

Rapport OPB 205

Modélisation de la circulation Océanique.

**Modélisation de la mer des Caraïbes avec le modèle ROMS
(Regional Ocean Modeling System)**

**Mise en évidence du courant Caraïbes et étude de l'impact de la
mer Caraïbes sur les paramètres physico-chimiques des masses
d'eau.**

**Navarro Jonathan - M1 OPB
21 Mai 2014**

jonathan.navarro @etu.univ-amu.fr
jonathan.navarro.etu.perso.luminy.univ-amu.fr

Résumé

L'étude de la mer des Caraïbes joue un rôle important dans la compréhension du fonctionnement de la circulation thermohaline dans l'océan. L'hypothèse de cette étude est qu'il existe un courant traversant la mer des Caraïbes présent tout au long de l'année et qui permettrait, entre autre, d'alimenter la circulation thermohaline directement *via* le Gulf Stream. Afin d'étudier ce phénomène le modèle ROMS a été utilisé dans une partie spécifique de la mer des Caraïbes qui s'étend de 89° Ouest à 75° Ouest de longitude et de 7° Nord à 23° Nord de latitude. L'étude démontre effectivement la mise en place d'un courant des Caraïbes permanent transportant l'eau de l'Est jusqu'au Nord Ouest du bassin contribuant à la formation du Gulf Stream. De plus, ce courant permettrait la mise en place d'une chaîne de tourbillon au sein du bassin. Ces structures hydrodynamiques agissent directement sur les élévations du niveau de l'eau. Le modèle permet de mettre en évidence une surélévation des eaux de surface dans la partie Nord du bassin et une sous-élévation des eaux de surface dans la partie Sud du bassin. L'étude met en évidence que la mer des Caraïbes est un véritable "moteur" de réchauffement, permettant de réchauffer les eaux qui y entrent avant de les relâcher dans la circulation thermohaline. Il serait donc intéressant de pouvoir estimer, dans une prochaine étude, l'impact de ces changements de température des masses d'eau sur la circulation océanique globale.

Mots clés : Mer Caraïbes, Gulf Stream, Circulation, Tourbillons, Paramètres physico-chimique.

Abstract

The study of the Caribbean Sea is really important because it gives us some informations about the functioning of the thermohaline circulation in the global Ocean. The hypothesis of this study is that a current is throwing the Caribbean sea during all the year. This current, named Caribbean current could also supply water to the global circulation *via* the Gulf Stream . We developed a numerical model of the Caribbean sea using ROMS. The study takes place from 89° West to 75° West and from 7° North to 23° North. The document shows that there is definitely a current throwing the Sea during all the year. This current is able to transport water from the East of the sea to the North West contributing to the formation of the Gulf Stream. Moreover, this current is associated to the creation of many eddies. The line of eddies created is definitely involved in the variation of the sea surface level. The model shows that the sea level increases in the North part of the Caribbean sea, whereas it decreases in the South part. The study shows that the Caribbean sea is a real engine which is able to warm the water masses before releases them. In this way, it could be interesting to try to study the impact of this modification of the temperature on the global thermohaline circulation.

Key words : Caribbean Sea, Gulf Stream, Circulation, Eddies, Physicochemical parameters.

Sommaire

Introduction.....	1
Matériel et Méthodes	1
Résultats et discussion	3
Conclusion	10

Introduction

Cette étude porte sur l'étude des courants du bassin Caraïbes. La mer des Caraïbes est une mer de l'océan Atlantique qui est comprise entre les Antilles à l'Est et au Nord, Le Venezuela et la Colombie au Sud et les Etats-Unis à l'Ouest. De superficie d'environ 2.6 millions de km², ce grand bassin joue un rôle important sur la circulation thermohaline de l'Océan global. En effet, le but de cette étude, est de prouver la mise en place du courant Caraïbes tout au long de l'année et d'étudier les variations de ses structures hydrodynamiques en fonction de la saison. Le document cherche aussi à prouver que ce courant permet de véhiculer des masses d'eaux directement depuis l'océan Atlantique et de les injecter dans le Gulf Stream, courant clé de la circulation thermohaline.

Notre étude porte sur une zone du bassin de 89° Ouest à 75° Ouest de longitude et de 7° Nord à 23° Nord de latitude.

Matériel et Méthodes

Afin de mettre en évidence le courant Caraïbes et de l'étudier, l'ensemble de l'étude sera menée à l'aide du modèle ROMS_TOOLS AGRIF développé par l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement) en collaboration avec INRIA (Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique) et l'UCLA. ROMS (Regional Oceanic Modeling System) est un modèle permettant de simuler l'évolution des courants d'une région de l'océan en fonction de forçages du vent, climatologiques et topographiques. Afin de pouvoir simuler l'évolution de ces courants, le modèle résout les équations de Navier-Stokes:

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

Afin de réaliser l'étude du bassin des Caraïbes, un pre-processing comprenant plusieurs étapes a été nécessaire.

Il a tout d'abord fallut créer une grille adaptée à la zone. La grille choisie est une grille de 97 mailles de longueur sur 116 mailles de largeur et sur 32 niveaux de grilles verticales soit un total de 360064 mailles et une résolution de 1/7. Les mailles sont des mailles orthogonales d'environ 14 km de coté. Cette distance de 14 km correspond au pas spatial horizontal du modèle.

Afin de configurer la grille en détail, il a fallut indiquer au modèle quelles mailles étaient considérées comme des mailles de mer et quelles mailles étaient considérées comme mailles de terre. Ce procédé permet entre autre de définir les mailles où les calculs seront effectués (mailles de mer). De plus, ce procédé permet d'éviter des erreurs de calculs dues à un mauvais lissage de la côte.

Les zones maritimes n'ayant pas d'intérêt pour l'étude (Zones se situant du côté Ouest et Sud du Mexique) sont considérées comme des zones de terre. Les petites îles (îles appartenant à Cuba, îles Caïmans *etc...*) ne comprenant que quelques mailles de grilles de terre ne sont pas prises en compte car elles pourraient perturber le bon déroulement du calcul. En revanche, la Jamaïque étant assez grande, le modèle considérera cette île en tant que mailles de terre. Au niveau des frontières, la seule fermeture induite est la frontière Sud. Les frontières Est, Nord et Ouest restent ouvertes.

Une fois la grille obtenue, il a fallut fixer des conditions initiales au modèle.

Ces multiples conditions permettent à la fois de lancer la simulation mais aussi de l'arrêter. Elles permettent aussi d'assurer le bon déroulement des résolutions des équations en apportant les valeurs des forçages. Ces forçages correspondent à la tension de surface due au vent, les flux de chaleur, le bilan de la salinité et les élévations de surface. Les valeurs de ces variables sont calculées à partir de données qui proviennent toutes du WOA2009 (World Ocean Atlas 2009). Ces données permettent, entre autre, non seulement d'obtenir des informations sur les mailles du bord de la grille (permettant au modèle d'être lancé et d'être arrêté) mais aussi d'avoir des informations sur toutes les mailles de grilles permettant au modèle de réaliser les calculs pour toutes les mailles à partir de données initiales.

Une fois la grille et les conditions de forçage introduites, il a été nécessaire de choisir un temps total de simulation ainsi qu'un pas de temps. Afin de déterminer un pas de temps optimal et adapté au modèle et à la grille, un calcul du critère CFL(Courant–Friedrichs–Lewy) a été réalisé. Le critère CFL correspond à un critère permettant de stabiliser un modèle lors de la résolution d'équations différentielles partielles de manière numérique. Le calcul du critère CFL se fait à l'aide de la formule :

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

Une fois le pre-processing réalisé, le modèle a été compilé puis exécuté durant 10 ans. Au premier jour du premier de simulation, le modèle utilise les conditions initiales de forçages induites lors du pre-processing. Le programme peut donc directement résoudre les équations primitives à l'aide des conditions climatologiques induites ce qui permet à la simulation de se dérouler sur plusieurs jours. A la fin du mois, la simulation passe au mois suivant et se sert des données calculées au mois précédent pour poursuivre la simulation. Le programme enregistre un résultat moyen tous les 3 jours de chaque mois (soit 10 sorties par mois). Ces sorties peuvent ensuite être interprétées directement à l'aide du logiciel Matlab.

Afin de pouvoir reproduire cette simulation, l'ensemble des données énoncées précédemment sont regroupées dans le tableau 1.

Tableau 1 : Tableau récapitulatif des paramètres utilisés pour la simulation.

Paramètres	Valeur
Latitude (°)	7°N - 23°N
Longitude (°)	89°W - 75°W
Résolution	1/7
Nombre de mailles horizontales selon l'axe Ox	97
Nombre de mailles horizontales selon l'axe Oy	116
Nombre de niveaux verticaux	32
Nombre total de mailles	360064
Frontières ouvertes	W - N - E
Nombre total de pas de temps pour les équations 3D (Variable NTIMES)	2160
Nombre de pas de temps 2D à chaque pas de temps 3D (Variable NDTFAST)	60
Pas de temps pour les équations 3D (Variable DT)	20
Temps total de simulation (Années)	10
Fréquence de sauvegarde des sorties instantanées (Jours)	30
Fréquence de sauvegarde des sorties moyennées (Jours)	3

Les scripts Matlab permettent à la fois d'obtenir des cartes des évolution des courants en surface mais aussi en profondeur. Ils permettent aussi d'obtenir des profils verticaux des courants sur toute la colonne d'eau et selon un transect choisi. Enfin, il permettent aussi d'obtenir des résultats sur certains paramètres tels que la température ou encore la salinité.

Afin d'étudier la stabilité du modèle, l'étude de différents paramètres (anomalies de volume, énergies cinétiques moyennes, vents moyens, valeurs de salinités et températures moyennes) est nécessaire. Des graphiques ont donc été tracés afin de connaitre la durée au bout de laquelle le modèle devenait stable.

Résultats et discussion

A l'aide de scripts Matlab, nous avons pu voir que les paramètres calculés au cours de la simulation pouvaient présenter des variations engendrées uniquement par le modèle. Ces variations montrent que le modèle est encore instable et qu'ainsi, les résultats obtenus peuvent contenir des erreurs et sont donc inexploitables.

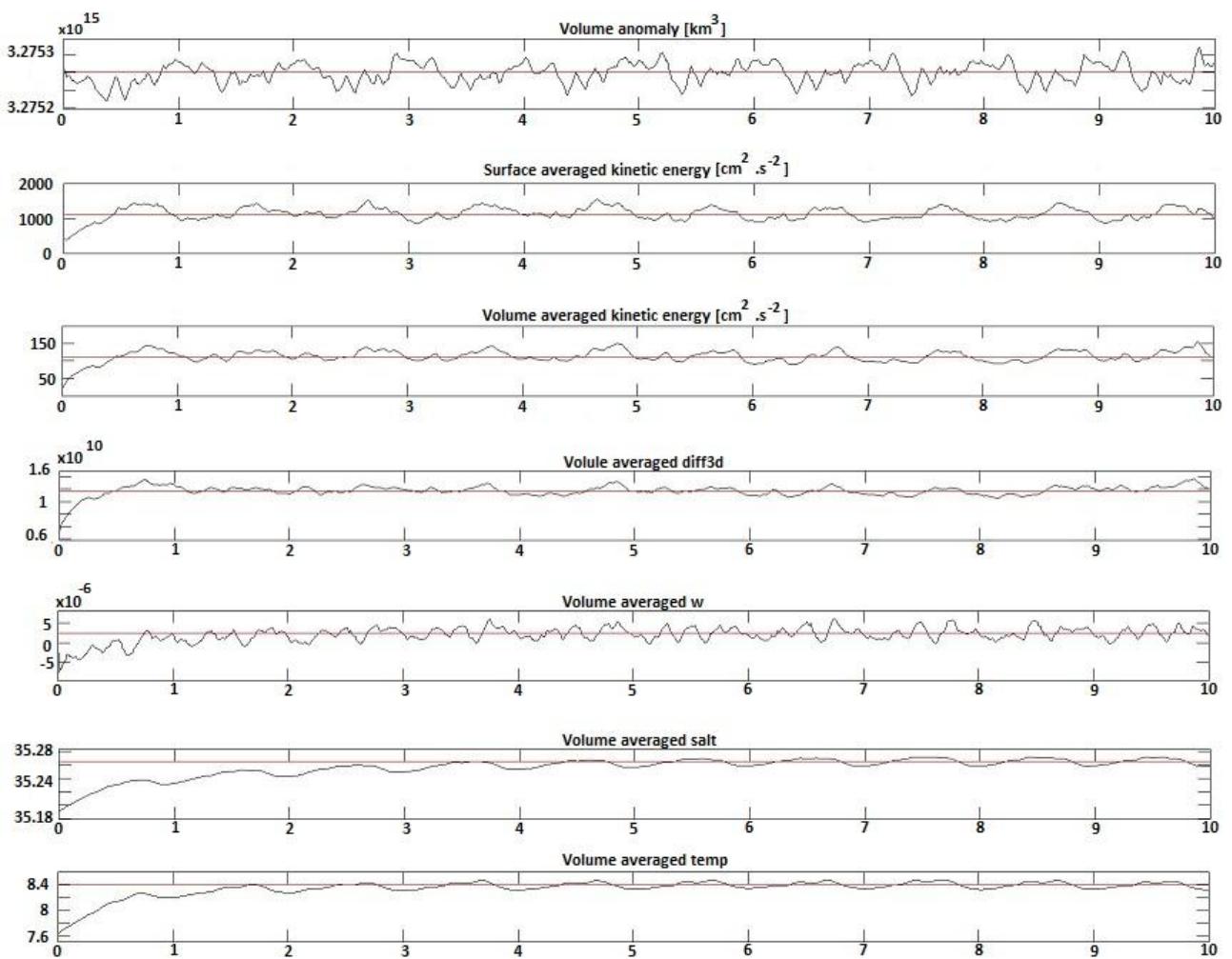


Figure 1 : Diagnostique du modèle.

La figure 1 montre que les valeurs d'énergie cinétique calculées avec le modèle se stabilisent relativement rapidement (au bout de 1 ou 2 ans). Toutefois, ce n'est pas le cas des températures et des salinités qui mettent beaucoup plus de temps à se stabiliser (environ 4 ans). Par conséquent, la suite de l'étude ne se basera que sur des données prises au delà de 4 ans. Ainsi, les résultats ne seront pas impactés par une quelconque anomalie due au modèle uniquement.

Compte tenu des observations faites ci dessus, l'ensemble des résultats présentés par la suite concerne la dixième année de simulation.

Le but de l'étude étant de montrer que le courant Caraïbes alimente bien le Gulf Stream, nous avons cherché à mettre en évidence le fait que ce courant était présent tout au long de l'année et n'était pas qu'un courant saisonnier. Toutefois, selon Gordon (1967), le courant Caraïbes présenteraient de véritables variations en fonction de la saison notamment entre l'automne et le printemps bien que sa tendance générale reste la même. Le courant entrerait donc dans la mer Caraïbes par l'Est au niveau des Antilles et ressortirait dans le Golfe du Mexique. Les variabilités saisonnières sont donc observables entre ces deux zones.

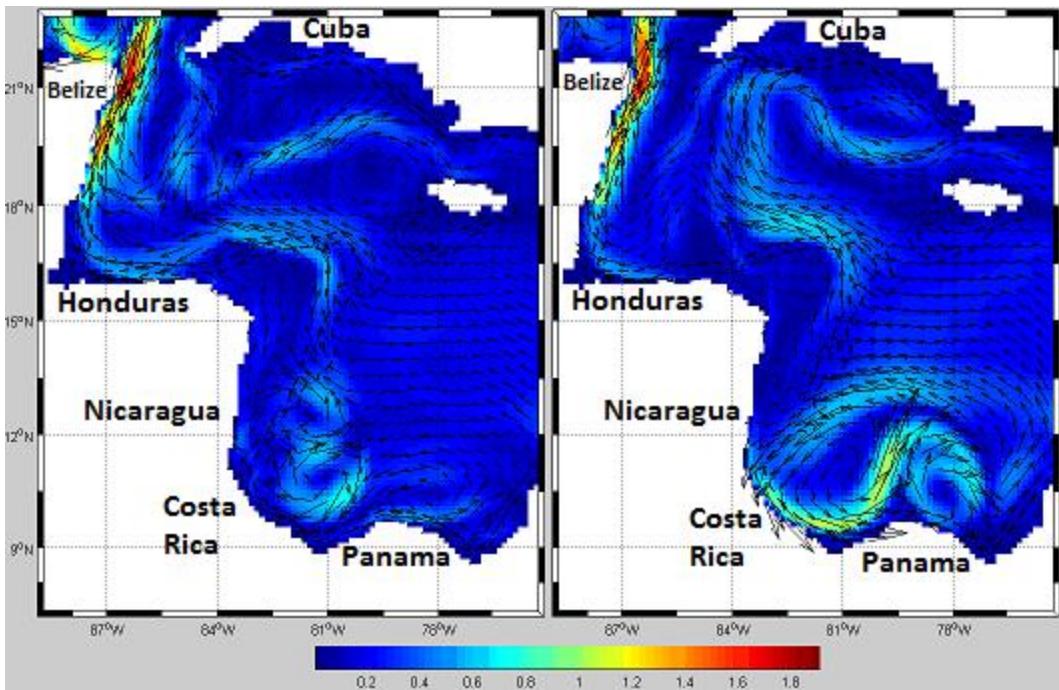


Figure 2 : Représentation des courants pour le mois d'Avril (gauche) et le mois d'Octobre (droite) -Etude de la vitesse des courants (m.s^{-1}).

La figure 2 représente les courants du bassin Caraïbes pour les mois d'avril (Partie gauche de la figure) et le mois d'octobre (Partie droite de la figure). Sur cette figure il est possible de constater de légères différences au niveau de la circulation au sein du bassin. Rappelons que la figure 2 est une sortie instantanée et non moyennée représentative de la situation aux mois d'Avril et d'Octobre

En effet, pour le mois d'avril, il est possible d'observer que le courant se scinde en deux parties. Une partie du courant entrant se dirige vers la partie Sud du bassin. Ce courant va longer les côtes de Costa Rica, Nicaragua, Honduras, Belize et du Mexique avant d'arriver dans le Golfe du Mexique. L'autre partie du courant va, au contraire, avoir tendance à être dirigé vers la partie Nord du bassin et longer les côtes de Cuba. Une grande partie du courant va alors circuler dans une direction opposée à ce qui est attendu et se mettre à recirculer dans la direction de l'Est, formant ainsi un tourbillon. Une faible fraction de ce courant va tout de même se diriger vers l'Ouest avant de rejoindre l'autre courant dans le Golfe du Mexique.

Pour le mois d'Octobre, le courant va effectivement se scinder en deux branches avec encore une fois, une partie du courant qui longe la partie Sud du bassin à partir de Honduras, avec cependant cette fois-ci, la création d'un tourbillon anti-horaire au niveau de la côte Est du Honduras. L'autre branche du courant qui se dirige vers le Nord ne suivra pas exactement le même trajet qu'au mois d'Avril. En effet, cette branche va effectivement remonter vers les côtes de Cuba mais cette fois ci la majeur partie du courant va se diriger vers l'Est avant d'être entraînée par le tourbillon antihoraire qui force le courant à retourner vers le golfe du Mexique. Une faible fraction du courant continuera tout de même de se diriger vers l'Est.

Enfin, la dernière caractéristique observable est la présence d'une boucle de courant au niveau du Costa Rica et du Panama. Cette boucle de courant de sens antihoraire présente aussi des variations saisonnières mais reste en place tout au long de l'année.

Globalement la figure 2 et toutes les autres tirées à l'aide du modèle mais non présentées ici, montre qu'il y a bel et bien existence d'un courant traversant la mer Caraïbes d'Est en Nord-Ouest et que ce courant est présent tout au long de l'année malgré quelques fluctuations. Il est donc tout à fait légitime de penser que ce courant Caraïbes joue un rôle majeur dans l'apport d'eau au niveau du Gulf Stream. De plus, l'ensemble des figures de toutes les années des simulations réalisées avec ROMS montrent effectivement cette tendance de formation d'un courant traversant la mer accompagnée de variations saisonnières et de formations tourbillonnaires.

L'étude des courants montrent que le courant entrant dans la mer des Caraïbes est à l'origine de la formation de plusieurs tourbillons. Il a aussi été possible d'observer directement sur ces figures que la taille, le nombre et surtout le sens de ces tourbillons dépendaient des courants qui dépendent eux même directement de la saison. Afin de mieux comprendre, leurs répartitions et leurs fonctionnements, l'étude de ces tourbillons est menée sur la figure 3.

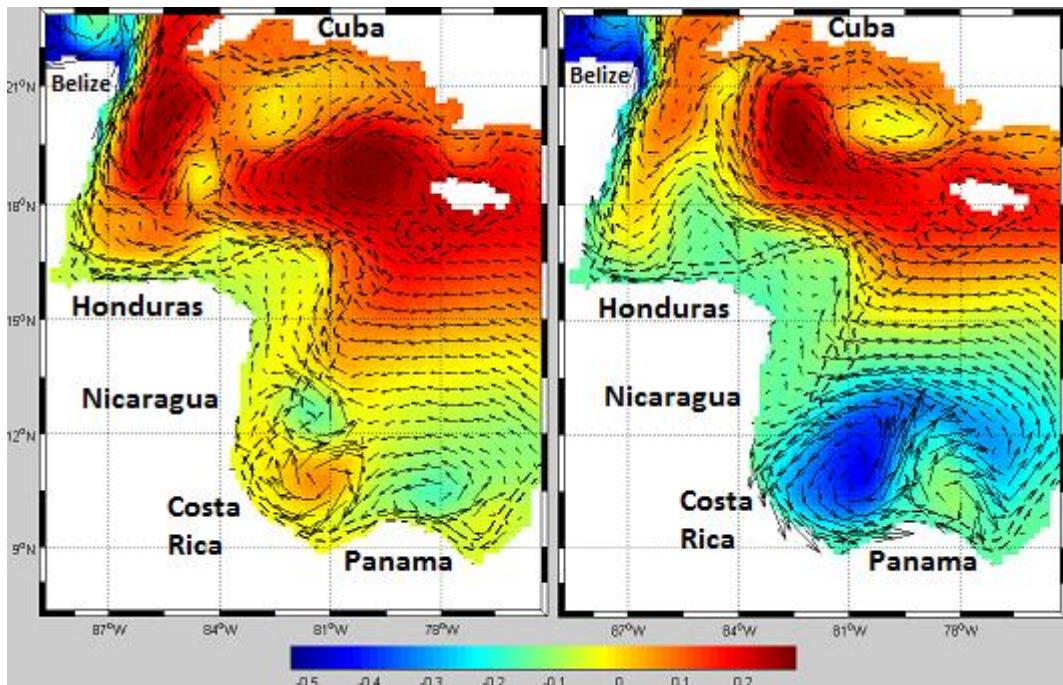


Figure 3 : Représentation des courants pour le mois d'Avril (gauche) et le mois d'Octobre (droite) - Etude des élévations du niveau de l'eau (m).

La figure 3 est une sortie instantanée du modèle aux mois d'Avril et d'Octobre. La figure 3 montre les principales structures tourbillonnaires ainsi que les élévations ζ de l'eau. Il est possible d'observer que les tourbillons prennent place dans deux zones bien spécifiques du bassin : Au niveau des côtes de la Colombie, du Costa Rica et du Panama et au niveau de la partie Nord du bassin, entre l'Honduras et Cuba. Ces phénomènes tourbillonnaires vont avoir pour effet de créer des sous éléveations de tailles variables en fonction de l'année. En effet, en hiver et en automne, la zone est parsemée de plusieurs petits tourbillons cyclonique causés par de petites sous-éléveations de l'ordre de -10 cm alors qu'en printemps et qu'en été cette zone accueille généralement un large tourbillon cyclonique causant une forte sous-élévation de -30 cm à -40 cm.

Au nord du bassin, ce sont plutôt les tourbillons anticycloniques qui gouvernent causant une sur élévation du niveau de l'eau. De même il est possible d'observer que les surélévations sont plus faibles en hiver et en automne (+10 cm à +20 cm) qu'en été (+30 cm jusqu'à +40 cm).

De manière générale, l'étude des tourbillons révèle que la saisonnalité bouleverse principalement les variations du niveau de l'eau. En effet, en été, les écarts par rapport au niveau de référence semblent être plus importants qu'en hiver. Toutefois, les variations saisonnières n'influent que très peu sur la position de ces tourbillons ainsi que sur leur sens.

Nous savons que la saison influe sur d'autres paramètres qui sont les paramètres physico-chimiques. Or, ces paramètres ne peuvent pas être dissociés de l'étude des courants. En effet, la circulation des masses d'eaux est principalement causée par des jeux de densités des masses d'eau entre elles et ces densités sont influencées par les facteurs physico-chimiques que sont principalement la température et la salinité. Ainsi, afin de connaître les caractéristiques principales des masses d'eaux qui étaient directement injectées dans le Gulf Stream, une étude des paramètres "Température" et "Salinité" a été réalisée

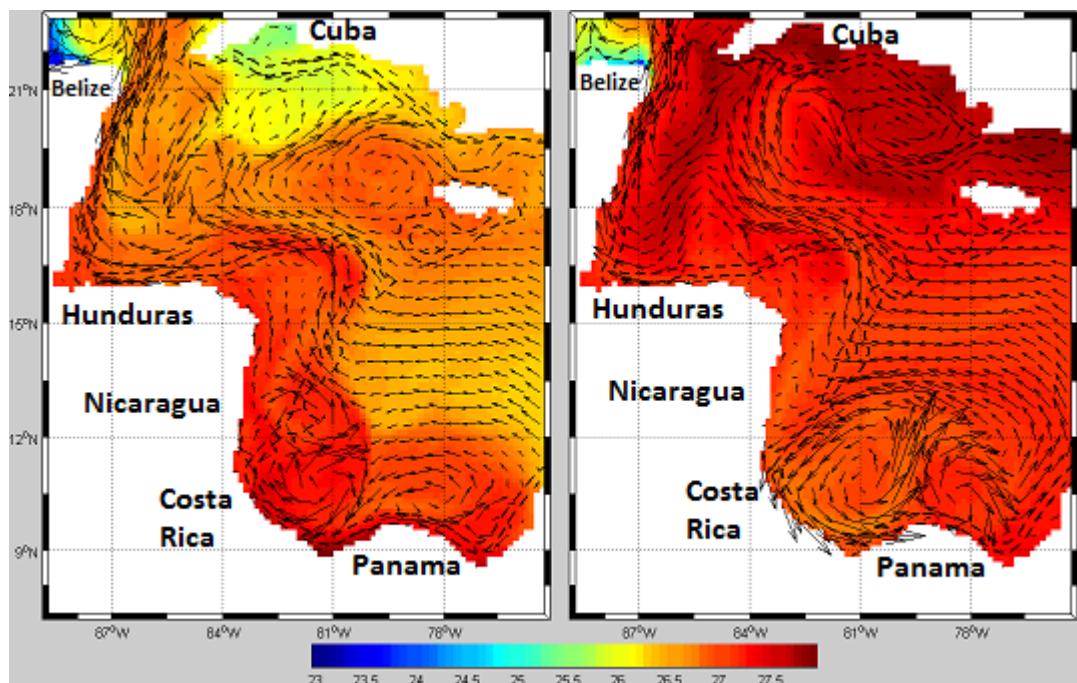


Figure 4 : Représentation des courants pour le mois d'Avril (gauche) et le mois d'Octobre (droite) - Etude des variations de température ($^{\circ}\text{C}$) en surface.

La figure 4 représente les températures de surface instantanées obtenues avec le modèle pour le mois d'Avril et le mois d'Octobre.

La première observation qui peut être tirée de ce document est que globalement les eaux sont plus froides en surface au moins d'Avril qu'au mois d'Octobre. Les eaux de surface commencent à se réchauffer au mois d'Avril, atteignant en surface des valeurs maximales d'environ 26.5°C à 27.5°C .

Les eaux les plus chaudes se retrouvent formées par les tourbillons observés au niveau du Panama et du Costa Rica. Par la suite, les eaux vont avoir tendance à se réchauffer continuellement jusqu'au mois d'Aout où elles atteignent leurs maximum de 30°C notamment au niveau de la côte de Cuba. Les valeurs restent néanmoins élevées et d'environ 28° à 29° au niveau de la côte du Panama et du Costa Rica. Les eaux vont ensuite se refroidir peu à peu jusqu'en Février où les valeurs atteignent un minimum de 26°C .

Par conséquent ces observations permettent de déduire que si les eaux apparaissent plus chaude en Octobre qu'en Avril c'est parce que la température globale en surface n'a pas eu suffisamment de temps pour diminuer.

La seconde observation qu'il est possible de tirer des ces deux graphiques est aussi intéressante. En effet, il a été possible de mettre en évidence que le grand tourbillon de la côte du Panama et du Costa Rica présentait des masses d'eaux chaudes, et ce, qu'elle que soit la saison. Or, la figure 4 permet aussi de mettre en évidence que le courant traversant le bassin des caraïbes passe obligatoirement par cette boucle avant de se scinder en deux dans la partie Nord-Ouest du bassin. Il est donc possible d'imaginer que les eaux venant de l'océan Atlantique se retrouvent piégées dans ce tourbillon où elles vont être réchauffées avant d'être réinjectées dans la circulation du bassin.

Ainsi, au fil du temps, ces eaux chaudes se retrouvent exportées dans la partie Nord-Ouest du bassin avant d'être rejetées dans le courant Jet Gulf Stream.

Il est donc possible de tirer deux conclusions : la première est que le tourbillon du Costa Rica constitue un véritable "moteur" de réchauffement des eaux et la seconde est que le courant Caraïbes contribue fortement à l'apport de masses d'eaux chaudes au Gulf Stream. Qu'en est-il de la Salinité ?

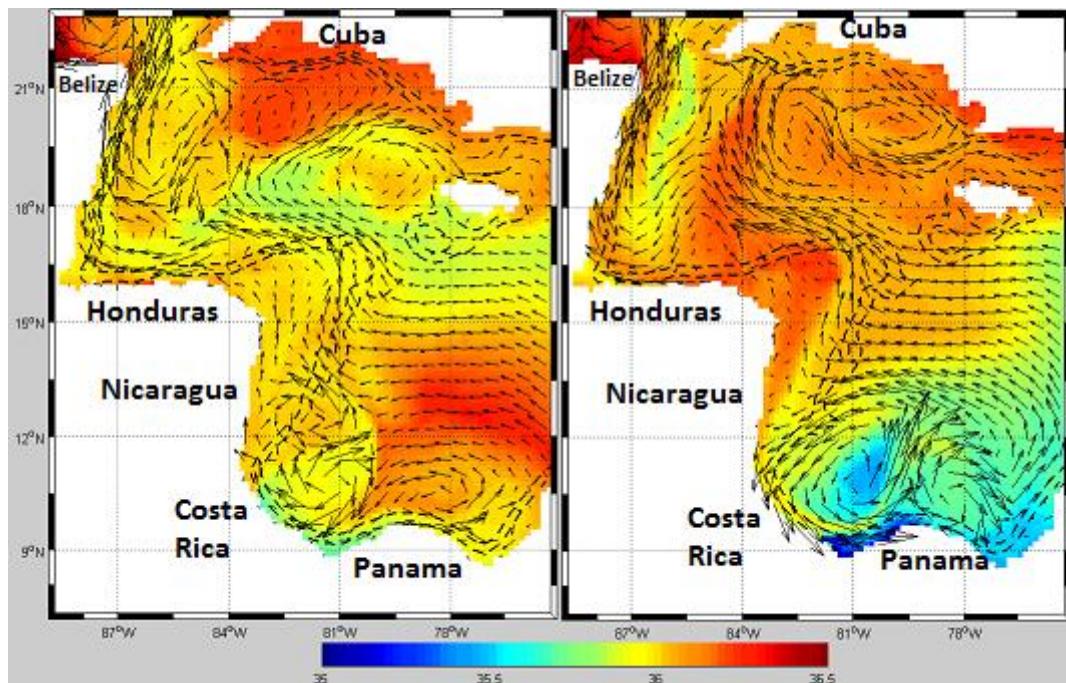


Figure 5 : Représentation des courants pour le mois d'Avril (gauche) et le mois d'Octobre (droite) - Etude des variations de salinité (PSU) en surface - Variable Salt.

La figure 5 montre les variations de salinité de surface instantanées obtenues avec le modèle pour les mois d'Avril et d'Octobre.

Sur cette figure il est possible de mettre en évidence la faible variation des salinités dans le bassin de manière globale. En effet, le bassin semble être majoritairement dominé par des eaux de salinité de l'ordre de 36 à 36.2.

Les variations importantes de salinité se retrouvent principalement dans des zones bien spécifiques. Il est possible d'observer de faibles valeurs de salinité dans la partie Sud du bassin principalement avec des valeurs de salinité d'environ 35 en Octobre et 35.5 en Avril. L'hypothèse pouvant expliquer ce phénomène est qu'il est possible que les eaux provenant directement de l'Est soit légèrement plus douces. En effet, ces eaux ont auparavant longées la côte des payes d'Amérique du Sud où se déversent les eaux douces de l'Amazone et l'Orénoque en grande quantité ($205\ 000\ m^3.s^{-1}$ et $36\ 000\ m^3.s^{-1}$ respectivement). Toutefois la simulation n'ayant pas été réalisée dans cette zone, il est impossible de conclure concrètement sur cet aspect.

Nous nous sommes ensuite intéressés à l'évolution de cette salinité avec la profondeur et les diagrammes qui ont pu être tirés à l'aide du modèle montre que le bassin semble être fortement stratifié. En effet, les graphiques révèlent des baisses de salinité d'environ 2 unité entre la surface et 1000 m de profondeur.

Par conséquent, il est possible d'avancer que les eaux provenant de ce bassin et qui alimentent le Gulf Stream sont des eaux qui sont en moyenne salées en surface et peu salées au delà de 1000 m de fond.

Afin d'appuyer les résultats énoncés ci-dessus, il a été nécessaire de comparer ces résultats avec ceux obtenus à l'aide d'autres modèles dans d'autres documents.

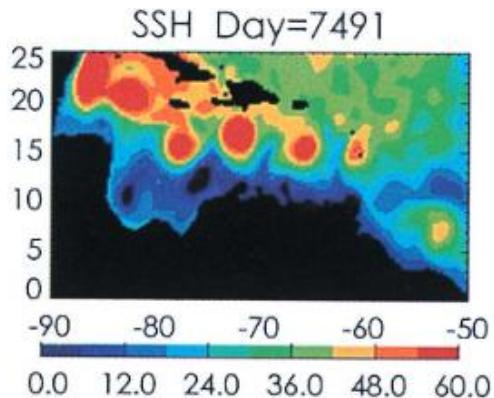


Figure 6 : Représentation des élévation du niveau de l'eau dans la mer des Caraïbes selon le modèle de Carton et Chao (1999).

La figure 6 correspond à une sortie du modèle de Carton et Chao (1999) qui démontrent les variations de l'élévation de surface dans le bassin Caraïbes. Cette figure met une fois de plus en avant les fortes variations du niveau de l'eau entre la partie Nord et la partie Sud du bassin. En effet, il est possible d'observer que la partie sud du bassin correspond à une zone de baisse du niveau de l'eau alors que la partie Nord du bassin correspond à une hausse du niveau de l'eau.

Toutefois, selon Carton et Chao(1999), cette succession de tourbillons serait due directement à une rétroflexion du courant Nord-Brésilien mais la zone étudiée avec notre modèle ne s'étend pas jusqu'à cette zone. Il est par conséquent impossible de confirmer concrètement cette observation bien que les résultats semblent similaires.

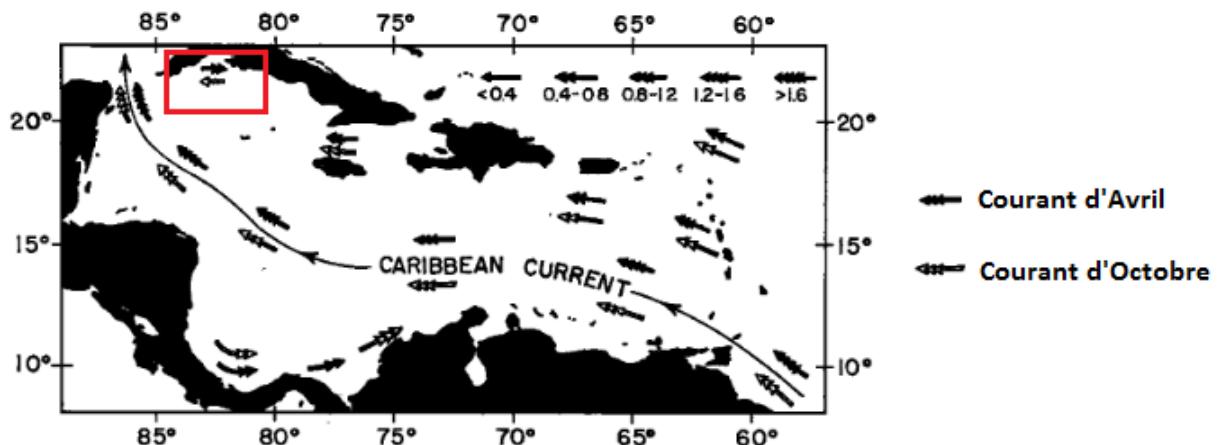


Figure 7 : Représentation du courant Caraïbes et des variations des courants annexes. Modifiée selon L. Gordon *et al.* (1967)

La figure 7 tirée de la publication de Gordon (1967), est une carte simplifiée qui présente la circulation du courant Caraïbes en général en fonction de la saison (Printemps et Automne). L'auteur met bien en évidence un courant similaire à celui qui a été obtenu avec notre modèle. De plus, il est possible de voir le courant de retour dans la partie supérieur du bassin en Avril, correspondant au courant de retour qui a aussi été obtenu avec notre modèle. Par conséquent l'ensemble des résultats obtenus ici semblent concorder avec les résultats obtenus dans la publication de Gordon (1967).

Conclusion

Cette étude met en évidence la présence du courant Caraïbes au sein de la mer des Caraïbes tout au long de l'année mais apporte aussi des précisions au niveau du rôle qu'il joue sur la circulation thermohaline globale. En effet, ce courant traverse l'ensemble de la mer générant des structures tourbillonnaires qui impactent directement les élévations du niveau de l'eau, mais surtout, les paramètres physico-chimique de ces eaux. Les grands tourbillons présent dans la partie Sud du bassin Caraïbes permettent directement d'augmenter la température des eaux de surface qui se retrouvent exporter dans l'ensemble de la mer des Caraïbes *via* le courant et qui se retrouvent donc directement injectées dans le Gulf Stream par la même voie. Ainsi la mer Caraïbes alimente directement le Gulf Stream en eaux chaudes. De plus, la salinité de ce bassin étant élevée, nous pouvons certifier que l'eau apportée au Gulf Stream est aussi fortement salée. De plus, l'apport de ces masses d'eaux se fait continuellement tout au long de l'année.

Or, nous savons que l'ensemble de la circulation thermohaline est gouverné par les variations de densités des masses d'eau de mer qui sont elles-mêmes contrôlées par les variations de température et de salinité. Nous pouvons donc affirmer que le courant Caraïbes impactent de manière importante la circulation thermohaline globale de part son existence tout au long de l'année mais aussi de par les masses d'eaux chaudes et salées qu'il injecte directement dans la circulation. Afin de mieux connaître l'impact réel de cette sortie d'eau massive de la mer des Caraïbes, une simulation centrée sur l'étude des sorties d'eaux depuis le bassin Caraïbes devrait être réalisée.

Annexes - Références

Carton A., Chao Y., Caribbean Sea eddies inferred from TOPEX/POSEIDON altimetry and a 1/6° Atlantic Ocean model simulation, Journal of geophysical research, Vol. 104, No.C4, Pages 7743–7752, 15 Avril 1999.

Gordon A. L., Circulation of the Caribbean Sea, Journal of geophysical research, Vol. 72, No.24, Pages 6207–6223, 15 Décembre 1967.

Annexes - Liens utiles

Debreu L. *et al.*, Two-way nesting in split-explicit ocean models: algorithms, implementation and validation. Ocean Modelling, 49-50, 1-21, 2011

Penven P. *et al.*, Evaluation and application of the ROMS 1-way embedding procedure to the central California upwelling system. Ocean Modelling, 12, 157-187, 2006

Penven P. *et al.*, Software tools for pre- and post-processing of oceanic regional simulations. Environ. Model. Softw., 23, 660-662, 2007

ROMSTOOLS Documentation, 23 Octobre 2012, [14 Mai 2014] disponible sur :
<http://www.romsagrif.org/index.php/documentation/ROMSTOOLS-Documentation>.

ROMS_AGRIF user Guide, 4 Novembre 2012, [14 Mai 2014] disponible sur :
http://www.romsagrif.org/index.php/documentation/ROMS_AGRIF-User-Guide.

Notes du Cours et Travaux Dirigés de Modélisation de la Circulation Océanique, 30 Avril 2014, [14 Mai 2014], disponible sur : http://www.com.univ-mrs.fr/~doglioli/Doglioli_NotesCoursTD_ModelisationCirculationOceanique.pdf