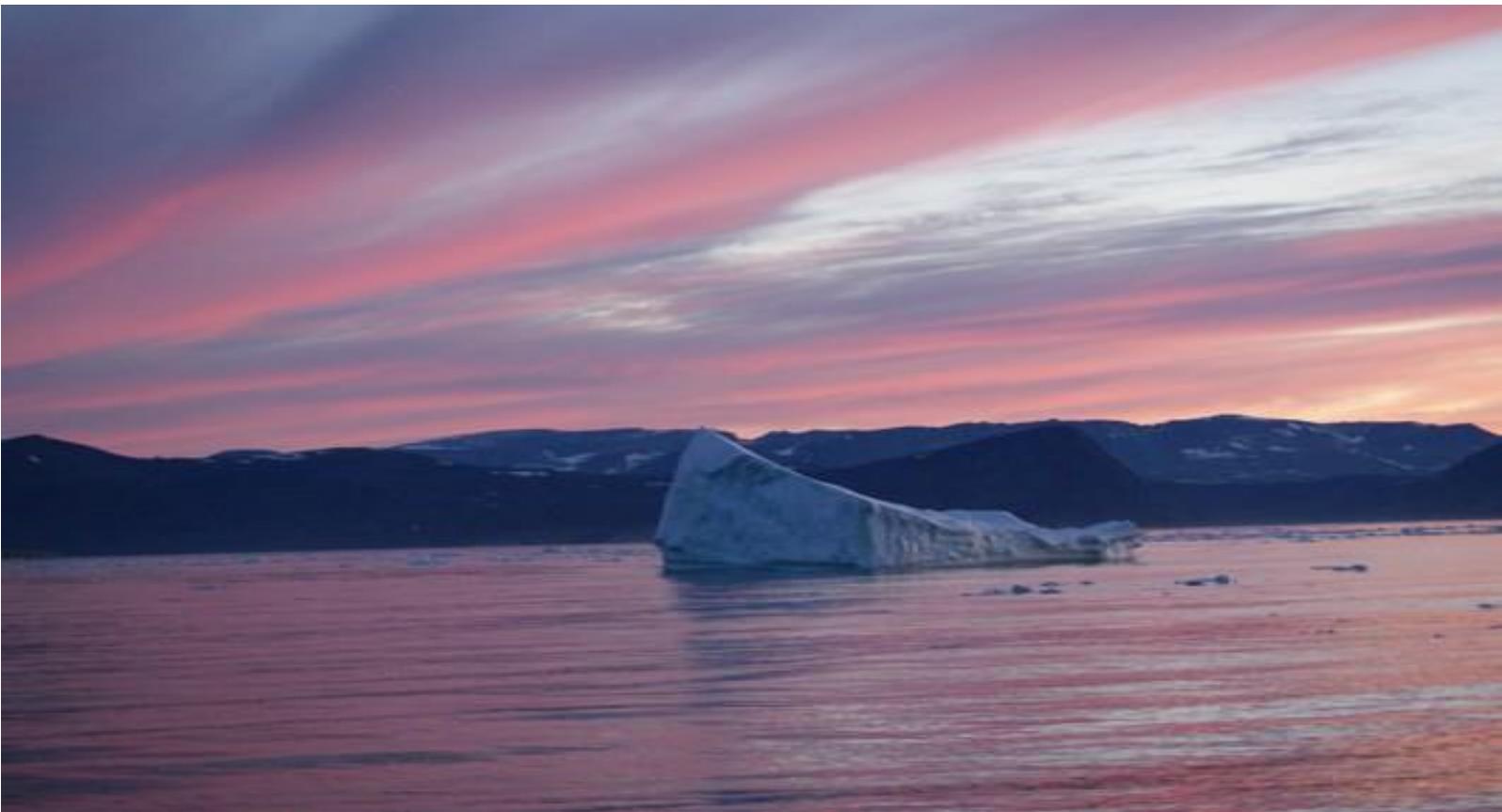




Institut PYTHEAS
Observatoire des Sciences de l'Univers
Aix-Marseille Université

Rapport OPB 205 : Modélisation de la circulation océanique

Modélisation de la mer du Labrador avec le logiciel ROMS



Grassi Kelly

Master 1 : Océanographie physique et biogéochimique – Semestre 2

Année 2015 – 2016

Dernière révision le 13/05/2016

Sommaire :

1. Introduction	1
2. Matériel et Méthode	2
2.1 Présentation des équations résolues par ROMS :	2
2.1.1 Equation en eau peu profonde	2
2.1.2 Équations de conservation de la chaleur et du sel	2
2.1.3 Equation d'état de l'eau de mer	3
2.2 Modèle ROMS	/3
2.2.2 Grille Utilisée :	3
2.2.3 Critère CFL (Courant Friedrichs-Levy) :	3
2.2.4 Domaine de calcul choisi :	4
3. Résultats et discussions	5
3.1 Diagnostique, stabilité du modèle	5
3.2 Comparaison des profils verticaux	5
3.3 Comparaison de la salinité dans la couche de formations de LSW (1000m)	7
3.4 Diagramme TS	8
4. Conclusion	9
5. Bibliographie	9

Résumé :

Ce document présente une étude comparative entre les données in-situ publiées par Yashayaev et Igor en 2007 et les simulations réalisées dans le cadre de l'unité OPB 205 : Modélisation de la circulation océanique du master d'océanographie de Luminy. Ces simulations sont produites à l'aide du logiciel ROMS (Regional Ocean Modeling System), spécialement conçu pour des simulations plus précises des systèmes océaniques régionaux. Pour ce projet, des simulations étalées sur 10 ans ont été effectuées afin d'étudier les différentes masses d'eau de la mer du Labrador. Ainsi, ces recherches ont pu démontrer que des simulations sur 10 ans ne permettaient pas au modèle de se stabiliser. Ce manque de stabilité entraînant des différences importantes sur les propriétés physicochimiques des masses d'eau. Par conséquent, la LSW (Labrador Sea Water) masse d'eau caractéristique de cette mer n'est pas bien représentée dans les simulations de ROMS.

Abstract :

This paper presents a comparative study of in-situ data published by Yashayaev and Igor in 2007 and simulations conducted as part of the unit OPB 205: Modeling of ocean circulation Oceanography master Luminy. These simulations are produced using the software ROMS (Regional Ocean Modeling System), which was specially designed for accurate simulations of regional oceans systems. For this project, simulations over 10 years to study the different water masses in the Labrador Sea were conducted. Thus, this research has demonstrated that simulations over 10 years did not allow to stabilize the model. This lack of stability leading to significant differences on the physicochemical properties of water bodies. Therefore, the LSW (Labrador Sea Water) water mass characteristic that this sea is not well represented in the simulation ROMS.

1. Introduction



Figure 1 : Carte de la mer du labrador

Zone d'étude :

La mer du Labrador (figure 1) se situe au Nord de l'océan Atlantique (Latitude : 56°00'N Longitude 50°00'W). Elle est entourée de côtes continentales au sud-ouest, nord-ouest et nord-est tels que le Labrador (au Canada) et le Groenland. Elle est reliée au nord à la Baie de Baffin au travers du Déroit de Davis. Le Bassin peut atteindre des profondeurs d'environ 3000 m et, c'est aussi, le bassin avec les eaux les plus froides et les plus fraîches du subpolaire de l'Atlantique Nord. Dans la colonne d'eau les deux masses d'eaux principales sont : l'eau de mer du Labrador (LSW) qui se trouve à une profondeur moyenne de 1000 m et les eaux profondes de l'Atlantique Nord (NADW) qui se déplacent sur le fond du bassin vers 3000m.

La mer du Labrador joue un rôle conséquent dans le système climatique et océanique planétaire. Il est donc fondamental- de bien connaitre la circulation de cette zone. En effet, c'est une des rares parties d'océan du monde où un important refroidissement atmosphérique occasionne une « convection profonde » en hiver. Cette convection aboutit à la formation du LSW qui s'enfonce dans les profondeurs intermédiaires et vient, en association avec la NADW et les eaux salées du Golf Stream, contribuer à la plongée des eaux de la circulation thermo haline mondiale(A. J. Weaver et al. 1999) (appelée aussi Atlantic Meridional Overturning Circulation ou AMOC).

Travaux effectués :

Après la prise en main du logiciel de modélisation de ROMS. Le logiciel ROMS a été utilisé, afin d'étudier la dynamique des différentes masses d'eau de la mer du Labrador. L'étude présentée ici, est effectuée dans le cadre du cours de modélisation de la circulation océanique du Master d'Océanographies de Luminy à Marseille, et réalise une comparaison des résultats de l'étude sur les changements hydrodynamiques de la mer du Labrador de Yashayaev et Igor en 2007 avec le résultat simulé par ROMS

2. Matériel et Méthode

2.1 Présentation des équations résolues par ROMS :

2.1.1 Equation en eau peu profonde

Les équations dites en eaux peu profondes sont les équations du mouvement de Navier-Stock modifié suite à l'application de diverses hypothèses telles que l'approximation de bousinesq et l'équation hydrostatique. Comme nous sommes en milieu peu profond, les termes U, V (composantes horizontales) sont pris très largement supérieurs à W (variable verticale). C'est la raison pour laquelle les termes verticaux ne sont pas pris en compte dans les équations [1] et [2]. De plus, les fluides sont considérés incompressibles simplifiant, ainsi, l'équation de continuité [3].

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = fV - g \frac{\partial \eta}{\partial x} + A_x \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + A_y \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\tau_{sx}}{\rho H} - \frac{\tau_{fx}}{\rho H} \quad [1]$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -fU - g \frac{\partial \eta}{\partial y} + A_x \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + A_y \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\tau_{sy}}{\rho H} - \frac{\tau_{fy}}{\rho H} \quad [2]$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(HU)}{\partial x} + \frac{\partial(HV)}{\partial y} = 0 \quad [3]$$

U et V = les composantes selon les deux directions horizontales de la vitesse moyennée sur la profondeur
 $f = f_0 + \beta y$: approximation du plan β avec $f = 2\omega \sin(\phi)$ = Coriolis, ω = la vitesse angulaire de rotation terrestre, ϕ = la latitude, et $\beta = \frac{\partial f}{\partial y}$

η = l'élévation du plan d'eau par rapport au niveau d'origine au repos

$A_x = A_y = 10^{-1} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ = coefficient de viscosité turbulente qui viens de la théorie de la «fermeture Newtonienne»
 $H = h + \eta$ = Hauteur totale de la colonne d'eau

$\rho = \rho_0$ = la densité de l'eau considérée constante d'après l'approximation de Boussinesq

g = l'accélération de la pesanteur

τ représente les conditions au bord remplace les terme de viscosité turbulente car on applique ici le modèle hydrostatique. Ainsi :

τ_{sx} = tension de surface du au vent dans la direction x

τ_{sy} = tension de surface du au vent dans la direction y

τ_{fx} = tension de fond dans la direction x

τ_{fy} = tension de fond dans la direction y

2.1.2 Équations de conservation de la chaleur et du sel

Ces équations permettent de quantifier les échanges de chaleur [4] et de sel [5]. Elles relient la variation de cette quantité dans le temps à sa variation dans l'espace. L'équation est approximée avec une fermeture de la turbulence à la bousinesq. Les termes de flux turbulents de chaleur et de sel sont remplacés par les coefficients des termes de diffusivité (1^{er} et 2^{ème} membres de droite). Pour la température [4] un terme de pénétration de la chaleur du au rayonnement lumineux est ajouté (dernier terme membre de droite).

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \cdot \nabla T = K_h \nabla_h^2 T + K_v \frac{\partial S}{\partial z^2} + \frac{H_c}{\rho_0 C_p} \frac{\partial I}{\partial z^2} \quad [4]$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \cdot \nabla S = K_h \nabla_h^2 S + K_v \frac{\partial S}{\partial z^2} \quad [5]$$

K_h = coefficient de diffusivité horizontal , K_v = coefficient de diffusivité verticale

H_c = flux solaire incident

C_p = coefficient de chaleur massique: $C_p = 3950 \text{ J/kg.K}$

$I(z)$ est la fraction de ce flux qui parvient au niveau z : $I(z) = \exp(-\lambda z)$ avec $\lambda = 0.05 \text{ m}^{-1}$, le coefficient d'atténuation, choisi à partir des tables de Jerlov (1976) en eau claire.

2.1.3 Equation d'état de l'eau de mer

Aujourd'hui ROMS utilise l'équation Thermodynamique de l'eau de mer 2010 (TEOS-1) comme définition officielle des propriétés de l'eau de mer et de l'océan. Elle est par exemple utilisée pour caractériser les changements de masse volumique. (Intergovernmental Oceanographic Commission, 2010)

2.2 Modèle ROMS

2.2.1 Fichiers/script de configuration : (Pierrick Penven et al., 2010)

Le fichier *ccpfs.h* permet de choisir les paramètres à définir ou non. Les différents paramètres de la configuration régionale peuvent, ainsi, être pris en compte ou non. Comme par exemple, les conditions aux limites (Bord ouvert ou fermé de la zone d'étude), qu'il faut faire concorder avec le vecteur OBC = [bord_Sud bord_Nord bord_Ouest bord_Est] du script matlab *romstools_param.m* (1 = ouvert, 0 = fermé).

Le fichier *Roms.in* contient les paramètres temporels indiquant les différents temps de calcul des itérations tels que NTIME, dt, NDTFAST (tableau 1) et les temps de sauvegarde, tels que NWRT, NAVG, NRST (tableau 1) respectif aux fichiers de sortie : history, average, restart.

Le fichier *param.h* fixe les paramètres de configuration de la simulation comme les paramètres de grille horizontale LLM0 et Mm0 (tableau 1), qui sont donnés dans le script matlab *Make_grid.m*. Ou encore le paramètre de la grille verticale N (tableau 1), qui doit être le même dans le script matlab *Roms_tools_param.m*

Enfin le script matlab *romstools_param.m* contient les paramètres nécessaires à la génération de l'entrée des fichiers NetCDT de ROMS. Il contient les paramètres généraux de la configuration, les paramètres de la grille (Dimension, Résolution ect.)

2.2.2 Grille Utilisée :

Le modèle ROMS utilise la grille d'Arakawa-C pour la discrétisation des termes de nos équations. C'est la grille horizontale la plus appliquée dans les modèles de circulation générale des océans. Elle consiste à calculer les vitesses au niveau des faces de la maille et les autres variables au centre de la maille (figure 2).

Pour la grille verticale ROMS utilise une grille qui suit la topographie (topography following). Les grilles de ce type on d'abord été introduites dans la modélisation atmosphérique et depuis sont devenues une alternative standard dans la modélisation de l'océan (figure 3).

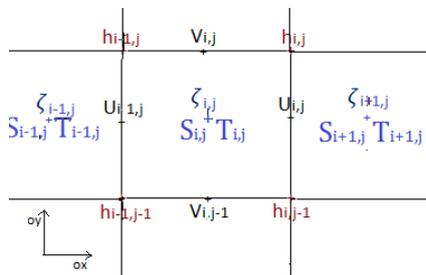


Figure 2 : Grille d'Arakawa_C

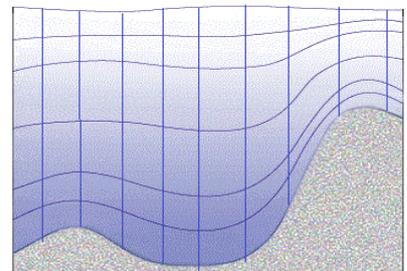


Figure 3: Exemple de grille avec suivie topographique (Grille sigma)

2.2.3 Critère CFL (Courant Friedrichs-Levy) :

Un autre terme est très important pour la résolution du modèle : Le critère CFL. En effet, la résolution spatiale et temporelle sont liées par ce critère de façon à ce que les processus type onde et courant ne se propagent pas de plus d'une maille à chaque pas de temps

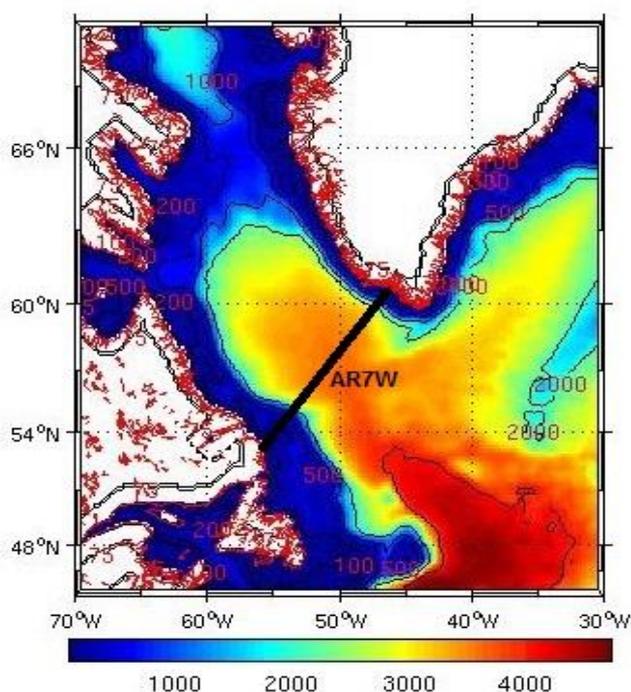
Dans ROMS le critère CFL va permettre de définir la taille de maille minimum en x et y pour que la résolution et les calculs restent corrects. Il va aussi permettre de définir le pas de temps minimum pour que le modèle reste stable. Pour connaître les valeurs spatiales et temporelles les mieux adaptées à la zone d'étude, il faut utiliser le Programme *ad_cfl.m*. Ce script permet de vérifier que les variables *dt*, *NDTFAST* et *NTIME* (tableau 1) soient sur la base du critère CFL. Pour ce faire : Apres exécution du script, il faut récupérer la valeur de DTE et la modifier pour qu'elle soit égale à un multiple de 12 le plus proche de sa valeur initiale. Ensuite, *ad_cfl.m* est relancé. Enfin, Les valeurs de *dt*, *NDTFAST* et *NTIME* indiquées doivent être retranscrites dans les fichiers *roms.in*, *roms_tools_param.m* et *run_roms.csh*.

variable	description	valeur simulation
N	Nombre de points de p - vertical, dans la grille verticale	32
MMm0	Dimension de la grille dans la direction de η	195
LLm0	Dimension de la grille dans la direction ξ	159
dt (en s)	Nombre de pas de temps interne (Pas de temps en s pour la boucle 3D, boucle lente)	720
NDTFAST	Nombre pas de temps externe (Nombre pas de temps 2D à chaque étape 3D) soit le nombre de fois que la boucle rapide est effectuée pour un pas de temps de la boucle lent	60
NTIME	nombre d'itération pour 1 mois de simulation	3600
NRST	Temps de sauvegarde des données	NTIME
NAVG	Période pendant laquelle les variables sont moyennées	NTIME/10 = 3jours

Tableau 1 : description des variables qui dépende du critère CFL

2.2.4 Domaine de calcul choisi :

La grille choisie pour représenter la zone d'étude est la même que celle de l'étude de Yashayaev et Igor, 2007.(Yashayaev 2007)



Pour réaliser cette grille un certain nombre de paramètres sont modifiés dans les scripts *romstools_param.m* et *param.h*, *cppdef.h* telles que les coordonnées de la zone (longitude Est= -70, longitude Ouest= -30, latitude Sud= 14, latitude Nord= 70), ? la résolution de modèle qui est égale à 1/4° horizontale

Ensuite le script *make_grid.m* et la fonction *edit_mask* sont utilisés pour créer la grille. Une grille de 159x195 est obtenue. Enfin les calculs des forçages et des conditions initiales sont réalisés aux frontières après exécution des scripts *make_forcing.m* et *make_clim.m* Le résultat final est représenté sur la figure 4 où apparaissent la zone d'étude et sa bathymétrie. Le transect choisi dans cette étude est aussi représenté sur la figure 4.

Figure 4: Carte de la mer du Labrador montrant ses principales caractéristiques topographiques. Le trait noir représentant le transect AR7W utilisé pour l'étude.

3. Résultats et discussions

Comme présenté dans l'introduction cette étude s'appuie principalement sur une étude (Yashayev 2007). Dans cette étude ce sont les changements de température et de salinité des masses d'eau qui sont étudiés. C'est pourquoi, nous nous focalisons aussi principalement sur ces deux variables d'état. Toutes les données présentées par la suite sont récupérées au niveau de la 9^{ème} ou 10^{ème} année au mois de mai pour être en accord avec les données de l'étude.

3.1 Diagnostique, stabilité du modèle

Après avoir exécuté le modèle pour une simulation sur 10 ans. Des outils de diagnostic sont utilisés pour se renseigner sur la stabilité du modèle. Le script *roms_diag.m* (qui sert à obtenir le volume et la surface moyenne des paramètres calculés à partir d'une simulation ROMS) puis le script *plot_diag.m* permettent de réaliser ce diagnostic et donnent les sorties graphiques suivantes :

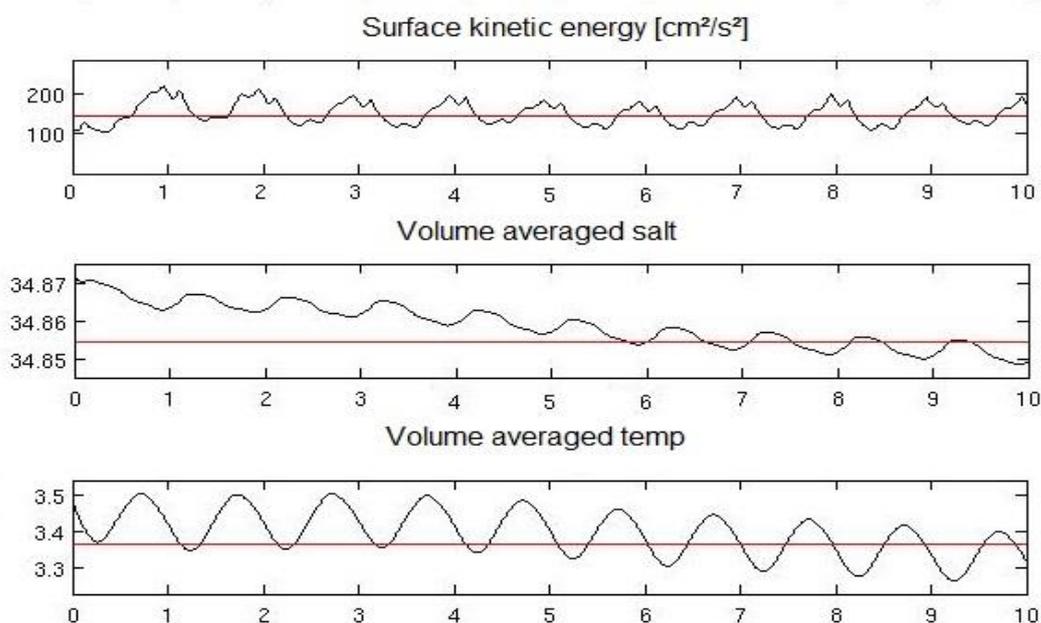


Figure 5 : graphique représentant l'évolution de l'énergie cinétique en $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ (1^{er} graphique), Volume moyen de la salinité en PSU (2nd graphique) et Volume moyen de la température en $^{\circ}\text{C}$ (3^{ème} graphique) au cours de la simulation (axe des x : temps en années)

Le paramètre de l'énergie cinétique se stabilise à partir de la 5^{ème} année. Mais en ce qui concerne les paramètres qui nous intéressent pour la suite c'est-à-dire la salinité et la température il est bien visible que même à la dixième année ils ne se sont pas stabilisés. Dans les suites de l'analyse des résultats nous allons nous intéresser plus particulièrement aux deux dernières années de simulations car ce sont quand même les simulations considérées comme les plus stables. Une simulation à plus long terme aurait dû être faite pour avoir plus de stabilité (exemples sur 20ans), mais cette opération demande une trop grande force de calcul.

3.2 Comparaison des profils verticaux

Au cours de cette deuxième étape un script Matlab a été réécrit afin d'ajouter des fonctionnalités à la sortie graphique de ROMS. Le script *myvertprofil.m* offre, donc, la possibilité de contrôler les sorties graphiques des profils verticaux. En ajoutant des fonctions connues de Matlab tel que *contourf* ect.

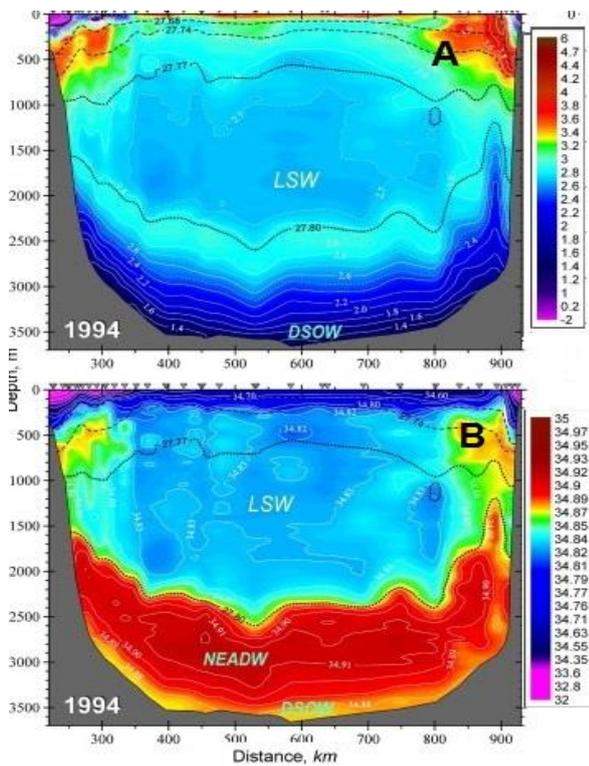


Figure 7 : profils vertical de transect AR7W de la température potentielle ($^{\circ}$ C) [A] et de la salinité [B]. Avec retranscription des principales masses d'eau LSW (Labradore Sea Water), NEADW (North Est Atlentic Deep Wate), DSOW(Deep Sea Overflow Water) (Yashayaev 200)

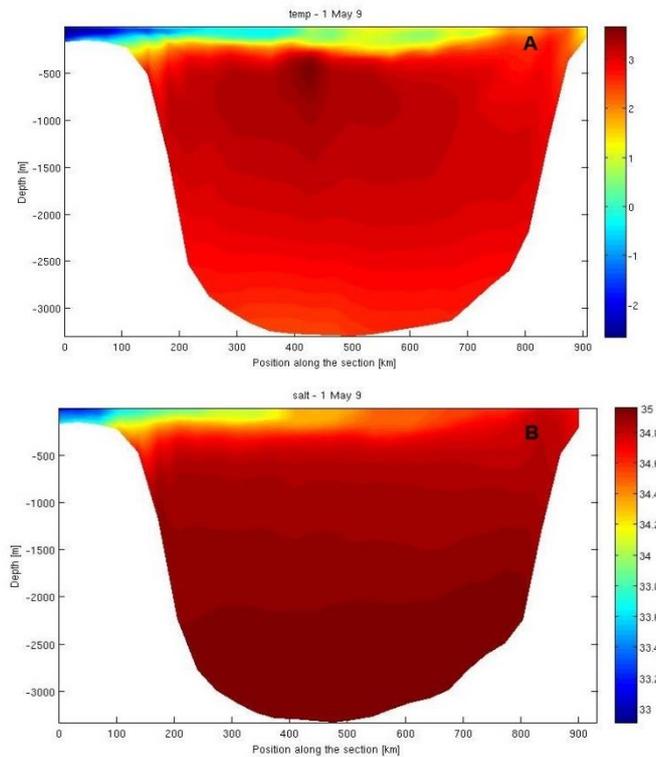


Figure 6 : profils vertical de transect AR7W de la température potentielle ($^{\circ}$ C) [A] et de la salinité (PSU) [B] apres simulation par ROMS

Les champs de température- et de salinité en sections verticales de la simulation ROMS (figure 7) et de l'étude de Yashayaev 2007 (figure 6) sont présentés ci-dessus. Les coupes transversales ont toutes été réalisées le long d'un même transect (figure 4). Que ce soit au niveau de la température ou de la salinité les masses d'eau sont beaucoup moins bien représentées dans les simulations de ROMS. On retrouve la trainée d'eau de surface du bord Est avec une signature de température très faible (± 2 $^{\circ}$ C) et de salinité tout aussi basse (± 32). Mais la trainée se diffuse différemment. Une autre similitude est l'apparition de la remontée d'eau profonde au niveau du bord ouest du bassin. La NEADW (North Atlantic Est Water) se retrouve aussi dans le fond du bassin, au niveau de la tache rouge la plus foncée du graphique de salinité. Ce sont les eaux les plus salées du bassin. Elle est aussi un peu plus froide que la LSW (Labrador Sea Water). Un léger éclaircissement (représentant une diminution de chaleur) est visible sur la section verticale de température. Toutefois, il est très difficile de distinguer la DSOW (indiqué figure 6) dans les profils simulés. De plus, la LSW est, aussi, mal distinguée sur la figure 7, même si une tache sombre apparait un peu plus marquée sur la section verticale de la température elle n'est pas assez étendue pour correspondre réellement. Ces différences (plus marquées en surface) sont sûrement dues au problème de stabilité du modèle souligné dans la partie 3.1. Et seront mises en évidence de manière plus flagrante dans la partie 3.4.

3.3 Comparaison de la salinité dans la couche de formations de LSW (1000m)

Le script *time_évolution.m* a été réécrit pour permettre de visualiser l'évolution sur 1 an des fichiers history. C'est-à-dire le fichier moyenné avec une configuration enregistrée par mois. Une série temporelle de 12 graphiques horizontaux est obtenue pour une année choisie. Il est rappelé que seul le graphique du mois de mai, vous est présenté ici.

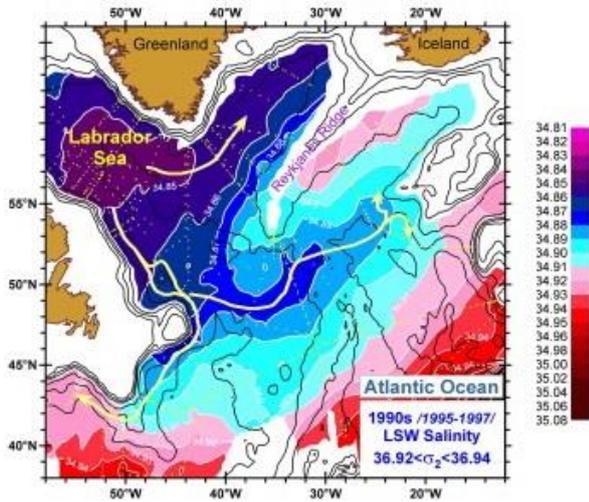


Figure 8 : représentation de la Salinité dans la couches de formations de LSW (1000m) au mai (Mer du Labrador, donnée de Yashayaev 2007)

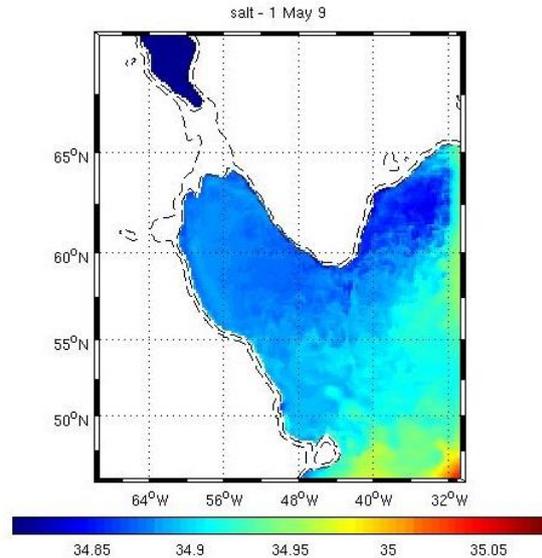


Figure 9 : représentation de la Salinité (PSU) dans la couches de formations de LSW (1000m) après modélisation avec ROMS au mai (mer de labrador)

En ce qui concerne la salinité des eaux à 1000m de profondeur, zone de formation et de transit de la LSW, le même dégradé de salinité est retrouvé. En effet, sur les deux figures, les salinités les plus faibles sont retrouvées dans la partie Nord du bassin et vont augmenter avec l'élargissement du bassin vers le large. La trainée des eaux du labrador qui longe la côte Ouest du Groenland est aussi bien distinguée. Toutefois, les eaux types de la mer de Labrador correspondant à la tache violette de la figure 8 n'apparaissent pas clairement sur la figure 9. La LSW dans la couche de 1000m de profondeur (figure 9) ou bien sur le profil vertical (figure 7B) ne semble pas vraiment recrée par le modèle.

3.4 Diagramme TS

Afin de comparer les digrammes Température vs Salinité présents dans l'étude (figure 10). Un script matlab *TS.m* a été écrit. Pour utiliser ce script il faut au préalable télécharger les routines matlab suivantes : *tsdiagram.m*, *swfreezt.m*, *swstate.m* et les placer dans le répertoire RUN. Ce scripte traite le fichier average de la 9^{ème} année en mai. Mais il est tout à fait possible de traiter les history et de changer l'année.

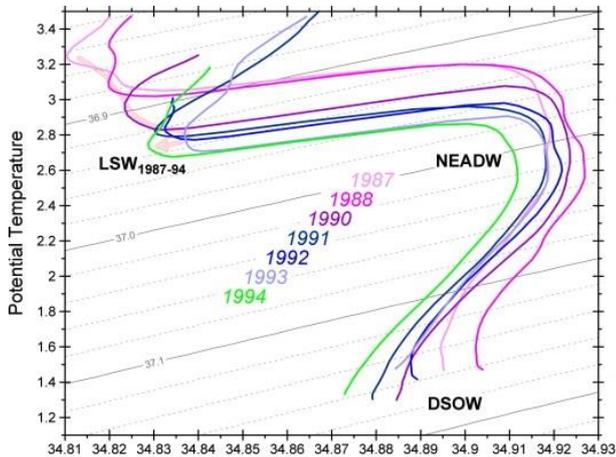


Figure 11 : digramme température vs Salinité .Données comprennent entre 1987 et 1994. (Yashayaev 2007)

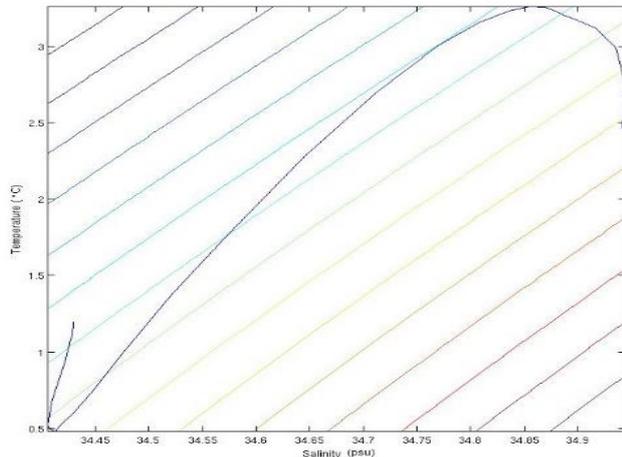


Figure 10 : Diagramme température vs Salinité. Données du moi de mai de la 9^{ème} année de simulation de ROMS.

Le diagramme Température vs Salinité des données de la simulation de ROMS (figure 11) n'est pas vraiment similaire au digramme des données in situ (figure 10). Seule, la courbure due à la présence de la NEADW (est présente) existe à des valeurs similaires. Ce diagramme permet de confirmer que la LSW et la DSOW ne sont pas conservées lors de la simulation. En effet, la boucle sensée représenter la LSW est bien plus froide qu'attendue. Il est fortement influencé par la trainée d'eau de surface du bord Est (plus froid et plus salé) qui se diffuse bien plus que dans le cas réel (figure 6A et 7A).

Cette importante différence entre les deux digrammes montre bien que la simulation ne reproduit pas vraiment la LSW. Une des causes est, sans doute, le fait que le modèle ne soit pas encore stabilisé au niveau de la salinité et de la température. Il génère des erreurs qui influent surtout sur les températures de 0 à 1000m0

4. Conclusion

Nous avons donc vu tout au long de ce travail que le modèle ROMS permet d'aboutir à des résultats assez satisfaisants. Mais, il existe malgré tout dans ce modèle de fortes instabilités qui génèrent des erreurs plutôt conséquentes. Des différences sont principalement observées au niveau de la LSW entre les données de la publication et les simulations ROMS. Cette eau caractéristique de la zone, n'est pas clairement identifiable ce qui est assez problématique pour en tirer des conclusions.

Toutefois le modèle reste bien représentatif, et traiter ce cas sur une durée plus longue de simulation devrait régler le problème d'instabilité du modèle.

5. Bibliographie

- A. J. Weaver, C. M. Bitz, A. F. Fanning, and M. M. Holland. 1999. "THERMOHALINE CIRCULATION: High-Latitude Phenomena and the Difference Between the Pacific and Atlantic." *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 27 (1): 231–85. doi:10.1146/annurev.earth.27.1.231.
- Intergovernmental Oceanographic Commission. 2016. "Thermodynamic Equation of SeaWater 2010 (TEOS-10)." Accessed April 30. <http://www.teos-10.org/>.
- Yashayaev, Igor. 2007. "Hydrographic Changes in the Labrador Sea, 1960–2005 [Prog. Oceanogr. 73 (2007) 242–276]." *Progress in Oceanography* 75 (4): 857–59. doi:10.1016/j.pocean.2007.09.001.
- Pierrick Penven, Gildas Cambon, Thi-Anh Tan, Patrick Marchesiello and Laurent Debreu. July, 2010. «ROMS AGRIF / ROMSTOOLS User's Guide ». Accessed may 1. ftp://ftp.legos.obs-mip.fr/pub/romsagrif/DATA_ROMS/user_manual/doc_roms_agrif_v2.1_19_07_2010.pdf