

Etudes du courant Oyashio par le modèle ROMS

Modélisation régionale 3D

GIANNESINI Laëtitia

4/1/2010

Résumé

Durant le cours d'OPCB 217, nous avons effectué une simulation régionale tridimensionnelle grâce au modèle numérique ROMS (Regional Ocean Modeling System). Ce rapport présente les résultats obtenus pour le courant Oyashio. Les eaux de courant Oyashio sont froides et riches en éléments nutritifs. D'après *T.Kono, M.Sato, 2010*, elles pourraient être impliquées dans le bloom phytoplanctonique printanier d'Hokkaido. En effet, les résultats montrent que durant le mois de Mars, des tourbillons d'eaux froides se forment et descendent le long de l'arc insulaire des Kouriles jusqu'à atteindre le Sud d'Hokkaido. Il se pourrait donc que le bloom phytoplanctonique d'Hokkaido soit le résultat du déplacement de ces tourbillons d'eau froide.

Abstract

During the OPCB 217 class, we did a regional three-dimensional simulation, with the numerical model ROMS (Regional Ocean Modeling System). This report presents results obtained for the Oyashio current. Current Oyashio waters are cold and nutrient-rich. According to *T.Kono, M.Sato, 2010*, they may be involved in the phytoplankton spring bloom of Hokkaido. Indeed, results show that during March, cold-water eddies form and go down along the Kuril island arc to the South Hokkaido. Therefore it is possible that the Hokkaido phytoplankton bloom is the result of the cold-water eddies moving.

SOMMAIRE

1. Introduction.....	4
2. Matériel et méthode.....	5
2.1. Zone et courant étudié.....	5
2.2. La modélisation numérique en océanographie.....	6
2.2.1. Hypothèses simplificatrices.....	6
2.2.2. Equations primitives.....	7
2.2.3. La fermeture turbulente.....	8
2.3. ROMS.....	8
2.3.1. Conditions initiales, conditions aux limites.....	8
2.3.2. Discrétisation.....	9
2.4. Implémentation du modèle.....	10
3. Résultats.....	13
3.1. Diagnostique du modèle.....	13
3.2. Température de surface au mois de Février de la dixième année.....	14
3.3. Température de surface au mois de Mars de la dixième année....	15
3.4. Température de surface au mois d’Avril de la dixième année.....	16
3.5. Section et profil verticaux de température des tourbillons.....	17
4. Discussion.....	19
5. Conclusion.....	21
Bibliographie.....	22

1. Introduction

La modélisation des courants océaniques, grâce à des outils numériques, débute au XXe siècle. Les équations qu'elle utilise sont très proches des modèles de prévisions météorologiques, en raison de la similarité existante entre les équations du mouvement atmosphérique et celles du mouvement océanique. Leur complexité, bien que simplifiée par de nombreuses hypothèses, nécessite un outil de calcul puissant afin de résoudre et de représenter avec la meilleure résolution possible le fonctionnement et les échanges océaniques.

Le courant Oyashio est un courant froid (transporte des eaux Arctiques) (5 °C en hiver, 10 à 15 °C en été) du Pacifique occidental, s'écoulant depuis les mers de Béring et d'Okhotsk en longeant les arcs insulaires des Kouriles et du Japon jusqu'au front hydrologique tempéré (latitude de Tokyo). Sa collision avec le courant Kuroshio forme le courant du Pacifique Nord, et des tourbillons où le phytoplancton se concentre et permet une visualisation du mouvement océanique (Fig.1). Les eaux du courant Oyashio sont extrêmement riches en éléments nutritifs et sont ainsi exploitées par les pêcheries.

Cette étude envisage de relier l'écoulement du courant Oyashio et la formation de blooms phytoplanctoniques printaniers.

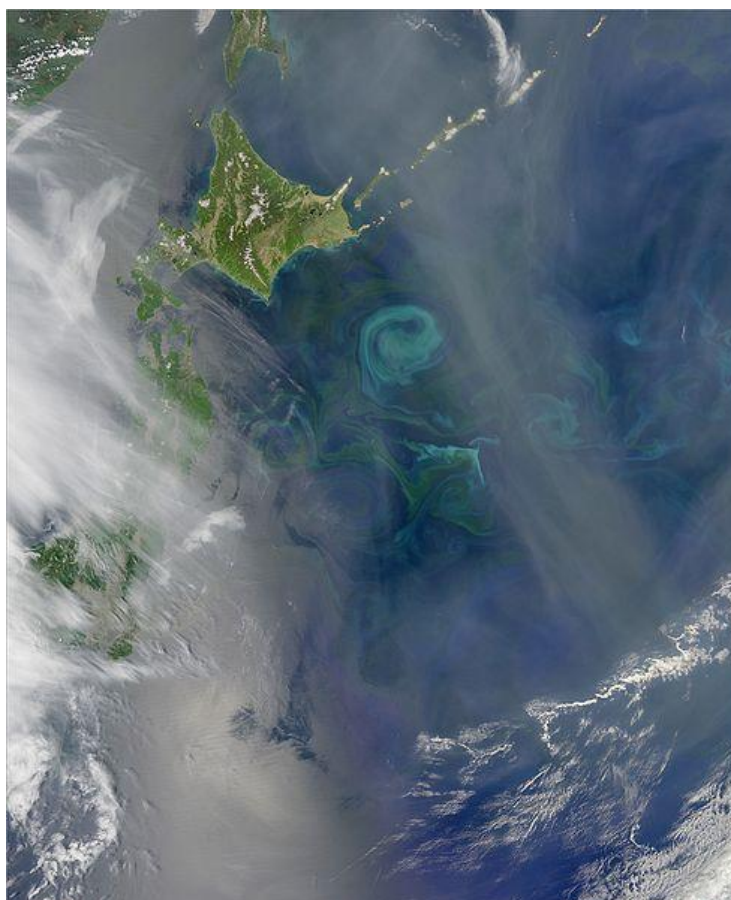
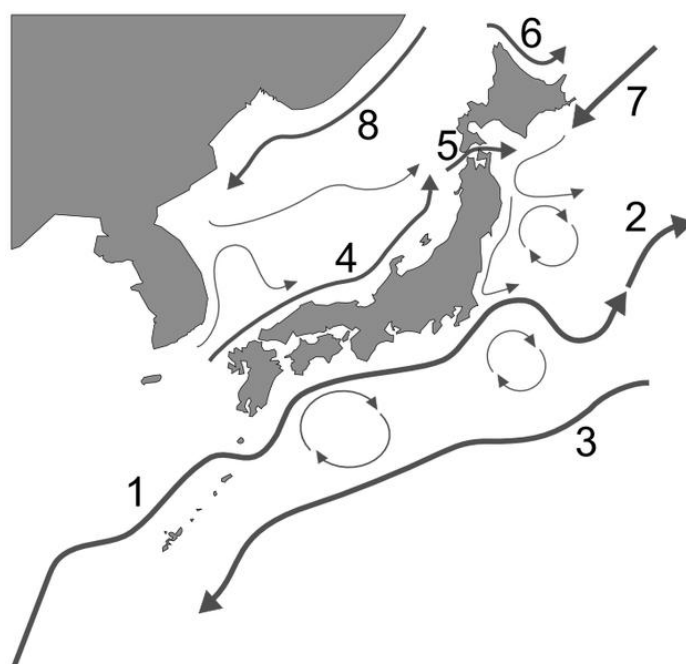


Fig.1 Bloom phytoplanctonique permettant la visualisation d'un tourbillon. Image tirée de *Wikipédia*.

2. Matériel et méthode

2.1. Zone et courant étudié

L'archipel japonais connaît une alternance des vents et des courants marins qui influe sur son climat (Fig. 2). En hiver, les vents sibériens soufflent sur la mer du Japon et provoquent d'énormes chutes de neige sur la côte occidentale de l'archipel. À l'inverse, la côte orientale est protégée par la chaîne des Alpes japonaises et connaît des hivers secs et ensoleillés, avec des températures tiédies par l'effet du courant chaud Kuroshio au sud-est. En été, le courant froid Oyashio abaisse les températures sur les côtes du nord ouest.



1. Kuroshio 2. Kuroshio extension 3. Kuroshio countercurrent 4. The Tsushima Current 5. The Tsugaru Current
6. The Sōya Current 7. **Oyashio** 8. The Liman Current

Fig. 2 Les différents courants du Japon. Figure tirée de *Wikipédia*.

La région Oyashio est dominée par les eaux froides d'Oyashio (OYW) et limitée au sud par le Front Oyashio (Fig. 3). On peut remarquer l'abondance de tourbillons.

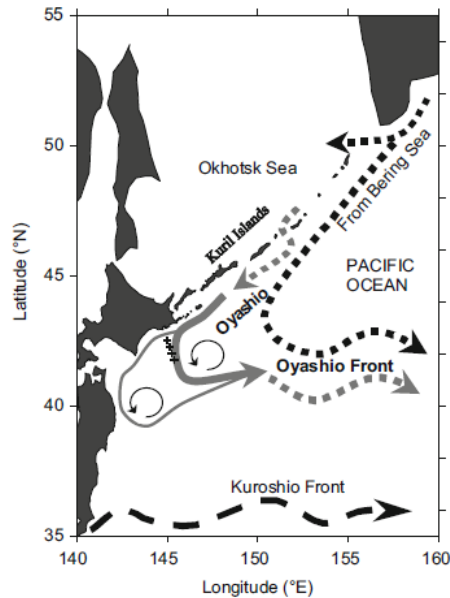


Fig.3 Représentation des différents fronts, d'après Tokihiro Kono et Masatoshi Sato, 2010.

2.2. La modélisation numérique en océanographie

Les modèles de circulation régionale océanique sont des outils intéressants à de nombreux égards : courantologie, études d'impacts anthropiques (transports sédimentaires, pollutions...), biogéochimie et écosystèmes marins, variabilité climatique... Le développement de tels outils requiert l'association de compétences géophysiques, mathématiques et numériques. Un certain nombre de difficultés actuelles sont notamment liées à la problématique du couplage : conditions de frontière ouverte, interactions dans des modèles multi-résolutions et multi-physiques, couplage océan-atmosphère, assimilation de données dans les systèmes couplés...

Les modèles numériques comme ROMS, SYMPHONIE et POM, sont des modèles tridimensionnels se basant sur la résolution d'un certain nombre d'équations dites primitives. Ces équations comportent des termes dits de « fermeture de la turbulence ». Elles sont ensuite discrétisées en utilisant une maille de calcul de type Arakawa-C. D'autre part, des hypothèses permettent de simplifier en partie la résolution de ces équations.

2.2.1. Hypothèses simplificatrices

- Approximation de Boussinesq

Dans une masse d'eau océanique, il y a peu de variation verticale de la densité dans le temps. Ainsi, la densité est supposée constante et une densité de référence ρ_0 est alors posée. Cependant, la variation horizontale de la densité n'est pas négligeable. Ainsi la masse volumique s'écrit :

$$\rho \equiv \rho_0 + \rho'(x, y, z, t) \text{ avec } \rho' \ll \rho_0 \quad O(10^{-3})$$

- Approximation hydrostatique

L'hypothèse clef de l'approximation hydrostatique est que les variations horizontales de l'océan priment sur les variations verticales, qui sont donc négligeables. Cette approximation est valable à moyenne et grande échelle.

- Incompressibilité

On suppose que la masse volumique de la masse ne dépend pas de la pression exercée par l'épaisseur de la colonne d'eau.

2.2.2. Equations primitives

Les équations primitives sont composées des équations de Navier Stokes, de conservation de la température et de la salinité, et de l'équation d'état de l'eau de mer proposée par l'UNESCO.

- Equation du mouvement :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + U \cdot \nabla u - f_v = \frac{-1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + A_h \nabla_h^2 u + A_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + U \cdot \nabla v + f_v = \frac{-1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} + A_h \nabla_h^2 v + A_v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}$$

- Equation de continuité :

$$\text{div} U = \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

- Equation de conservation de la température :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} T = - \frac{\partial (\overline{T' u'})}{\partial x} - \frac{\partial (\overline{T' v'})}{\partial y} - \frac{\partial (\overline{T' w'})}{\partial z} + \frac{H_c}{\rho_0 C_p} \frac{\partial I}{\partial z}$$

- Equation de conservation de la salinité :

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} S = - \frac{\partial (\overline{S' u'})}{\partial x} - \frac{\partial (\overline{S' v'})}{\partial y} - \frac{\partial (\overline{S' w'})}{\partial z}$$

- Equation d'état de l'eau de mer :

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

2.2.3. La fermeture turbulente

Coefficients verticaux de viscosité turbulente	
SYMPHONIE	<ul style="list-style-type: none">• Approche par l'énergie cinétique (Q)
POM	<ul style="list-style-type: none">• Approche par l'énergie cinétique (Q) et par la longueur du mélange (L)
ROMS	<ul style="list-style-type: none">• Mellor et Yamada, 1974 : Approche par l'énergie cinétique• Pacanowski et Philander, 1981 : Approche K-Profil• Large et al., 1994 : Approche KPP (K-Profil Parameterization)

Tab.1

Coefficients horizontaux de viscosité turbulente	
SYMPHONIE	<ul style="list-style-type: none">• Varie avec la taille de la maille de la grille
POM	<ul style="list-style-type: none">• Varie avec le gradient de vitesse
ROMS	<ul style="list-style-type: none">• Turbulence horizontale isotrope

Tab.2

2.3. ROMS

ROMS (Regional Ocean Modeling System) permet le calcul de nombreuses variables physique de l'océan comme la température, la salinité, les vitesses de déplacement... Le modèle prend en compte des phénomènes physiques, comme le mécanisme de forçage et de dissipation, qui agissent sur la circulation des masses d'eau soit directement, soit dans les conditions initiales ou aux limites. L'horizontale et la verticale utilisent des schémas aux différences finies sur des grilles décalées. Sur l'horizontale, la grille C d'Arakawa est adoptée. La discrétisation temporelle utilise une méthode de séparation explicite des modes barotropes rapides et baroclines lents : un modèle 2D est couplé au modèle 3D afin de considérer séparément les ondes de gravité de surface et les ondes internes.

2.3.1. Conditions initiales, conditions aux limites

- Conditions initiales

Comme tout modèle mathématique, ROMS nécessite des conditions initiales prédéfinies. Le modèle peut récupérer dans deux bases de données différentes les conditions météorologiques d'une année type. The International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set Project (ICOADS) comporte les données de forçage en surface, tandis

que World Ocean Atlas (WOA) comporte les données de température, de salinité. Ce dernier permet, avec la méthode dynamique, de calculer les champs de courant 3D.

- Conditions aux limites

Les conditions aux limites sont nécessaires et doivent également être paramétrées par l'utilisateur. Elles concernent la surface, le fond et les frontières latérales (fermées ou ouvertes sur l'océan).

- ✓ A la surface (on a $z = \xi$) :

$$\left\{ \begin{array}{l} A_z \frac{\partial u}{\partial z} = \tau_{s_x} \\ A_z \frac{\partial v}{\partial z} = \tau_{s_y} \end{array} \right\} \quad \frac{\partial \xi}{\partial z} = w \quad \left\{ \begin{array}{l} A_z^T \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{Q}{\rho_0 C_p} \\ A_z^S \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{S(E-P)}{\rho_0} \end{array} \right\}$$

Tension de surface (vent)

Bilan de sel

- ✓ Au fond (on a $z = -H$)

$$\left\{ \begin{array}{l} A_z \frac{\partial u}{\partial z} = \tau_{b_x} \\ A_z \frac{\partial v}{\partial z} = \tau_{b_y} \end{array} \right\} \quad w = -\vec{u} \cdot \nabla H \quad \left\{ \begin{array}{l} A_z^T \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \\ A_z^S \frac{\partial S}{\partial z} = 0 \end{array} \right\}$$

Tension de cisaillement

2.3.2. Discrétisation

- Discrétisation spatiale

- ✓ Discrétisation horizontale

Sur l'horizontale, le modèle s'écrit en coordonnées régulières sur une grille d'Arakawa-C décalée.

- ✓ Discrétisation verticale

Sur la verticale, le modèle s'écrit en coordonnées sigma, permettant l'obtention du même nombre de maille, et ce quelque soit la bathymétrie.

- Discrétisation temporelle

La discrétisation temporelle sépare les modes barotropes et baroclines. Elle est rendue possible par le *time splitting* (séparation du pas de temps).

Le choix est effectué sur la base des critères de stabilité CFL (Courant-Friedrichs-Levy) qui permettent qu'un processus ne se propage pas de plus d'une maille à chaque pas de temps. Ils relient résolution spatiale et temporelle.

2.4. Implémentation du modèle

Dans un premier temps, l'utilisateur doit définir son domaine d'étude grâce au script Matlab *ad_findgeocoord.m*, permettant de sélectionner une zone géographique. Pour le courant Oyashio, les coordonnées du domaine sont définies dans le Tab.3.

Coordonnées de la zone d'étude Oyashio (en degré)	
Lon. Min	139
Lon. Max	169
Lat. Min	33
Lat. Max	55

Tab.3 Coordonnées zone géographique

Les coordonnées et la résolution doivent ensuite être modifiées dans le fichier *romstools_param.m*. Ici, la résolution est de 1/3. De même, les frontières doivent être fermées correctement. Dans cette simulation, les frontières Ouest et Nord Est sont fermées.

Par ensuite le biais du script *make_grid.m*, la grille se crée et les critères de stabilité CFL peuvent alors être calculés (Tab.4).

Taille de la grille	
LLm	299
MMm	311
Pas spatial	
Dxmin / Dxmax	6.3672 km / 9.3204 km
Dymin / Dymax	6.3809 km / 9.3159 km

Tab.4

On obtient ainsi une figure de bathymétrie (Fig. 4).

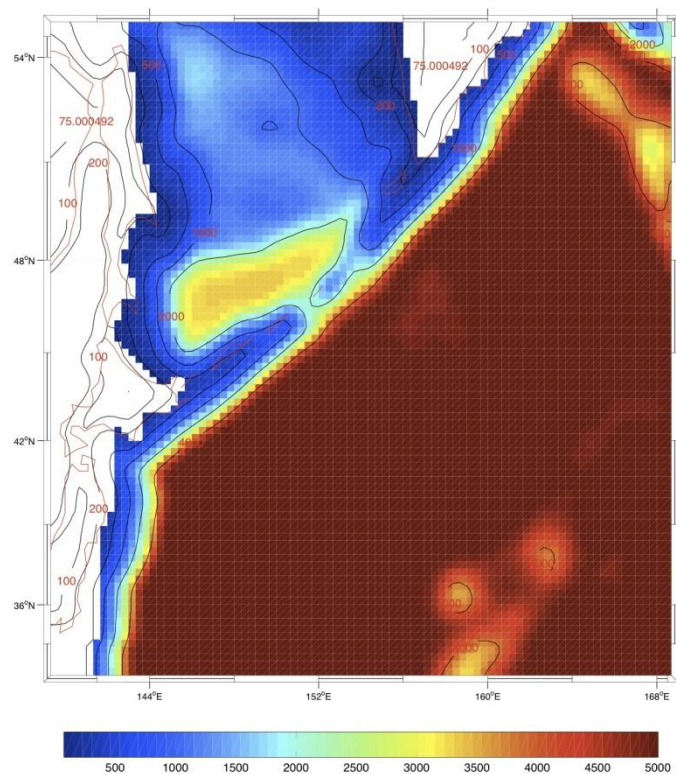


Fig.4 Bathymétrie

De même, l'utilisateur exécute les scripts *make_forcing.m* (la vitesse et l'orientation du vent, le flux d'eau douce, la température de surface, la salinité de surface) (Fig. 5) et *make_clim.m* (les courants, la salinité et la température en profondeur) (Fig. 6) afin de calculer les conditions initiales et les forçages.

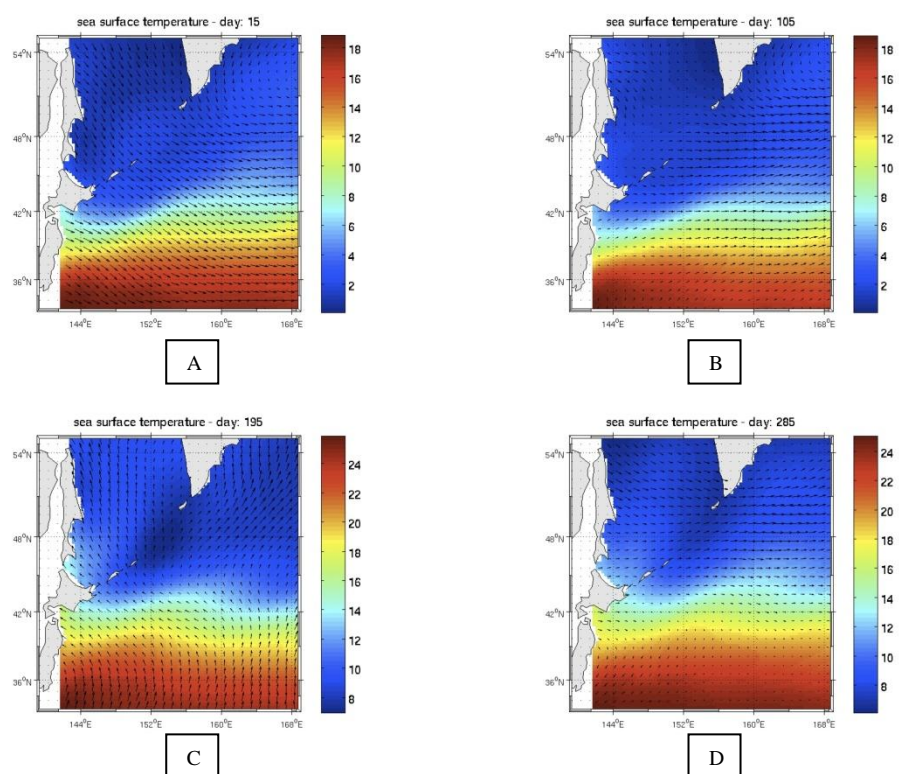


Fig.5 A, B, C, D : Exemple de figure obtenue avec *make_forcing.m* : Température de l'eau en surface

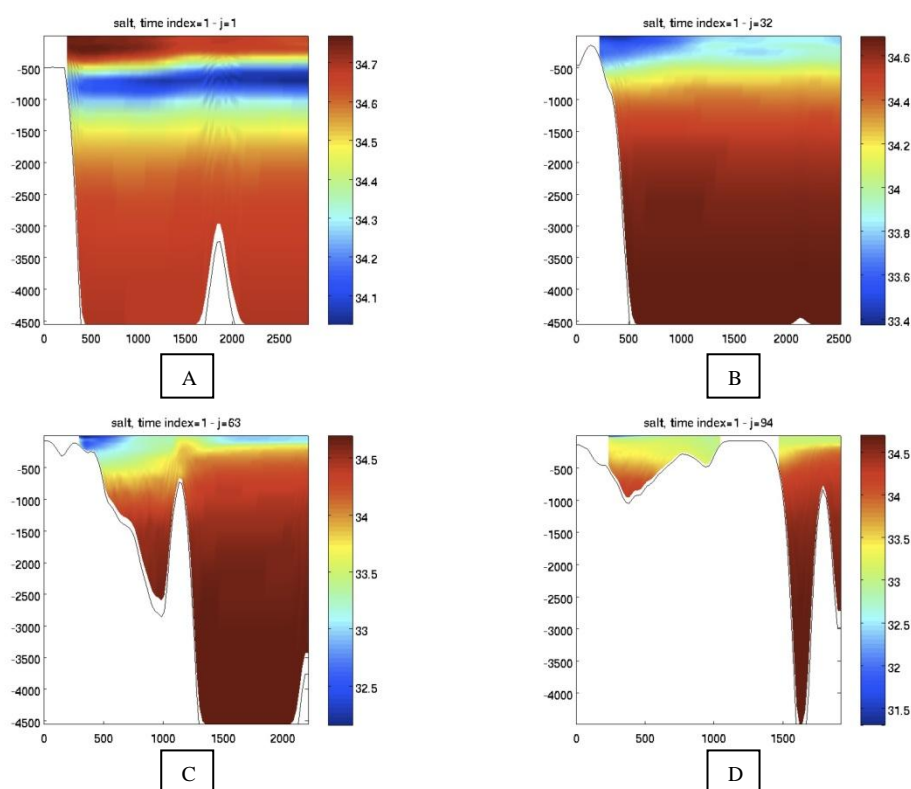


Fig.6 A, B, C D : Exemple de figure obtenue avec *make_clim.m* : Salinité en profondeur

Puis, les fichiers *param.h* et *cppdefs.h* doivent être modifiés afin de définir de nouvelles clefs pour la configuration. Le modèle est ensuite compilé dans la machine de calcul du COM, le *cluster*, grâce au script *.jobcomp*.

3. Résultats

3.1. Diagnostique du modèle

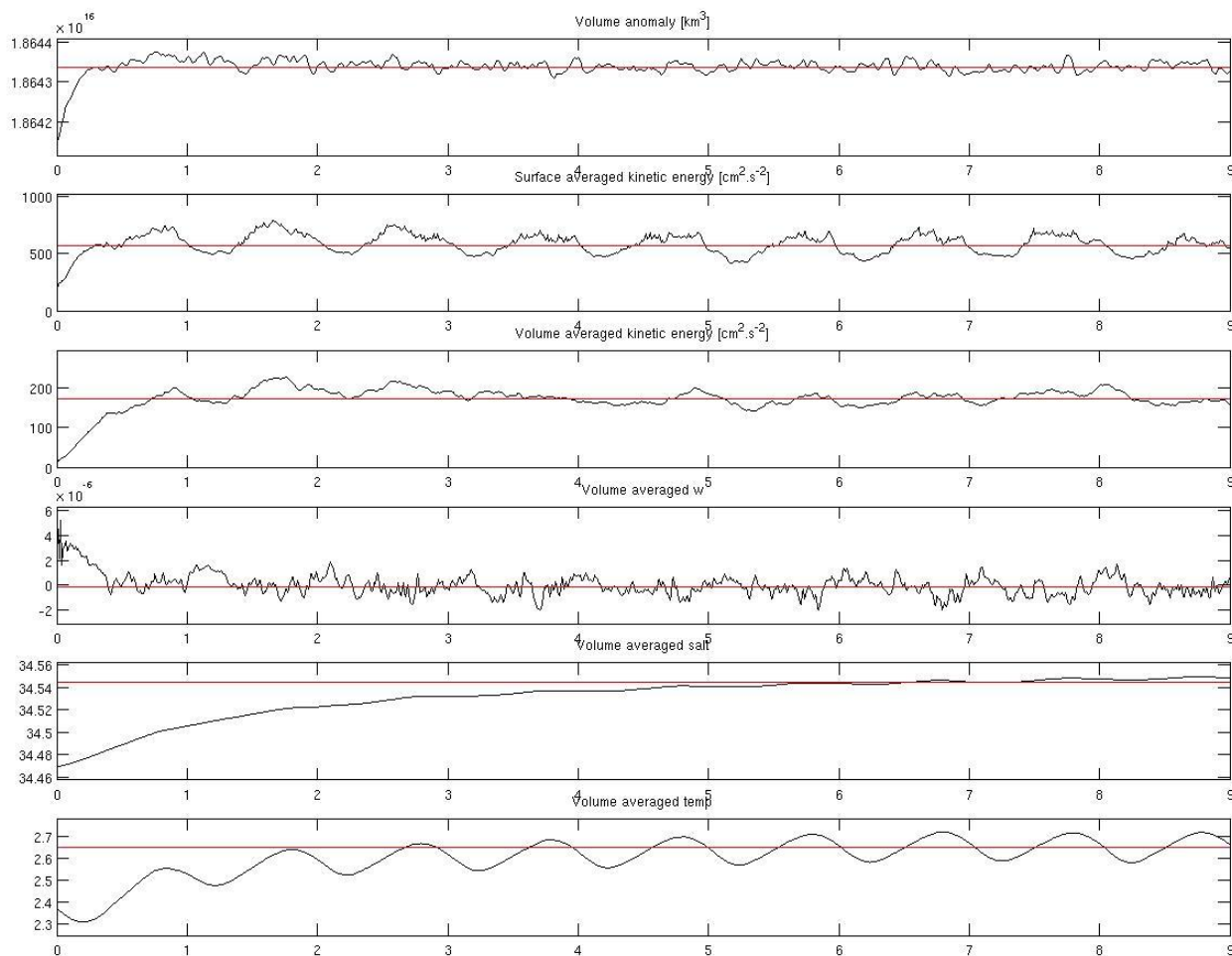


Fig.7 Diagnostique du modèle

La première année, le modèle n'est pas stable. La salinité, plus difficile à modéliser, met 6 ans avant de se stabiliser correctement. On remarque également qu'il y a une légère instabilité sur la valeur de température pour les 10 années. De plus il y a présence d'une légère fluctuation saisonnière sur toutes les courbes. Ainsi pour les résultats il convient d'utiliser la dixième année, la plus stable.

Les eaux du courant Oyashio, très riches, sont suspectées d'être à l'origine du bloom phytoplanctonique printanier. Ainsi, une modélisation des mois de février, mars et avril est nécessaire. Comme le courant est froid, une modélisation de la température s'impose pour le discerner.

3.2. Température de surface au mois de Février de la dixième année

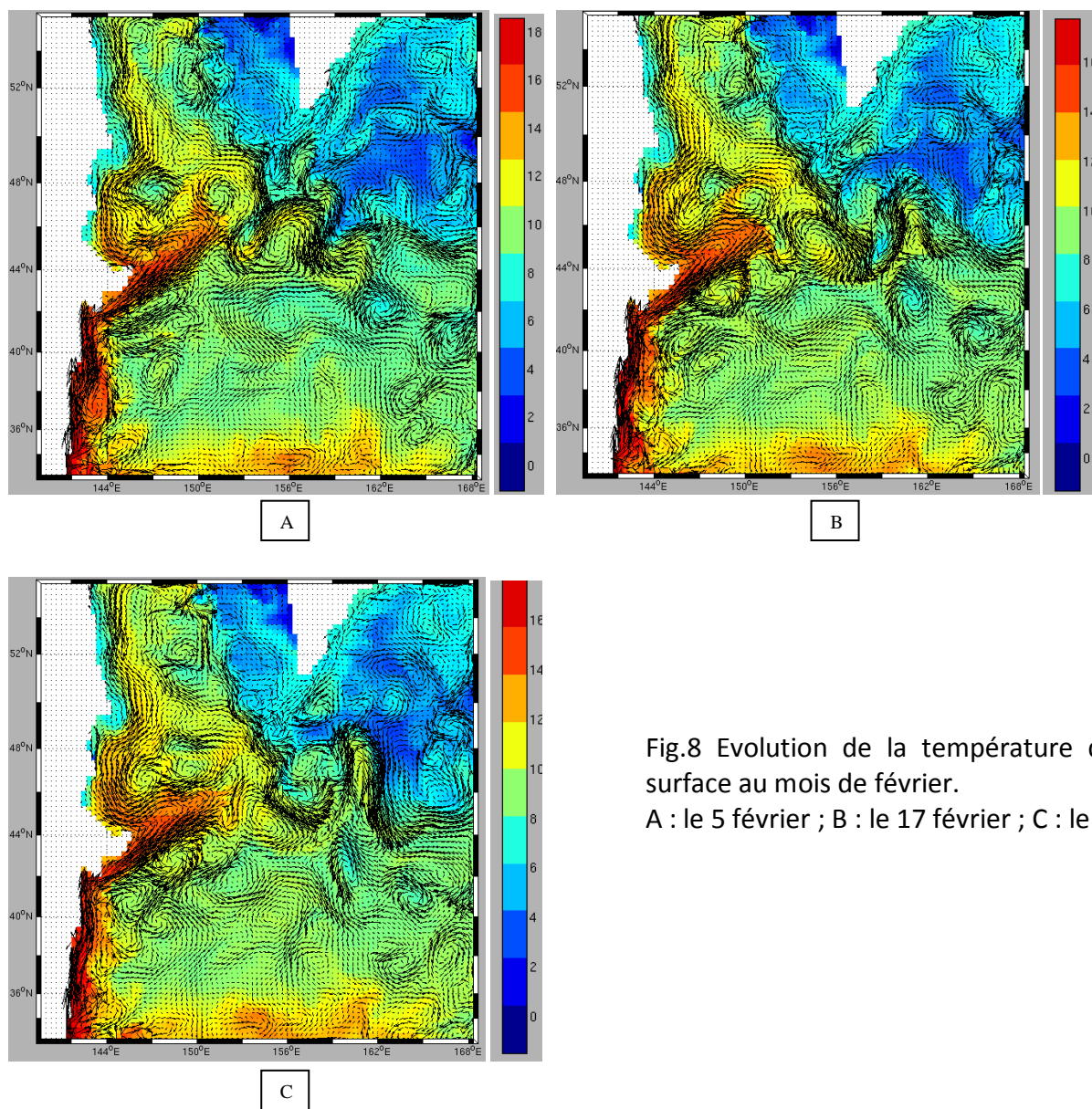


Fig.8 Evolution de la température des eaux de surface au mois de février.
A : le 5 février ; B : le 17 février ; C : le 26 février.

On remarque (Fig.8) des masses d'eau froide descendant des mers de Bering et d'Okhotsk.

3.3. Température de surface au mois de Mars de la dixième année

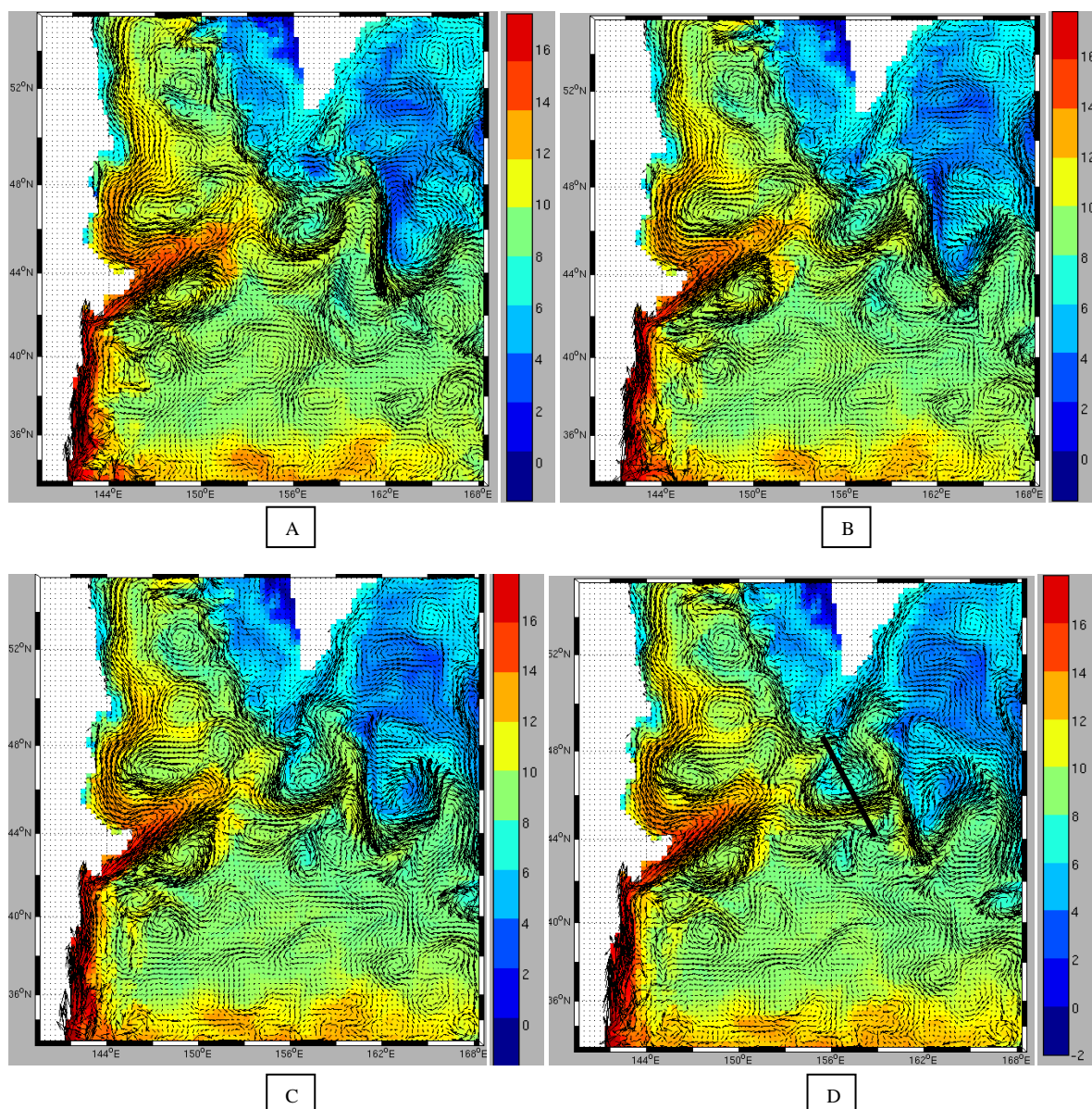


Fig.9 Evolution de la température des eaux de surface au mois de mars.

A : le 5 mars ; B : le 14 mars ; C : le 23 mars ; D : le 29 mars

— Zone de section verticale

On voit très nettement (Fig.9 A) la formation de tourbillons d'eau froide au contact des masses d'eaux plus chaudes. Ces tourbillons tendent à descendre le long de l'arc insulaire des Kouriles (Fig.9D).

3.4. Température de surface au mois d'Avril de la dixième année

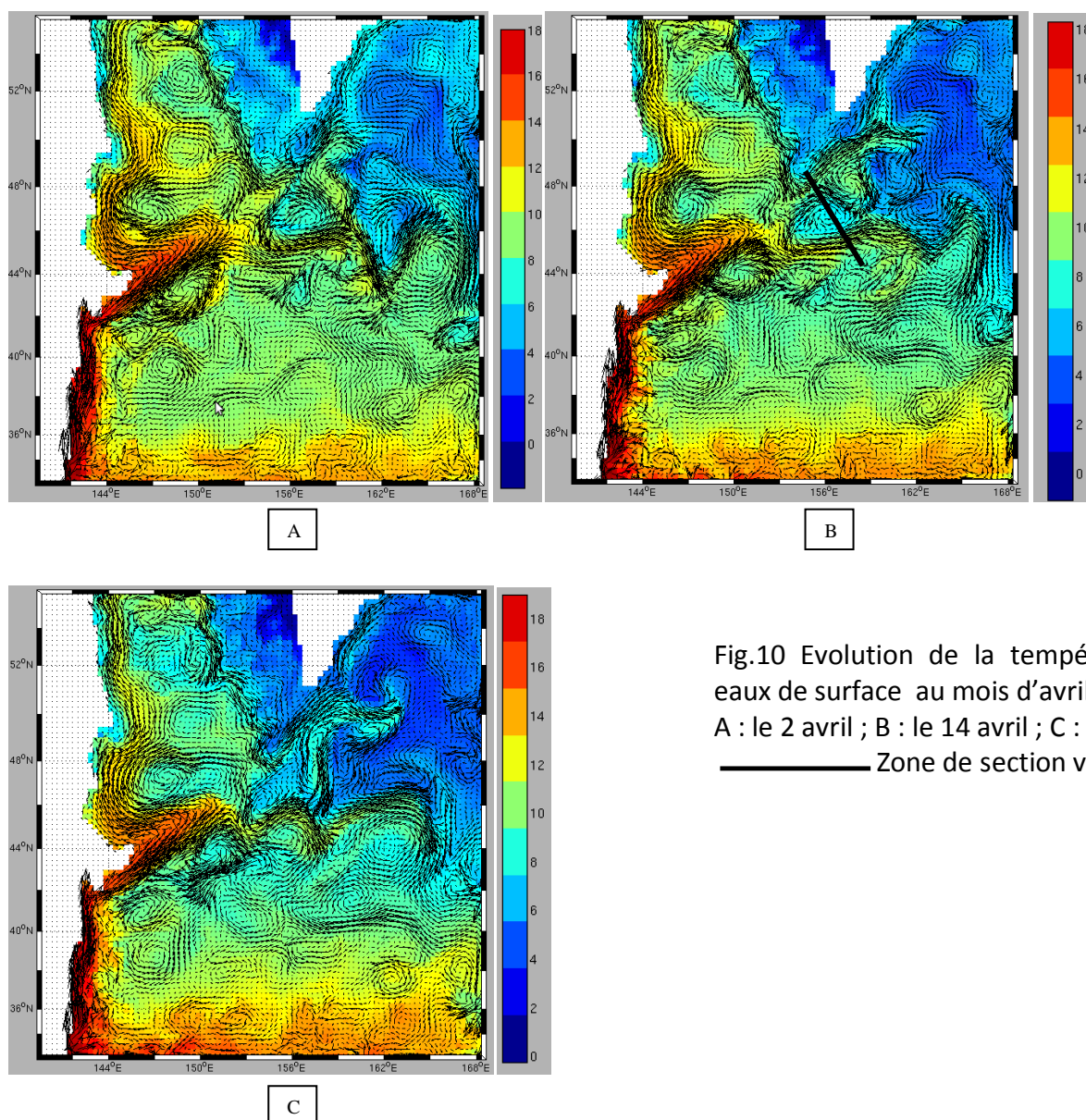


Fig.10 Evolution de la température des eaux de surface au mois d'avril.

A : le 2 avril ; B : le 14 avril ; C : le 29 avril

———— Zone de section verticale

Les masses d'eaux froides deviennent de plus en plus importante (Fig.10) autour de l'arc insulaire et se décalent vers le Sud de la région d'Hokkaido. La température diminue peu à peu et le tourbillon d'eau froide se maintiennent.

3.5. Section et profil verticaux de température des tourbillons

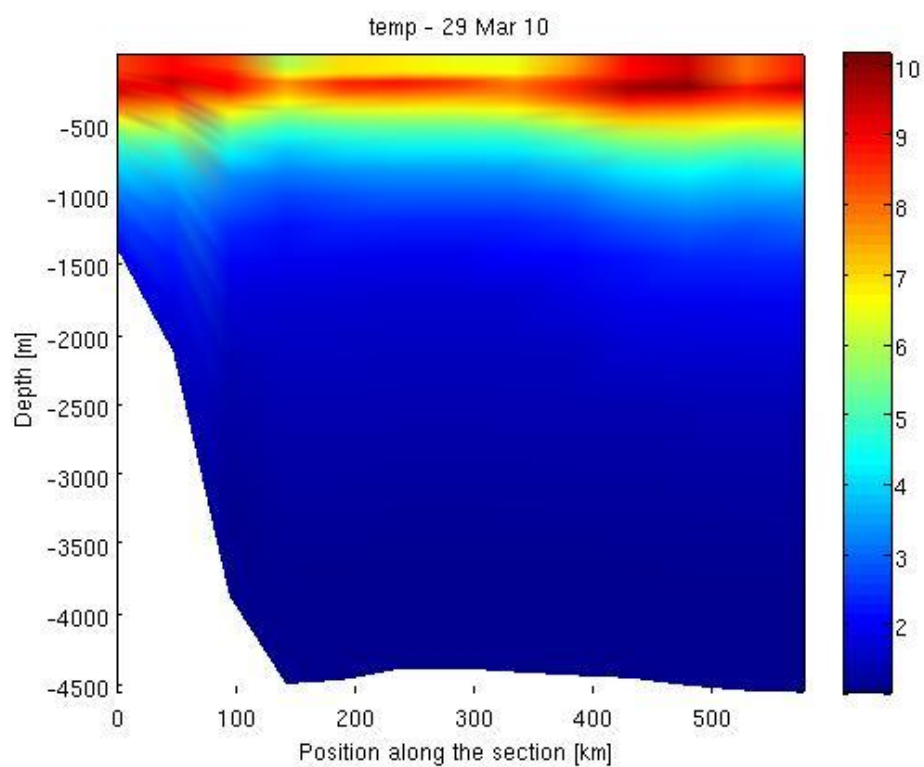


Fig.11 Section vertical d'un tourbillon le 29 Mars

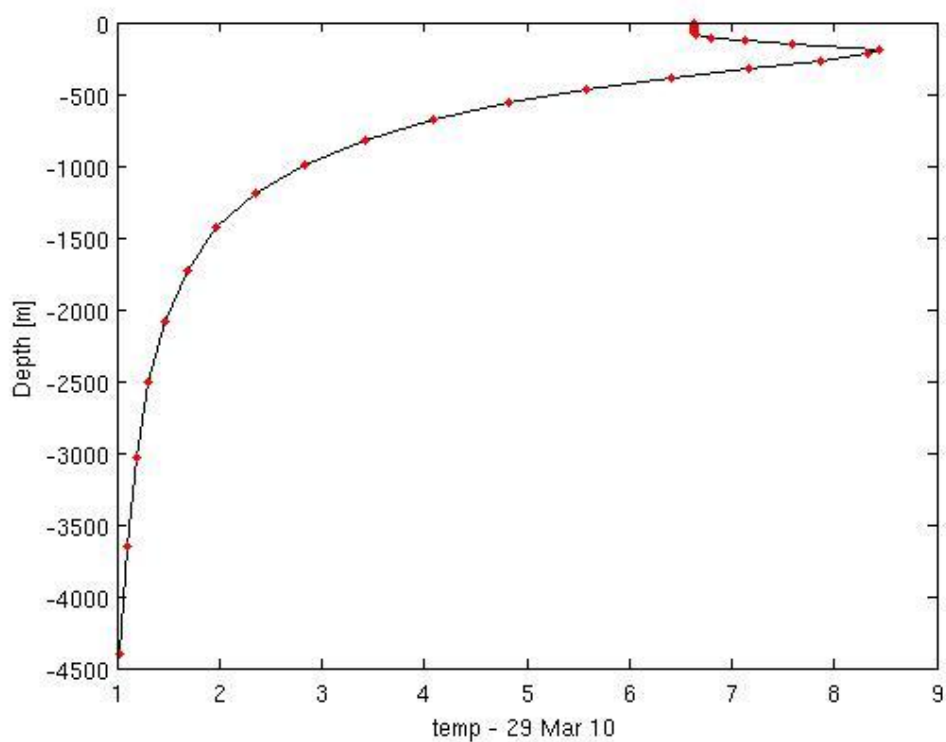


Fig.12 Profil vertical d'un tourbillon le 29 Mars

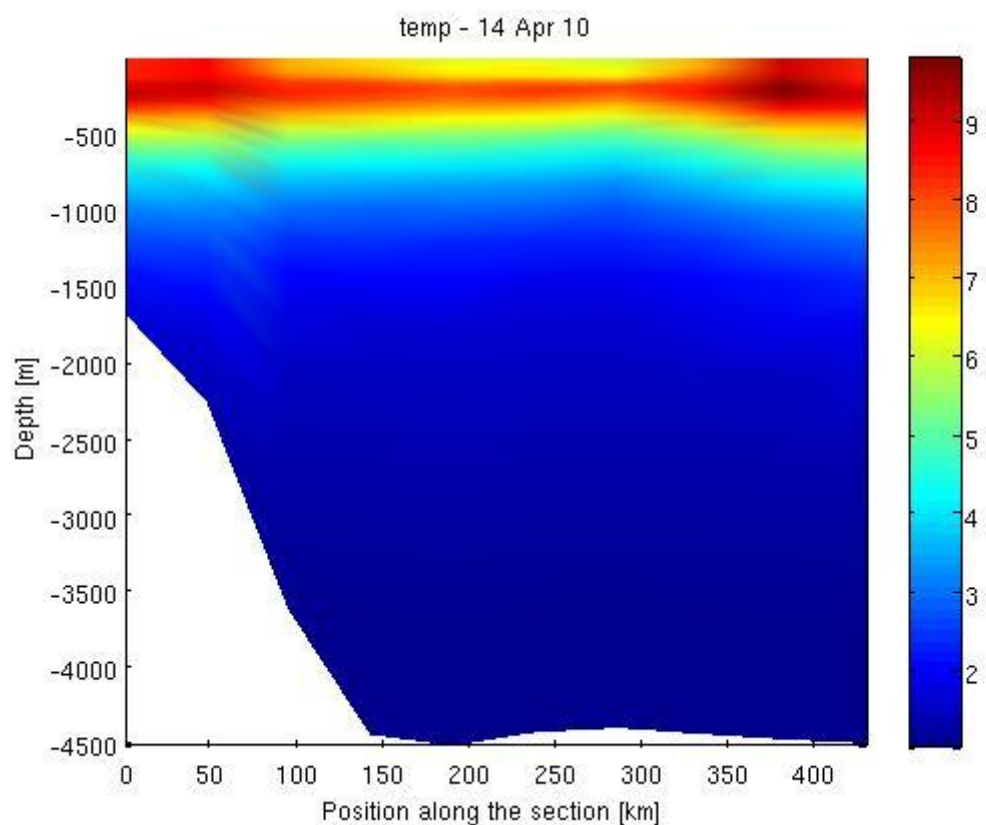


Fig.13 Section verticale d'un tourbillon le 14 Avril

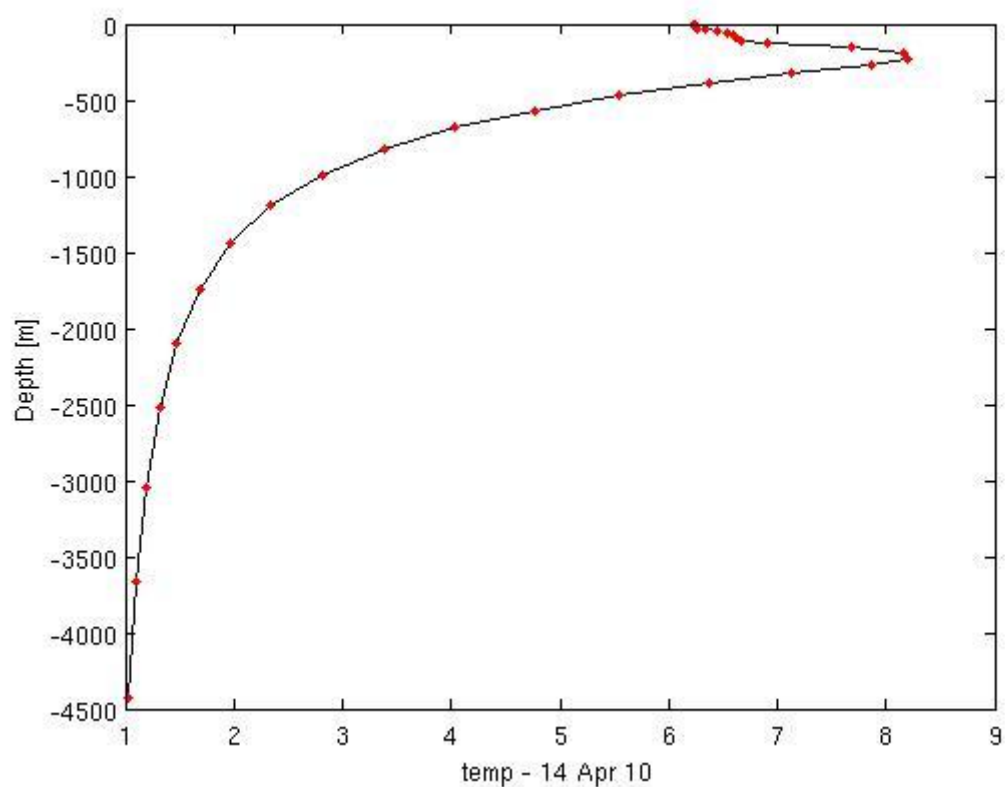


Fig.14 Profil vertical d'un tourbillon le 14 Avril

Sur les profils verticaux et les sections des tourbillons, on voit très nettement la rencontre entre deux masses d'eau, puisque la température de surface est plus faible qu'à 500 mètres.

De plus, la délimitation du front Oyashio, constitué d'eau froide, est facilement remarquable, tout comme le front Kuroshio (Fig. 15).

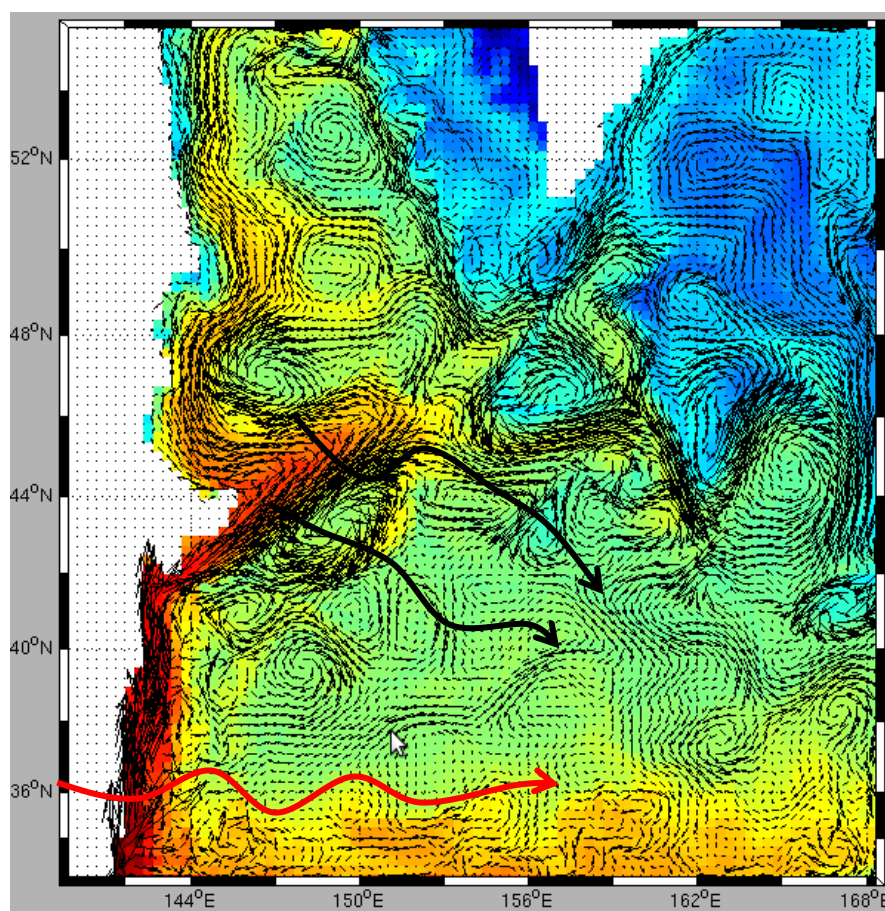


Fig. 15 Schématisation des fronts Oyashio et Kuroshio

—→ Oyashio Front

—→ Kuroshio Front

4. Discussion

La publication de T.Kono et M.Sato envisage de mettre en évidence la responsabilité des eaux de courant Oyashio dans le bloom phytoplanctonique printanier d'Hokkaido. L'article contient un graphique intéressant illustrant la relation entre la température des masses d'eaux et la quantité de chlorophylle a (Fig. 16). Le bloom phytoplanctonique a lieu quand la température de l'eau est la plus basse (4 ou 5°), entre le 5 et la 11 Avril.

Or, d'après les simulations effectuées, les eaux riches et froides apportées par Oyashio sont piégées dans des tourbillons au Nord Est de l'arc insulaire des Kouriles dès le début du mois de Mars, puis se déplacent au cours du temps vers le Sud d'Hokkaido. On peut donc penser que les masses d'eau froide responsables du bloom phytoplanctonique de

la région d'Hokkaido sont formées en réalité au niveau de l'arc insulaire des Kouriles, et se décalent peu à peu jusqu'à atteindre Hokkaido aux dates envisagées par T.Kono et M.Sato.

De plus, un léger pic de chlorophylle a apparaît peu après le 16 Avril tandis que la température de l'eau avoisine 8°, mais les auteurs ne peuvent l'expliquer. Une hypothèse serait que les masses d'eau se mélangent sur la verticale au cours du temps, entraînant ainsi une augmentation de la température et un enrichissement en éléments nutritifs des couches d'eau sous jacentes.

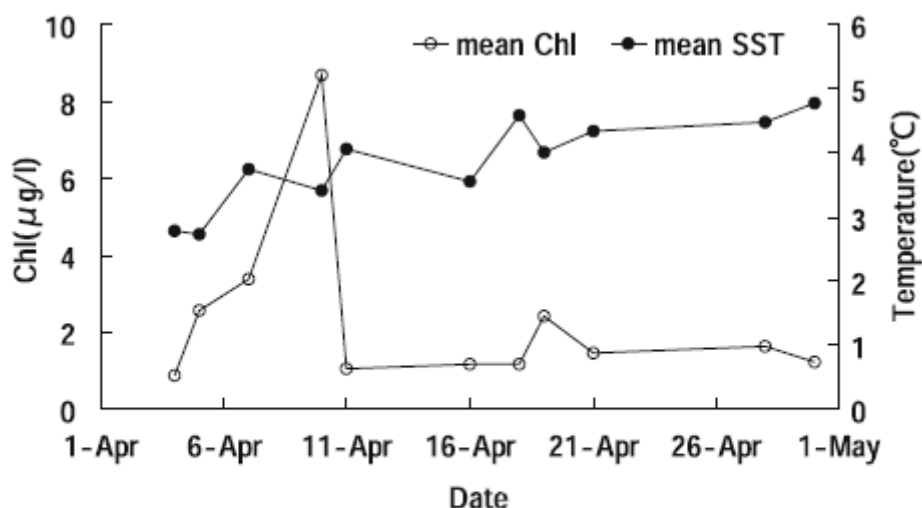


Fig. 4. Mean satellite estimates of SST (white circles) and chlorophyll a concentration (black circles) over the area within 41°30'-42°30'N and 144°30'-146°E around St.A5 for daily images in April.

Fig. 16 Comparatif température de surface / chlorophylle a, d'après Tokihiro Kono et Masatoshi Sato, 2010.

En effet, près d'Hokkaido, les tourbillons et autres mouvements des masses d'eaux sont très intenses. Selon l'article, il s'agit d'une zone de rencontre entre plusieurs masses d'eaux différentes :

- Coastal Oyashio Water (COW)
- Oyashio Water(OYW), froide et salée
- Modified Kuroshio Water(MKW), chaude et sale

Ces masses d'eaux, en raison de la zone d'étude et de la précision du modèle, ne sont pas clairement visible ici. De plus, il existe dans cette zone un pompage d'Ekman important. Ainsi, une des améliorations à envisager serait de centrer l'étude prochaine sur la région d'Hokkaido afin de pouvoir analyser le mécanisme de mélange. La présence de trois masses d'eaux différentes nécessiterait une modélisation précise de la température mais aussi de la salinité.

Enfin, l'analyse prochaine saurait être complétée de données mesurées *in situ*, comme la concentration en fer. En effet, il est stipulé dans l'article qu'une décroissance du phytoplancton a lieu fin Avril, alors que la concentration en nutriments est importante. Il s'agit donc d'un facteur biogéochimique secondaire inhibant la continuité du bloom phytoplanctonique. Ainsi, une amélioration envisageable de ROMS serait l'ajout d'une base de données contenant d'une part les mesures biogéochimiques du fer dans les eaux

océaniques, et d'autre part la répartition géographique des aérosols de poussières désertiques à l'origine des apports en fer d'origine atmosphérique (*Duce et Tindale, 1991*).

5. Conclusion

L'objet de cette étude, la liaison entre le bloom phytoplanctonique d'Hokkaido et le courant Oyashio, a été difficile à mettre en évidence. En effet, le nombre de masses d'eaux présentes complique considérablement les choses et l'absence de mesure *in situ* ne permet pas de porter de conclusion quant au lien direct existant entre les deux mécanismes. En revanche, les mouvements océaniques comme le choc des masses d'eaux froides et chaudes, la stratification, les tourbillons et leurs déplacements, ont été clairement mis en évidence.

La modélisation numérique en océanographie a évolué durant le dernier siècle et son évolution permet la compréhension, l'analyse, voire même la prévision des mécanismes et des fluctuations de l'océan. Les actuels changements climatiques bouleversent et transforment les courants océaniques à petite comme à grande échelle. De tels changements impactent la circulation atmosphérique et donc le climat. La modélisation numérique en océanographie devient donc nécessaire et vitale. Dans cette étude, nous avons pu constater que ROMS présente un grand nombre de variables modélisées. L'adjonction d'une base de données contenant les paramètres biogéochimiques des éléments traces tels que le Fer permettrait de pouvoir relier les mécanismes, qu'ils soient biogéochimiques ou physiques, entre eux.

Bibliographie

Doglioli, A., (2010) Modélisation circulation régionale 3D

Duce, R.A., Tindale, N.W., (1991) Atmospheric transport of iron and its deposition in the ocean

Kono, T., Sato, M., (2010) A mixing analysis of surface water in the Oyashio region: Its implications and application to variations of the spring bloom.

Large, W.G., McWilliams, J.C., Doney, S.C., (1994) Oceanic vertical mixing: A review and a model with a nonlocal k-profile boundary layer parameterization.

Pacanowski, R. C., Philander, S.G.H., (1981) Parameterization of vertical mixing in numerical models of tropical oceans

Wikipédia