

# Étude de la circulation générale du Golfe de Gascogne avec le modèle CROCO

Sébastien Calmé

Master 1 Sciences de la Mer

Parcours Océanographie Physique et Biogéochimique

Institut Pythéas, Université d'Aix-Marseille

Année académique 2024/2025

Date de rendu : 28/04/2025

# Résumé

Ce rapport présente une étude de la circulation océanique dans le Golfe de Gascogne à l'aide du modèle numérique CROCO. Une description du cadre physique et mathématique de la modélisation océanique y est détaillé ainsi que les spécificités techniques du modèle CROCO, les bases de données utilisées et les choix des paramètres spatiaux et temporels. La simulation, menée sur une période de 10 ans, permet d'identifier les différents courants qui composent la circulation générale du Golfe de Gascogne. Les résultats révèlent une variabilité saisonnière marquée des courants de surface, bien que certaines divergences soient observées par rapport aux données in situ. La comparaison avec d'autres études et observations indique que l'absence de modélisation des marées et des apports fluviaux pourrait expliquer ces écarts. Il serait intéressant d'intégrer ces éléments pour améliorer la représentation de la circulation océanique dans cette zone.

# Abstract

This report presents a study of ocean circulation in the Bay of Biscay using the CROCO numerical model. A description of the physical and mathematical framework of ocean modeling is given, as well as the technical specifics of the CROCO model, the databases used and the choice of spatial and temporal parameters. The simulation, carried out over a 10-year period, identifies the different currents that make up the general circulation of the Bay of Biscay. The results reveal a marked seasonal variability in surface currents, although some discrepancies are observed in relation to in situ data. Comparison with other studies and observations suggests that the absence of tidal and river input modelling could explain these discrepancies. It would be interesting to integrate these elements to improve the representation of ocean circulation in this area.

# Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>1 Matériel et méthodes</b>	<b>1</b>
1.1 Modèles numériques de circulation océanique . . . . .	1
1.2 Caractéristiques du modèle CROCO . . . . .	2
1.3 Base de données utilisées . . . . .	4
1.4 Choix des paramètres spatio-temporels . . . . .	5
<b>2 Résultats</b>	<b>6</b>
2.1 Diagnostic du modèle . . . . .	6
2.2 Masses d'eau et courants associés . . . . .	7
2.3 Variation saisonnière des courants . . . . .	7
<b>3 Discussion</b>	<b>9</b>
<b>4 Conclusion</b>	<b>9</b>

# Introduction

Le Golfe de Gascogne se situe dans l’océan Atlantique Nord Est. La zone d’étude se situe entre 43°N-48.5°N et 8°W-2°W. Cette région comprise entre le nord de l’Espagne et la Bretagne est constituée d’un plateau continental qui peut atteindre les 200 km, suivi d’un talus et d’une plaine abyssale. Cette zone est largement étudiée (Charria et al. (2013);

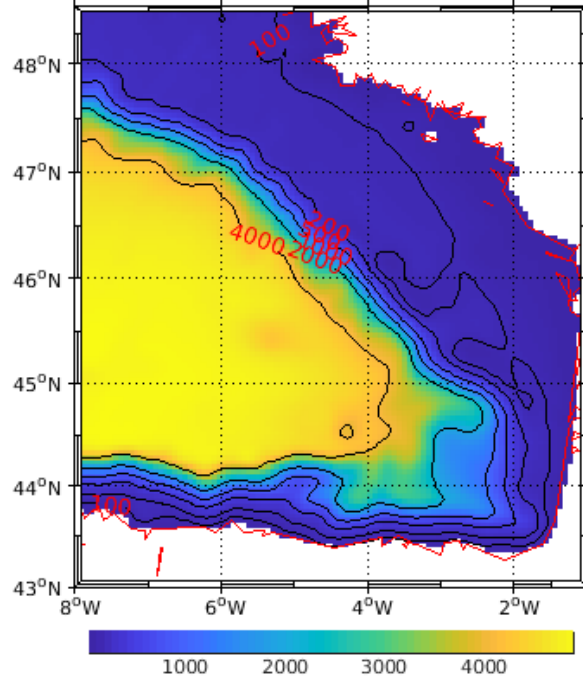


FIGURE 1 – Bathymétrie du Golfe de Gascogne

Friocourt et al. (2007); Le Boyer et al. (2013); Solabarrieta et al. (2014)) notamment pour ses courants de surfaces fortement dépendant des saisons, mais aussi pour la formation de tourbillons et de son courant de pente. La simulation décrite dans ce rapport tente de modéliser ces différents phénomènes et d’étudier la variabilité saisonnière de ceux-ci.

## 1 Matériel et méthodes

### 1.1 Modèles numériques de circulation océanique

La circulation océanique est modélisée à l’aide d’un système d’équations qui représentent le comportement physique de l’océan avec certaines hypothèses. Ces équations sont discrétisées puis résolues pour obtenir une approximation de la solutions exacte de ces équations. Les équations utilisées sont les équations de Naviers Stokes qui permettent de décrire le mouvement d’une particule fluide :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + f v + K_h \nabla_h^2 u + K_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} - f u + K_h \nabla_h^2 v + K_z \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g = 0 \quad (3)$$

Avec  $u, v, w$  qui sont les composante de la vitesse du courant selon les directions  $x, y, z$  respectivement. Le paramètre de coriolis est noté  $f$  et la pression  $p$ .  $\rho_0$  est la masse volumique de référence de l'eau de mer dans l'hypothèse d'approximation de Boussinesq. L'hypothèse hydrostatique permet d'écrire l'équation 3. Enfin  $K_h$  et  $K_z$  sont des coefficients de viscosité turbulente selon la direction  $x, y$  et  $z$  respectivement avec l'hypothèse  $K_x = K_y = K_h$ .

L'équation de conservation de la masse avec l'hypothèse d'incompressibilité est aussi utilisées ainsi que la conservation de la chaleur et du sel qui s'écrivent de la façon suivante :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T = D_h \nabla_h^2 T + D_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (5)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla S = D_h \nabla_h^2 S + D_z \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} \quad (6)$$

$$\rho = \rho(T, S, z) \quad (7)$$

Avec  $T$  la température,  $S$  la salinité,  $D_h$  le coefficient de diffusion turbulente horizontal et  $D_z$  le coefficient de diffusion turbulente verticale. Ces coefficient sont considéré les mêmes pour la température et la salinité même si en réalité ils peuvent être différents. Ces équations sont discrétisées à l'aide d'une grille adaptée, les conditions initiales et aux frontières sont données aux modèles à l'aide de base de données. Une fois toutes les étapes précédentes réalisées une approximation des solutions exactes de ces équations est calculée au temps  $t+1$  sur toute la grille.

## 1.2 Caractéristiques du modèle CROCO

CROCO (Coastal and Regional Ocean COmmunity model) est un modèle océanique régional de conception récente, développé dans le cadre de la communauté scientifique française. Il vise à intégrer les avancées majeures issues de plusieurs codes existants (notamment MARS3D, ROMS, SNH, et SYCOM), tout en s'appuyant principalement sur la structure du modèle ROMS AGRIF.

Ce modèle est conçu pour simuler les processus océaniques à fine échelle et étudier leurs interactions avec les dynamiques à grande échelle. Il repose sur un code source écrit majoritairement en Fortran, complété par des structures de contrôle en langage C, ainsi que des interfaces d'entrée/sortie en format NetCDF. L'ensemble est configuré à l'aide de l'outil `CROCO_TOOLS`, composé essentiellement de scripts Matlab, permettant de préparer les simulations numériques, de les paramétrer selon la zone d'étude et d'en exploiter les résultats.

CROCO utilise une grille horizontale cartésienne non uniforme de type Arakawa C, qui permet de positionner les composantes de la vitesse aux interfaces des mailles, contrairement aux autres variables placées aux centres des cellules. La verticalité du modèle repose sur un système de coordonnées sigma généralisées, adapté pour suivre fidèlement les variations bathymétriques tout en conservant une structure verticale régulière. Les paramètres de pente de surface et de fond permettent d'ajuster la résolution verticale selon

la complexité de la topographie sous-marine, conformément à l'approche définie par Song et Haidvogel (1994).

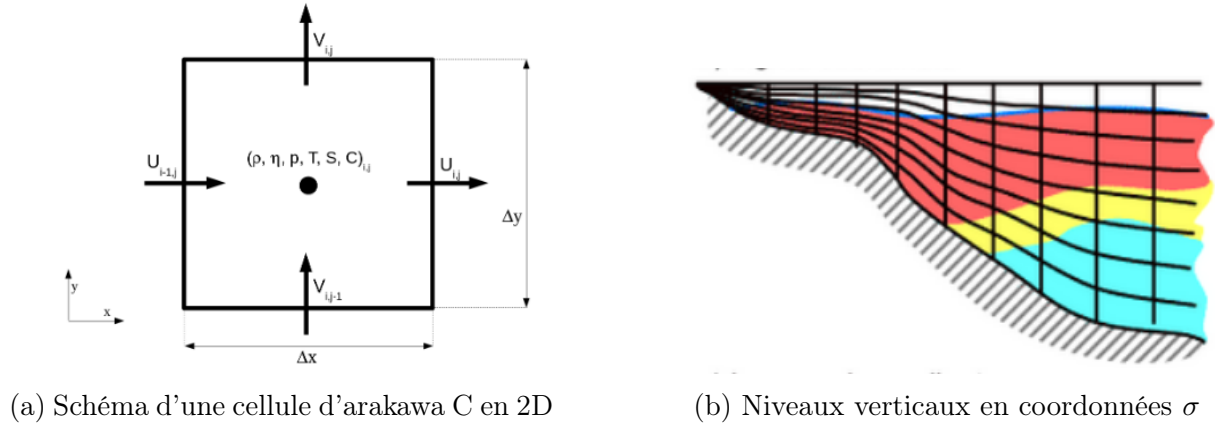


FIGURE 2 – Elements de la méthode de discrétisation du modèle CROCO

Il faut aussi prendre en compte dans un modèle le calcul du pas de temps qui est un élément essentiel de la simulation. Le critère de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) est une condition nécessaire pour assurer la stabilité des schémas numériques dans la majorité des modèles.

Ce critère stipule que la distance qu'un phénomène peut parcourir pendant un pas de temps ne doit pas excéder la distance séparant deux points de la grille.

Dans le cas d'une grille unidimensionnelle, la condition CFL s'exprime de la manière suivante :

$$u \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 1 \quad (8)$$

avec  $u$  qui représente la vitesse caractéristique du phénomène,  $\Delta t$  le pas de temps, et  $\Delta x$  la taille de la maille.

Cette condition assure que l'information ne peut se propager que d'une maille à une autre voisine à chaque pas de temps. Elle devient particulièrement restrictive pour les processus océaniques rapides, comme les ondes de gravité externes, ou barotropes, liées à l'hypothèse hydrostatique.

Ces ondes sont une solution des équations primitives verticalement intégrées, correspondant au mode externe. Leur dynamique très rapide, comparée aux autres processus océaniques, impose l'utilisation d'un pas de temps très court pour respecter la condition CFL.

Appliquer ce pas de temps à l'ensemble des processus du modèle rendrait la simulation extrêmement coûteuse en ressources de calcul.

Pour dépasser cette contrainte, CROCO, comme de nombreux autres modèles océaniques, utilise une technique appelée time-splitting. Elle repose sur l'utilisation de deux pas de temps distincts :

- un pas de temps court, adapté au mode externe, défini par la condition CFL
- un pas de temps plus long, utilisé pour le mode interne, qui concerne les phénomènes baroclines (variations de température, de salinité, etc.).

Dans une grille bidimensionnelle (en  $x$  et  $y$ ), la condition CFL pour le mode externe s'écrit :

$$\Delta t_{\text{ext}} \leq \frac{1}{\sqrt{gH}} \left( \frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right)^{-1/2} \quad (9)$$

où  $H$  est la hauteur de la colonne d'eau, et  $\sqrt{gH}$  représente la vitesse de phase des ondes de gravité.

Le pas de temps pour les processus internes est ensuite obtenu en multipliant  $\Delta t_{\text{ext}}$  par un facteur *NDTFAST* ce qui permet d'alléger le coût de calcul tout en assurant la stabilité du modèle.

### 1.3 Base de données utilisées

Le modèle CROCO s'appuie sur un ensemble d'outils appelés CROCO TOOLS, composés de trois scripts principaux en langage Matlab :

- `make_grid.m` : permet de configurer la grille du modèle en intégrant la bathymétrie et en éditant le masque de terre/mer.
- `make_forcing.m` : génère les conditions aux limites et les forçages nécessaires.
- `make_clim.m` : initialise les conditions de départ du modèle.

Ces scripts exploitent des jeux de données externes, téléchargés au préalable, afin d'assurer une modélisation précise des conditions océaniques. Trois bases de données principales ont été utilisées :

- ETOPO 2022 (NOAA, 2022) : fournit une topographie et bathymétrie haute résolution issues de plusieurs sources. Elle permet une représentation détaillée des fonds marins et des côtes.
- ICOADS (International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set, NOAA, 2006) : rassemble des données sur l'interface océan-atmosphère, incluant plus de 300 ans d'observations de surface (annuelles et mensuelles depuis 1800). Ces données servent à modéliser les flux de quantité de mouvement, de chaleur et de salinité à la surface et au fond de l'océan.
- World Ocean Atlas 2009 (NOAA, 2009) : contient des profils de température, salinité et paramètres biogéochimiques mesurés au cours des 50 dernières années. Les données sont organisées sur une grille de 1° et servent à définir les conditions initiales du modèle. Les vitesses de courant sont déduites dynamiquement par le calcul du courant géostrophique à partir des gradients de densité (fonction des profils verticaux de température et salinité) sur les 1000 premiers mètres.

L'exécution de ces scripts génère cinq fichiers NetCDF qui servent d'entrées au modèle CROCO :

- `croco_grd.nc` : fichier de grille
- `croco_frc.nc` : fichier de forçage (surface, vent, etc.)
- `croco_clm.nc` : conditions climatiques (profils verticaux)
- `croco_oa.nc` : données d'assimilation optionnelles (objective analysis)
- `croco_ini.nc` : conditions initiales

## 1.4 Choix des paramètres spatio-temporels

Afin de réaliser une étude centrée sur les **îles Canaries**, les coordonnées géographiques de la simulation ont été choisies de manière à couvrir le bassin canarien. Cette zone permet d’analyser à la fois l’upwelling côtier sur les côtes africaines et les tourbillons à méso-échelle générés par la présence des îles.

Les paramètres spatiaux du modèle sont définis à l’aide du script `crocotools_params.m` en spécifiant :

- les coordonnées de la zone d’étude,
- la résolution spatiale,
- le nombre et la taille des mailles horizontales,
- le nombre de niveaux verticaux,
- les paramètres des coordonnées verticales sigma,
- le type de frontières (ici toutes ouvertes autour des Canaries).

TABLE 1 – Coordonnées choisies pour la simulation

Latitude min	Latitude max	Longitude min	Longitude max
42°N	48.5°N	0°W	8°W

Le tableau suivant résume les principaux paramètres de la grille, calculés à partir de la résolution via le script `make_grid.m` :

TABLE 2 – Paramètres de la grille calculés par le modèle

Résolution	LLm	MMm	$dx_{min}$	$dx_{max}$	$dy_{min}$	$dy_{max}$	N
1/15	104	118	4.9064	5.4185	4.9128	5.4163	32

La résolution choisie est suffisamment fine pour représenter toutes les îles et permettre la formation réaliste des tourbillons. Une fois la grille définie, la simulation est créée et le schéma de turbulence KPP (Large et al., 1994) est sélectionné dans le fichier `cppdefs.h`. Les paramètres de grille sont également renseignés dans le fichier `params.h`.

La dernière étape consiste à déterminer le pas de temps externe ( $\Delta t_{ext}$ ) en respectant le critère CFL (voir équation (9)). Ce pas de temps est ensuite utilisé pour calculer le pas de temps interne ( $\Delta t_{int}$ ) à l’aide de la variable `NDTFAST`. Les paramètres temporels sont ajustés dans le fichier `croco.in`.

TABLE 3 – Valeurs des principaux paramètres temporels du modèle

$\Delta t_{ext}$ (s)	$\Delta t_{int}$ (s)	NDTFAST	NTIMES	NAVG	NWRT
18	1080	60	7200	720	720

Pour simuler une période plus longue, nous avons enchaîné des simulations mensuelles sur une durée totale de 10 ans, modifiable dans le fichier `run_croco.bash`.

Les simulations ont été lancées sur le cluster de calcul de l’OSU Pythéas, permettant des calculs haute performance. Les résultats ont ensuite été visualisés dans Matlab via le script `croco_gui`, en exploitant les fichiers netCDF produits mensuellement par le modèle.



## 2 Résultats

### 2.1 Diagnostic du modèle

Avant d'utiliser les résultats de la simulation il faut d'abord faire un diagnostic de celle-ci pour s'assurer que les résultats sont exploitable et notamment à partir de quelle année. En effet le modèle met un certain temps avant de se stabiliser. Le modèle ajuste les variables dynamiques et thermodynamiques jusqu'à ce que les différent flux se stabilisent ainsi que la circulation. De plus les vitesses sont calculées à partir de 1000 mètres avec la condition  $\vec{v} = 0$ . Il faut donc le temps que la vitesse soit calculé sur l'ensemble du domaine pour pouvoir obtenir des valeurs réalistes des différents paramètres physiques.

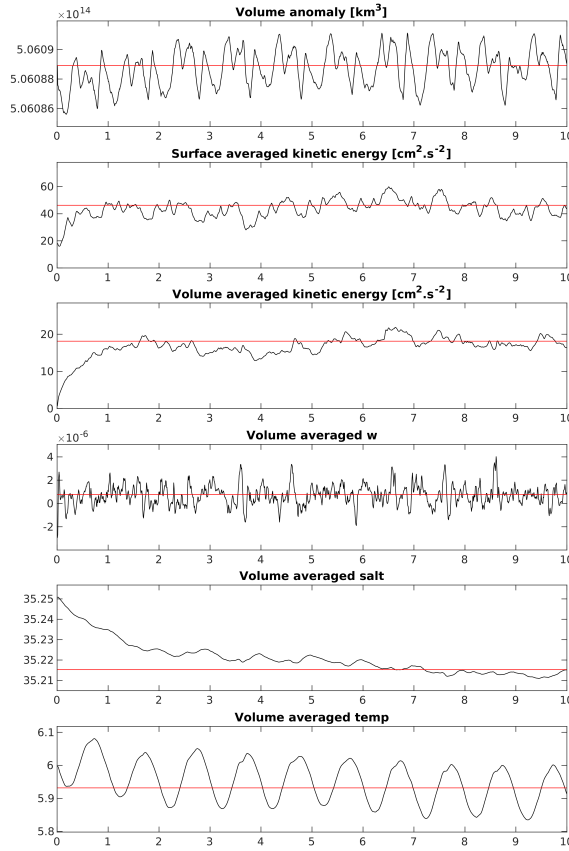
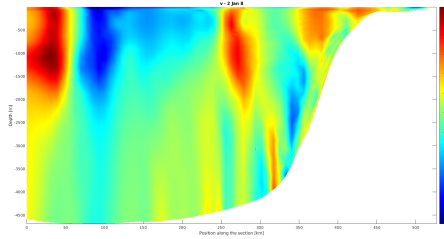


FIGURE 3 – Diagnostic de la modélisation de la Golfe de Gascogne.

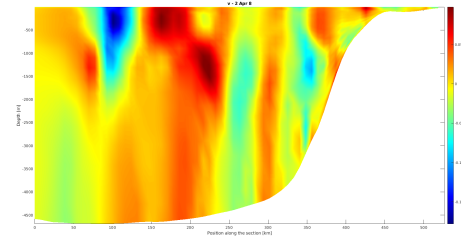
Comme on peut le voir dans la figure 3 le modèle se stabilise en quantité de sel à partir de l'année 3 ou 4 ce qui permet d'analyser les résultats sur 6 ans. Les autres paramètres se stabilisent rapidement cependant on observe une légère diminution de la température moyennée par le volume qui peut être expliqué par le fait que les marées et les sources d'eau douce ne sont pas modéliser dans ici.

## 2.2 Masses d'eau et courants associés

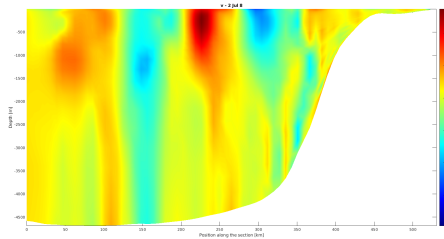
La colonne d'eau dans le Golfe de Gascogne est composée de différentes masses d'eau qui sont l'ENACW ( Eastern North Atlantic Water) de la surface à 300 mètres de profondeur, de 300 à 1500 mètres on retrouve la MW (Mediterranean water) enfin de 1500 à 2000 mètres se situe la LSW (Labrador Sea Water) Friocourt et al. (2007). La circulation générale du Golfe de Gascogne est composée d'un courant anticyclonique longeant le talus qui est un courant de pente permanent. Il se situe entre 0 et 300 mètre de profondeur juste au dessus du talus comme on peut l'observer sur les figures 4. Au dessus du plateau continentale on observe des courants qui sont le résultat du forçage par le vent. Dans la plaine abyssale du Golfe de Gascogne on observe la formation de tourbillons cyclonique et anticyclonique dont la profondeur peut atteindre plus de 2500 mètres.



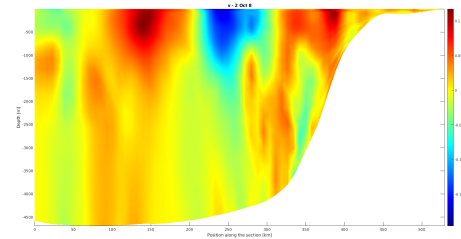
(a) Section verticale des vitesses V en Janvier à 45°N



(b) Section verticale des vitesses V en Avril à 45°N



(c) Section verticale des vitesses V en Juillet à 45°N



(d) Section verticale des vitesses V en Octobre à 45°N

FIGURE 4 – Variation de la vitesse V au cours des saisons le long du 45°N

Ces différents courants sont assez bien étudiés et correspondent à des observations et des modélisations déjà réalisées comme Charria et al. (2013); Friocourt et al. (2007); Le Boyer et al. (2013); Solabarrieta et al. (2014). Nous verrons dans la suite que certains courants sont plus soumis aux variations saisonnières que d'autres.

## 2.3 Variation saisonnière des courants

Les courants de surfaces sur le plateau continentale sont générés par le forçage du vent ce qui implique qu'ils sont fortement dépendants de la saison. On peut le constater sur la figure 5. En effet des courants de nord-ouest le long de la côte sont plus intenses en hiver et au printemps avec un écoulement plus turbulent qu'en été et en automne. On

observe également la formation de tourbillons cyclonique et anticyclonique dans la plaine abyssale. il semble que leur formation est indépendante de la saison.

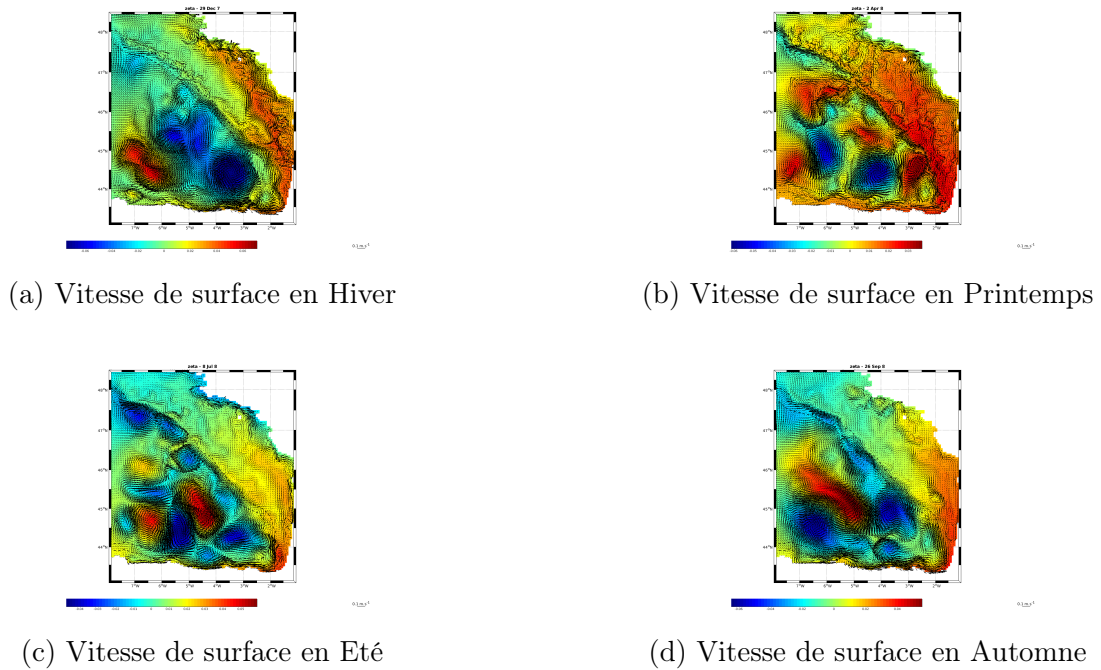
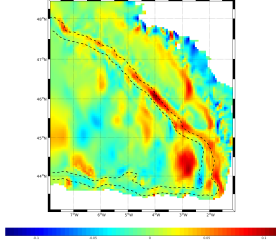
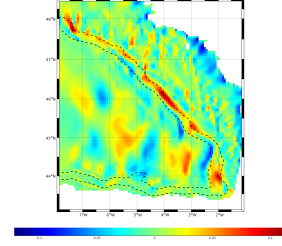


FIGURE 5 – Elevation de surface et vitesse des courants de surface au cours des saisons

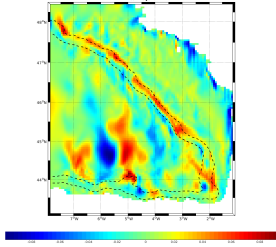
Les courants de surfaces ne sont pas les seuls à varier selon la saison. Le courant de pente au dessus du talus voit son intensité diminuer du printemps à l'été puis augmenter de l'automne jusqu'à la fin de l'hiver comme on peut le voir sur la figure 6. On peut voir que les tourbillon atteigne de plus grande profondeur dans la plaine abyssale en été et en automne ce qui impacte la vitesse moyennée sur la hauteur d'eau selon la direction Nord-Sud.



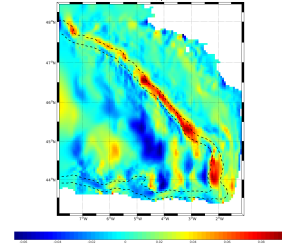
(a) composante V intégrée sur la hauteur en Décembre



(b) composante V intégrée sur la hauteur en Avril



(c) composante V intégrée sur la hauteur en Juillet



(d) composante V intégrée sur la hauteur en Septembre

FIGURE 6 – Variations de la composante V intégrée sur la hauteur d'eau au cours des saisons

### 3 Discussion

Les résultats obtenus par cette simulation ont été comparé a des données de bouées dérivante et des simulations utilisant un autre modèles Charria et al. (2013); Friocourt et al. (2007); Le Boyer et al. (2013); Solabarrieta et al. (2014). Les données ont montré que la circulation de surface alterné entre une circulation globalement cyclonique en hiver et au printemps et anticyclonique l'été et l'automne. On obtient avec la simulation la même circulation de surface en hiver et au printemps mais pas en été et en automne. La simulation à permis de retranscrire en parti la circulation générale du Golfe de Gascogne notamment du courant de pente de la formation de tourbillons au nord de l'espagne et d'une partie de la variabilité saisonnière des courants de surfaces. Ces variations par rapports aux autres modèles et aux données mesurées peuvent être expliquer en partie par le fait que les marées ne sont pas modélisées mais aussi les apports en eau douce des fleuves. Ces éléments pourraient avoir un impact important sur la circulation de surface.

### 4 Conclusion

La modélisation du Golfe de Gascogne avec le modèle CROCO a une échelle assez fine ( $1/15^\circ$ ) a permis d'observer les différents courants et tourbillons qui composent la circulation générale de cette zone. Le courant de pente a bien été modéliser tandis que la variabilité saisonnières des courants de surface ne correspond pas à la réalité observé. Pour aller plus loin il faudrait reprendre cette simulation en y incluant les les marées et les apports d'eau douce.

## Références

- Charria, G., Lazure, P., Le Cann, B., Serpette, A., Reverdin, G., Louazel, S., Batifoulier, F., Dumas, F., Pichon, A., and Morel, Y. (2013). Surface layer circulation derived from lagrangian drifters in the bay of biscay. *Journal of Marine Systems*, 109-110 :S60–S76. XII International Symposium on Oceanography of the Bay of Biscay.
- Friocourt, Y., Levier, B., Speich, S., Blanke, B., and Drijfhout, S. S. (2007). A regional numerical ocean model of the circulation in the bay of biscay. *Journal of Geophysical Research : Oceans*, 112(C9).
- Le Boyer, A., Charria, G., Le Cann, B., Lazure, P., and Marié, L. (2013). Circulation on the shelf and the upper slope of the bay of biscay. *Continental Shelf Research*, 55 :97–107.
- Solabarrieta, L., Rubio, A., Castanedo, S., Medina, R., Charria, G., and Hernández, C. (2014). Surface water circulation patterns in the southeastern bay of biscay : New evidences from hf radar data. *Continental Shelf Research*, 74 :60–76.