

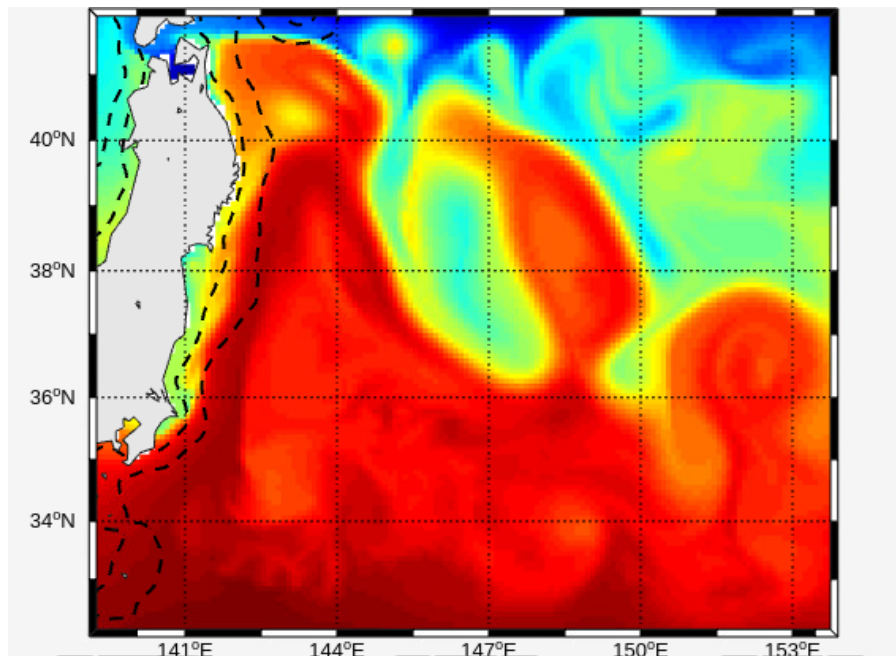
AIX MARSEILLE UNIVERSITÉ

Master Sciences de la mer

Année académique : 2025–2026

Modélisation 3D océanique

Modélisation numérique de la zone de confluence Kuroshio–Oyashio à l'aide du modèle CROCO



Réalisé par : BOULAHIA Chahinez

Encadré par : Andrea Doglioli

Date de rendu : 1^{er} mai 2026

Résumé

Cette étude analyse la dynamique de la zone de confluence entre le courant chaud Kuroshio et le courant froid Oyashio dans le Pacifique Nord-Ouest à l'aide du modèle CROCO. Les simulations réalisées sur le domaine 32°N-42°N et 139°E-154°E permettent d'illustrer l'interaction entre les eaux chaudes et froides, à l'origine de forts gradients thermiques et d'une activité tourbillonnaire intense. Les résultats montrent la formation du courant d'extension du Kuroshio et la présence de structures méso-échelle liées aux instabilités baroclines. Le modèle reproduit globalement les principales caractéristiques physiques de la région, bien que certaines limites apparaissent dans la représentation fine du jet et la sensibilité aux paramètres de résolution et aux conditions aux frontières.

Mots clés : Kuroshio, Oyashio, tourbillon, courant, confluence

Abstract

This study analyzes the ocean processes and dynamics of the confluence zone between the warm Kuroshio and the cold Oyashio Currents in the Northwest Pacific using the CROCO model. Simulations conducted over the 32°N-42°N and 139°E-154°E domains illustrate the interaction between warm and cold waters, which generates strong thermal gradients and intense eddy activity. The results highlight the formation of the Kuroshio extensional current and reveal the presence of mesoscale structures driven by baroclinic instabilities. However, some limitations are still evident in the model's ability to accurately resolve the fine structure of the jet, as well as in its sensitivity to resolution settings and boundary conditions.

Keywords : Kuroshio, Oyashio, eddy, current, confluence

Table des matières

1	Introduction	3
2	Matériel et méthodes	4
2.1	Système d'équations du modèle océanique CROCO	4
2.2	Hypothèses et approximations	5
2.3	Sources et bases de données utilisées	5
2.4	Paramétrisation du modèle	6
2.4.1	Définition du domaine et génération de la grille spatiale . .	6
2.4.2	Paramétrisation de la grille temporelle	7
3	Résultats	8
3.1	Diagnostiques du modèle	8
3.2	Comparaison entre la simulation CROCO et les observations	9
4	Contraintes du modèle	11
5	Conclusion	11

1 Introduction

La région du Pacifique Nord-Ouest, située à l'est du Japon, est l'une des zones les plus dynamiques de l'océan mondial. Elle est caractérisée par la convergence de deux grands courants océaniques : le Kuroshio, courant chaud et salé d'origine subtropicale, et l'Oyashio, courant froid et moins salé provenant des régions subpolaires. Le Kuroshio s'écoule vers les hautes latitudes et transporte une grande quantité de sel et de chaleur vers l'océan de moyenne latitude. En revanche, l'Oyashio transporte des eaux plus froides et peu salées provenant de la mer d'Okhotsk ainsi que du courant est-Kamchatkien, [2].

La rencontre entre le Kuroshio et l'Oyashio engendre une région de mélange particulièrement active, souvent appelée Mixed Water Region (MWR). Cette zone de confluence est caractérisée par de forts gradients de température et de salinité, ainsi que par une intense activité tourbillonnaire. Les interactions entre ces deux masses d'eau jouent un rôle fondamental dans les échanges de chaleur, de sel et de nutriments et influencent fortement la circulation océanique à grande échelle. De nombreuses études ont montré que la dynamique de cette région est dominée par des instabilités baroclines ainsi que par la formation de tourbillons [1]. Ces structures permettent des échanges entre les eaux subtropicales et subpolaires contribuant ainsi à la redistribution des propriétés physiques dans l'océan. En particulier, les travaux de [2], mettent en évidence le rôle important de ces tourbillons dans les mécanismes de mélange et de transport dans cette zone de confluence. En effet, la variabilité de cette zone influence la distribution des écosystèmes marins ainsi que les échanges air-mer.

Dans ce contexte, l'utilisation de modèles numériques constitue un outil essentiel pour analyser ces phénomènes complexes. Le modèle CROCO (Coastal and Regional Ocean COmmunity model) permet de simuler la circulation océanique à haute résolution et de représenter les processus de méso-échelle.

L'objectif de ce travail est d'étudier la dynamique de la zone de confluence Kuroshio-Oyashio s'étendant de **32°N à 42°N et de 139°E à 154°E** à l'aide du modèle CROCO, en analysant la structure thermique simulée et en évaluant la capacité du modèle à reproduire les principales caractéristiques observées, en comparaison avec la littérature existante afin d'évaluer la fiabilité du modèle.

2 Matériel et méthodes

2.1 Système d'équations du modèle océanique CROCO

Le modèle utilisé dans cette étude est le modèle CROCO. C'est un modèle numérique conçu pour la modélisation régionale et côtière. Il dispose de nombreuses bibliothèques permettant une configuration adaptable. Le modèle CROCO permet d'effectuer des simulations océaniques réalistes de différentes grandeurs dans un système de coordonnées cartésiennes : la direction des courants, la vitesse, la température, la salinité, la hauteur de la surface libre ainsi que de nombreuses autres variables.

Pour cela, le modèle repose sur la résolution de différentes équations décrites dans un système de coordonnées cartésiennes (O,x,y,z) : les équations du mouvement (1),(2), l'équation de continuité (3), les équations de conservation de la chaleur (4), du sel (5), et l'équation internationale de l'état de l'eau de mer (6).

Équations du mouvement :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (\vec{U} \cdot \vec{\nabla})u = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + fv + A_H \nabla_H^2 u + A_Z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (\vec{U} \cdot \vec{\nabla})v = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} - fu + A_H \nabla_H^2 v + A_Z \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (2)$$

Équation de continuité :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{U} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

Équation de conservation de la chaleur :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{U} \cdot \vec{\nabla})T = A_H \nabla_H^2 T + A_Z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{Q_c}{\rho C_p} \frac{\partial I}{\partial z} \quad (4)$$

Équation de conservation de la salinité :

$$\frac{\partial S}{\partial t} + (\vec{U} \cdot \vec{\nabla})S = A_H \nabla_H^2 S + A_Z \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} \quad (5)$$

Équation d'état de l'eau de mer :

Cette équation est donnée par TEOS10 (International Thermodynamic Equation Of Sea Water), en utilisant la température conservative ainsi que la salinité absolue comme variables d'état.

$$\rho = \rho(T, S, P) \quad (6)$$

où $\vec{U} = (u, v, w)$ représente le vecteur vitesse du courant, avec w la composante verticale et u, v les composantes horizontales. ρ_0 représente la masse volumique, T la température, P la pression, f le paramètre de Coriolis et S la salinité. Les coefficients de diffusion/viscosité sont A_H (horizontal) et A_Z (vertical).

2.2 Hypothèses et approximations

Les équations précédentes ont été obtenues à partir d'hypothèses et approximations telles que :

- **L'hypothèse hydrostatique**, qui implique que sur la verticale, les forces de gravité et de pression sont prépondérantes par rapport aux autres forces.
- **L'approximation de Boussinesq** : $\rho = \rho_0 + \rho'(x, y, z, t)$
- **L'hypothèse d'incompressibilité**, qui suppose que la masse d'eau, au cours de son trajet le long des lignes de courant, conserve sa masse volumique.
- **L'hypothèse de la fermeture Newtonienne de la turbulence.**
- **Plan f** : le parametre de coriolis f est une constante.

2.3 Sources et bases de données utilisées

Dans le cadre de notre simulation avec le modèle CROCO, trois bases de données de référence ont été utilisées afin d'initialiser le système.

- **The International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set (ICOADS)** : Il regroupe des données marines de surface couvrant les trois derniers siècles. L'ICOADS est probablement la collection de données marines de surface la plus complète et la plus hétérogène qui existe.

- **World Ocean Atlas 2009 (WOA09)** : c'est un ensemble de champs climatologiques objectivement analysés (grille de 1°) de température, salinité, oxygène dissous, utilisation apparente de l'oxygène (AOU) pour des périodes de composition annuelles, saisonnières et mensuelles pour l'océan mondial.

- **TOPO** : fournit une bathymétrie globale permettant de définir la géométrie réaliste du domaine océanique, avec une meilleure représentation des côtes et des reliefs sous-marins, améliorant ainsi la circulation induite par ces structures.

2.4 Paramétrisation du modèle

2.4.1 Définition du domaine et génération de la grille spatiale

La première étape de paramétrisation du modèle consiste à définir la zone d'étude à l'aide de la commande **ad findgeocoord.m** qui permet de déterminer l'emprise spatiale du modèle en fixant les bornes en latitude et en longitude adaptées à la région étudiée. Il faut par la suite les rentrer dans le script **croco-tools_param.m** pour définir la zone où la grille de calcul sera établie. Le fichier **crocotools_param.m** permet aussi de fixer la résolution horizontale choisie et de limiter la taille de la grille afin d'éviter une simulation longue. Ce fichier permet également de définir les conditions aux frontières du domaine. Pour chaque frontière (ouest, est, sud, nord), il est possible de spécifier si elle est ouverte ou fermée. Une valeur de 1 est utilisée pour une frontière ouverte tandis qu'une valeur de 0 correspond à une frontière fermée. Cette manipulation est à répéter sur le fichier **cppdefs.h** en activant les clés correspondantes aux frontières ouvertes. En l'occurrence, dans notre cas d'étude, les frontières sont ouvertes **[1,1,1,1]**.

Le modèle CROCO utilise une grille d'Arakawa C pour la discrétisation horizontale. La discrétisation verticale est réalisée en coordonnées sigma, suivant la bathymétrie. Le modèle utilise également une séparation des pas de temps interne et externe (time-splitting), afin de respecter le critère de stabilité CFL (Eq.7) :

$$\Delta t \leq \frac{1}{\sqrt{gH}} \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right)^{-1/2} \quad (7)$$

La grille a été créée à l'aide de **make_grid.m** qui a permis d'ajuster les contours du domaine, au niveau des zones côtières et des frontières ouvertes particulièrement. Après l'exécution, le modèle donne trois cartes, Fig.1. Une fois la grille générée, les informations nécessaires au critère de stabilité CFL ont été sauvegardées dans un fichier **memo.mat** qui sera utilisé ensuite pour le calcul du pas de temps du modèle. La prochaine étape est de calculer les forçages et les conditions initiales aux frontières par le biais des scripts MATLAB ; **make_ini**,

make_clim, **make_forcing** en utilisant les données de WOA.

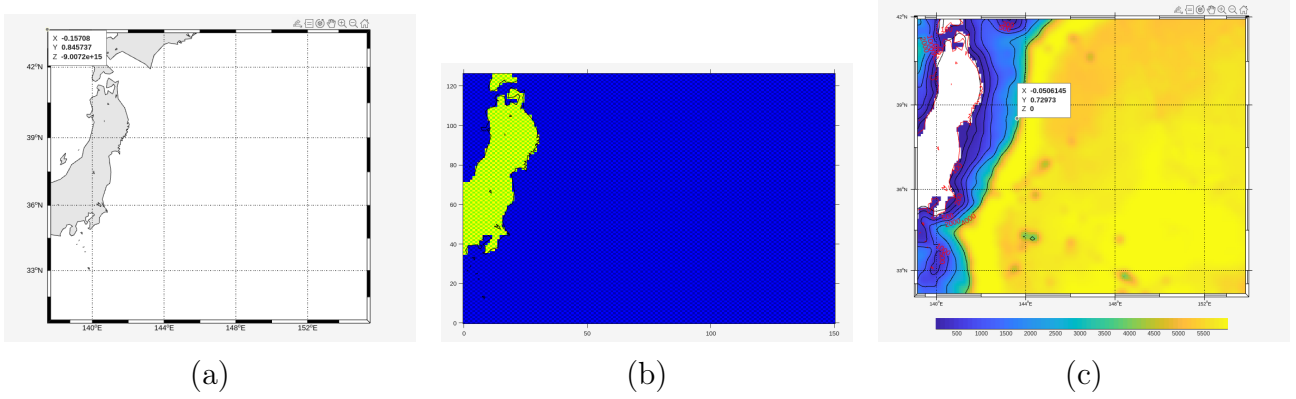


FIGURE 1 – (a) Situation géographique de la zone, (b) La grille de la zone d’étude, (c) Bathymétrie de la zone d’étude

- **Cas de notre modèle** : Pour notre analyse, le modèle a été lancé sur une zone s’étendant de **32°N à 42°N et de 139°E à 154°E**, avec une résolution de **1/5°** et une autre de **1/10°**. Dans la suite de notre étude, nous retenons la résolution **1/10°**. Les valeurs de la grille du modèle, à savoir **LLm0** qui représente la taille de la grille en longitude, **MMm0** qui indique la taille de la grille en latitude et **N** qui correspond à la taille de la grille verticale sont intégrés au fichier **param.h**. L’ensemble des valeurs de notre modèle ainsi que les caractéristiques de la résolution horizontale sont présentées dans le Tab.1

TABLE 1 – Paramètres de la grille de calcul

Résolution	LLm	MMm	dxmin	dxmax	dymin	dymax	N-sigma
1/10°	149	125	8.2538	9.4246	8.2683	9.4202	32

2.4.2 Paramétrisation de la grille temporelle

Afin de déterminer le pas de temps interne **dt** et externe **NDTFAST**, la commande **ad_cfl.m** sur MATLAB a été utilisée. Ce calcul repose sur le critère de stabilité CFL permettant ainsi de garantir la stabilité numérique du modèle. Une fois la CFL calculée, les valeurs suivantes doivent être fixées dans le fichier **croco.in** : La durée de la simulation **NTIMES**, la fréquence de sauvegarde des sorties instantanées **NWRT**, la fréquence de sauvegarde des sorties moyennées

NAVG, la fréquence de sauvegarde des sorties pour relancer le modèle **NRST** comme indiqué dans le Tab.2 :

TABLE 2 – Paramètres temporels associés au modèle

dt	NDTFAST	NTIMES	NRST	NAVG	NWRT
720	60	3600	3600	360	360

Il est également nécessaire de mettre à jour le pas de temps dans `run_croco_bash` ainsi que la durée de simulation dans `slurm_run_croco.sh`. Une fois les étapes réalisées, le modèle est compilé d’abord en utilisant la commande `./jobcomp` pour l’adapter au langage binaire de l’ordinateur. Ensuite, une connexion au cluster de calcul de l’OSU PYTHEAS, est nécessaire pour lancer la simulation avec la commande `sbatch ./slurm_run_croco.sh`. Ainsi, le modèle se met à tourner et fournira des estimations climatologiques sur 10 ans.

3 Résultats

3.1 Diagnostiques du modèle

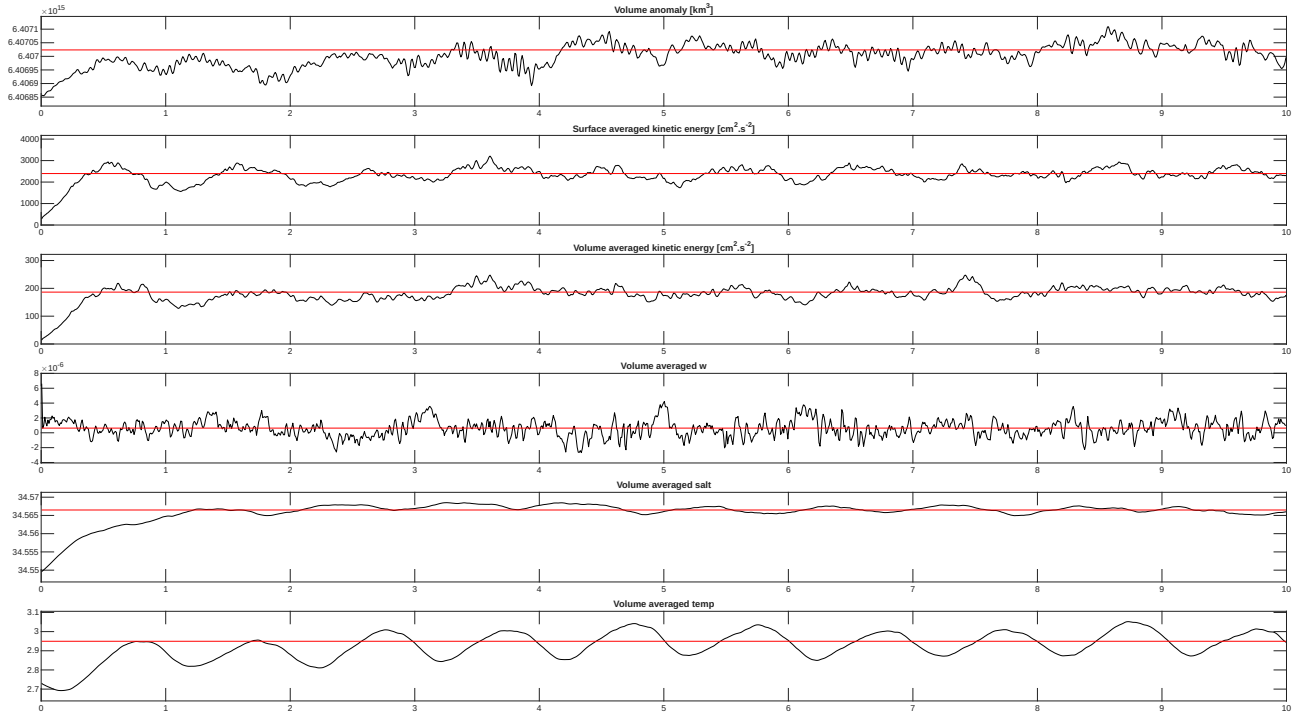


FIGURE 2 – Diagnostic du modèle de la confluence Kuroshio-Oyashio sur 10 ans

Une fois la simulation terminée, il est important d'identifier la période à partir de laquelle les résultats du modèle deviennent exploitables et de vérifier si la simulation exécutée est stable ou non. Pour cela, les commandes **croco_diags.m** et **plot_diags.m** sont utilisées afin de générer les diagnostics et les séries temporelles associées au cours des 10 années de simulation. Pour déterminer la phase stable du modèle, il faut évaluer sur les séries temporelles le temps **spin up**, qui correspond au temps nécessaire pour que le modèle ne soit plus influencé par les conditions initiales. D'après la figure 2, on remarque que dans le cas de la simulation de la confluence des deux courants Kuroshio et Oyashio au pacifique Nord_Ouest, le modèle se stabilise à partir de la 2ème année de simulation, comme l'atteste la série temporelle du volume du sel moyen, les sorties à partir de la troisième année seront alors étudiées dans notre cas (Fig. 2)

3.2 Comparaison entre la simulation CROCO et les observations

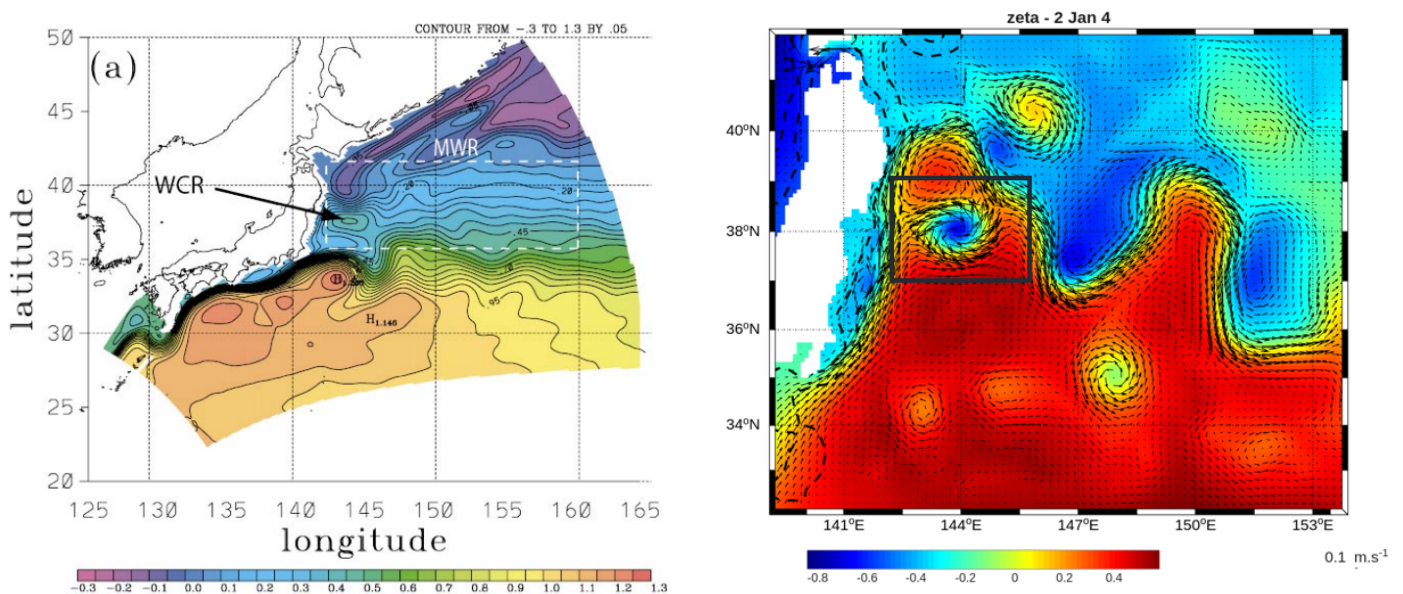


FIGURE 3 – Climatologie de la hauteur de surface (SSH) moyennée de modélisation , (a) Résultat de (Mitsudera H et al. 2004), (b) Résultat de la simulation de la confluence des deux courants avec CROCO

D'après la Fig. 3(a), on remarque que les courants du Kuroshio et de l'Oyashio convergent à l'est du Japon, formant le courant de l'extension du Kuroshio (KE) qui s'étire vers l'est. Cette région est caractérisée par un fort gradient de SSH, lié

au contraste entre eaux chaudes et froides, ce qui intensifie le cisaillement et rend la zone fortement instable. Cela favorise une forte activité méso-échelle.

La Fig. 3(b) montre la présence de tourbillons entre 142–145°E et 37–39°N, résultant de cette instabilité. Ces structures confirment la forte dynamique du Kuroshio Extension et le rôle majeur des eddies dans la variabilité régionale.

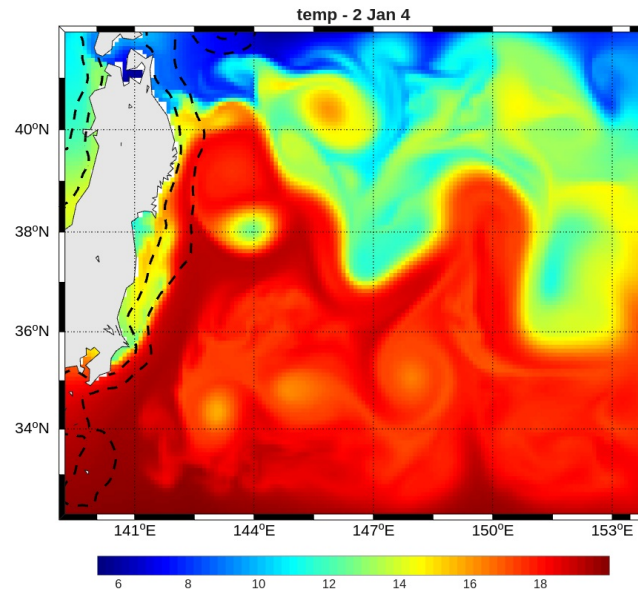


FIGURE 4 – Température de surface SST

La simulation réalisée avec le modèle CROCO dans la région à l'est du Japon reproduit de manière générale la dynamique de la confluence entre le courant du Kuroshio et celui de l'Oyashio. On observe clairement l'interaction entre une masse d'eau chaude et une masse d'eau froide, Fig.4 définissant une zone frontale marquée.

Cette région est connue pour sa forte instabilité dynamique, ce qui se traduit dans le modèle par la présence de nombreux tourbillons de méso-échelle. Ces structures résultent des instabilités baroclines générées par les forts gradients de température et de densité entre les deux courants. La simulation capture l'intense activité tourbillonnaire et la présence des limites des deux courants. Fig.3

Cependant, certaines limites du modèle peuvent être identifiées. En particulier, le courant du Kuroshio montre des signes de déviation et de détachement par rapport à sa structure idéale de jet continu, avec une extension vers le Nord rappelant la dynamique du Gulf Stream. Ce comportement peut être lié à la variabilité intrinsèque du système mais aussi aux limitations du modèle, notamment la résolution spatiale et les paramétrisations des processus turbulents.

4 Contraintes du modèle

L'utilisation d'une haute résolution sur une zone d'étude large comme le Japon pose un problème lors de la génération de la grille avec CROCO. En effet, lorsque la zone est large et la résolution est haute, le nombre de mailles devient grand. Cela rend l'étape `edit_mask` extrêmement longue, massive et lourde à traiter, au point de bloquer complètement l'interface du PC à la fin du processus ce qui induit à la non possibilité de finir la simulation. Ainsi, il devient difficile voir impossible de poursuivre les étapes qui suivent `make_grid`. Pour éviter ce problème, il a été important de rétrécir dans notre cas la taille du domaine et de limiter, voire éviter, l'utilisation de l'étape `edit_mask` afin de pouvoir terminer la procédure.

En outre, l'augmentation de la résolution provoque une forte hausse du temps de calcul. Dans notre cas, les simulations ne peuvent pas dépasser un temps de calcul d'environ 100 heures, ce qui rend l'utilisation d'une résolution plus fine pour une zone étendue impossible, notamment dans la région de confluence à l'est du Japon.

5 Conclusion

Dans cette étude, la simulation représente bien de manière générale la structure de la confluence entre le Kuroshio et l'Oyashio, en mettant en évidence le contraste entre les deux masses d'eau. La présence de structures tourbillonnaires et d'instabilité montre une dynamique cohérente avec les processus observés dans cette région. Néanmoins, le modèle est toujours loin de la réalité : le courant du Kuroshio se montre trop diffus et insuffisamment structuré, tandis que la zone de front semble mélangée et dominée par des structures de petite échelle, ce qui masque l'organisation du jet principal.

Ces limitations peuvent s'expliquer par plusieurs facteurs : une augmentation de la résolution spatiale permettrait de mieux représenter la structure fine et les processus méso-échelle. De plus, l'extension du domaine de calcul constituerait une amélioration importante, en intégrant des régions clés pour la dynamique du Kuroshio, telles que l'archipel d'Okinawa ou les îles de Kyūshū afin de mieux contraindre sa formation et sa trajectoire. Le modèle peut également être sensible aux conditions aux limites et au forçage atmosphérique, ce qui influence la posi-

tion et l'intensité du courant du Kuroshio ainsi que la variabilité du front. Pour améliorer la représentation de la dynamique de la région, il serait possible d'augmenter la résolution horizontale et verticale afin de mieux résoudre les structures tourbillonnaires et les gradients frontaux.

Références

- [1] Zhao JING et al. “Mesoscale SST dynamics in the Kuroshio–Oyashio extension region”. In : *Journal of Physical Oceanography* 49.5 (2019), p. 1339-1352.
- [2] Humio MITSUDERA et al. “Numerical study on the Oyashio water pathways in the Kuroshio–Oyashio confluence”. In : *Journal of physical oceanography* 34.5 (2004), p. 1174-1196.