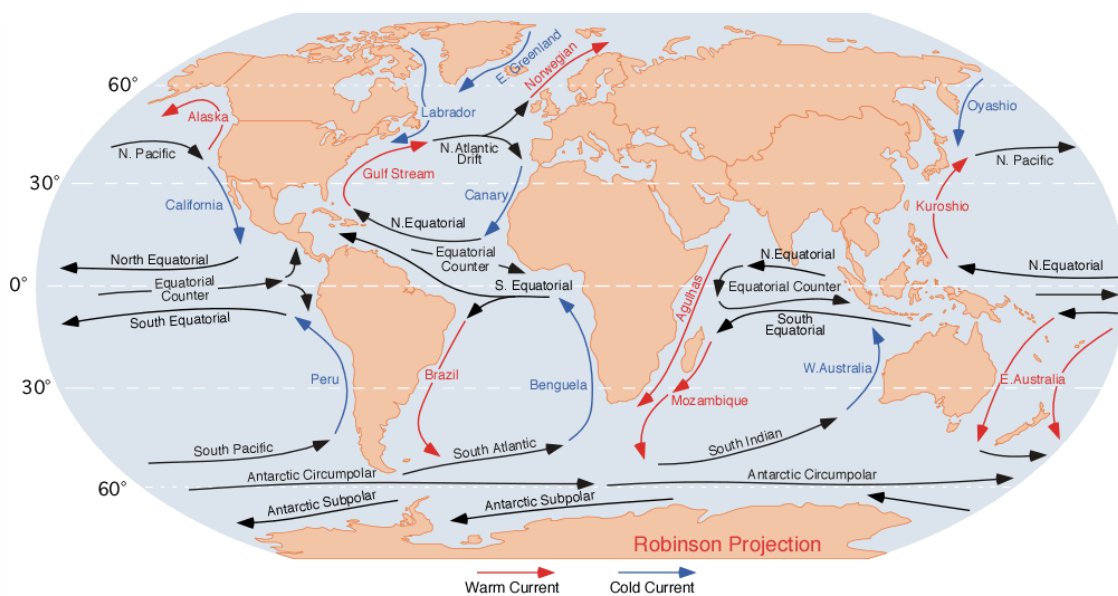




**ENSTA  
BRETAGNE**

# Rapport de Deep Ocean Modelling



# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Le modèle CROCO</b>	<b>2</b>
2.1	Présentation des fichiers . . . . .	2
<b>3</b>	<b>Choix du pas de temps</b>	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>Analyse des résultats</b>	<b>3</b>
4.1	Évolution temporelle de l'énergie cinétique . . . . .	3
4.2	Vorticité relative de la zone normalisée par la force de Coriolis locale à la surface pour différents instants . . . . .	4
4.3	Vorticité relative de la zone normalisée par la force de Coriolis locale à une profondeur de 400m pour différents instants . . . . .	6
4.4	Température de ma zone à la profondeur de 400m pour différents instants	7
4.5	Section zonale et méridienne pour les vitesses et la densité . . . . .	9
4.5.1	Sections des vitesses zonales et méridiennes . . . . .	9
4.5.2	Sections de la densité . . . . .	11
4.6	Moyenne des vitesses zonales et méridiennes au cours de la dernière année	12
4.7	Variance des SSH au cours de la dernière année . . . . .	13
4.8	Energie cinétique des eddies au cours de la dernière année pour différents instants . . . . .	13
<b>5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>16</b>
	Liste des figures	17
	Bibliographie	18

# 1 Introduction

La zone choisie pour cette étude se situe entre la latitude  $23^\circ$ ,  $63^\circ$  et entre la longitude  $-119^\circ$  et  $-170^\circ$ . Elle correspond à la partie Nord du Pacifique. Dans cette partie du Nord Pacifique, la circulation est dominé par par un large courant appelé le North Pacific Current situé entre 40ème et 50ème parallèle. Il se sépare en 2 courants à la 48ème, l'un vers le sud, le California Current et le second vers le nord, l'Alaska Current qui devient l'Alaskan Stream vers l'île de Kodiak. Cette partie nord forme la gyre de l'Alaska, est principalement forcé par les vents [HLS19] [HT08]. En plus de ce courant circule aussi le courant cotier d'Alaska, passant près des côtes de l'Alaska jusqu'à l'île Samalga [WDR05] (figure 1). Nous nous intéresserons particulièrement à la gyre de l'Alaska et au courant cotier.

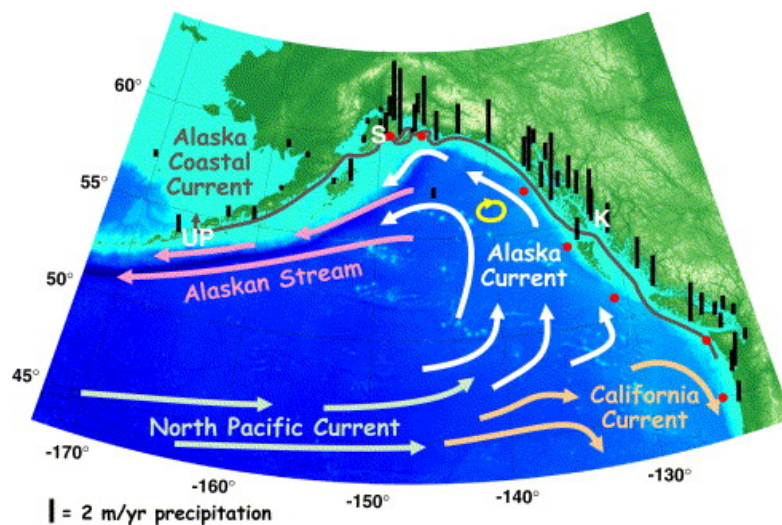


FIGURE 1 – Circulation du Golf d'Alaska [SRS95]

Dans un premier temps, nous présenterons brièvement le modèle utilisé pour simuler la circulation de cette zone et nous expliquerons les difficultés techniques rencontrées. Ensuite, nous analyserons les résultats de la simulation en terme d'énergie cinétique, vorticité relative, température, vitesses horizontales et hauteur de la surface.

## 2 Le modèle CROCO

Le modèle CROCO est basé sur le modèle ROMS et développé et mis à jour par les centres de recherches de l'INRIA, l'Ifremer et du SHOM [ST].

### 2.1 Présentation des fichiers

Afin de mettre en place de la simulation, nous modifions les fichiers suivants :

- **crocotools\_param.m** : les latitudes et longitudes maximales/minimales pour délimiter la zone d'étude et le titre de la configuration

- **param.h** : le nombre de noeud en latitude, longitude et profondeur
- **croco.in** : le pas de temps, fréquence d'enregistrement des données instantanées et les données moyennées (qui dépend du pas de temps).
- **cppdef.h** : "activer" la configuration créer pour l'étude de ma zone, activation de la configuration "Climatology"

### 3 Choix du pas de temps

Au travers plusieurs tests de simulation nous avons pu nous rendre compte que le pas de temps  $\Delta t$  était entre 3500s et 3600s.

Nous pouvons aussi déterminer le pas de maximal pour cette configuration du Nord Pacifique avec la formule suivante :

$$\Delta t \sqrt{gH \left( \frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right)} \leq 0.89 \quad (1)$$

En prenant les valeurs maximales nous avons  $\frac{1}{\Delta x^2} = 3.27 \times 10^{-9}$ ,  $\frac{1}{\Delta y^2} = 3.32 \times 10^{-9}$  et  $H = 1m$ . Nous obtenons comme borne supérieur à notre pas de temps :

$$\Delta t \leq 3500.36s \quad (2)$$

Nous avons donc choisi comme pas de temps  $\Delta t = 3500s$

## 4 Analyse des résultats

### 4.1 Évolution temporelle de l'énergie cinétique

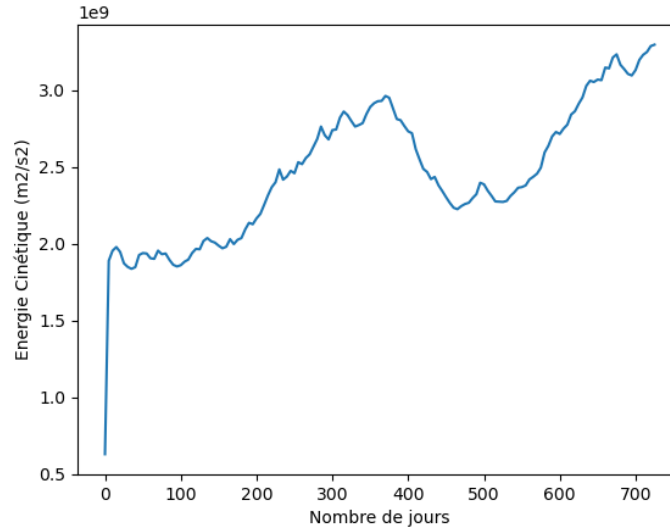


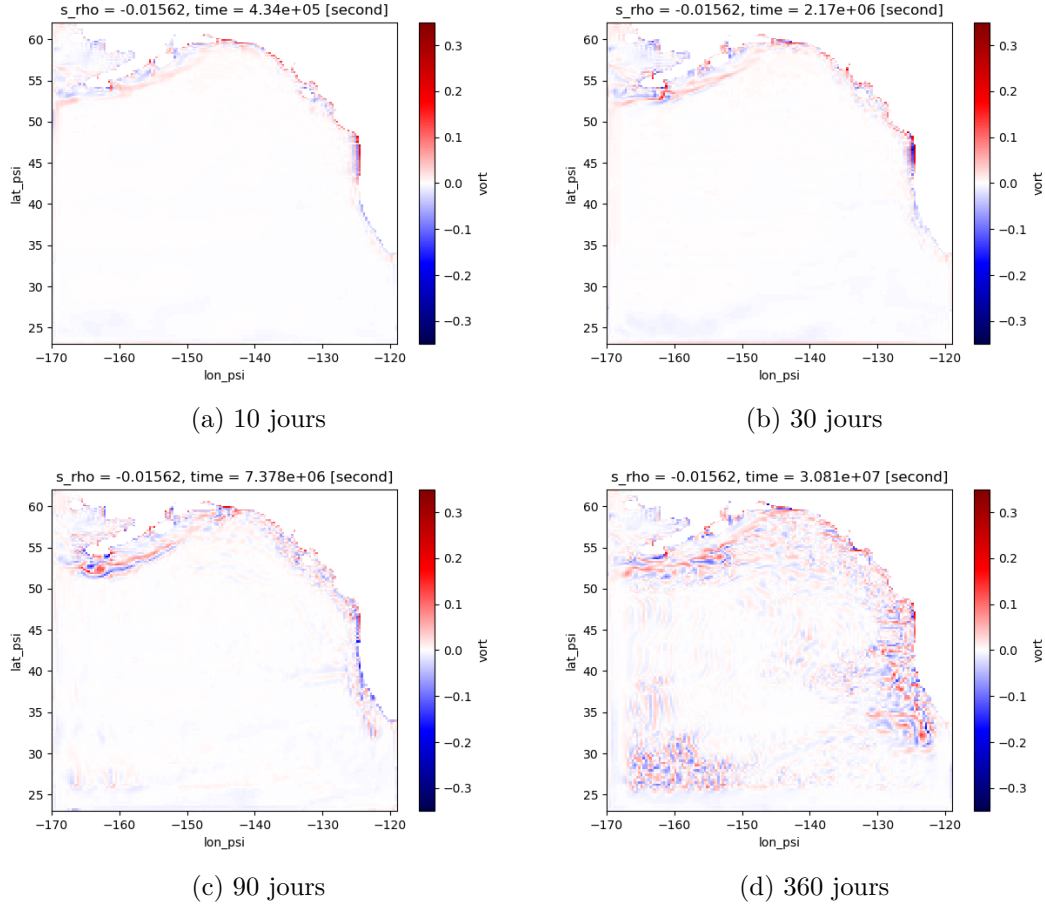
FIGURE 2 – Evolution temporelle de l'énergie cinétique de surface (m2/s2) sur une période de deux ans

Nous pouvons observer l'évolution une période de spin up durant sans doute environ 100 jours. En effet si nous regardons l'énergie cinétique sur cette même période 1 ans ans plus tard, elle plus élevée, entre 1.25 et 1.5 fois plus. L'énergie cinétique semble avoir des variations annuelles (la simulation allant débutant en janvier d'une année jusqu'à décembre de l'année suivante) en étant plus importante en hiver et en automne (figure 2).

## 4.2 Vorticité relative de la zone normalisée par la force de Coriolis locale à la surface pour différents instants

La vorticité relative normalisée est calculée à 10, 30, 90, 360, 500 et 730 jours. Elle est définie par :

$$\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (3)$$



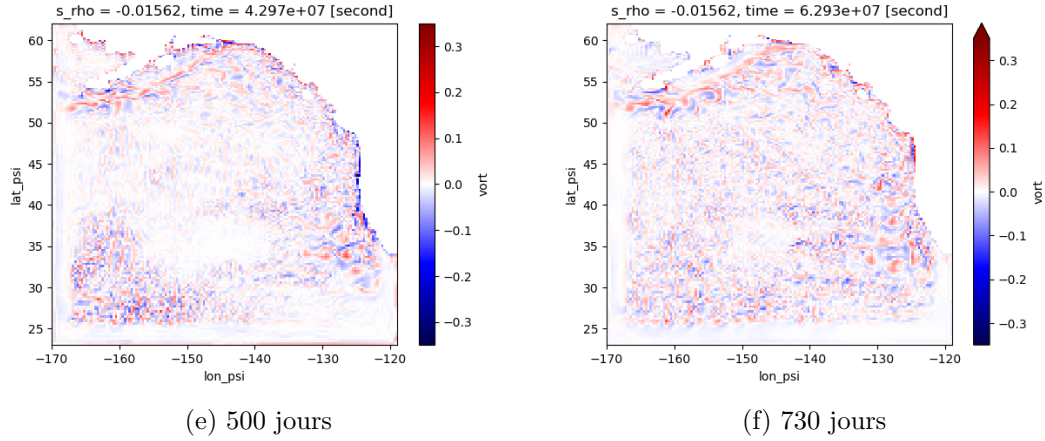


FIGURE 3 – Vorticité normalisée par la force de Coriolis locale à la surface pour différents jours sur une période de deux ans

L'évolution de la vorticité relative normalisée à la surface, renforce l'idée que le spin up de la modélisation puisse durer une centaine de jours. En effet au 90ème jour, la vorticité normalisée est quasiment nulle sur l'ensemble du bassin (figure 3c) au contraire de la suite de la simulation (figures 3d, 3e et 3f). Tout au long de la simulation, les valeurs les plus élevées de la vorticité normalisée se situent au niveau du courant côtier mais aussi au nord au niveau de l'Alaskan Stream et au sud vers le Californian Current. A partir de 360 jours la zone entre les longitudes  $-170^\circ$  et  $-150^\circ$  et les latitudes  $25^\circ$  et  $40^\circ$  est aussi particulièrement élevée. Dans un article publiée en 2019 [HLS19], la figure 9 montre une section réalisée à  $-155^\circ$  des vitesses zonales grâce à des mesures faites par Argo. Elles sont de l'ordre de 3-4 cm/s en surface de  $40^\circ\text{N}$  et  $50^\circ\text{N}$  et varient peu selon la latitude. Cela semble cohérent avec les faibles valeurs de la vorticité normalisée à ces mêmes latitudes. Il ne parait pas avoir beaucoup de littérature scientifique sur la vorticité de l'Alaskan Stream ou de l'Alaska Coastal Current, elle concerne plus la vitesses de ses courants. Ainsi, les vitesses zonales géostrophiques de l'Alaskan Stream pourraient atteindre jusqu'à la centaines de  $\text{m}^2/\text{s}$  d'après des mesures faites dans les années 80 vers la longitude  $-173^\circ$  et vitesses moyennes géostrophiques zonales seraient de l'ordre de 30  $\text{cm}^2/\text{s}$  à la longitude  $-180^\circ$  ([Ree84] et [RS99], figure 3 de [Oni01]), cependant cela n'est pas associé à des informations concernant l'évolution de la vitesse zonale selon  $y$  et de la vitesse méridienne selon  $x$ . De plus l'Alaska Coastal Current étant situé au bord de notre masque, cela pourrait être lié à des erreurs du modèle sur la prise en compte des bords plus qu'à une simulation réelle de ce courant côtier. Il est donc difficile de conclure sur le réalisme ou non de la simulation pour la reproduction de la vorticité de cette région

### 4.3 Vorticité relative de la zone normalisée par la force de Coriolis locale à une profondeur de 400m pour différents instants

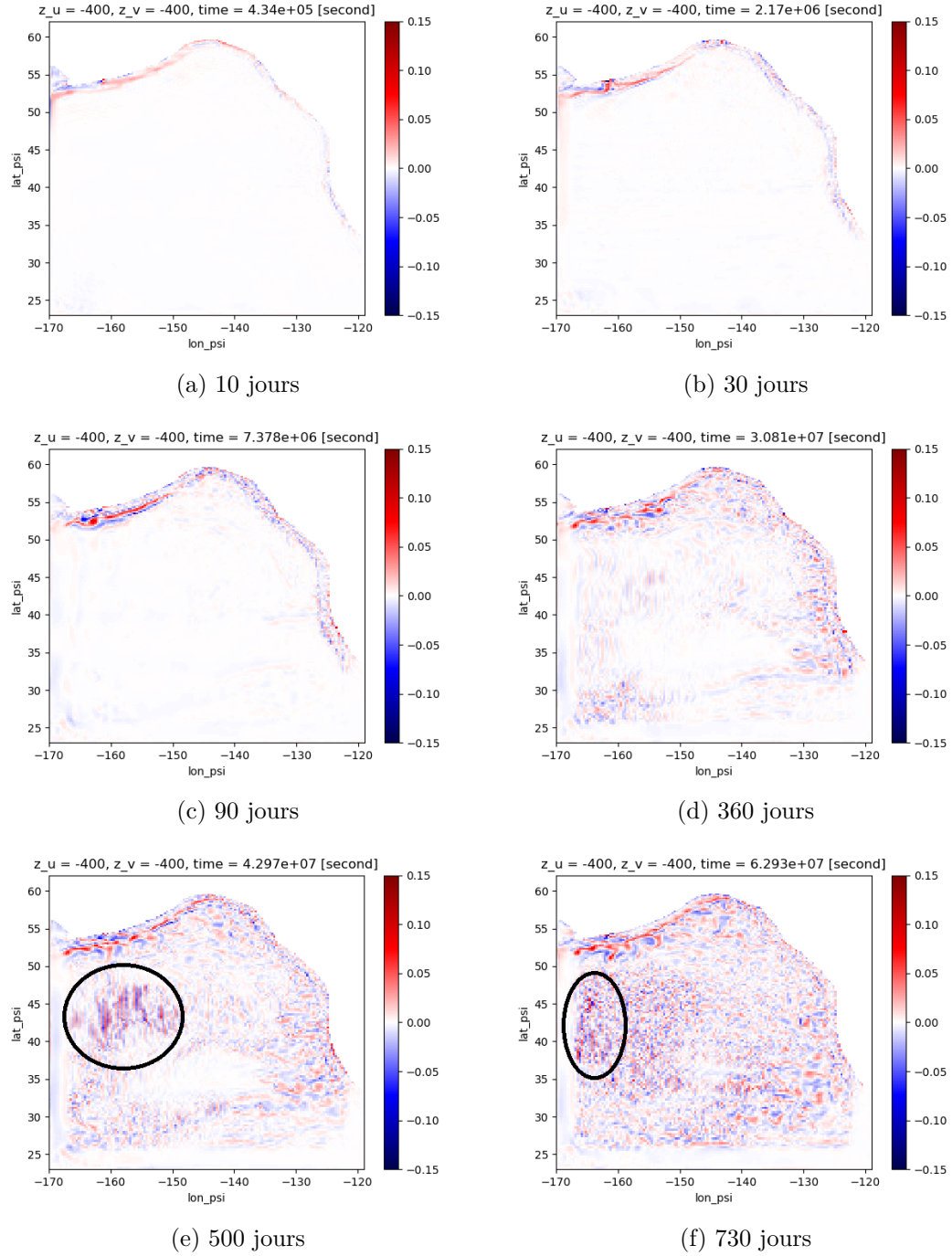
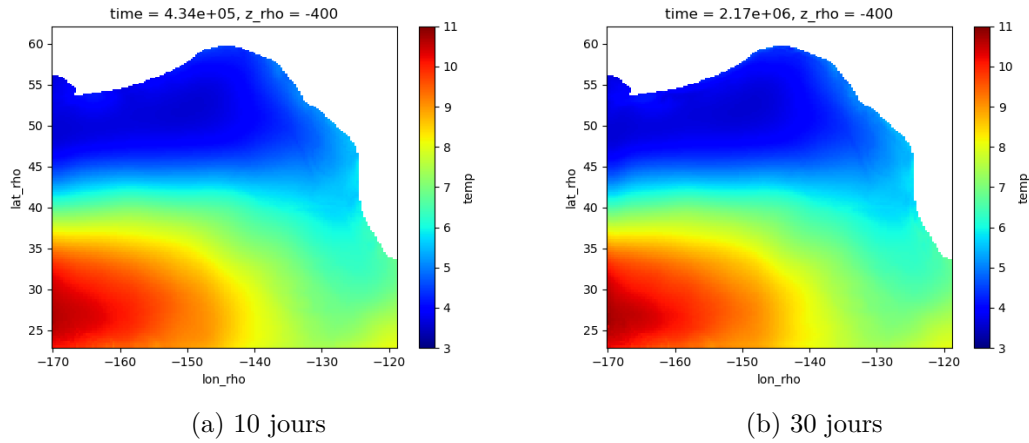


FIGURE 4 – Vorticité normalisée par la force de Coriolis locale à 400m de prondondeur pour différents jours sur une période de deux ans

Nous remarquons aussi que la simulation présente des patterns assez similaire que la surface avec une vorticité normalisée assez forte au niveau du Alaska Current et de l'Alaskan Stream au 360ème jour (figure 4d). Les valeurs semblent plus homogène à partir du 500ème jour et les maximas correspondent au passage du North Pacific Current et de l'Alaskan Stream. Même si ces valeurs de vorticité sont moins élevées qu'en surface ces résultats ne semblent pas forcément cohérents avec la littérature scientifique. En effet, si la figure 9 de l'article [HLS19] évoquée dans 4.2 nous indique que le North Pacific Current est profond jusqu'à 800m, la vitesse zonale à 400m est d'environ 1,5m2/s et ne varie que que peu entre les latitudes 40 et 50. Or, nous remarquons des valeurs relativement élevées ainsi qu'un pattern étrange de bande à partir du 500ème jour (cercles noir sur les figure 4e et 4f) sur cette zone.

Ensuite pour l'Alaskan Stream, l'article [Oni01] publié en 2001, donne des informations sur les vitesses géostrophiques zonales grâce à une section réalisée à la longitude -180° (figure 3 du papier), elles sont de l'ordre de la vingtaines de cm2/s à 400m vers les latitudes 50° à 52, mais de la même manière qu'à la partie 4.2, nous n'avons trouvé des informations issues de la littérature scientifique sur la vorticité ou l'évolution des vitesses zonales et méridiennes selon respectivement  $y$  et  $x$ . Si ne nous pouvons pas conclure pour les valeurs de la vorticité normalisée de l'Alaskan Stream, la simulation ne paraît pas reproduire de manière correct celle du North Pacific Current.

#### 4.4 Température de ma zone à la profondeur de 400m pour différents instants





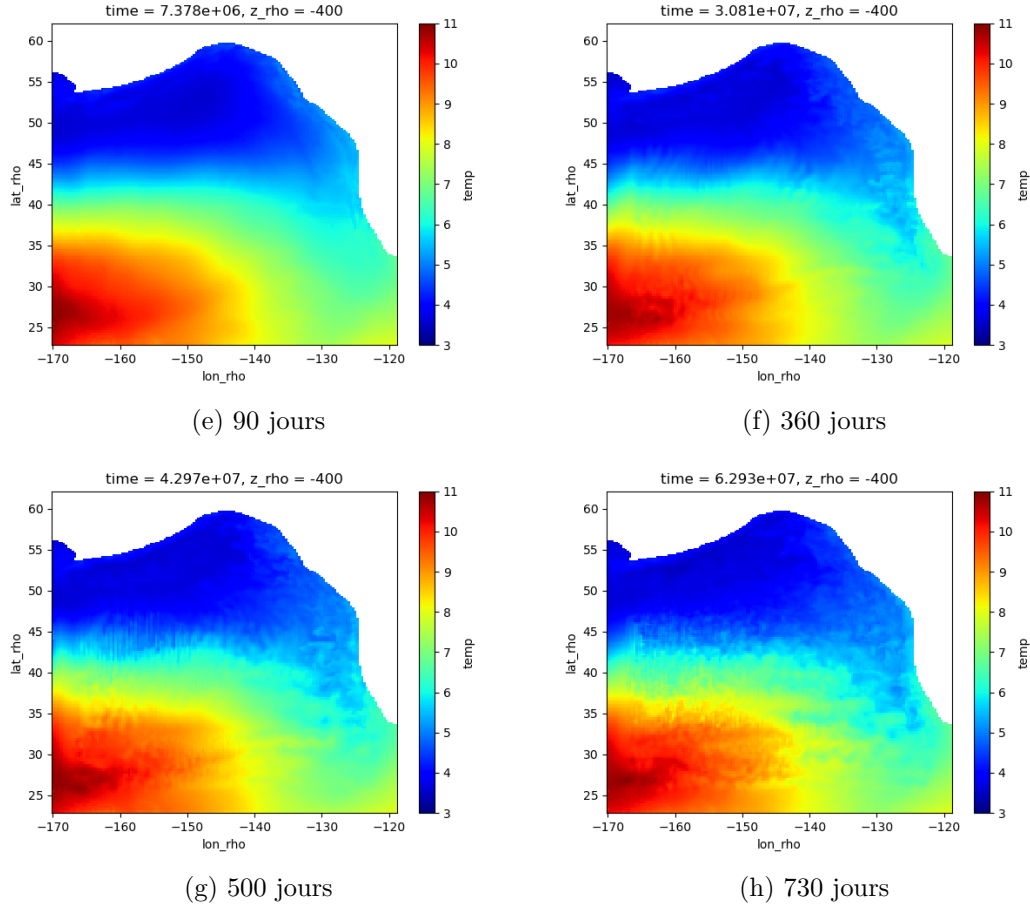


FIGURE 5 – Température à 400m de profondeur pour différents jours sur une période de deux ans

Tout d'abord, les figures pour les jours 10, 30 et 90 jours renforcent le fait que le spin-up pourrait durer une centaine de jours (figures 5a, 5b et 5e). Les masses d'eaux se mélangent qu'à partir du 360ème jour. Le mélange des eaux entre la 40ème et 45ème parallèle pourrait être dû au North Pacific Current et par le California Current entre -130° et -120°.

Les eaux de cette zone sont plutôt froides et nous pouvons distinguer la partie nord, au dessus de 43°N, entre 3°C et 6°C, et celle du sud, avec des température entre 6°C et 11°C. La simulation débutant en janvier, le 360ème et 730ème jour correspondent alors au début de l'hiver et le 500ème au milieu du printemps. La température ne semble pas présenter de variations saisonnière tandis que les mesures effectuées par une station, située à -149° et 59°N, de 1979 à 1983, montrent une température variant entre 3°C et 6°C à -250m. Le minimum a lieu à la fin de l'hiver (figure 4 de l'article [XR84]).

## 4.5 Section zonale et méridienne pour les vitesses et la densité

### 4.5.1 Sections des vitesses zonales et méridiennes

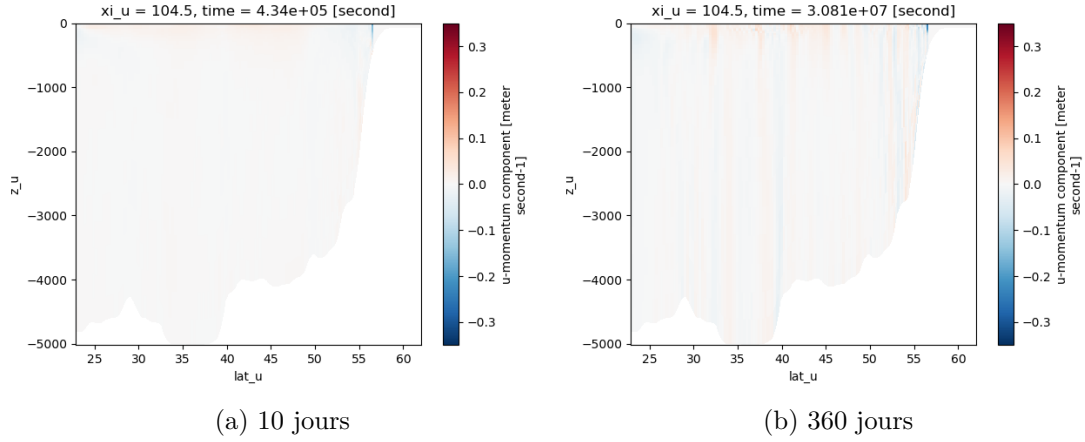


FIGURE 6 – Section méridienne à la longitude  $-135.5^\circ$

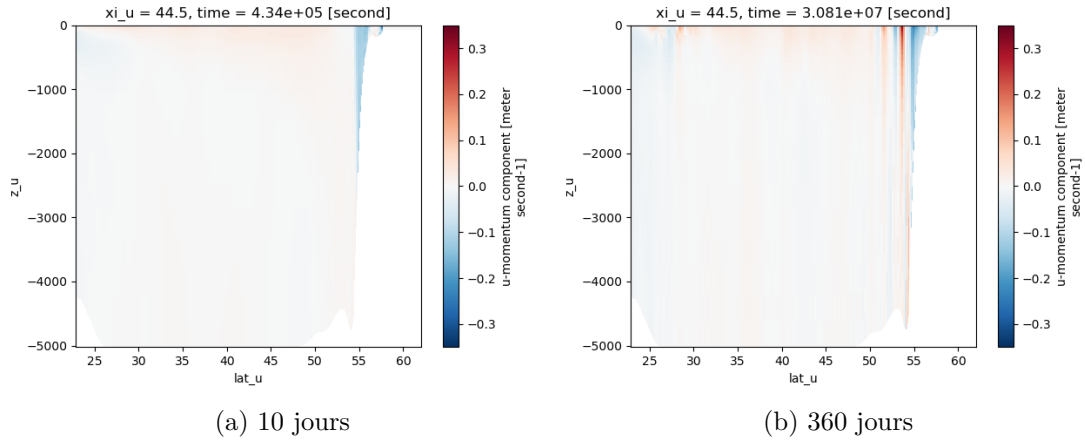


FIGURE 7 – Section méridienne à la longitude  $-155.5^\circ$

Nous avons choisi d'effectuer une section méridienne de la vitesse  $U$  à la longitude  $-135^\circ/-136^\circ$  pour visualiser la fin de l'Alaska Current et à la longitude  $-155^\circ/-156^\circ$  pour visualiser l'Alaskan Stream. Tout d'abord au dixième jour nous sommes encore dans la période du spin-up et nous remarquons des vitesses plus faibles qu'au 360ème jour. La figure 9a de l'article [HLS19] représentait une section méridienne à  $-155^\circ$  des vitesses moyennes zonales entre  $40^\circ$  et  $50^\circ$ . Elles sont bien positive et de l'ordre de  $0.3 \text{ cm/s}$  à la surface et diminue à  $0.05 \text{ cm/s}$  (figure 7b). La simulation semble assez réaliste pour ces latitudes. Cependant, le fait que le modèle est réussi à simuler le courant côtier et l'Alaskan Stream semble moins évident. Nous remarquons deux pics de vitesses au niveau puis après la latitude de  $55^\circ$ . Ces vitesses zonale, au-dessus de la latitude  $55^\circ$ , de l'ordre

de  $-0,2$  m/s et  $-0,3$  m/s près des côtes (figures 6 et 7), sont cohérentes par rapport aux résultats d'une étude faites dans les années 80 : la vitesse du courant varie entre  $0,25$  m/s et  $1,75$  m/s [JRL88]. Ensuite, à  $55^\circ$  près de la cote, nous observons aussi une vitesse zonale avec des vitesses qui pourraient correspondre à l'Alaskan Stream (voir parties 4.3 et 4.2). Toutefois, l'Alaskan Stream ne passe pas aussi près des côtes (figure 1). Ainsi, soit le modèle a bien plutôt bien reproduit les deux courants mais avec l'Alaskan Stream trop proche des côtes, soit le second pic, situé sur le bord pour des profondeurs plus faible que le reste du bassin, correspondrait à des erreurs du modèle. Enfin, la présence de vitesses zonale positive à ces latitudes pourrait correspondre à bifurcation de l'Alaska current (figure 7b).

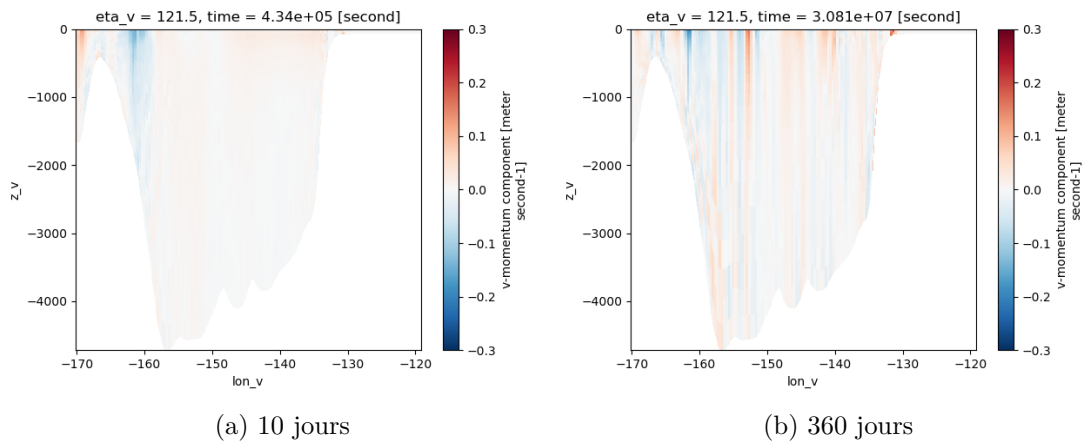


FIGURE 8 – Section zonale à la latitude  $53.69^\circ$

De la même manière, nous avons pris une section à la latitude vers  $53^\circ$  pour vérifier si l'Alaska Stream était bien simulé (figure 1) et la latitude vers  $50^\circ$  pour comparer les valeurs obtenues avec la figure 9b du papier [HLS19].

Il était attendu à ce que les vitesses soient plus faibles puisque nous nous intéressons à l'Alaska Stream qui s'écoule plutôt vers l'ouest. Le modèle simule bien des vitesses méridienne positive entre la longitude  $-155^\circ$  et  $-130^\circ$ , aux alentours de  $0,15$  m/s (figure 9). Cependant, au contraire des mesures du papier [HLS19], nous remarquons des vitesses négative à la longitude  $-135^\circ/-138^\circ$ .

D'autre part, si nous remarquons des vitesses méridiennes négatives cohérentes avec la simulation de l'Alaskan Stream (entre les longitudes  $-160^\circ/150^\circ$ ), nous observons aussi la présence des vitesses positives du même ordre de grandeur qui pourraient correspondre à la bifurcation de l'Alaska Current (figure 8b).

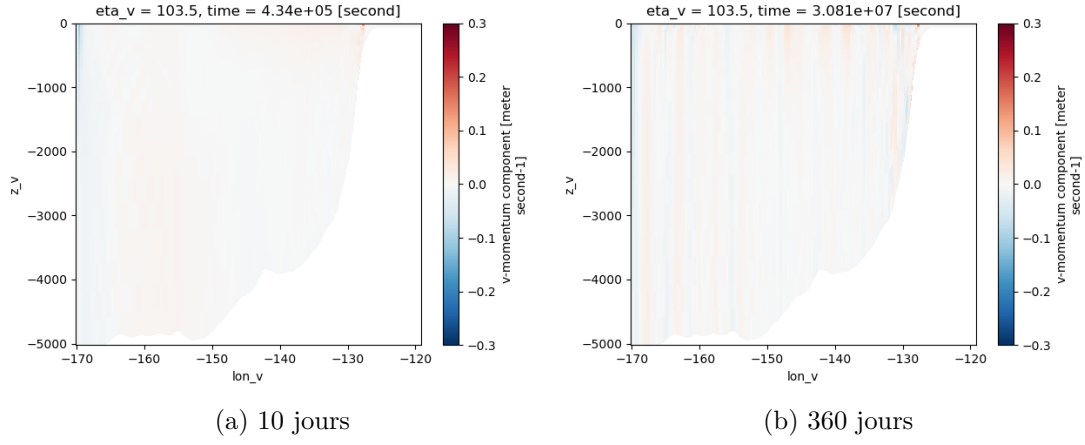


FIGURE 9 – Section zonale à la latitude  $49.98^\circ$

#### 4.5.2 Sections de la densité

Pour le calcul de la densité nous utilisons la formule suivante [Mor]:

$$\rho = 1000 - 0.12 * T + 0.35 * S \quad (4)$$

T correspond à la température en degrés Celcius et la salinité en g/kg.

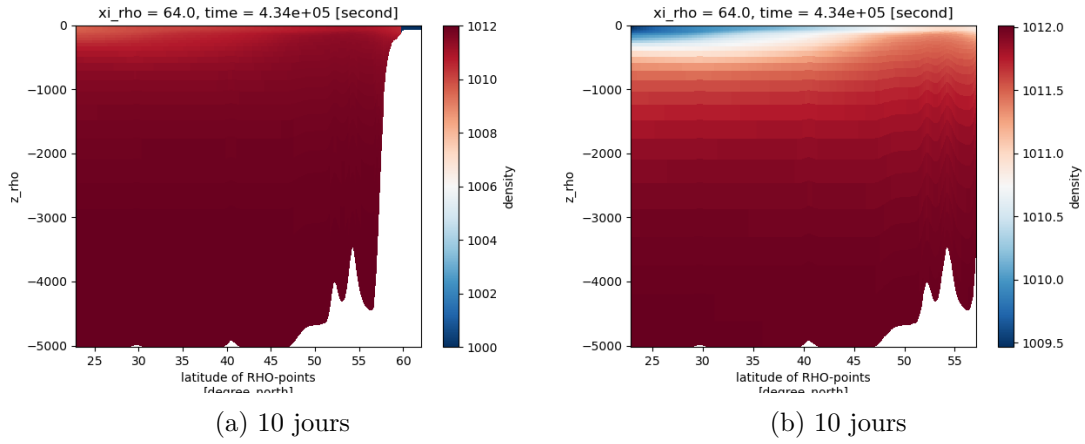


FIGURE 10 – Section méridienne à la longitude  $-149.0^\circ$

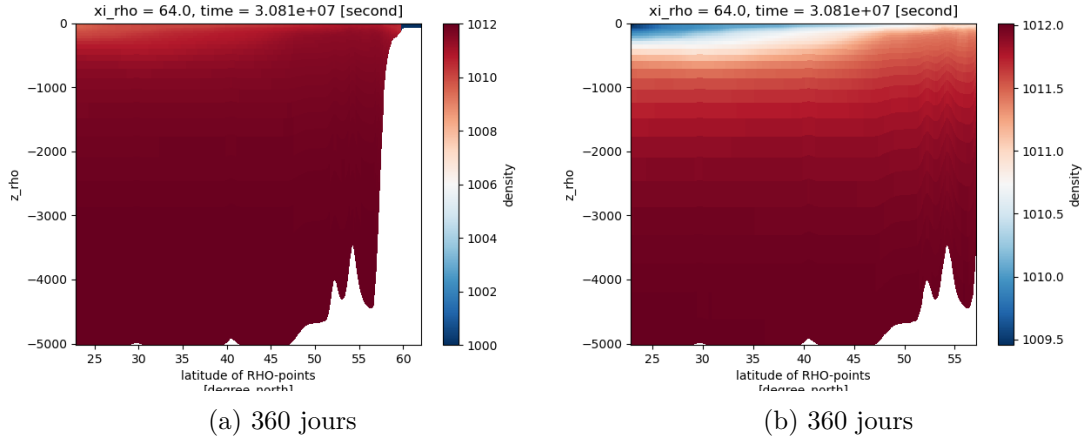


FIGURE 11 – Section méridienne à la longitude  $-149.0^\circ$

La partie du Nord Pacifique, est plus particulièrement le golf de l'Alaska est une des zones dont les surfaces sont les moins salines au monde (figure 1 du papier [DZS19]). L'article [XR84] présente aussi des mesures de salinité réalisées entre 1979 et 1983 par une station situé près des côtes vers  $-149^\circ$  et  $59^\circ$ . Les salinité varie saisonnalement, à la surface entre 26 ‰ et 33 ‰ et à la profondeur de 250m, entre 32 ‰ et 34 ‰. Associées aux faibles températures évoquées dans la partie 4.4, les valeurs de densité apparaissent alors cohérentes (figures 10 et 11). En outre, nous pouvons remarquer que la densité au-dessus de  $60^\circ$  est celle de l'eau douce, cela est aussi en cohérence avec la réalité puisque l'Alaska Coastal Current transporte de l'eau douce, due au forte précipitation dans la zone [WDR05], [Dav].

#### 4.6 Moyenne des vitesses zonales et méridiennes au cours de la dernière année

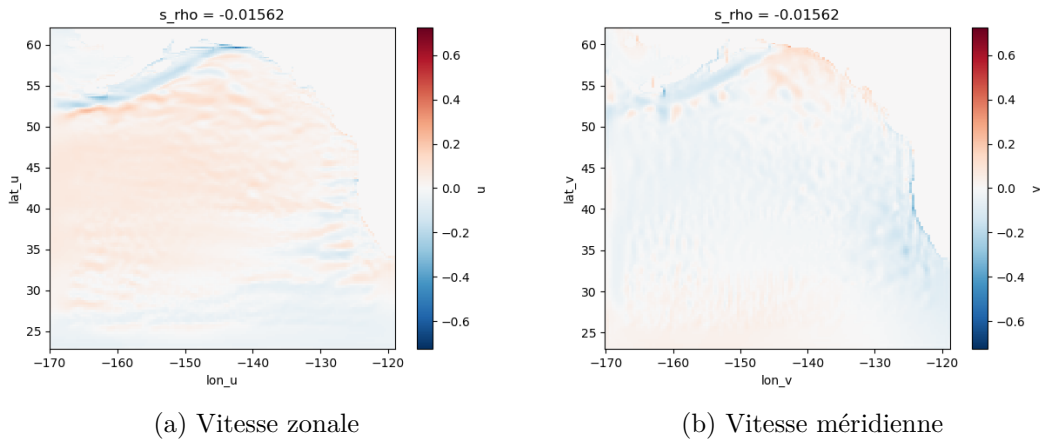


FIGURE 12 – Moyenne sur la dernière année des vitesses zonales et méridiennes de surface

Les vitesses moyennes obtenues apparaissent tout de même cohérentes avec l'existence de la gyre de l'Alaska (figure 12). Le signe et les valeurs des vitesses zonales et vitesses méridiennes à partir de  $48^\circ$ , peuvent bien correspondre à la bifurcation du North Pacific Current. De plus, les ordres de grandeurs et le signe des vitesses zonale et méridienne moyennes de surface sont bien similaire aux vitesse zonales moyennes de surface de la figure 9a-9c du papier [HLS19]. Enfin, ces vitesse moyennes zonales et méridiennes de surface négatives (entre les latitudes de  $50^\circ$  et  $55^\circ$ ), sont en faveur de la simulation de l'Alaskan Stream par le modèle, en moyenne les vitesses horizontales sont négative et le courant s'écoule effectivement vers le Sud-Ouest.

#### 4.7 Variance des SSH au cours de la dernière année

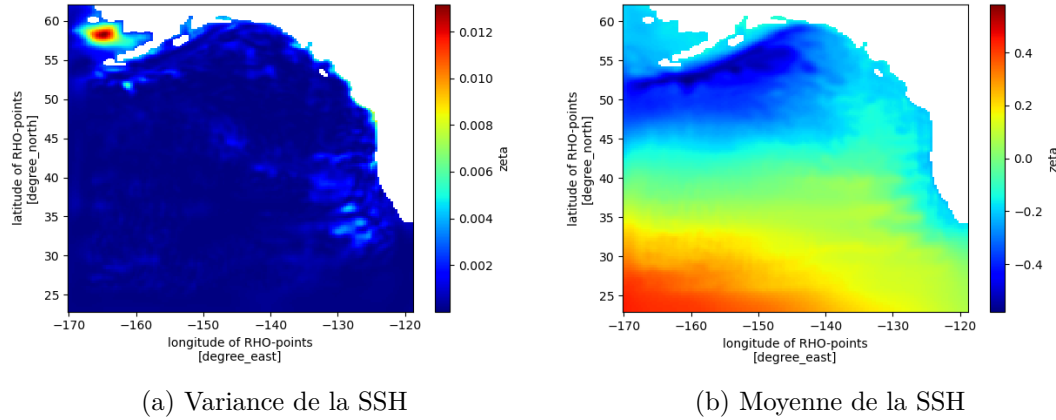


FIGURE 13 – Variance et moyenne de la SSH au cours de la dernière année de la simulation

La variance de la SSH est assez faible, de l'ordre du millimètre sur l'ensemble du bassin, indiquant alors que la variation temporelle au cours de la dernière année de notre simulation est vraiment faible (figure 13a).

Ensuite, nous pouvons comparer la moyenne de la SSH avec une moyenne de la SSH mesurée par altimètre entre 1993 et 2018. Nous pouvons retrouver ces données dans la figure 1 de l'article [HLS19]. Ces données sont cohérentes avec les notre. En effet, du même ordre de grandeur (dizaine de centimètres), la moyenne de la SSH est nulle vers  $40^\circ$  de latitude contre  $35^\circ$  pour la simulation. De plus, de la même manière que les données de l'altimètre, à mesure que l'on s'approche des côte de l'Alaska, la moyenne de la SSH diminue bien sur notre simulation, et augmente en-dessous de la latitude  $35^\circ$  (figure 13b). La reproduction de la SSH par la simulation semble bien réaliste.

#### 4.8 Energie cinétique des eddies au cours de la dernière année pour différents instants

Pour calculer l'énergie cinétique des eddies nous faisons tous d'abord la moyenne des vitesses zonales et méridiennes sur la dernière année. Nous avons alors :

$$U' = U - \bar{U} \quad (5)$$

$$V' = V - \bar{V} \quad (6)$$

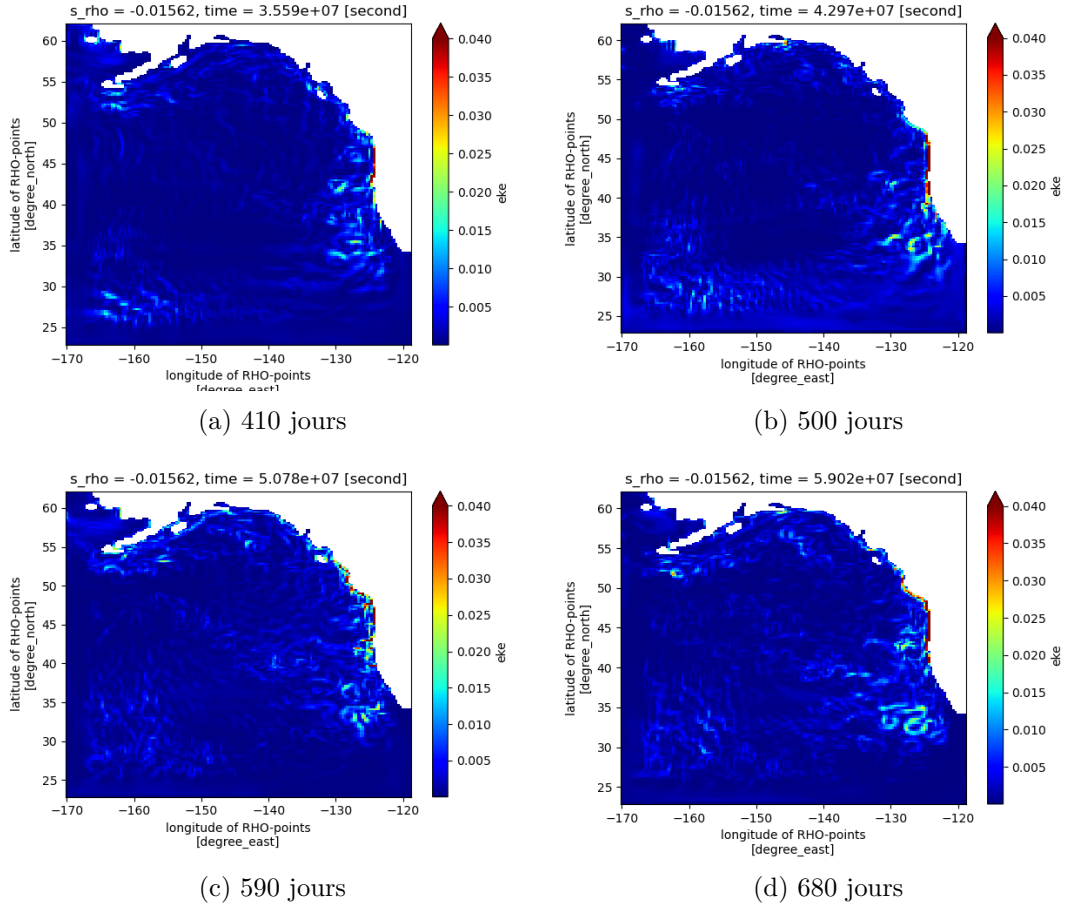


FIGURE 14 – Énergie cinétique des eddies sur la dernières années

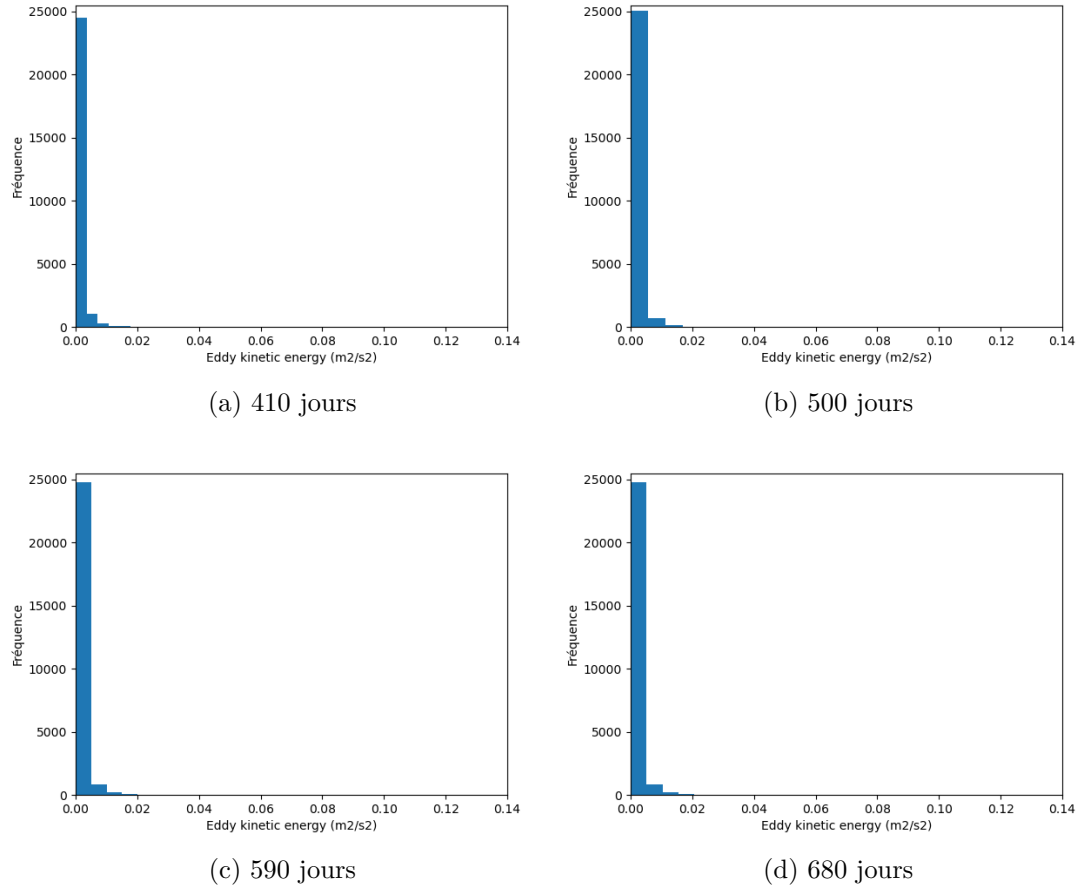


FIGURE 15 – Énergie cinétique des eddies sur la dernières années

Des valeurs anormalement élevées sont présente près de la cote entre les latitudes  $40^\circ$  et  $50^\circ$ , nous avons donc adapter la colorbar pour pouvoir étudier la zone.

L'énergie cinétique des eddies semble assez similaire sur l'ensemble de l'année : la répartition des énergies dans la zone est similaire (figure 15) et ne semble pas avoir de variation saisonnière (figure 14).

L'article [Lad07], présente des calculs de l'énergie cinétique des eddies entre 1998 et 2006 par altimétrie, les figures 1 et 2 du papier permettent d'avoir un ordre de grandeurs de ces énergies dans la partie nord du Gold d'Alaska. C'est à partir de la latitude à  $52^\circ$  que l'on retrouve les plus fortes valeurs de la partie Nord, avec des valeurs de  $0.2 \text{ m}^2/\text{s}^2$  à plus de  $1.6 \text{ m}^2/\text{s}^2$ . Cela ne correspond pas aux ordres de grandeur de notre simulation, nos valeurs d'énergie cinétique d'eddies pour cette zone sont de l'ordre de 10 à 100 fois inférieur (figure 14).



## 5 Conclusion

Ainsi, nous avons effectué une simulation durant sur 2 ans par le modèle CROCO. Tout d'abord, le modèle semble bien reproduire la circulation de l'Alaska. Cependant, certains paramètres de la circulation comme la vorticité sont difficilement comparable avec des données issues de la littérature scientifique. Toutefois, de nombreux paramètres, comparable à des mesures in-situ ou acquises par télédétection, comme les vitesses zonales et méridiennes, la SSH et la densité de notre simulation n'apparaissent pas incohérentes avec ses données réelles.

## Table des figures

1	Circulation du Golf d'Alaska [ <a href="#">SRS95</a> ] . . . . .	2
2	Evolution temporelle de l'énergie cinétique de surface (m2/s2) sur une période de deux ans . . . . .	3
3	Vorticité normalisée par la force de Coriolis locale à la surface pour différents jours sur une période de deux ans . . . . .	5
4	Vorticité normalisée par la force de Coriolis locale à 400m de profondeur pour différents jours sur une période de deux ans . . . . .	6
5	Température à 400m de profondeur pour différents jours sur une période de deux ans . . . . .	8
6	Section méridienne à la longitude $-135.5^\circ$ . . . . .	9
7	Section méridienne à la longitude $-155.5^\circ$ . . . . .	9
8	Section zonale à la latitude $53.69^\circ$ . . . . .	10
9	Section zonale à la latitude $49.98^\circ$ . . . . .	11
10	Section méridienne à la longitude $-149.0^\circ$ . . . . .	11
11	Section méridienne à la longitude $-149.0^\circ$ . . . . .	12
12	Moyenne sur la dernière année des vitesses zonales et méridiennes de surface	12
13	Variance et moyenne de la SSH au cours de la dernière année de la simulation	13
14	Énergie cinétique des eddies sur la dernières années . . . . .	14
15	Énergie cinétique des eddies sur la dernières années . . . . .	15

## Références

- [Dav] T. Neil Davis. Alaska’s freshwater coastal jet. *Geophysical institute of Alaska*. 12
- [DZS19] Yan Du, Yuhong Zhang, and Jiancheng Shi. Relationship between sea surface salinity and ocean circulation and climate change. *Science China Earth Sciences*, 62:771–782, 2019. 12
- [HLS19] Hristina G Hristova, Carol Ladd, and Phyllis J Stabeno. Variability and trends of the alaska gyre from argo and satellite altimetry. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(8):5870–5887, 2019. 2, 5, 7, 9, 10, 13
- [HT08] Stephanie A Henson and Andrew C Thomas. A census of oceanic anticyclonic eddies in the gulf of alaska. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 55(2):163–176, 2008. 2
- [JRL88] Walter R Johnson, Thomas C Royer, and John L Luick. On the seasonal variability of the alaska coastal current. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 93(C10):12423–12437, 1988. 10
- [Lad07] Carol Ladd. Interannual variability of the gulf of alaska eddy field. *Geophysical Research Letters*, 34(11), 2007. 15
- [Mor] Yves Morel. La circulation thermohaline. 11
- [Oni01] Hiroji Onishi. Spatial and temporal variability in a vertical section across the alaskan stream and subarctic current. *Journal of oceanography*, 57:79–91, 2001. 5, 7
- [Ree84] RK Reed. Flow of the alaskan stream and its variations. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 31(4):369–386, 1984. 5
- [RS99] RK Reed and PJ Stabeno. A recent full-depth survey of the alaskan stream. *Journal of oceanography*, 55:79–85, 1999. 5
- [SRS95] PJ Stabeno, RK Reed, and JD Schumacher. The alaska coastal current: continuity of transport and forcing. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 100(C2):2477–2485, 1995. 2, 17
- [ST] R. Benshila L. Bordoio G. Cambon F. Dumas S. Le Gentil F. Lemarié P. Marchesiello S.Jullien, M.Caillaud and S. Theetten. Technical and numerical doc. 2
- [WDR05] Thomas J Weingartner, Seth L Danielson, and Thomas C Royer. Freshwater variability and predictability in the alaska coastal current. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 52(1-2):169–191, 2005. 2, 12
- [XR84] Qingcheng Xiong and Thomas C. Royer. Coastal temperature and salinity in the northern gulf of alaska, 1970–1983. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 89(C5):8061–8068, 1984. 8, 12