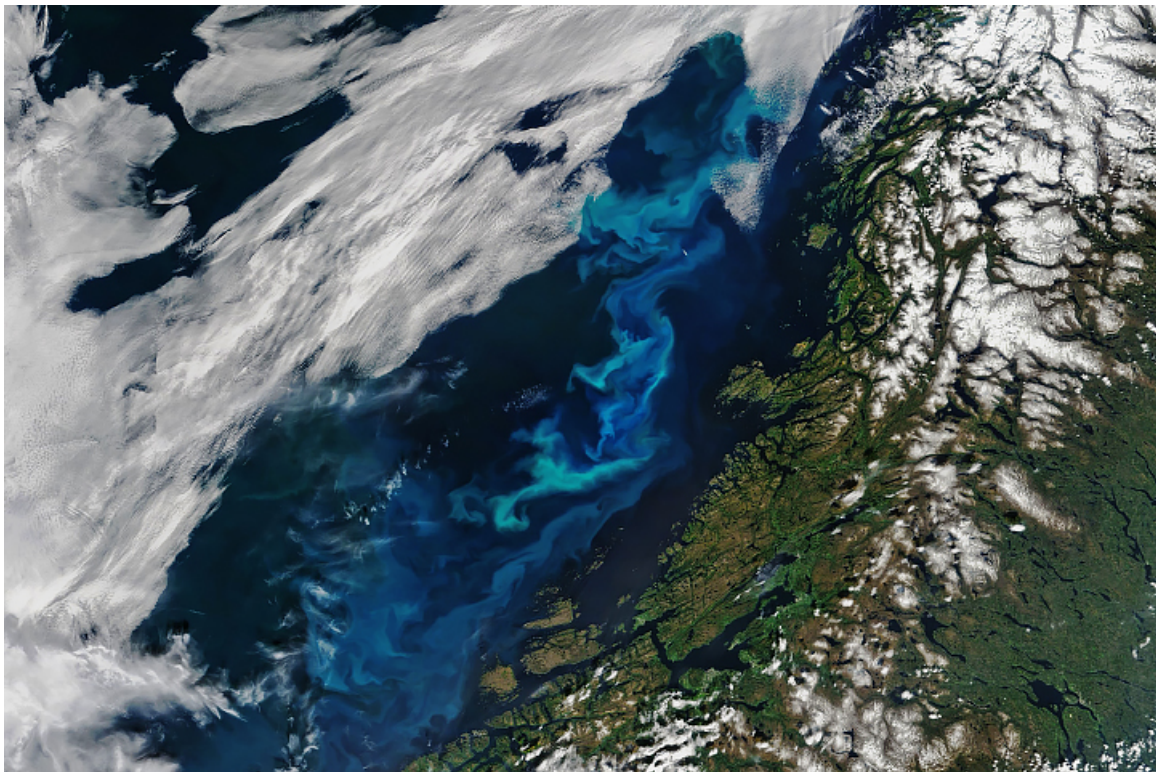


UE OPB205 : MODÉLISATION 3D D'UNE RÉGION OCÉANIQUE

---

# Modélisation de la circulation le long de la côte Ouest Norvégienne

---



M1 Science de la mer - Parcours Physique

Laurina OMS  
Encadrant : Andrea DOGLIOLI

5 mai 2021

## Résumé

Le long de la Norvège s'étale un courant Nord, provenant de la dérive Nord Atlantique. Ici l'intérêt est d'utiliser un modèle qui résout tridimensionnellement les équations du mouvement pour étudier les caractéristiques principales de ce courant et de son eau, pour cette étude le modèle CROCO est choisi. CROCO, s'appuie sur une discrétisation spatio-temporelle, en utilisant les coordonnées sigma pour la verticale et une grille d'Arakawa C pour l'horizontale. Pour le temps la méthode de séparation des pas de temps est utilisée. Ici nous réalisons une modélisation pluriannuelle de dix ans, avec une résolution de 4 mailles par degré. Le spin-up du modèle a été déterminé par son diagnostic, il se stabilise à partir de la troisième année et nos résultats portent tous sur la cinquième année de simulation. Les résultats obtenus s'intéressent à la vitesse horizontale du courant, la bathymétrie, la température, la salinité, et enfin la vorticité. Pour la vitesse du courant on remarque qu'au niveau du resserrement des isobathes le courant s'intensifie mais cette intensification présente des variations saisonnières liées aux vents. La température et la salinité de surface sont aussi soumises à des variations saisonnières, mais globalement on voit une stratification en surface de la température et un déficit en salinité près de la côte (  corréler avec la présence d'une embouchure de fleuve). Enfin, ce modèle nous a permis d'observer un vortex à 71 N qui engendre un mouvement vertical ascendant d'eau. Les résultats ont été comparé avec la littérature et sont cohérents.

## Abstract

Along the Norwegian coast, there is a north current, coming from the North Atlantic drift. Here the interest is to use a model that solves the equations of motion in three dimensions to study the main characteristics of this current and its water, for this study the CROCO model is chosen. CROCO is based on a space-time discretization, using sigma coordinates for the vertical and an Arakawa C grid for the horizontal. For the time the method of separation of time steps is used. Here we perform a multi-year modeling of ten years, with a resolution of 4 meshes per degree. The spin-up of the model was determined by its diagnosis, it stabilizes from the third year and our results are all about the fifth year of simulation. The results obtained are interested in the horizontal speed of the current, the bathymetry, the temperature, the salinity, and finally the vorticity. For the current velocity, we notice that at the level of the isobath constriction, the current intensifies but this intensification presents seasonal variations linked to the winds. The surface temperature and salinity are also subject to seasonal variations, but overall we see a stratification of the surface temperature and a deficit in salinity near the coast correlated with the presence of a river mouth. Finally, this model allowed us to observe a vortex at 71 N that generates a vertical upward movement of water. The results were compared with the literature and are consistent.

Mots-clés : Courant de Norvège, modélisation, modèle CROCO, température, salinité, vitesse, vortex

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
1.1	Présentation de la zone d'étude . . . . .	1
1.2	Les modèles numériques . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Matériels et Méthodes</b>	<b>2</b>
2.1	Le modèle CROCO . . . . .	2
2.1.1	Discrétisation spatiale . . . . .	3
2.1.2	Discrétisation temporelle . . . . .	3
2.2	Implémentation dans la zone d'étude . . . . .	3
2.2.1	Choix de la zone et bathymétrie . . . . .	3
2.2.2	Conditions initiales et aux frontières . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Diagnostic et Résultats</b>	<b>5</b>
3.1	Diagnostic du modèle . . . . .	5
3.2	Influence de la topographie et des régimes de vent sur le NCC . . . . .	5
3.3	Etude de la température et de la salinité . . . . .	7
3.3.1	Température . . . . .	8
3.3.2	Salinité . . . . .	8
3.4	Présence d'un vortex . . . . .	9
<b>4</b>	<b>Conclusion</b>	<b>10</b>



## 1.2 Les modèles numériques

C'est dans la seconde partie du XXe siècle que la modélisation numérique a débuté, en raison de l'amélioration considérable des processus de traitement numérique. Avant cela, la météorologie et l'océanographie étaient surtout descriptives. Ce qui a poussé les scientifiques au progrès numérique, sont les équations primitives de la mécanique des fluides. En effet ces équations permettant de prédire le mouvement d'un fluide, et donc nécessaires pour les prévisions météo, ne possèdent pas de solutions analytiques connues. L'objectif a donc été de concilier expériences physiques et numériques à l'aide d'ordinateur, qui ont vu le jour pour la première fois en 1946. Par la suite la puissance de calcul n'a cessé d'augmenter, et il existe aujourd'hui un grand nombre de modèles météorologiques et océanographiques donnant lieu à un traitement efficace des processus impliqués lors de l'écoulement d'un fluide.

Ici, nous allons nous intéresser à une modélisation tridimensionnelle résolvant numériquement les équations primitives de Navier-Stokes (Eq.1), couplées aux équations de continuité (Eq.2), du sel (Eq.3), de la chaleur (Eq.4) et enfin à l'équation d'état de l'eau de mer (Eq.5).

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

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

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

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

$$\rho = \rho(S, T, p) \quad (5)$$

Pour cela plusieurs hypothèses sont posées :

- Approximation hydrostatique, la troisième composante de la vitesse dans (1) est réduite à l'équilibre entre la force de gravité et le gradient de pression vertical ;
- Hypothèse du mouvement quasi-horizontal, la composante verticale de la force de Coriolis est négligée ;
- Approximation de Boussinesq permettant de remplacer le terme de pression par une constante fixée, cela sous-entend que les variations de pression sont très faibles par rapport à cette constante.

## 2 Matériels et Méthodes

### 2.1 Le modèle CROCO

Parmi les modèles satisfaisant les propriétés émises dans la section précédente, il y a le modèle CROCO (Coastal and Regional Ocean COMMunities model) que nous allons utiliser ici. Ce modèle de prévisions de l'océan, renvoie le calcul d'un grand nombre de variables caractéristiques de l'océan, à l'aide d'une discrétisation spatio-temporelle. De plus, étant un modèle de nouvelle génération, il utilise une approche particulière. Celle-ci concerne les coefficients verticaux turbulents, intervenant dans l'expression des tensions de Reynolds de fermeture turbulente.

En effet, CROCO utilise une paramétrisation dites de K-profil, dont l'objectif est d'obtenir un profil vertical représentatif de ces coefficients.

### 2.1.1 Discrétisation spatiale

Sur l'horizontale, une grille d'Arakawa C est utilisée. Cette grille décalée consiste à calculer les vitesses au niveau des faces de la maille, et les autres variables au niveau du centre de la maille (Figure.2, gauche). Sur la verticale, les coordonnées sigma sont utilisées. Cette approche permet de bien suivre la topographie du fond, de raffiner la résolution verticale et enfin de garder le même nombre de maille sur la verticale (Figure.2, droite).

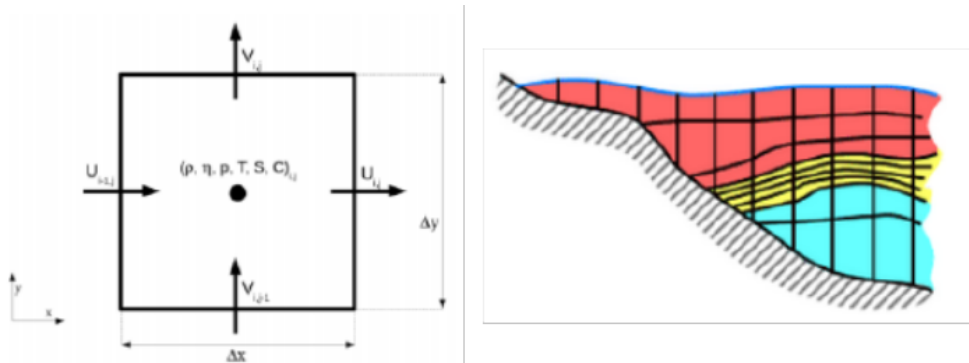


FIGURE 2 – À gauche : Grille d'Arakawa C, à droite : Coordonnées sigma (cours OPB204 M.Baklouti)

$\rho$  = Masse volumique,  $\eta$  = Déformation surface libre,  $p$  = Pression,  $T$  = Température,  $S$  = Salinité,  $C$  = concentration,  $U$  et  $V$  = Vitesses horizontales

### 2.1.2 Discrétisation temporelle

Le modèles CROCO utilise la technique de séparation des pas de temps, qui consiste à différencier les processus rapide liés aux ondes de gravité de surface externe (terme barotrope) et ceux plus lents liés aux ondes internes (terme barocline). Le traitement des ondes externe se fait séparément, car du fait de leur propagation plus rapide elle necessite une résolution temporelle plus fine.

## 2.2 Implémentation dans la zone d'étude

Dans cette section, les initiatives prises pour la préparation du modèle sont décrites. Tout d'abord, les données bathymétriques, climatiques, océanographiques et les boîtes à outils matlab nécessaires, sont chargées via les bases de données de CROCO.

### 2.2.1 Choix de la zone et bathymétrie

La zone d'étude et sa bathymétrie sont représentées ci-dessous (Fig.3). Ces figures sont obtenues à l'aide du script make grid disponible dans la boîte à outils croco tools. Les caractéristiques de la grille sont référées dans la table 1.

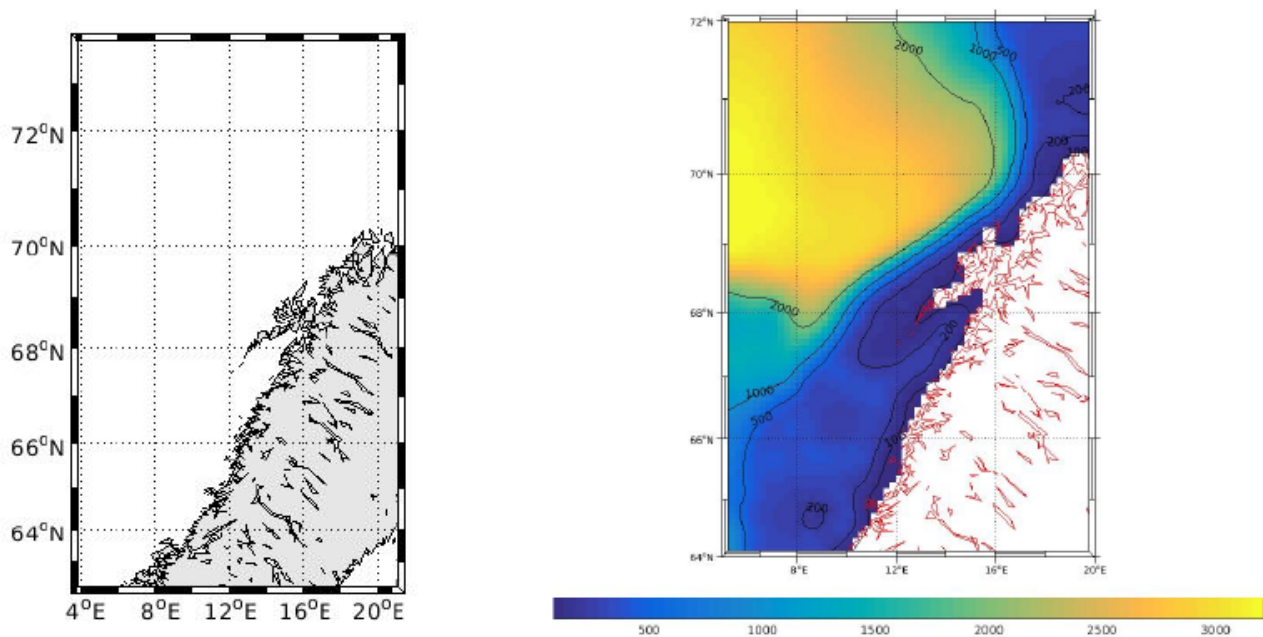


FIGURE 3 – A gauche : Carte géographique de la zone d'étude, à droite : Carte bathymétrique de la zone d'étude (échelle en mètre)

D'après la carte bathymétrique, les isobathes se resserrent à partir de 68°N. Cela signifie que la profondeur diminue rapidement à ce niveau. Le NCC pourrait être affecté par cette raideur de pente.

TABLE 1 – Tableau récapitulatif des caractéristiques de la grille

Caractéristiques			
Longitudes (°E)	Min = 5, Max=20	Nombre de maille en x	59
Latitudes (°N)	Min=64, Max=72	Nombre de maille en y	86
Frontières ouvertes	Nord Sud Est Ouest	Nombre de maille en z	32
Résolution	1/4		

### 2.2.2 Conditions initiales et aux frontières

Afin d'initier le modèle, il est nécessaire d'avoir des conditions initiales et aux frontières. Dans le cas du modèle CROCO ces conditions sont fournis par des paramètres climatologiques (base de données WOA), notamment pour la température et la salinité. De plus, le modèle nécessite aussi des forçages externes (base de données COAD). Par exemple, pour la zone d'étude présentée ici le forçage par le vent est très important car il va influencer, selon la saison, la circulation de surface et les propriétés de la NCW. Un exemple est donné ci-dessous (Fig.4).

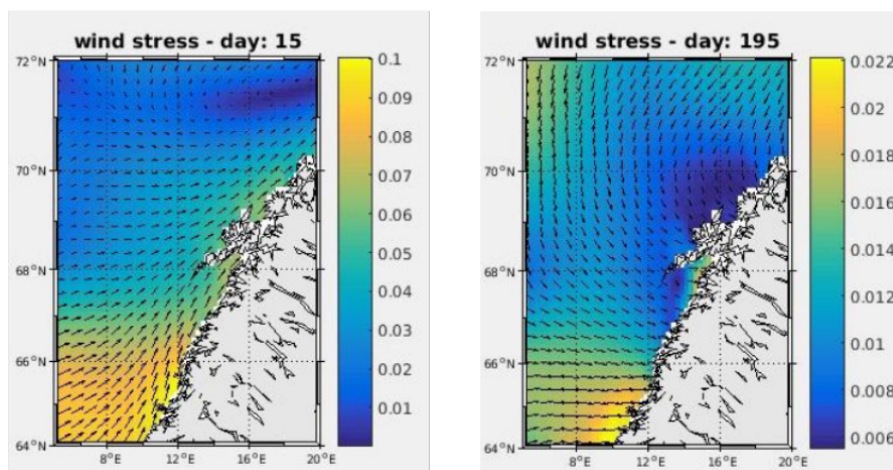


FIGURE 4 – Une représentation du forçage du vent pour une année de référence (à l'aide du script make forcing). À gauche : Typique d'un vent de Sud-Ouest hivernal, à droite : Typique d'un vent de Nord-Est estival

### 3 Diagnostique et Résultats

#### 3.1 Diagnostique du modèle

Avant de s'intéresser aux résultats du modèle, il faut s'assurer de sa stabilité. C'est-à-dire, de vérifier si les perturbations liées au schéma numérique de s'amplifient pas. Pour cela une routine de diagnostique de CROCO est disponible, permettant de visualiser les variations des variables du modèle au cours de la période simulée . C'est ce qui est illustré sur la figure 5. Le paramètre utilisé pour déterminer l'année d'étude sur laquelle porterons les résultats présentés, est la salinité moyennée. Or, au cours des trois premières années de simulation elle présente une diminution puis semble se stabiliser autour de la moyenne. Les oscillations les plus faibles ont lieu lors de la cinquième année. C'est donc celle-ci qui sera utilisée pour les analyses.

#### 3.2 Influence de la topographie et des régimes de vent sur le NCC

D'après Sundby (1984), la topographie du fond influence fortement la distribution des masses d'eau et la configuration des courants. De plus d'après Skagseth et al (2011) la variabilité du NCC est significativement cohérente avec le champ de vent. Nous allons donc voir ici, si dans nos simulations il est possible d'observer cela.

La figure 6 représente respectivement la vitesse horizontale, et la bathymétrie de la zone avec les vecteurs vitesses du courant en fin d'hiver (17 Mars). Or à cette période de l'année, la côte Norvégienne est soumise à des vents du sud-ouest. Il est intéressant ici de noter qu'au niveau du resserrement des isobathes, le courant s'intensifie, avec des vitesses approchant 0.4 m/s. Ces résultats peuvent être comparés avec ceux de J.Skarjhamar et H.Svendsten (2005) qui ont observés à l'aide du modèle SINMOD (4km/maille) de forts écoulements vers le nord le long de la pente du plateau et au-dessus du bord du plateau (Fig.7). Ces résultats sont valables pour trois périodes de l'année différentes (Juin, Octobre, Mars), comme notre modèle la montrés. Mais contrairement à nos attentes, le courant le plus intense fut observé pour le mois d'Octobre. Afin de détecter l'effet du vent il serait intéressant d'étudier le transport des particules au



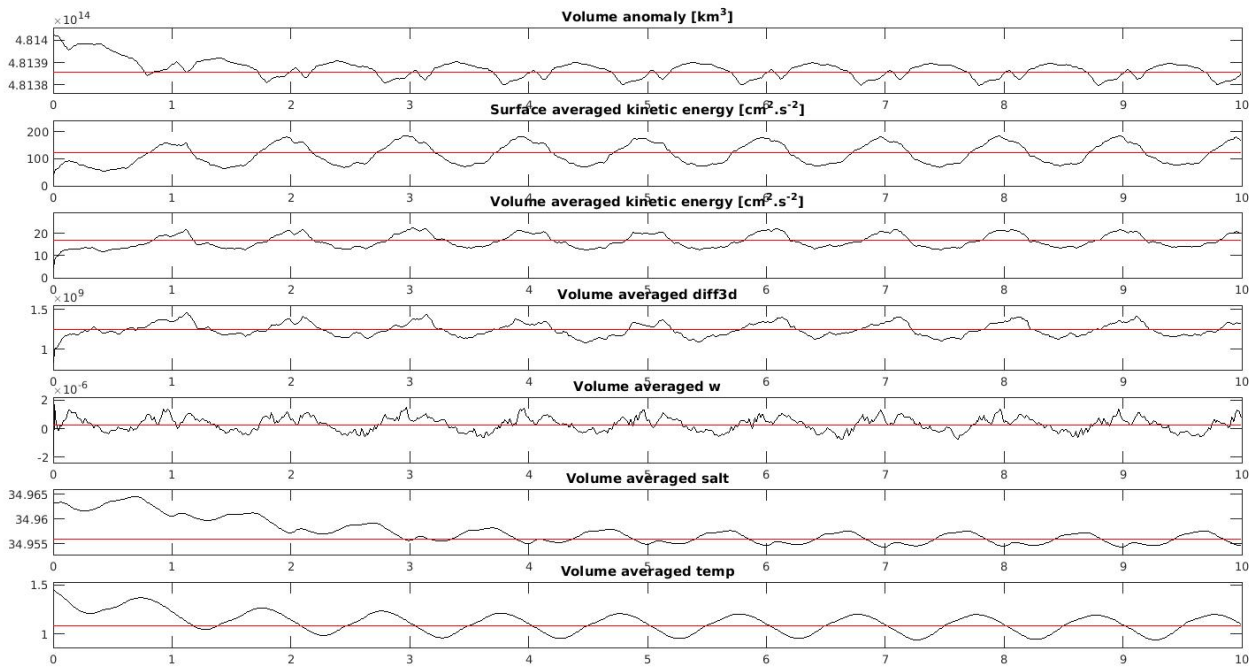


FIGURE 5 – Evolution de différentes variables importantes pour vérifier la stabilité du modèle.

niveau de cette zone, soumis à différents régime de vent. C'est ce qu'on fait J.Skarjhamar et H.Svendsen, leur conclusion sont que les vents du sud forcent les courants vers la côte, tandis que les vents du nord induisent un transport d'Ekman au large et répandent les particules sur le plateau.

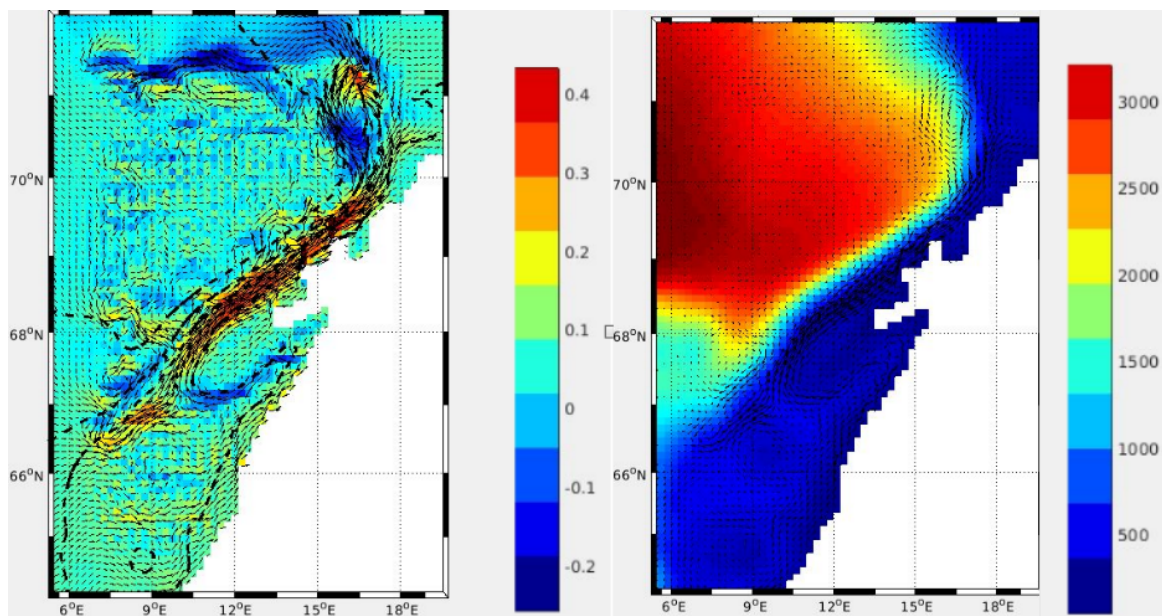


FIGURE 6 – Simulation du 17 Mars de l'année 5. A gauche : Vitesse horizontale  $u$  (m/s) du courant de surface (à -2.5m) avec les isobathes 200, 500, 1000 et 2000, à droite : Bathymétrie de la zone (m).

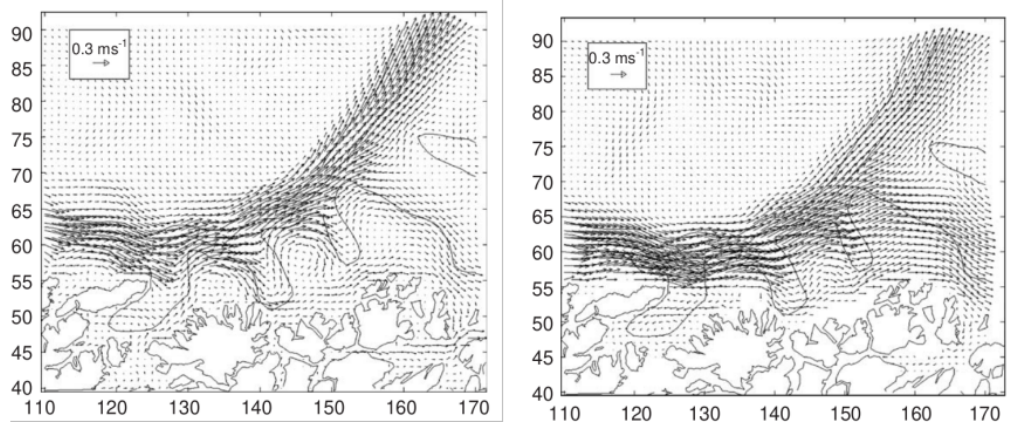


FIGURE 7 – Résultat du modèle SINMOD J.Skarjhamar et H.Svendsen (2005) pour le courant moyen de surface(à 2.5m). A gauche : Mars, à droite : Octobre.

### 3.3 Etude de la température et de la salinité

Le flux d'AW arrivant ici, influence fortement les caractéristiques du NCW et pourrait en plus de l'étude combinée du pilotage topographique, et du comportement du vortex présent dans le NCC (Johannessen et al, 1989) amener à l'étude de l'activité de méso-échelle de ce courant. Et plus particulièrement à l'étude des tourbillons.

Dans cette section, les paramètres salinité et température sont exposés. Ils pourraient informer sur la présence de tourbillons et par conséquent l'influence de l'AW sur l'activité tourbillonnaire. La figure 8 montre la forte influence de l'AW, en effet le front entre l'eau entrante et l'eau environnante est très marqué. On peut aussi noter que autour du circuit principal, il y a des panaches d'eau plus chaude qui s'étalent (Fig.8, gauche). Cela pourrait être lié à des instabilités de méso-échelle. De plus elle montre que dans la zone d'étude la salinité est relativement homogène et ne dépasse pas 35.1 PSU environ (Fig.8, droite)

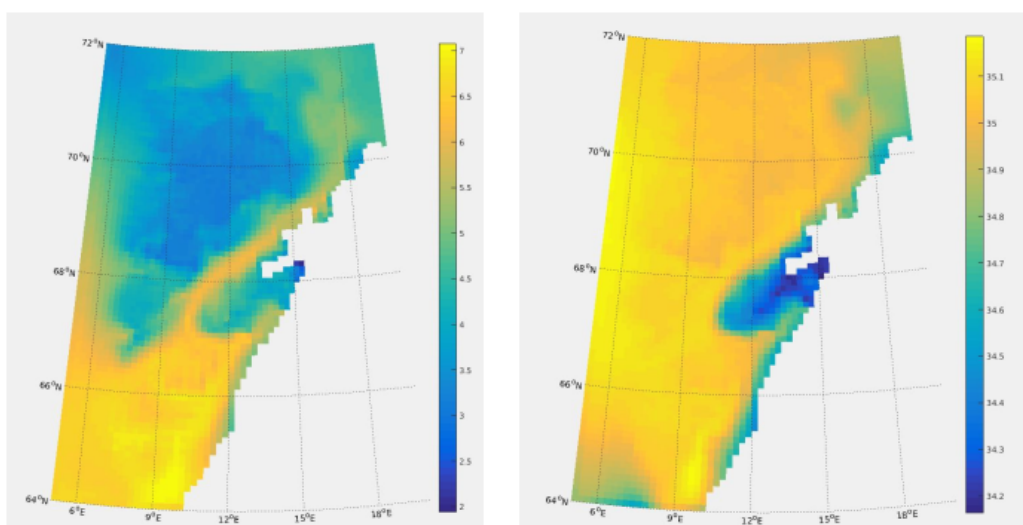


FIGURE 8 – Carte de la zone d'étude représentant la température à gauche et la salinité à droite, de l'eau de surface le 17 Octobre de l'année 5

### 3.3.1 Température

On s'intéresse maintenant à la stratification, notamment en surface de la NCW. D'après les mesures de terrain de J.Skarjhamar et H.Svendsen, en Octobre 2000 les gradients de température entre l'AW et le NCW étaient significatifs. Sur la figure 9 une comparaison entre les résultats de notre modèle et ceux obtenus sur le terrain montre bien cette stratification. Mais, comme le paramètre température est variable avec la saison, il serait judicieux de comparer les différentes sorties du modèle pour chaque saison avec ces données de terrain. Les températures plus chaudes en surface (environ 8°C), apportées par l'AW permettent à la côte norvégienne d'être dénuée de glace toute l'année. Notre modèle donne des températures similaires à celles de terrain, d'environ 8 à 10°C en surface.

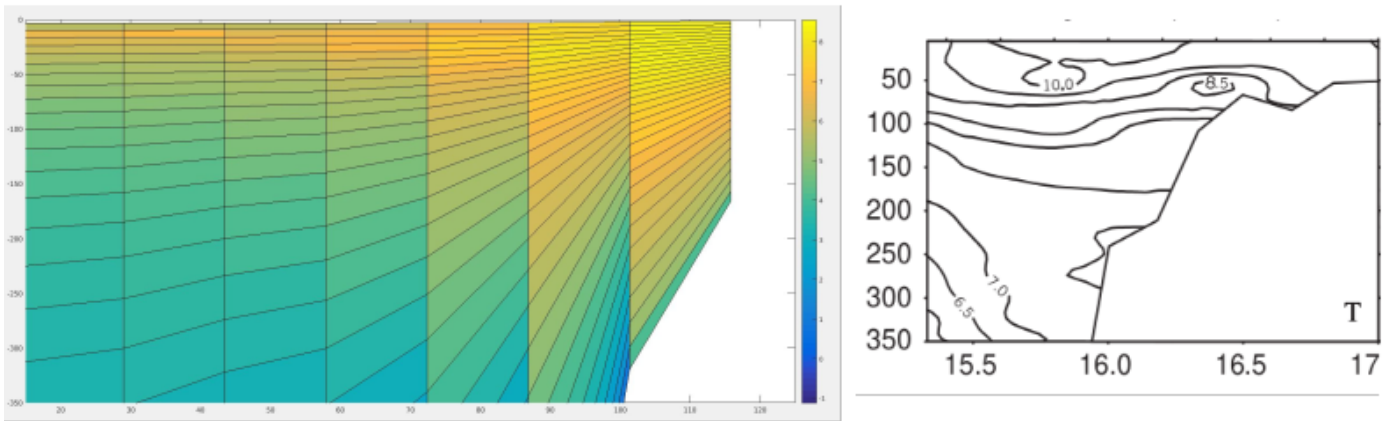


FIGURE 9 – Comparaison des températures à 69.69°N du 17 Octobre entre le modèle CROCO utilisé ici, et les mesures de terrain faites par J.Skarjhamar et H.Svendsen. Echelle verticale = -350m pour les deux figures

### 3.3.2 Salinité

L'étude de la salinité au niveau de l'eau côtière a été montrée dans la littérature que même si l'eau côtière norvégienne est relativement chaude, sa faible salinité empêche efficacement le mélange vertical dans l'AW sous-jacente du fait d'une stabilité accrue entre les deux masses d'eau (Nilsen et al, 2006). D'où la stratification observable tout au long de l'année. D'après J.Skarjhamar et H.Svendsen la faible salinité de la zone peut être liée aux précipitations, ou alors en raison d'un hiver plus doux, la forte stratification mesurée sur le plateau au mois de Mars est le résultat d'événements locaux de fonte des neiges et de ruissellement côtier en Janvier et Février. La figure 10 montre une comparaison de nos résultats avec les mesures de terrain, dans les deux figures on voit une augmentation de la salinité entre 50 et 100 m de profondeur. Et en surface, près de la côte dans les deux figures on observe un déficit en salinité lié très probablement à un rejet d'eau douce continentale.

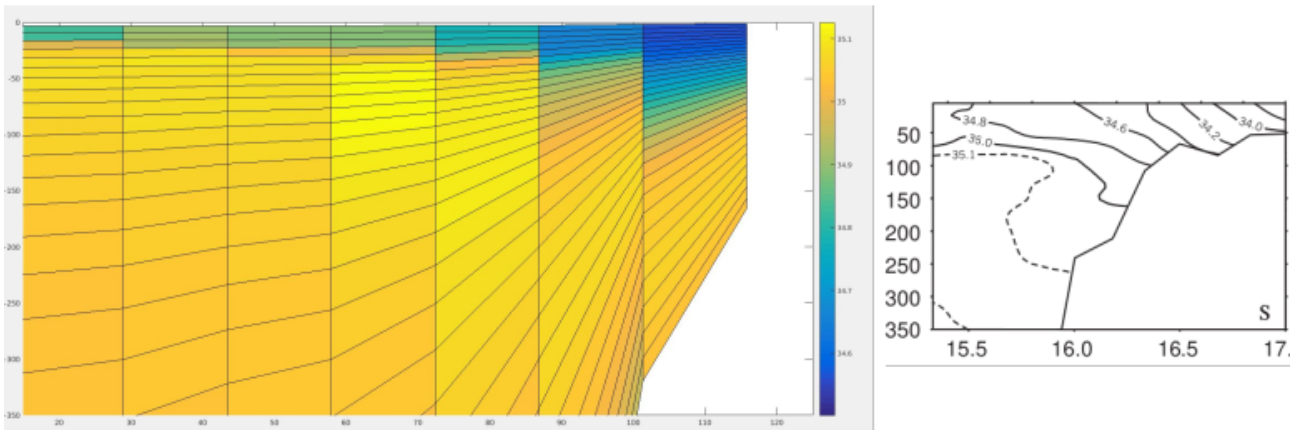


FIGURE 10 – Comparaison de la salinité à 69.69°N du 17 Octobre entre le modèle CROCO utilisé ici, et les mesures de terrains faites par J.Skarjhamar et H.Svendsen. Echelle vertical = -350m pour les deux figures

### 3.4 Présence d'un vortex

La figure 11 indique la présence d'un vortex à environ 71° de latitude. Ce vortex a été observé plusieurs fois, notamment J.Skarjhamar et H.Svendsen l'on étudié à l'aide du modèle SINMOD. Leur conclusion à ce sujet, sont que le vortex est lié à la composante de marée diurne et aux changements de bathymétrie. C'est très probablement un vortex d'AW piégée, en raison de la diminution brutale de la pente du plateau. Sur la figure 12 à gauche, on remarque un léger déficit de salinité vers environ 71° de latitude. Cette observation pourrait être liée à la présence du vortex. En effet, le vortex pourrait créer une remontée des eaux subjacentes qui sont particulièrement dessalées ici. La figure 12 à droite indique en effet un courant vertical vers le haut, il y a donc bien une remontée d'eau au niveau de vortex.

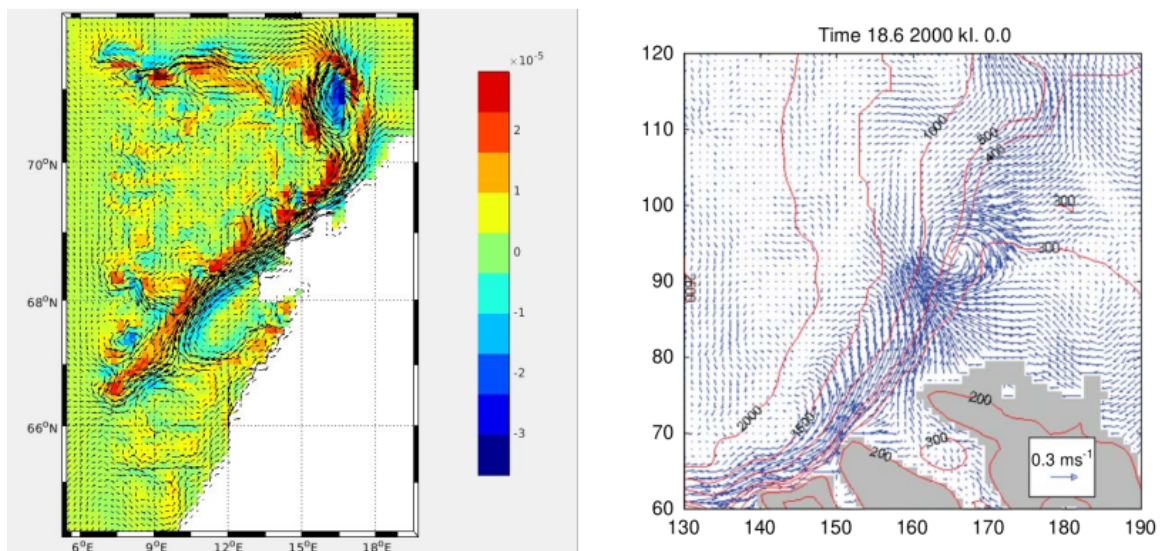


FIGURE 11 – Visualisation de la présence d'un vortex à 71°N. A gauche : Simulation de la vorticité par le modèle CROCO, à droite : Simulation du champ de courant par le modèle SINMOD (J.Skarjhamar et H.Svendsen, 2005)

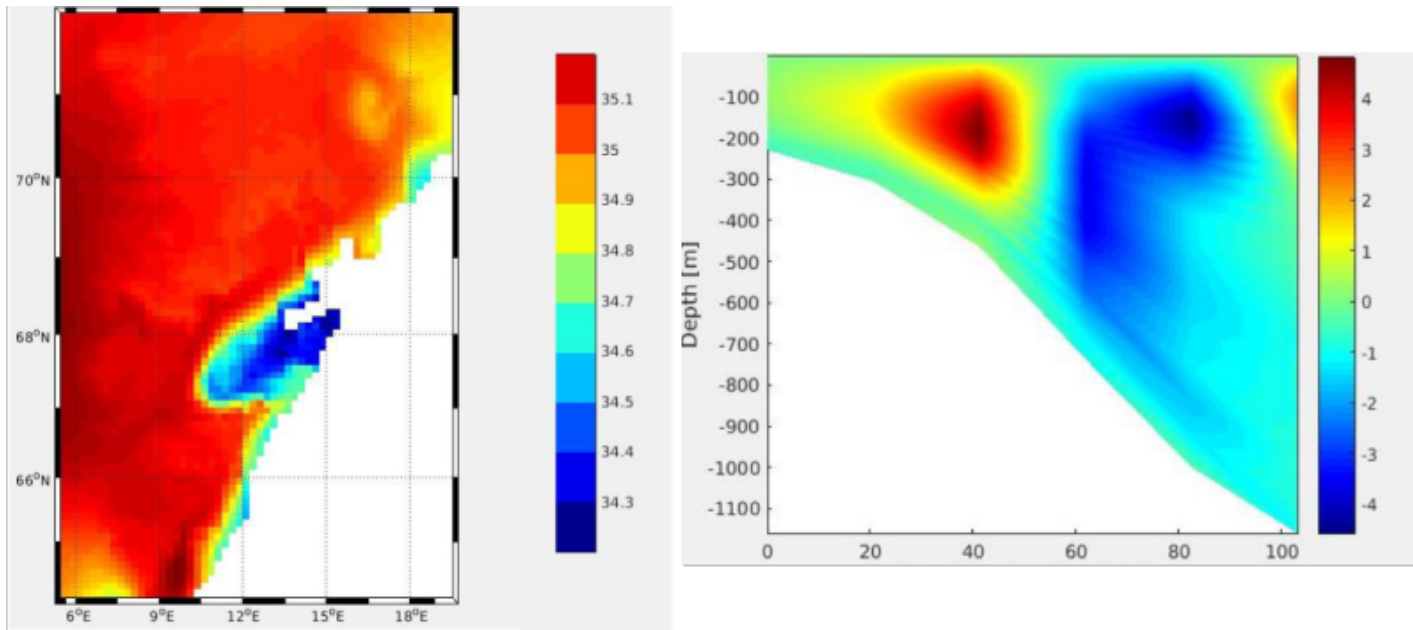


FIGURE 12 – A gauche : Simulation de la salinité (psu), à droite : section à 71°N de la vitesse verticale  $w$  du courant (m/s)

## 4 Conclusion

Pour conclure, le modèle semble à première vue relativement approprié à l'étude du courant côtier de Norvège, si l'on s'intéresse aux vitesses de courants, et aux paramètres tel que la température et la salinité, lié à l'influence du régime de vent et de l'AW. Même si la résolution aurait pu être augmenté au vu de la taille de la zone. On voit par exemple sur les sections verticales que certaines variables sont mal représentées en surface. On aurait aussi pu s'intéresser à la masse volumique afin de voir si sa distribution est en cohérence avec celle de la salinité. En revanche, pour l'étude des activités de petite échelle une résolution plus élevée et une zone d'étude beaucoup plus restreinte serait demandé. Par exemple pour l'étude des puissants maelström de Norvège dont les dimensions sont de l'ordre du mètre, le modèle n'est sûrement pas appropriés. Une étude axée sur l'impact du régime des vents sur ces formations de petite échelle serait intéressante à mener.

De manière général, le modèle nous a permis ici de visualiser, avec des résultats plutôt satisfaisants les caractéristiques principaux du NCC et de la NCW. En effet, nous avons pu observer que le pilotage topographique influence nettement la direction et la vitesse du courant ainsi que la forte incidence sur les paramètres de l'eau, de l'infiltration de l'AW le long des côtes Norvégiennes.

## Références

- [1] Johannessen, J. A., Sandven, S., Lygre, K., Svendsen, E., and Johannessen, O. M. (1989). *Three-dimensional structure of mesoscale eddies in the Norwegian Coastal Current*. Journal of Physical Oceanography, 19(1), 3-19.
- [2] Sundby, S. (1984). *Influence of bottom topography on the circulation at the continental shelf off northern Norway*.
- [3] Skarðhamar, J., and Svendsen, H. (2005). *Circulation and shelf-ocean interaction off North Norway*. Continental Shelf Research, 25(12-13), 1541-1560.
- [4] Nilsen, J. E. Ø., and Falck, E. (2006). *Variations of mixed layer properties in the Norwegian Sea for the period 1948–1999*. Progress in Oceanography, 70(1), 58-90.
- [5] Skagseth, Ø., Drinkwater, K. F., and Terrile, E. (2011). *Wind-and buoyancy-induced transport of the Norwegian Coastal Current in the Barents Sea*. Journal of Geophysical Research : Oceans, 116(C8).
- [6] Sætre, R., and Ljøen, R. (1972). *The Norwegian coastal current*.