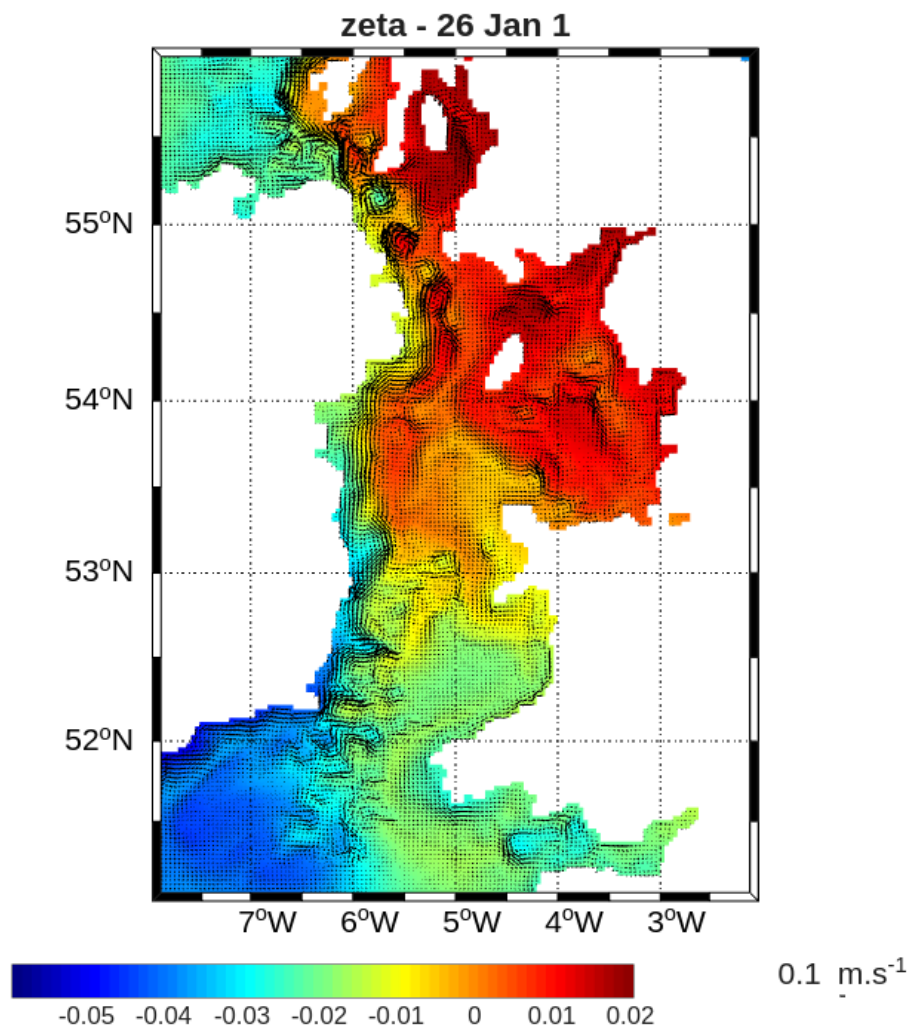


Modélisation de la circulation océanique de la mer d'Irlande



OPB205 : Modélisation 3D de la circulation océanique

Master 1 Sciences de la Mer

Parcours Océanographie Physique et Biogéochimique

Professeur référent : M. Doglioli

Auteur : Juliette GARNIER

Résumé

Séparant l'Irlande de la Grande-Bretagne, la mer d'Irlande est une mer épicontinentale caractérisée par une bathymétrie peu profonde et des forçages multiples incluant les apports fluviaux, les flux atmosphériques et une dynamique de marée intense. En période estivale, la stratification thermique favorise l'émergence de structures de méso-échelle, notamment un tourbillon cyclonique saisonnier dans la partie ouest du bassin, associé aux gradients de densité et à la topographie. Ce rapport vise à comparer des simulations à différentes résolutions issues d'un modèle de circulation régionale ROMS (Regional Ocean Modelling System), avec la littérature. La simulation à Haute résolution témoigne d'une reproduction plus fidèle aux structures de méso-échelles, dont la position, l'intensité et la variabilité sont globalement cohérentes avec les études antérieures. Cependant, les simplifications importantes utilisées pour la configuration de ce modèle, telles que l'absence de forçage de marée, limite sa capacité à reproduire fidèlement les processus de mélange verticaux et les interactions entre stratification et turbulence.

Mots-clés : Mer d'Irlande – modèle ROMS – faible bathymétrie – structure à méso-échelle

Abstract

Nestled between Ireland and Great Britain, the Irish Sea is an epicontinental sea characterized by shallow bathymetry and multiple forcings, including river inputs, atmospheric fluxes, and intense tidal dynamics. During the summer period, thermal stratification promotes the emergence of mesoscale structures, notably a seasonal cyclonic eddy in the western part of the basin, associated with density gradients and topography. This report aims to compare simulations at different resolutions from a Regional Ocean Modeling System (ROMS) circulation model with the literature. The high-resolution simulation demonstrates a more accurate reproduction of mesoscale structures, whose position, intensity, and variability are generally consistent with previous studies. However, significant simplifications used in the model's configuration, such as the absence of tidal forcing, limit its ability to accurately reproduce vertical mixing processes and the interactions between stratification and turbulence.

Keywords : Irish Sea – ROMS model – shallow bathymetry – mesoscale structure

Table des matières

1	Introduction	1
2	Méthodes	2
2.1	Modélisation et équations associées	2
2.2	Le modèle ROMS	3
2.2.1	Conditions aux limites et frontières	3
2.2.2	Discretisation et critère CFL	3
2.3	Implémentation et configuration du modèle	3
3	Résultats et Discussion	5
3.1	Stabilité et diagnostics du modèle	5
3.1.1	Modèle à Basse Résolution	5
3.1.2	Modèle à Haute Résolution	6
3.2	Étude saisonnière des paramètres	6
3.3	Zoom sur la circulation de l'ouest de la mer d'Irlande	7
3.4	Influence de la résolution	9
4	Conclusions et perspectives	10
A	Annexes	11

1 Introduction

L'un des principaux enjeux des modèles numériques en zones côtières réside dans leur degré de précision dont ils pourront faire preuve afin d'être le plus représentatif des processus physiques sous-jacents à l'étude des flux biogéochimiques et des écosystèmes marins. La mer d'Irlande s'écoule au sein d'un chenal séparant l'Irlande et l'Irlande du Nord à l'ouest de l'Ecosse, l'Angleterre et du pays de Galles à l'est. Elle s'étend sur 300 km de long et 200 km de large pour une superficie de 46 007 km². Sa bathymétrie peu profonde atteignant 150 m au sud et 250 m au nord lui confère une dynamique complexe facilement influençable par les conditions atmosphériques. D'autre part, elle communique avec l'Océan Atlantique Nord grâce aux deux mers épicontinentales qui la bordent. En effet, elle est en contact à sa frontière nord avec la partie sud de la mer d'Ecosse par le canal du Nord (55° 03 00 N, 5° 37 00 W) ainsi qu'avec la partie nord de la mer Celtique à sa frontière sud (52° 00 00 N, 5° 53 19 W) ; (Organisation Hydrographique Internationale, 2026).

L'influence des apports fluviaux représente également une des caractéristiques majeures de cette région. En effet, une dizaine de fleuves et rivières sillonnent la côte irlandaise tels que le Liffey et le Boyne se jettant dans la baie de Dublin ainsi que le Barrow, le Nore et le Suir se jettant à la péninsule de Hook, avec un débit moyen annuel cumulé de 9 km³/an. Sur la partie est de la mer d'Irlande, certains fleuves de Grande-Bretagne s'y jettent également. C'est le cas des fleuves Mersey, Ribble et Lune se déversant dans la baie de Liverpool avec un débit moyen annuel cumulé de 5 km³/an.

Concernant les contraintes atmosphériques, les côtes irlandaises et de la Grande-Bretagne présentent un climat doux et humide largement influencé par la dérive Nord-Atlantique du Gulf stream, avec des températures estivales pouvant atteindre 25 °C en été irlandais et 40,3°C en Grande-Bretagne. De plus, cette région est soumise à des vents intenses de sud-ouest pouvant varier de 3 m/s à 8 m/s selon les régions générant une alternance de Hautes et Basses Pressions rapides (Met Éireann - The Irish Meteorological Service, GreatBritain.info).

La courantologie de la mer d'Irlande présente des caractéristiques propres aux mers continentales. De ce fait, les courants à long terme qui progressent dans cette zone dépendent d'une composante induite par le vent et les marées ; permettant un mélange vertical important sur l'ensemble de la colonne d'eau (Horsburgh et al., 2003). Cependant, la présence de structures à méso-échelle comme le gyre cyclonique saisonnier de l'ouest de la mer d'Irlande génère des instabilités baroclines induites par la variation de densité et de vitesse horizontales avec la profondeur (Hill et al., 1994 ; Horsburgh et al., 2000).

Ce rapport vise à présenter la circulation générale de la mer d'Irlande de manière simplifiée (non prise en compte de la circulation tidale et autres effets de marée dans le modèle), afin de rendre compte des principaux mécanismes inhérents à la dynamique de cette région. Dans un premier temps nous verrons les différentes paramétrisations du modèle ROMS ainsi que les équations primitives et les hypothèses associées. Dans un second temps, nous porterons notre

attention sur les variables diagnostiques du modèle à haute et basse résolution ainsi qu'aux paramètres de sortie. Puis nous nous focaliserons sur la circulation à méso-échelle de la partie ouest du bassin irlandais en comparant avec la littérature. Enfin, nous verrons l'influence de la résolution sur la représentation des processus physiques des zones côtières.

2 Méthodes

2.1 Modélisation et équations associées

Afin de construire un modèle de circulation océanique à l'échelle régionale, il est nécessaire d'établir les équations et les approximations adaptées aux processus que l'on souhaite représenter. Les équations primitives qui décrivent l'océan à l'instant t sont introduites dans le modèle ROMS selon les quatres équations ci-dessous en faisant l'approximation d'un fluide incompressible. Pour les résoudre au pas de temps suivant, on se place dans un repère tournant avec la Terre de coordonnées cartésiennes en se basant sur l'approximation de Boussinesq et sur l'hypothèse hydrostatique. Ces équations sont alors discrétisées grâce au schéma numérique de la grille d'Arakawa-C en utilisant des méthodes à pas de temps séparés (time splitting). Cette grille décentrée calcule les vitesses horizontales du fluide aux faces de la maille et les autres variables au centre de la maille.

Equations du mouvement (Navier-Stokes et approximation hydrostatique) :

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + U \cdot \nabla u = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + f v + A_h \nabla_h^2 u + A_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \\ \frac{\partial v}{\partial t} + U \cdot \nabla v = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} - f u + A_h \nabla_h^2 v + A_v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \\ 0 = \frac{\partial P}{\partial z} + \rho g \end{cases} \quad (1)$$

Equation de continuité :

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

Equations de la conservation de la chaleur et du sel :

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial t} + U \cdot \nabla T = K_h \nabla_h^2 T + K_v \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \\ \frac{\partial S}{\partial t} + U \cdot \nabla S = K_h \nabla_h^2 S + K_v \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} \end{cases} \quad (3)$$

Equation d'état de l'eau de mer :

$$\left\{ \rho = \rho(T, S, z) \right. \quad (4)$$

2.2 Le modèle ROMS

Le modèle ROMS (*Regional Ocean Modeling System*) est un modèle régional à surface libre permettant de simuler une circulation océanique à l'interface air-mer.

2.2.1 Conditions aux limites et frontières

Pour ce faire, il utilise notamment des conditions initiales et aux frontières paramétrées selon des banques de données océanographiques mondiales. L'Atlas que nous avons utilisé se décompose en une banque de données du "World Ocean Atlas 2009" (WOA09) indiquant les conditions de Température, d'oxygène dissous, d'Utilisation Apparente en Oxygène (UAO) et de Salinité aux frontières. Ainsi que de l'"International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set" (ICADS) indiquant tous les autres paramètres à la surface.

2.2.2 Discrétisation et critère CFL

Pour permettre aux paramètres du modèle de respecter la grille de résolution du modèle (éviter d'aller plus ou moins vite que la vitesse imposée ou éviter qu'une particule se retrouve dans deux cases de grille en même temps), le critère établi par M. Courant-Friedrich-Levy qui stipule qu'une particule de fluide ne doit pas parcourir plus d'un pas d'espace au cours d'un pas de temps a été calculé (voir Tableau 2).

Condition de Courant-Friedrich-Levy (CFL) :

$$\Delta t \leq \frac{1}{\sqrt{gH}} \sqrt{\left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right)} \quad (5)$$

2.3 Implémentation et configuration du modèle

Pour la zone choisie, il a été nécessaire d'établir les frontières ouvertes (en contact direct avec d'autres masses d'eau) et les frontières fermées (présence de continent sur l'ensemble de la frontière). La zone choisie pour modéliser la mer d'Irlande est décrite dans le Tableau 1. Cependant, la frontière est ne présentant aucun apport d'eau océanique, elle a été initialisée comme frontière fermée. Les autres frontières ont quant à elles été initialisées comme ouvertes dans le fichier *cppdef.h*.

Afin de s'assurer de la bonne paramétrisation du modèle, il a dans un premier temps été initialisé en basse résolution. Puis une seconde simulation à 1/24° a permis de simuler à plus hautes résolution la dynamique de la mer d'Irlande. Les paramètres du Tableau 2 sont issus du module *make_grid* dans le répertoire *croco_tools* qui permet de définir la grille de calcul en fonction de la résolution choisie (avec l'option *editmak* activée), permettant d'obtenir la bathymétrie de la zone d'étude (voir Figure 1). Pour paramétrer le modèle, les modules *make_ini* pour créer les conditions initiales à $t=0$, *make_forcing* pour initialiser les forçages (tension du vent, flux net de chaleur et de sel en surface, énergie solaire, entrées d'eau douce) et *make_clim*

pour initialiser les conditions climatiques (température, Salinité, transport d'Ekman dû à la circulation induite par le vent) ont été lancés dans matlab. Les résultats obtenus ont permis d'établir les paramètres du 3, où le critère CFL a été calculé avec le script *ad_cfl* puis recalculé à la main. L'ensemble de ces paramètres ont alors pu être inscrit dans le fichier *croco_ini* rassemblant les paramètres initiaux du modèle.

Le paramètre NTIMES permet de réaliser une sauvegarde tous les mois avec Dt indiquant le pas de temps et NDTFAST la vitesse de simulation. D'autre part, le paramètre NWRT génère un fichier "historique" de sauvegarde des données initialisé ici à 3 jours, contrairement au paramètre NRST qui génère un fichier "restart" contenant l'ensemble des NTIMES simulées. Enfin, le paramètre NAVG enregistre les valeurs diagnostiques du modèles moyennées ici tous les trois jours. Avant de lancer le modèle, les fichiers *run_croco.bash* et *slurm_run_croco.sh* ont été modifiés afin d'être correctement utilisés dans le cluster de calcul.

$$t$$

Longitude min-max	2°W – 8°W
Latitude min-max	51°N – 56°N

TABLE 1 – Coordonnées de la zone d'étude du modèle sur la mer d'Irlande

$$t$$

Résolution	Basse (1/8)	Haute (1/24)	Très Haute (1/72)
LLm - MMm - N	47 - 67 - 32	143 - 201 - 32	431 - 606 - 32
Grille associée	$\begin{cases} \Delta x = 14,2 \text{ km} \\ \Delta y = 8,3 \text{ km} \end{cases}$	$\begin{cases} \Delta x = 4,7 \text{ km} \\ \Delta y = 2,8 \text{ km} \end{cases}$	$\begin{cases} \Delta x = 1,55 \text{ km} \\ \Delta y = 0,91 \text{ km} \end{cases}$

TABLE 2 – Paramètres de la grille du modèle selon la résolution testée

$$t$$

Résolution	Condition CFL	Fréquence d'affichage
Basse Résolution	NTIMES - Dt[sec] - NDTFAST	NWRT - NRST - NAVG
	600 - 4320 - 60	60 - 600 - 60
Haute Résolution	NTIMES - Dt[sec] - NDTFAST	NWRT - NRST - NAVG
	2700 - 960 - 60	270 - 2700 - 270
Très Haute Résolution	NTIMES - Dt[sec] - NDTFAST	NWRT - NRST - NAVG
	8640 - 300 - 60	864 - 8640 - 864

TABLE 3 – Paramétrisation temporelle remplissant les conditions CFL (Courant-FriedrichsLevy) de l'équation (5)

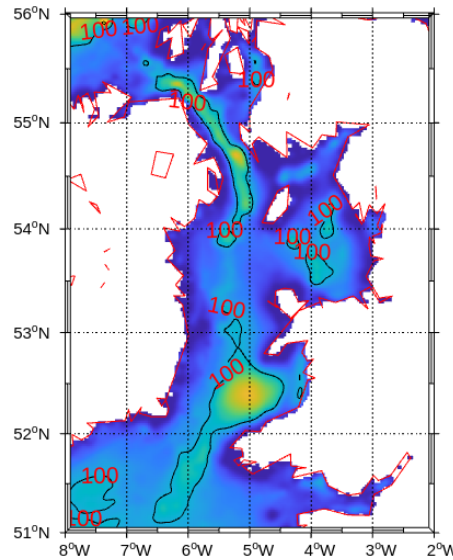


FIGURE 1 – Carte bathymétrique de la zone d'étude pour le modèle à Haute Résolution ($1/24^\circ$) après avoir appliqué le script `make grid` dans le logiciel MATLAB

3 Résultats et Discussion

3.1 Stabilité et diagnostics du modèle

3.1.1 Modèle à Basse Résolution

Après avoir fini la simulation, il est important de tester la robustesse du modèle. De ce fait, en lançant le script `croco_diags` dans matlab, il est possible d'afficher la variation des variables diagnostiques du modèle. D'après la figure 2, on peut voir que le modèle se stabilise assez rapidement autour de la valeur moyenne de chaque variable. Le temps de spin-up des variables est très faible ici puisque même la variable "Volume averaged salt" correspondant à la salinité qui est normalement la dernière à se stabiliser atteint des pics aux mêmes valeurs que les années suivantes. D'autre part, le modèle apparaît comme étant plutôt stable puisque la variation de vitesse verticale reste faible (de l'ordre de $-0,2.10-$).

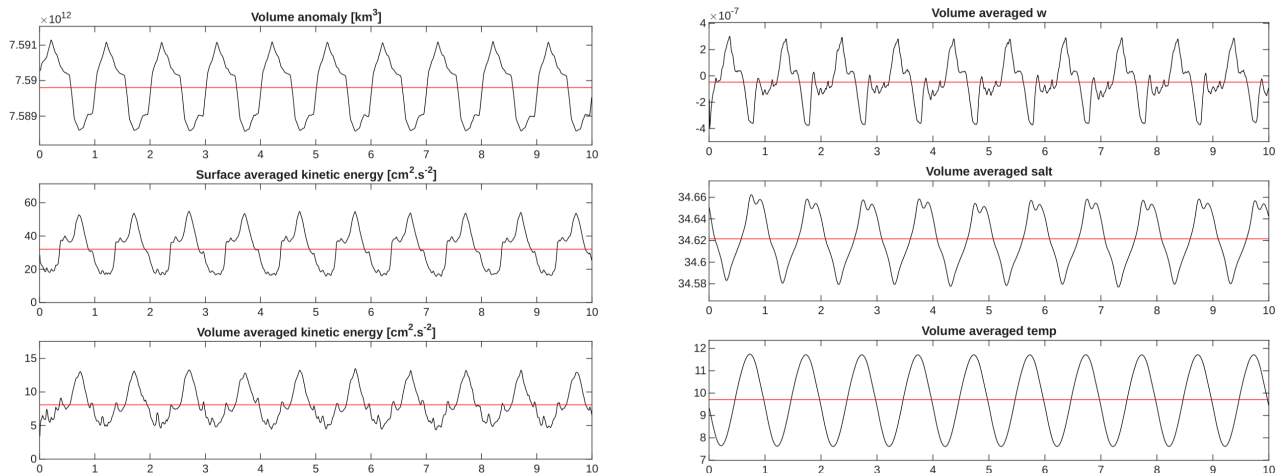


FIGURE 2 – Variables diagnostiques pour une simulation à Basse Résolution pendant 10 ans

3.1.2 Modèle à Haute Résolution

Concernant la simulation à haute résolution, elle présente un temps de spin-up légèrement plus important. En effet, la composante attirée à la Salinité met environ 2 ans et demi pour se stabiliser correctement. D'autre part, l'énergie cinétique du modèle est très faible au lancement du modèle puis tend à se stabiliser dans une dynamique constante à compter de la première année. Par ailleurs, on observe une variation du paramètre w légèrement plus élevée que le modèle à basse résolution (1.10—)

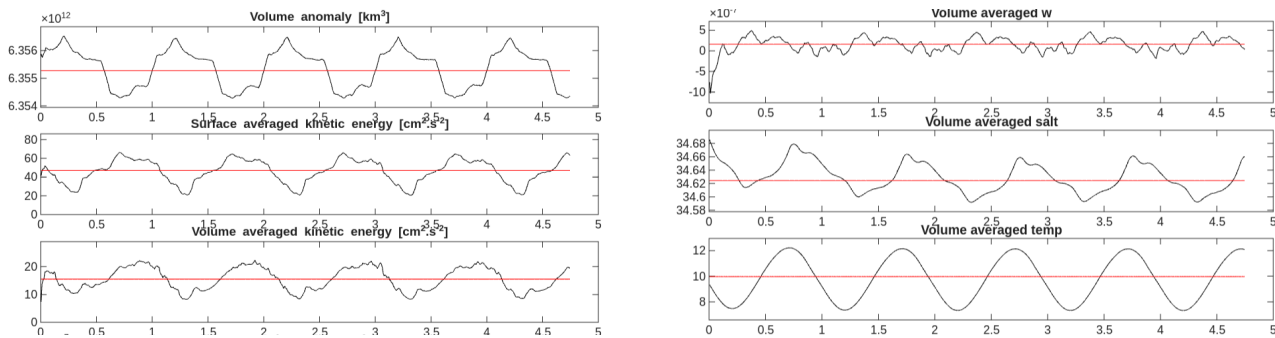


FIGURE 3 – Variables diagnostiques pour une simulation à Haute Résolution pendant 5 ans

3.2 Étude saisonnière des paramètres

D'après la Figure 5, les principales variables représentatives de la circulation thermohaline témoignent de l'importante variabilité inter-saisonnière. En effet, sur les mois de janvier moyennés, la mer d'Irlande présente un gradient de salinité important au niveau de ses frontières sud et nord ainsi que des températures faibles au niveau des premiers mètres à la côte. Ces caractéristiques correspondent en effet à la saison hivernale où la température demeure plus froide sur les continents et les masses d'eau plus chaudes par leur importante capacité calorifique. Durant la saison printanière, la partie sud des continents se réchauffent sur et les masses d'eau se mettent en mouvement avec une entrée de masse d'eau Nord Atlantique au sud de la mer d'Irlande. L'hiver et le printemps sont des saisons avec une importante pluviosité sur les continents, ce qui explique une faible salinité en mer d'Irlande durant ces saisons, additionné aux apports fluviaux. En été, les masses d'eau en surface se réchauffent créant une stratification de la colonne d'eau associée à un déplacement des masses d'eau vers le Nord. Les apports des eaux d'Atlantique sud depuis la mer Celtique sillonnent la côte de la Grande-Bretagne sous l'effet de la force de Coriolis induisant un transport d'Ekman vers la droite. Enfin, la moyenne des mois de décembre met en place une boucle de circulation au sud-est de l'île de Man, ce qui est peu représentatif de la circulation réelle de cette partie de la mer d'Irlande, fortement influencée par les phénomènes de marées sur la côte de la Grande Bretagne (voir Figure 5). On pourra également noter une tendance de circulation de surface guidée davantage par les changements de température que le gradient de Salinité (faible dans cette simulation). Ainsi, la circulation à haute résolution de la mer d'Irlande avec le modèle ROMS sans les effets de marée respecte la boucle de circulation thermohaline et induite par le vent assez fidèlement,

cependant, la présence d'une structure cyclonique dans la partie est est non réaliste sous les effets de marées qui homogénéisent la colonne d'eau au sud-est de l'île de Man.

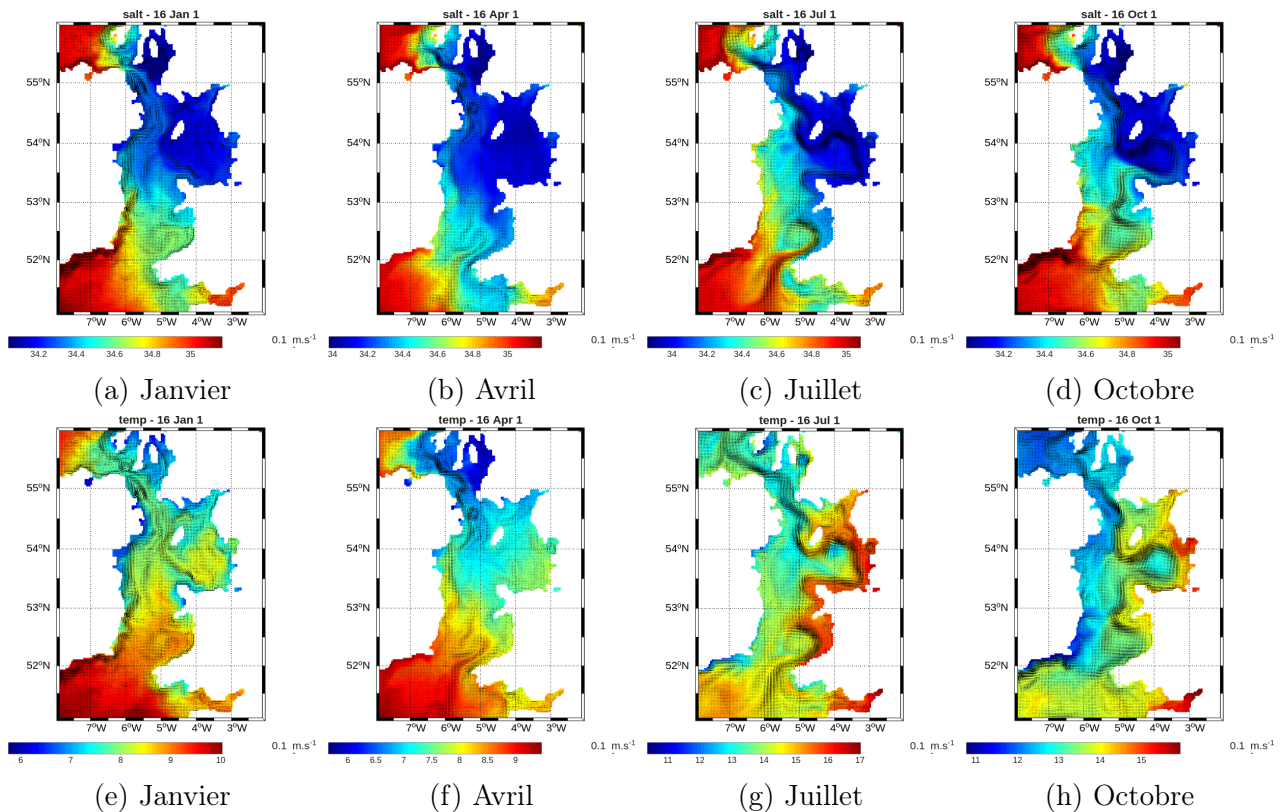


FIGURE 4 – Cartes de la Salinité (PSU) (a,b,c,d) et de la Température Potentielle (°C) (e,f,g,h) moyennées sur 5 ans de simulation à haute résolution pour 4 mois différents

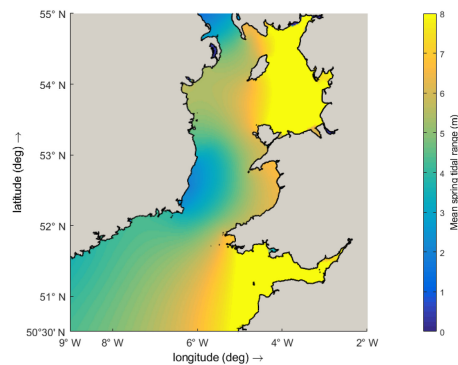


FIGURE 5 – Carte des effets de marées de la mer d'Irlande (K.J Horsburgh et al, 2000)

3.3 Zoom sur la circulation de l'ouest de la mer d'Irlande

Nous allons maintenant nous intéresser à un cas d'étude de modélisation couplé à des déploiements de gliders sur le terrain durant les années 2000 à 2010. Ce n'est autre que le gyre cyclonique de l'ouest de la mer d'Irlande ou "Western Irish Sea Gyre dans la littérature" (WISG). Il apparaît au printemps et reste en été lorsque la colonne d'eau se stratifie davantage en surface et isole la couche d'eau froide profonde. Une thermocline marquée s'établit alors à l'ouest de l'île de Man où les courants de marées sont très inférieurs à 1 m/s (valeur moyenne pour la

majorité de la mer d'Irlande) et avoisinent les 0,3 m/s (Horsburgh K. J. et al., 2003). Dans la figure 7, issue de l'article de 2003, les auteurs présentent des profils de température issus des sorties du modèle ECOMsi, un modèle de courantologie régionale établi par Blumberg en 1994 qui prend en compte la courantologie induite par la marée. Le WISG est formé grâce à plusieurs processus physiques, notamment la présence d'un front de mélange tidal (Simpson, J. H. et al., en 1974) dû à l'interface entre les zones côtières homogénéisées par les marées qui s'atténuent à l'approche de la saison estivale couplé à la stratification progressive des masses d'eau plus au large piégeant une poche d'eau froide au sein du creux bathymétrique entre l'est de l'Irlande et l'île de man. Ici, le modèle ROMS à haute résolution témoigne de cette stratification saisonnière qui débute en mars et permet au gyre de se mettre en place durant le mois d'avril jusqu'en juillet où il reste stable. Puis lors du refroidissement progressif des couches de surface, la thermocline saisonnière devient instable avant de se dissiper complètement de novembre (). Ici, d'après la figure 6, le modèle ROMS suit les tendances des profils de température simulés par le modèle ECOMsi pour le mois de Juillet mais présente des températures moins élevées pour les mois de Mai et Juin plus en profondeur (à 60m).

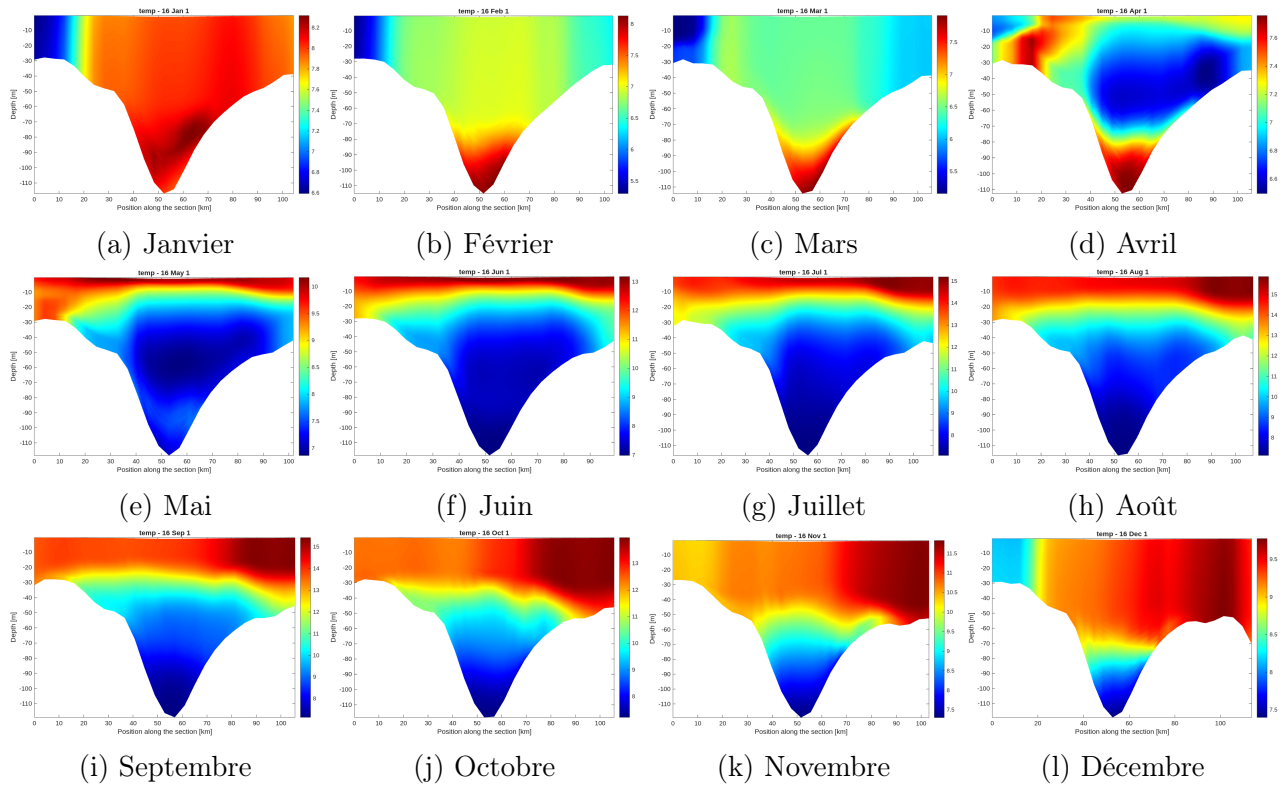


FIGURE 6 – Sections verticales de la température mensuelle (°C) moyennée sur 5 ans de simulation à haute résolution en fonction de la profondeur (m) au sein du gyre cyclonique de l'ouest de la mer d'Irlande

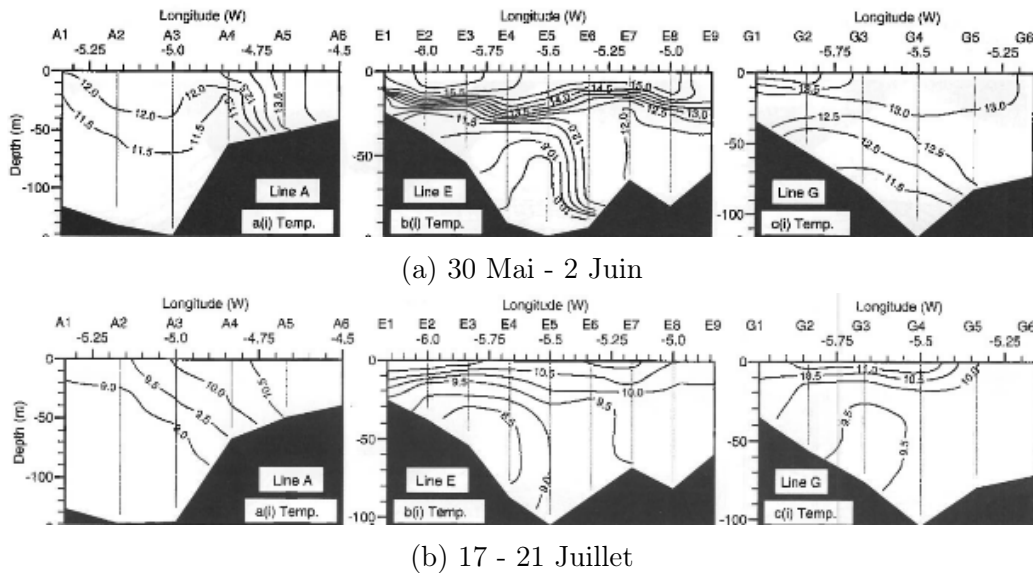


FIGURE 7 – Sections transverses de la Température (°C) durant la saison estivale modélisées dans l'article (Horsburgh, K. J. et al., 2003)

3.4 Influence de la résolution

D'après la figure 8, on constate que la résolution choisie influence grandement les processus physiques représentés. Les Figures (a,e,i) représentent le paramètre de turbulence verticale où l'isobathe à 50m est représenté sur le modèle à haute et très haute résolution. Cet indice nous donne idée du mélange verticale opéré sur les zones de 0-50m et 50-250m et l'on peut voir qu'il est très important proche des côtes à basse résolution, soulignant une homogénéisation intense de la colonne d'eau. Tandis qu'il est à l'inverse très faible au niveau des côtes et a une tendance à diminuer avec la résolution. Cependant, même si à plus haute résolution le modèle tend vers plus de réalisme, ce n'est pourtant pas le cas car les côtes irlandaises et de Grande-Bretagne sont soumises à d'intenses processus de marée qui homogénéisent la colonne d'eau. Les cartes de la vitesse zonale (Figures b,f,j) soulignent l'importance de choisir une résolution fine afin d'appréhender au mieux la circulation plus intense en bord est du bassin océanique à cause de la force de Coriolis déviant les masses d'eau sur la droite dans l'hémisphère Nord (transport d'Ekman). Enfin, les figures (c,g,k) et (d,h,l) tendent à présenter la variation du profil de vitesse méridienne intensifié au niveau de la frontière nord de la mer d'Irlande ainsi que les échange de quantité de sel à sa frontière sud. A basse résolution les échanges de sel sont très mal représentés car la tendance n'est pas respectée. Cependant, on observe une tendance respectée de vitesse méridienne intenses en surface pour l'ensemble des résolutions avec une bien meilleure représentation des processus de mélange inter-couche d'eau en haute résolution.

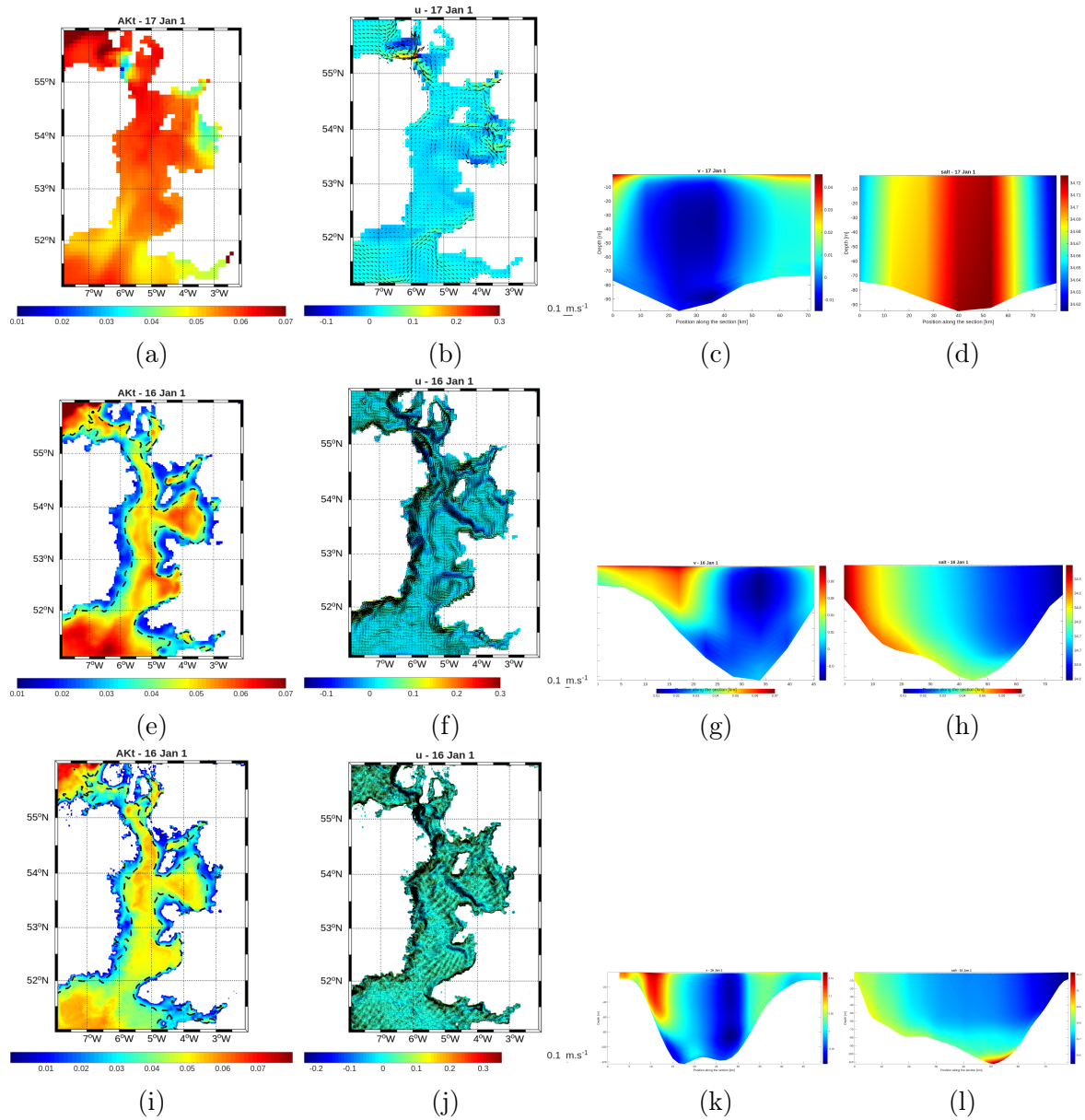


FIGURE 8 – Comparaison des sorties à Basse, Haute et Très Haute Résolution respectivement 1ere, 2e et 3e ligne des paramètres de turbulence verticale (Akt), de vitesse zonale, de profil de vitesse méridienne le long du "North Channel" et de profil de Salinité le long du "St Georges Channel", de gauche à droite, pour les mois de janvier moyennés

4 Conclusions et perspectives

Le modèle de circulation ROMS constitue un atout particulièrement intéressant pour réaliser des simulations à différents degrés de résolution tel qu'il a été utilisé pour la réalisation de ces modèles à haute et basse résolution de la mer d'Irlande. La simplification de la circulation de cette région dans le modèle explique notamment la mise en place d'une cellule de circulation cyclonique dans la partie est de la mer d'Irlande. Cependant, malgré les effets de marée négligés et les apports fluviaux sous-estimés, le modèle à haute résolution parvient à représenter la mise en place du gyre de la partie ouest de la mer d'Irlande selon les profils verticaux de température. Il serait intéressant de réaliser une simulation avec activation du packages comprenant les effets

de marées lors de futures simulations afin de tester la robustesse de la circulation générale et confirmer la présence du gyre cyclonique de la partie ouest.

Références

- [1] “A comprehensive study of the tides around the Welsh coastal waters”. In : *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 254 (2021), p. 107326. ISSN : 0272-7714. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2021.107326>.
- [2] Andrea M. DOGLIOLI. *Notes de Cours et Travaux Dirigés de Modélisation 3D Océanique*. Master d’Océanographie, dernière révision 3 avril 2019. 2019. URL : https://people.mio.osupytheas.fr/doglioli.andrea/Doglioli_NotesCoursTD_Modelisation3DOceanique.pdf.
- [3] K. J. HORSBURGH et A. E. HILL. “A Three-Dimensional Model of Density-Driven Circulation in the Irish Sea”. In : *Journal of Physical Oceanography* 33 (2003), p. 343-365. DOI : 10.1175/1520-0485(2003)033<0343:ATDMOD>2.0.CO;2.
- [4] Kevin J. HORSBURGH et A. Edward HILL. “A Three-Dimensional Model of Density-Driven Circulation in the Irish Sea”. In : *Journal of Physical Oceanography* 33.2 (2003), p. 343-365. DOI : 10.1175/1520-0485(2003)033<0343:ATDMOD>2.0.CO;2. URL : https://journals.ametsoc.org/view/journals/phoc/33/2/1520-0485_2003_033_0343_atdmod_2.0.co_2.xml.
- [5] Swen JULLIEN et al. *CROCO Technical and Numerical Documentation*. Juill. 2026. DOI : 10.5281/zenodo.19453285. URL : <https://doi.org/10.5281/zenodo.19453285>.

A Annexes

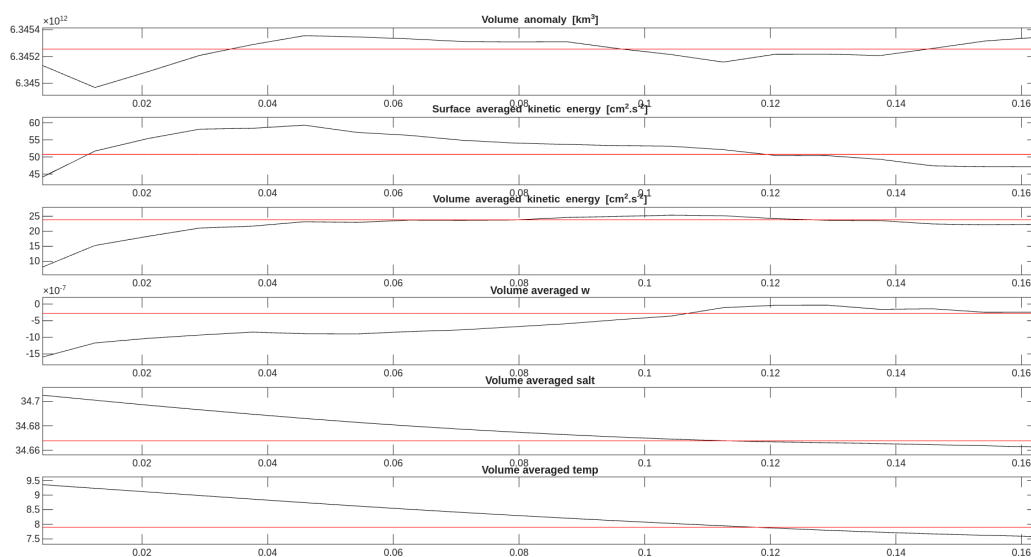


FIGURE 9 – Variables diagnostiques pour une simulation à Très Haute Résolution pendant 2 mois