

MASTER OCÉANOGRAPHIE PARCOURS PHYSIQUE ET
BIOGÉOCHIMIQUE :
OPB-205

Limitations du modèle ROMS Agrif pour la mer Baltique



KOENIG Guillaume
Le 08 mai 2016

Abstract

The Baltic Sea is a region of interest because of its location close to important population center and its numerous fishery zones. Here we attempted to reproduce a basical scheme of its physical circulation. However, the basic parameters we chose and the model we used did not give us the expected results. It seems that the inflows of rivers and North Sea are of great importance for the salinity and general circulation. Furthermore, our model was not able to replicate the many upwellings of the south region and created an articial low-level center at the South-East of Gotland island. We conclude by saying that extending the simulation zone to the West and introducing sea ice and river inflows may be necessary for a realistic scheme of the circulation.

Résumé

La mer Baltique est une région de grand intérêt du à sa location proches de centres de populations importants et ses nombreuses zones de pêches. Dans le présent article nous avons tenté de reproduire un schéma basique de sa circulation physique. Cependant, les paramètres basiques choisis pour le modèle et le le modèle lui-même ne nous ont pas donnés les résultats attendus. Il semble que l'apport des fleuves et de la mer du Nord soient d'une importance capitale pour la salinité et la circulation générale. De plus, notre modèle s'est révélé incapable de reproduire les nombreux upwellings de la région sud et a fait apparaître un centre de bas niveau marin au Sud-Est de l'île de Gotland. Nous concluons sur le fait qu'une extension à l'ouest de la zone à simuler, ainsi que l'implémentation de la glace de mer et des apports fluviaux pourraient être nécessaire à une modélisation acceptable.

1 Introduction

1.1 Généralités

La mer Baltique est la principale mer fermée du Nord de l'Europe et un point d'importance économique majeur au niveau régional. Plusieurs points la caractérisent et font de l'étude et la modélisation de sa circulation des sujets intéressants bien qu'ardus.

Sa localisation entre 52° et 68 °Nord amène une couverture de glace de l'ordre de 45% pour des conditions hivernales normales à la quasi entière dans des conditions d'hiver rude(Lehmann & Hinrichsen,2000)[4]. Ce fait est accentuée par sa faible salinité du à l'apport important des fleuves et des précipitations. Le seul apport d'eau salé étant au niveau du détroit du Danemark et estimé à 450km³ par an([4]), un gradient de salinité important allant du Nord vers le Sud caractérise la zone.

Au niveau de la bathymétrie, cette mer se distingue par sa faible profondeur moyenne ($\approx 50m$) et une profondeur maximale de 459m. Anciennement lac d'eau douce, la fonte des glaciers scandinaves l'ont reliés à l'océan mondial. Du fait de sa faible profondeur, elle répond rapidement aux changements de conditions atmosphériques.

Sa faible profondeur ne signifie pas une absence de variations profondes. En effet la circulation de la Baltique est stratifiée par les nombreux apports d'eau douces de surface ainsi que l'introduction d'eau salée au niveau du détroit du Danemark. De plus la présence d'une importante couche de glace de mer serait à même d'amener des désalures, bien que faible due à la faible salinité des eaux de surfaces, ainsi qu'une stratification importante en hiver due à l'absence de mélange par les vents.

La délimitation Ouest est variable, et dans le présent rapport nous avons choisi de la poser à 14 °Est, au niveau du détroit du Danemark. Cependant, elle est parfois définie comme allant jusqu'au Skarregard, poussant sa limite à 10 °Est. Le choix de la limite ouest est important dans le cadre de la simulation ROMS Agrif, car il régit l'apport de salinité depuis la mer, celui-ci dépendant directement de la salinité mesurée à la frontière de la zone considérée.

Les principales divisions et caractéristiques géographiques d'importance sont l'île de Gotland, normalement centre d'un gyre de circulation cyclonique. La mer de Botnie, ainsi que le golfe associé sont marqués par des températures et salinité très faibles et sont à distinguer. Enfin, le golfe de Riga ou de Finlande est marqué par l'apport important d'eau douce de la Neva au niveau de St-Pétersbourg.

Enfin, les caractéristiques climatiques sont d'importance puisque au delà de la simple régulation de la circulation, celles-ci sont responsables des crues des fleuves alimentant la Baltique, ainsi que d'évaporation ou précipitation importante. De plus, les vents d'ouest sont susceptible de bloquer l'export d'eau douce de surface au niveau du détroit du Danemark.

1.2 Modèle utilisé

Le travail du présent rapport consiste en une simulation ROMS-Agrif de la mer Baltique. Ce modèle est un modèle en trois dimensions résolvant les équations de Navier-Stokes (équations 1), de continuité (équation 2) et de diffusion/advection de la salinité/température (équations 3 et 4).¹

1. Merci à Sébastien Sébastien Le Clec'h pour ses équations

$$\left\{ \begin{array}{lcl} \frac{\partial u}{\partial t} + \vec{U} \nabla u - fv & = & -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + A_h \nabla_h^2 u + A_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \vec{U} \nabla v - fu & = & -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} + A_h \nabla_h^2 v + A_v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \vec{U} \nabla S = A_h \nabla_h^2 S + A_v \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{U} \nabla T = A_h \nabla_h^2 T + A_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \frac{\partial I}{\partial z} \quad (4)$$

Les paramètres utilisés sont indiqués dans le tableau 1. De nombreux autres paramètres (énergie cinétique, vorticité potentielle, etc...) peuvent être déduits de ceux-ci.

TABLE 1: Un tableau des différents paramètres basiques des équations du modèle ROMS-Agrif

Symbol	Paramètre	Unité	Symbol	Paramètre	Unité
u & v	Vitesses horizontales	m.s^{-1}	w	Vitesse verticale	m.s^{-1}
\vec{U}	Vecteur vitesse	m.s^{-1}	f	Paramètre de Coriolis	s^{-1}
ρ_0	Masse volumique	kg.m^{-3}	P	Pression	$\text{kg.m}^{-3}.\text{s}^{-2}$
A_h & A_v	Coefficients de viscosité turbulente	$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$	S	salinité	psu
T	Température	kelvin			

De plus, les approximations suivantes sont utilisées :

- Approximation de Boussinesq
- Approximation hydrostatique
- Fluide incompressible
- Fermeture newtonienne
- Égalité des coefficients de turbulence horizontale

Le modèle ROMS est un modèle à surface libre et à deux pas de temps. Un pas de temps plus court est utilisé pour la quantité de mouvement (*momentum*) dans un contexte barotrope et un plus long pour cette quantité de mouvement dans un contexte barocline, ainsi que pour les équations de température et salinité.

Les véritables coordonnées de calcul sont curvilinéaires afin de s'adapter au mieux aux côtes et à la bathymétrie (utilisation de coordonnées sigma sur la verticale), ce qui implique que les équations de Navier-Stokes données au dessus subissent des transformations avant d'être résolues.

Les coordonnées sur l'axe vertical sont des coordonnées dites σ suivant la bathymétrie et la densité de la colonne d'eau. Un fait intéressant est que les coefficients de viscosité latéraux sont pris en charge dans l'équation d'advection, celle-ci générant naturellement une diffusion numérique qui est mise à profit.

Cependant, le modèle ROMS est un modèle océanique utilisé pour produire une climatologie de l'océan selon des données atmosphériques moyennées et non un modèle couplé océan atmosphère. Les données de forçage seront les mêmes d'année en année. De plus, le module de glace de mer n'est pas existant dans le modèle ROMS Agrif (mais bien dans le ROMS Rutgers).Enfin, les modules de gestion des fleuves sont locaux et ceux de la Baltique n'ont pas encore été implémentés.

1.3 Spécificités de la mer Baltique

La mer Baltique est un bassin peu profond, et nécessite donc une paramétrisation de ROMS adapté. Elle ne dispose pas de fort gradient au niveau de sa bathymétrie et ses fosses sont a priori peu profondes et d'une importance assez peu marquées dans sa circulation générale. La paramétrisation de sa bathymétrie côtière pourrait cependant être d'importance dans la reproduction d'upwelling dans la zone Sud.

La glace de mer est une aussi une issue. Celle-ci recouvrant une bonne partie de la Baltique durant l'hiver, il est dommage qu'elle ne soit pas implémentée au niveau de ROMS-Agrif .Cependant, des modélisations couplées atmosphères océans ont au moins montré un impact négligeable, dans l'état climatologique actuel, sur la salinité (Markus Meier & Kauker,2003)[5].

Les apports des fleuves n'étant pas implémentés de façon automatique, la simulation de l'apport d'eau douce est uniquement liée aux apports du modèle climatique de précipitations et évaporations. Aucun patch de ROMS Agrif ne compilant les fleuves de la zone Baltique n'ayant été trouvé, nous tenterons de négliger l'impact de ceux-ci lors de la première simulation.

Enfin, les événements de "Baltic Saltwater Inflows" caractéristiques de la région et aérant les eaux profondes apparaissant au milieu de l'hiver dépendent de conditions météorologiques exceptionnels et ne sont pas pris en compte dans les données climatiques moyennées de COADS 2005. Ces événements ayant une occurrence moins importante depuis les années 1970 [5], ce détail n'est peut-être pas d'une importance crucial pour la détermination du climat de la mer Baltique.

2 Matériels et Méthodes

2.1 Paramètres de la simulation

Une première simulation a été réalisée à l'aide de ROMS Agrif. Celle-ci couvrait une zone allant de 13 à 27 °de longitude Est et de 54 à 66 °de latitude Nord. Les autres paramètres tels que le nombre de couches en profondeurs (32), les réglages de gradient de profondeur, la profondeur maximale de la bathymétrie et à la côte sont aussi restés inchangés et correspondaient aux défauts de la version téléchargée de ROMS Agrif.

La simulation fut effectuée avec des conditions de frontières fermées à l'exception de la bordure ouest, afin de permettre le contact avec la mer du Nord. Une possibilité de simulation de l'apport important de la Neva aurait été l'ouverture du bassin à l'est en conditions ouvertes. La Neva représente en effet un effet important d'apport d'eau ($\approx 79\text{km}^3$ ²). Cette solution n'a pas été retenue car elle aurait nécessité une considération des apports des autres fleuves, les débits de ceux-ci étant non-négligeables aussi. Pour cette première simulation, nous avons préféré nous contenter des paramètres basiques.

2. Soit un apport de l'ordre de grandeur de celui du détroit du Danemark. Source : Article wikipedia de la Neva, consulté le 04 mai 2016

La simulation s'est faite selon une résolution zonale de 139 mailles et méridionale de 242 mailles ($\approx 5\text{km}^2$, les dimensions des mailles variant de $4,5\text{km}^2$ et $6,5\text{km}^2$.), soit une division de 10 maille par degré de latitude/longitude. Cette résolution a permis la prise en considération de certaines formations îleuses de la Baltique.

Les données de bathymétrie utilisées proviennent des données ETOPO 2[6]. Les paramètres climatiques et de forçage externes proviennent du Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set (COADS) de 2005. Les paramètres marins de salinité et température de l'eau proviennent du World Ocean Atlas de 2009.

Le modèle ROMS n'amène pas de couplage océan-atmosphère, ainsi, les paramètres tels que le vent, la chaleur latente ou l'illumination sont précalculés à partir des sources de données citées plus haut. Puis que le modèle que nous voulons créer est un modèle "climatologique" de l'océan, ces paramètres extérieurs se répèteront chaque année pour la durée de la simulation. Celle-ci seront répétées sur dix années, afin de laisser au modèle une période de stabilisation. Du à des raisons internes à ROMS Agrif, le modèle tend à perdre du sel au cours du temps. Entre les pertes de salinité et le temps de stabilité, les données sont généralement extraites des années 6 ou 7 de simulation.

2.2 Choix de la zone et bathymétrie

La bathymétrie de la simulation ainsi que certaines caractéristiques géographiques importantes dans notre cas sont présentés sur la figure 1. On remarquera que ces simulations n'incluent pas le détroit de Skagerrad communiquant avec la mer du Nord.

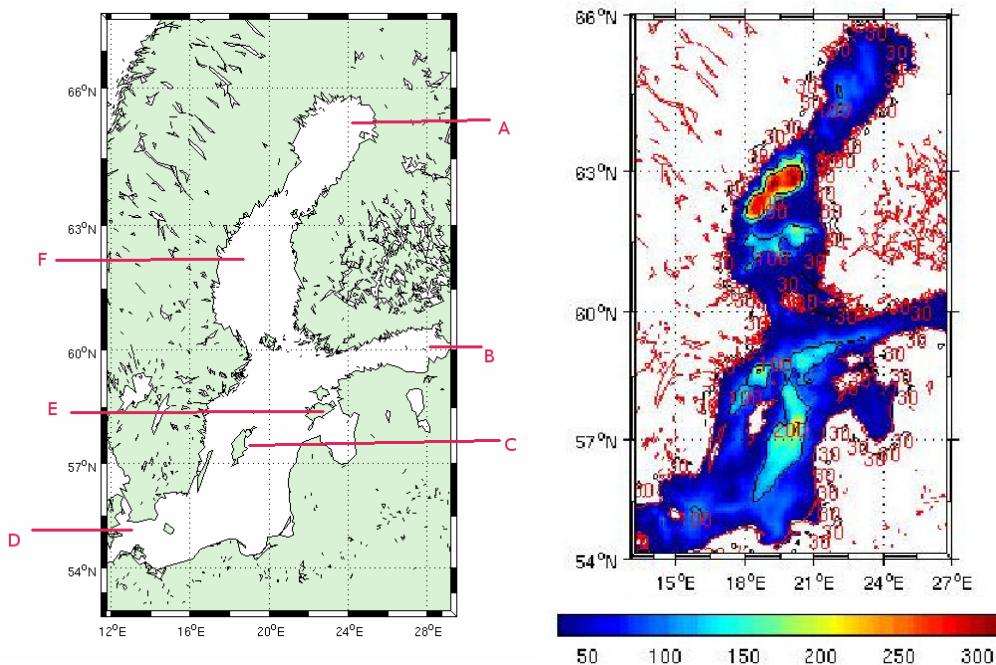


FIGURE 1: Une carte géographique générées par le script de Roms tools make grid, avec A : La baie de Botnie (formant avec F le golfe de Botnie), B : Golfe de Finlande (ou de Riga), C : île de Gotland, D : Détroit du Danemark délimité à l'Est par l'île de Bornholm, E : îles Saarema et Hiiumaa et F : Mer de Botnie. À droite une carte de la bathymétrie du modèle utilisé, avec une échelle en mètres.

La bathymétrie minimale aux côtes a été fixées à 30 mètres, qui est donc atteinte sur la plupart des côtes, la Baltique ne disposant pas de gradient important côtiers. On voit que la

plupart des formations îleuses sont bien présentes avec la résolution sélectionnées. Celles-ci ont une importance dans le découpage de la circulation réelle ,l'île Gotland par exemple est le centre de circulation du centre de la Baltique.

3 Résultats

3.1 Paramètres de forçage et climatologique

Les paramètres de forçage sont extraits de la base de données de COADS 2005 et ne sont pas couplés au modèles. Ils sont répétés chaque année sans modification, le but du modèle étant de fournir une simulation climatologique d'une année de référence. Dans le cas de la Baltique, les paramètres de précipitation et de vent sont particulièrement important, étant donnés qu'ils sont les principaux régulateurs d'un écoulement au niveau du Détroit du Danemark.

Des paramètres climatologiques sont aussi calculés par le modèle, pour la salinité et la température notamment. Ceux-ci peuvent être comparés avec les données de la littérature, notamment de l'article de Janssen,Schrum & Backhaus, 1999 [3]. La salinité de surface pour le mois de janvier est comparée entre les paramètres climatiques du modèle et ceux de la littérature dans la figure 2.

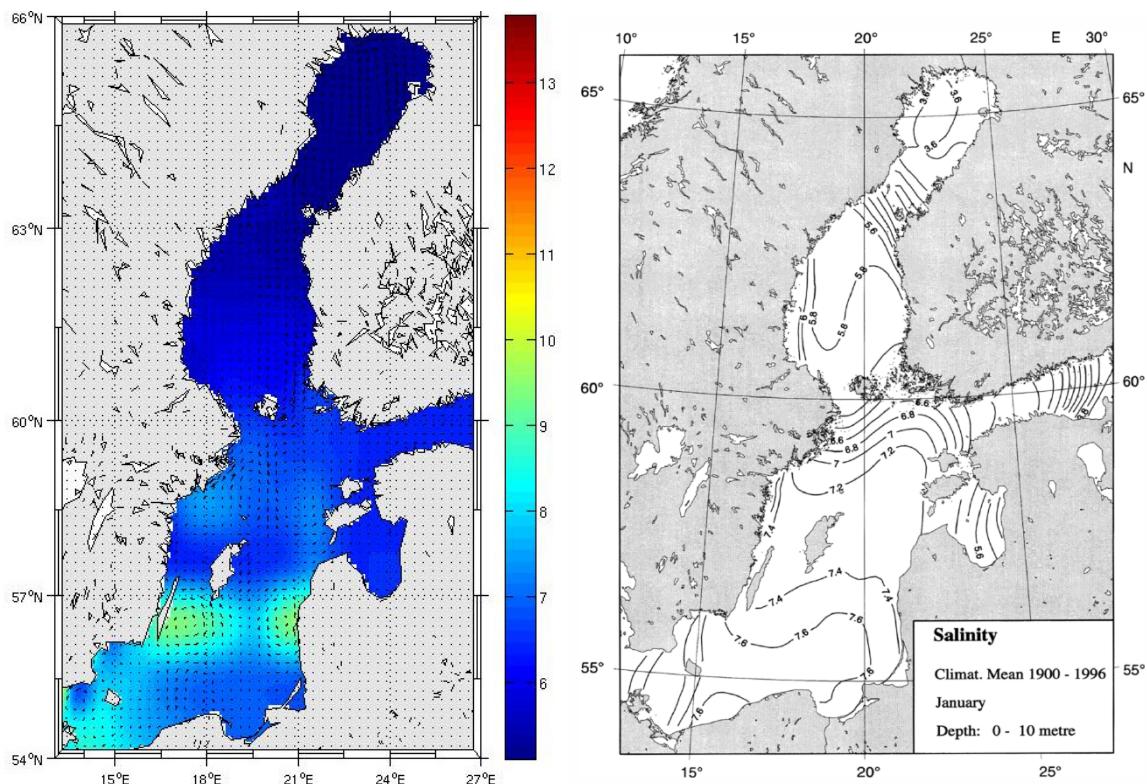


FIGURE 2: Une comparaison des données climatiques pour la salinité de surface du mois de janvier (à gauche) avec les données de surface de (Janssen,Schrum & Backhaus,2002) [3], à droite. Les flèches sur la figure de gauche représentent les vitesses de courants de surface.

La caractéristique la plus choquante et certainement la plus intéressante sont les hautes salinités enregistrées pour les données du modèle dans le golfe de Botnie. Les basses salinité du golfe de Botnie sont normalement dues à l'appport important des fleuves finlandais de la zone et ne dépend pas fortement de la saison. Ainsi, les données (non montrées ici) du reste de l'année diverge de la même façon, de plus de deux psu dans le Golfe de Botnie. Le fort

gradient de salinité Nord-Sud caractéristique de la mer Baltique n'est donc pas reproduit. De même variations sont visibles pour la température, trop élevée de 1 °C dans ce Golfe de Botnie.

Cette absence d'eaux froides et douces du Nord risque d'être l'un des facteurs de perturbations du transit dans le détroit du Danemark puisque la salinité du bassin peinera à être reproduite sans cet apport d'eau douce du Nord du bassin. De plus l'absence d'estimation correcte de température initiale pourrait aggraver le problème d'absence du module de glace de mer dans ROMS Agrif.

3.2 Diagnostiques des modèles

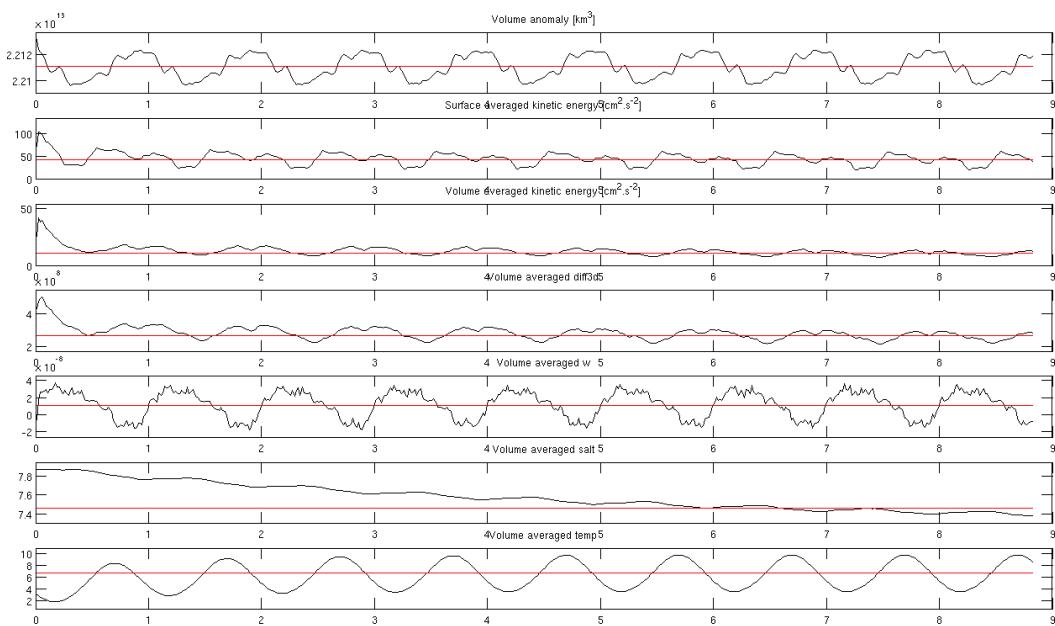


FIGURE 3: L'évolution de différentes variables importantes au cours du temps fourni par la routine de diagnostic de ROMS Agrif. Le diagnostic ici correspond à celui du modèle à moyenne résolution.

La figure 3 permet de visualiser la variation temporelle de caractéristiques globales du modèle telles que la salinité moyenne ou l'anomalie de volume sur le bassin. Ces paramètres sont importants pour estimer la stabilité du modèle et sa zone de fonctionnement optimale pour l'extraction de données dans le cadre de notre modélisation climatique.

Certaines variables permettent d'estimer des situations physiques du modèle, comme ici l'anomalie de volume dans la Baltique. Il est en effet connu que la Baltique, dans le cas de fort vent d'Ouest voit son volume augmenté par l'arrêt total de l'export d'eau douce de surface dans le détroit du Danemark[1]. La corrélation entre les anomalies de volumes et un régime de vent ouest plus important, ou une circulation réduite en surface au niveau du détroit du Danemark serait une confirmation du bon fonctionnement du modèle dans ce cadre.

Un paramètre important dans le cadre des simulations ROMS Agrif, et probablement l'acteur majoritaire dans notre choix de la zone d'étude est la salinité moyennée. En effet, ces oscillations périodiques sont à peines distinguables (figure 3) dans sa décroissance importante. Cependant, cette diminution devient moins importante autour de la sixième année, qui est aussi la plus proche de la moyenne de salinité enregistrée pour le modèle, et sera donc celle sélectionnée préférentiellement pour les analyses futures.

3.3 Export à travers le détroit du Danemark

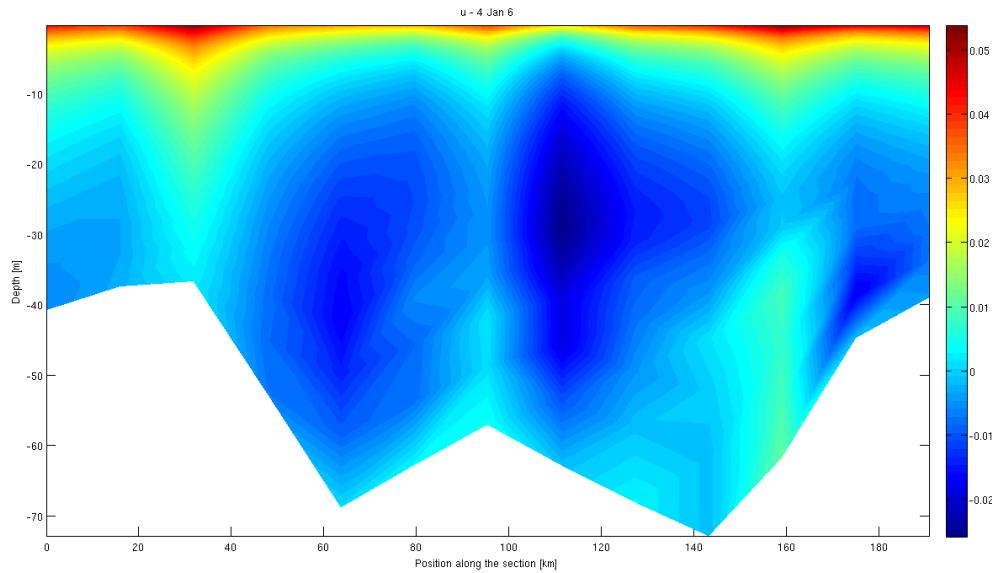


FIGURE 4: Une coupe de vitesse horizontale dirigée vers l'est effectuée au niveau de 16 °Est, proche de l'île de Bornholm, pour le mois de janvier de la sixième année de simulation

La figure 4 présente des informations importantes pour l'apport d'eau et de salinité dans le modèle. La structure de l'export se fait de façon simple, avec une division en deux couches marquée. La circulation de surface s'effectue sur les premiers mètres , avec des vitesses de 5cm.s^{-1} et vers l'Est. Des veines plus profondes de surface importante exporte de l'eau vers avec des vitesses allant jusque 2cm.s^{-1} . Au niveau de 160km dans la section, on repère une exportation d'eau vers l'est avec une vitesse de 1cm.s^{-1} .

On remarquera le découpage en veines avec les frontières correspondant à des remontées bathymétriques. Cependant, la veine d'export vers l'ouest au niveau de 160km contredit la thèse d'un simple pilotage bathymétrique. Les vitesses ne sont pas forcément nulles au fond, mais sont moins importantes qu'en surface, due à la dissipation d'énergie. Les approfondissements de vitesses dirigées vers l'ouest voient bien un gradient de vitesse se former mais sans inversion de celle-ci, écartant l'observation d'une spirale d'Ekman.

Cette structure est extrêmement étrange comparée aux données réelles de la mer Baltique, qui présente une structure inverse, d'export d'eau douce sur les couches superficielles vers la mer, et donc avec une vitesse horizontale dirigée vers l'ouest, et des couches profondes d'arrivées d'eau salée en provenance de la mer du Nord avec des flux dirigés vers l'Est.

Les causes de ces variations pourraient être les conditions au bord et le découpage géographique choisi. Cela serait alors corrélés avec des données de salinité et sera discuté ultérieurement dans ce rapport.

3.4 Salinité de fond et apports externes

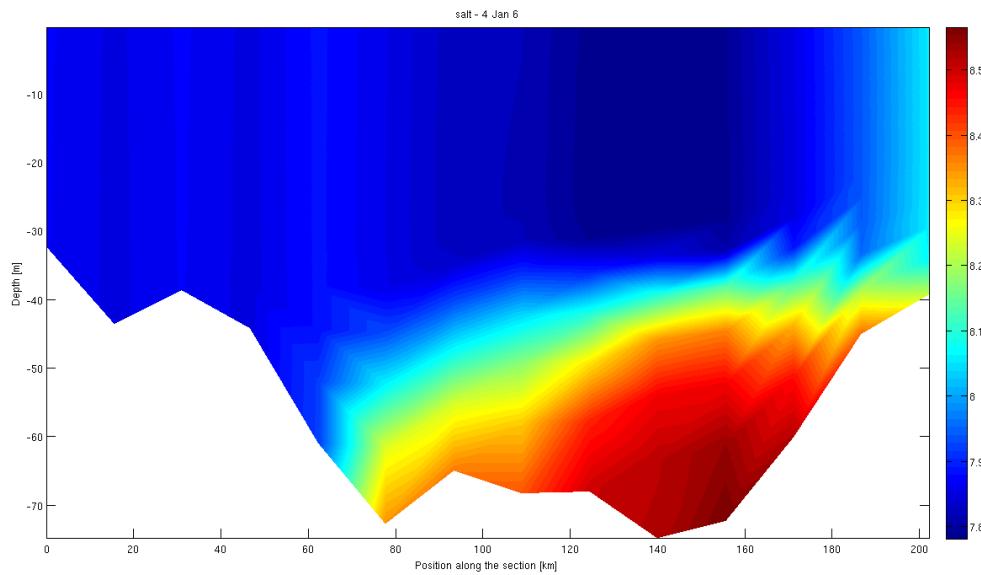


FIGURE 5: Une coupe effectuée aux alentours de 16 °Est au large de l’ île de Bornholm affichant la salinité (psu) pour le premier pas de temps de janvier de la sixième année

La figure 5 représente des données pour la répartition verticale et méridionale de salinité au large de l’île de Bornholm. La zone choisie est légèrement décalée par rapport à la figure 4 pour des raisons de visibilités de la salinité, sans effet sur le commentaire général.

L’origine de la section étant prise au Nord, la distance sur l’axe x représente l’avancée vers le Sud. On remarque que le maximum de salinité est concentré au Sud et dans les profondeurs maximales, en dessous d’une veine de subsurface de salinité plus faible (≈ 7.8 psu). Les variations de salinité entre les maxima sont de 0,7 psu, ce qui représente une faible variation au niveau de la profondeur pour cette région de la Baltique. Ceci est à comparer avec la figure 4 pour obtenir des informations sur le comportement de la simulation au niveau du détroit du Danemark.

3.5 Circulation générale et gyre de Gotland

La figure 6 montre l’élévation du niveau de surface par rapport à la moyenne du modèle. On remarque un gradient d’élévation Nord-Sud et Est-Ouest, avec les bords du bassin présentant les creux de surface les moins marqués. La dépression maximale se retrouve au niveau du détroit du Danemark avec la condition ouverte au frontière, et dans un creusement important (-18 cm) au Sud-Est de l’île de Gotland.

Ce gyre apparaît de façon permanente dans notre simulation et sa localisation ne varie plus fortement après 3 ans, contrairement à son étendue. De plus, il lui arrive de former des "bras" et d’être relié au creusement du détroit du Danemark. Un autre creusement non permanent et moins important est visible aux alentours de 53 °Nord.

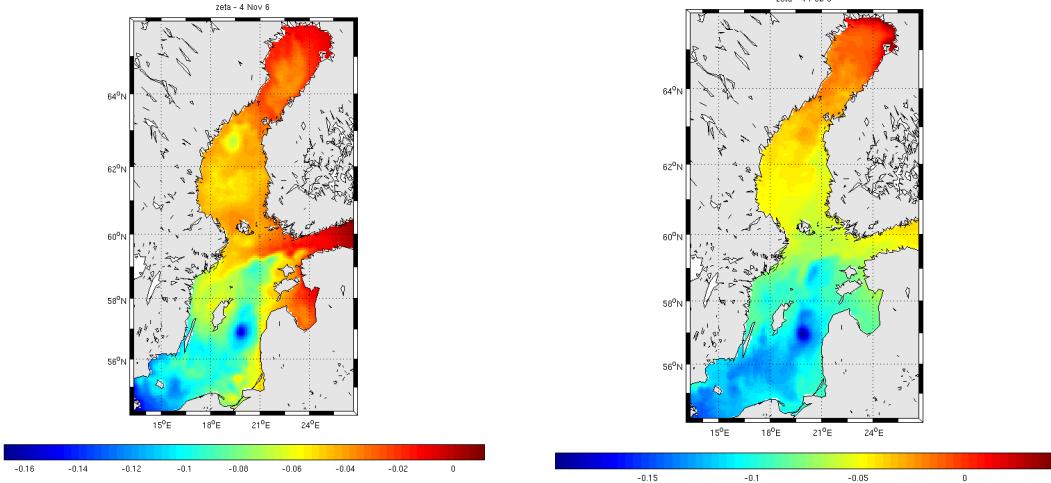


FIGURE 6: Une carte de l’élévation (en cm) de la surface de l’eau au mois de novembre(à gauche) et de février (à droite) de la sixième année de simulation.

4 Discussion

Les données de la figure 5 illustre une faible salinité de fond, incompatible avec les données disponibles de la mer Baltique. Ce couplage avec les vitesses horizontales incohérentes de la figure 4 avec les données réelles pourraient être reliées à un mauvais découpage de la zone choisie pour la modélisation. Les conditions de frontières ouvertures sont incapables de simuler l’apport de sel externe de la zone située au delà du détroit du Danemark et n’apportent qu’une eau de salinité proches de celles déjà présentes. En comparant les figures 5 et 4 on observe même que les eaux apportées par les frontières sont caractérisées par une salinité inférieure à celle déjà présentes dans la zone. Une simulation plus étendue à l’Ouest permettrait d’obtenir des gammes de salinité plus importantes et peut-être de simuler de façon plus réaliste l’apport d’eau par le détroit du Danemark.

L’anomalie de volume visible en hiver semble due à une saison de précipitation plus importantes, le modèle exposant des données de précipitation nette durant la période d’hiver (données non montrées). L’impact du régime de vent n’étant quant à lui pas clair, son effet principal étant normalement de bloquer l’export d’eaux de surface vers l’ouest n’est ici pas observé, un export de surface permanent vers l’est étant enregistré et n’est pas une structure saisonnière ou épisodique due à une variation du régime des vents.

Le creusement permanent au niveau du détroit du Danemark serait lié à une circulation cyclonique autour de cette zone. Cependant, l’établissement permanent d’une circulation cyclonique autour de cette zone paraît en désaccord avec la présence de glace de mer plusieurs mois par an dans cette zone. De plus, la Baltique est une zone marquée par des upwellings côtiers importants dans sa partie sud [2]. Ces upwellings sont clairement prohibés dans ce modèle où les niveaux d’eau sont plus importants les côtes, à l’exception peut-être de la partie Nord du détroit du Danemark.

5 Conclusion

En conclusion, les paramètres de base utilisés pour la simulation de la circulation dans la mer Baltique par le modèle ROMS Agrif semblent inappropriés. Si certaines erreurs semblent liés aux paramètres choisis, certaines qui n’ont pas été détaillés ici pourraient être dues aux limitations internes du modèle.

Le découpage de la zone est clairement à améliorer, une zone s'étendant au delà du Skager-rak, soit à moins de dix degrés Est. Ceci pourrait régler l'apport de sel et la mauvaise circulation au niveau du Détroit du Danemark.

La faible profondeur demanderait aussi une modification des paramètres de base afin de pouvoir prendre en compte les pentes peu marquées et la faible profondeur, et pourrait servir de moyen d'allègement le modèle en diminuant le nombre de mailles verticales.

Le problème d'apport d'eau douce des fleuves est implantable mais ne l'est pas dans le modèle de base, et demanderait une base de données solides. Celui permettrait sûrement de corriger les niveaux de salinités souvent aberrants mesurés. De plus, les apports fluviaux peuvent être responsables d'événements hydrologiques importants, comme les élévations du niveau moyen de la Baltique dans le cadre de vent d'ouest important.

Le problème d'utilisation de données moyennes empêche la mise en évidence de Major Baltic Inflow (MBI), important pour le mélange d'eaux profondes et pour le rééquilibrage de la salinité du modèle et pour la ventilation des eaux de fond. Ces événements ayant cependant diminués depuis les années 1970, la relevance de l'implémentation des conditions présidant à ces événements durant l'hiver reste à poser.

Enfin, le problème d'absence de l'implémentation de la glace de mer dans le modèle ROMS Agrif est un inconvénient majeur, celle-ci pouvant dans certaines conditions couvrir l'intégralité du bassin Baltique et perturber fortement l'interaction avec les vents, ainsi que servir de frein important à la circulation de l'eau en dessous en dissipant l'énergie par frottement. Ce problème pourrait être utilisé par l'utilisation de la version Rutgers de ROMS ou l'implémentation d'un module de glace de mer

Références

- [1] Döös, Meier, and Döscher. The baltic haline conveyor belt or the overturning circulation and mixing in the baltic. *AMBIO : A Journal of the Human Environment*, 33(4) :261–266, 2004.
- [2] Gidhagen. Coastal upwelling in the baltic sea—satellite and in situ measurements of sea-surface temperatures indicating coastal upwelling. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 24(4) :449–462, 1987.
- [3] Janssen, Schrum, and Backhaus. A climatological data set of temperature and salinity for the baltic sea and the north sea. *Deutsche Hydrografische Zeitschrift*, 51(9) :5–245, 1999.
- [4] Lehmann and Hinrichsen. On the wind driven and thermohaline circulation of the baltic sea. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B : Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 25(2) :183–189, 2000.
- [5] Meier and Kauker. Modelling decadal variability of the baltic sea during 1902-1998. In *EGS General Assembly Conference Abstracts*, volume 27, page 2375, 2002.
- [6] 2006. 2-minute Gridded Global Relief National Geophysical Data Center. Data (etopo2) v2. national geophysical data center, noaa. doi :10.7289/V5J1012Q.