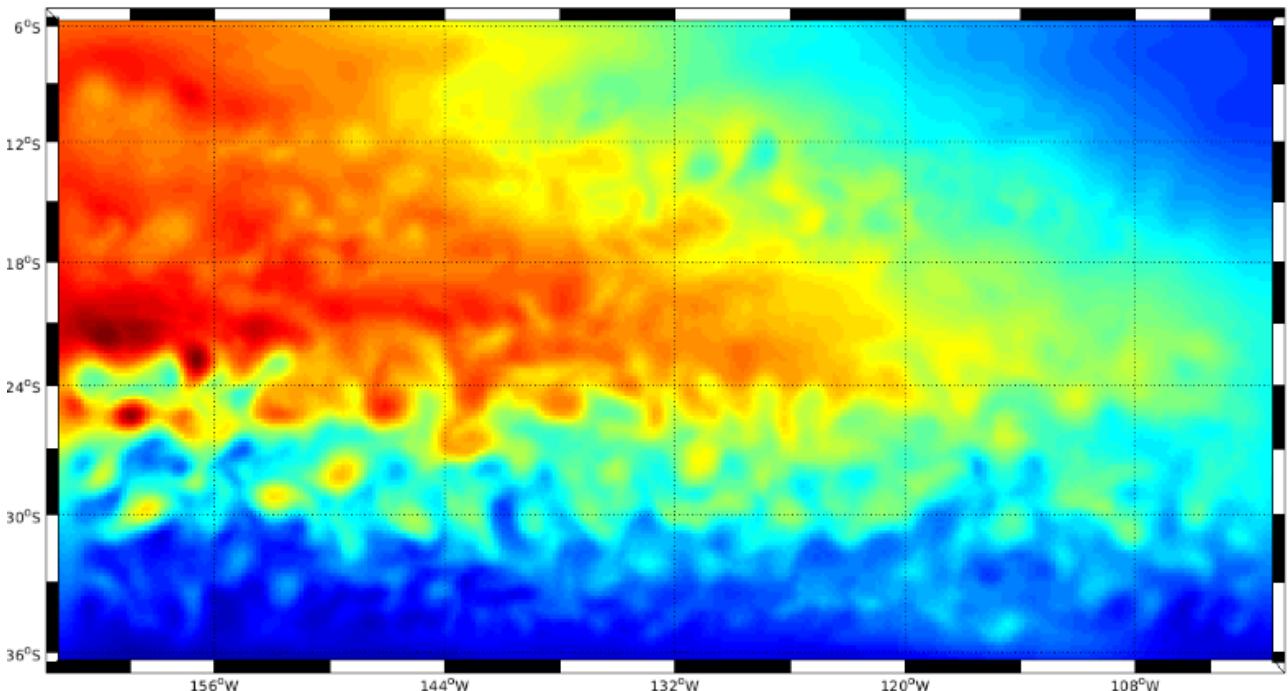




MASTER SCIENCES DE LA MER 2021-2022  
OPB205 - MODÉLISATION 3D OCÉANIQUE

Responsable UE : [A. Doglioli](#)

Étude de la dynamique du gyre subtropical du Pacifique Sud



VOLORIO-GALÉA Anastasia

06 mai 2022

## Résumé

Le modèle de simulation de la circulation océanique côtière et régionale CROCO est une plateforme récemment conçue afin d'aider les scientifiques à mieux comprendre et découvrir de nouveaux concepts relatifs à la dynamique des océans. Une simulation du gyre subtropical du Pacifique Sud a été réalisée sur 10 ans à partir de ce modèle. L'étude de la stabilité de la simulation et des paramètres, tels que la déformation de la surface libre  $\eta$ , le champ de vitesse, la température et la salinité, a permis de mettre en exergue la fialité du modèle par rapport à la théorie de la dynamique océanique. Après comparaison des données simulées à celles mesurées *in situ*, notamment lors de la campagne WOCE, des écarts se sont manifestés, dont l'origine principale s'explique par un temps de simulation trop court du modèle CROCO. À l'avenir, une simulation à l'échelle inter-décennale serait privilégiée, afin d'obtenir des résultats plus proches des phénomènes observés sur une échelle de temps longue.

*Mots clefs* : Modèle 3D océanique CROCO, Gyre subtropical du Pacifique Sud, Stabilité, Simulation décennale, Campagne WOCE

## Abstract

The coastal and regional ocean circulation simulation model CROCO is a recent platform aimed at helping scientists better understand and discover new concepts on ocean dynamics. A based-simulation from this model of the South Pacific subtropical gyre was carried out over a decade. The study of the stability of the simulation and parameters such as the Free Surface Elevation  $\eta$ , the velocity field, the temperature and the salinity made it possible to highlight the reliability of the model with regards to the theory of the ocean dynamics. After comparing the simulated data with the ones measured *in situ*, in particular during the WOCE campaign, discrepancies were revealed. The main origin of these discrepancies is explained by a too short-term simulation of the CROCO model. In the future, a simulation at an inter-decadal scale would be more convenient, in order to obtain qualitative results more similar to phenomena observed on a long time scale.

*Keywords* : CROCO ocean 3D model, South Pacific Subtropical Gyre, Steadiness, Decennial simulation, WOCE campaign

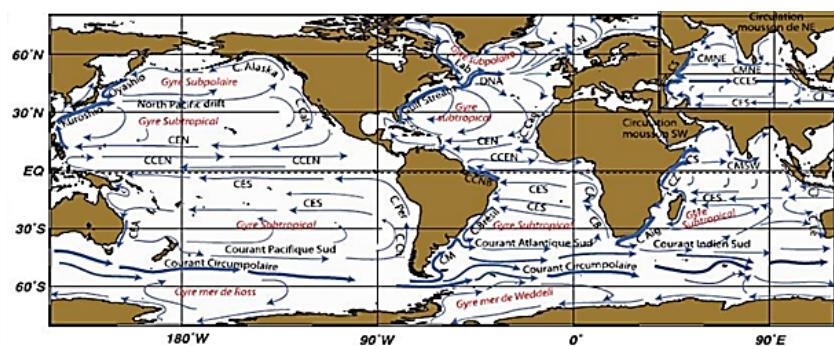
# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>3</b>
1.1	Le gyre subtropical du Pacifique Sud . . . . .	3
1.2	Modélisation du gyre subtropical du Pacifique Sud . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Matériels et méthodes</b>	<b>4</b>
2.1	Le modèle CROCO . . . . .	4
2.1.1	Généralités . . . . .	4
2.1.2	CROCO et les équations primitives . . . . .	4
2.2	Paramétrisation du modèle . . . . .	6
2.2.1	Paramétrisation de la grille spatiale . . . . .	6
2.2.2	Paramétrisation temporelle . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Résultats</b>	<b>7</b>
3.1	Diagnostiques . . . . .	7
3.2	Le gyre subtropical du Pacifique Sud modélisé . . . . .	8
3.2.1	Transport d'Ekman - transport horizontal . . . . .	8
3.2.2	Pompage d'Ekman - transport vertical . . . . .	9
3.2.3	Courant géostrophique . . . . .	10
3.2.4	Température et salinité . . . . .	10
3.3	Étude décennale du gyre subtropical du Pacifique Sud . . . . .	11
<b>4</b>	<b>Discussion</b>	<b>12</b>
<b>5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>12</b>

# 1 Introduction

## 1.1 Le gyre subtropical du Pacifique Sud

Situé entre l’Australie et l’Amérique du Sud, le gyre subtropical du Pacifique Sud représente le plus grand gyre océanique à l’échelle du globe, délimité au nord par l’équateur et au sud par le gyre de Ross (Fig. 1.1). Il s’étend presque sur 10 000 km de long et ne présente pas d’obstacles bathymétriques, puisque seuls quelques îles, telles que la Polynésie Française ou encore l’île de Pâques y sont présentes. Le centre du gyre subtropical est considéré comme étant un pôle océanique d’inaccessibilité<sup>1</sup>, étant donné qu’il représente l’endroit le plus éloigné des continents. Paradoxalement, bien que ce gyre soit très grand, il est très peu actif et est perçu comme le plus grand désert océanique en raison de sa vie marine peu signifiante.



**Figure 1.1** – Circulation générale des océans, tiré de l'ouvrage *L'océan planétaire* de Michèle Fieux

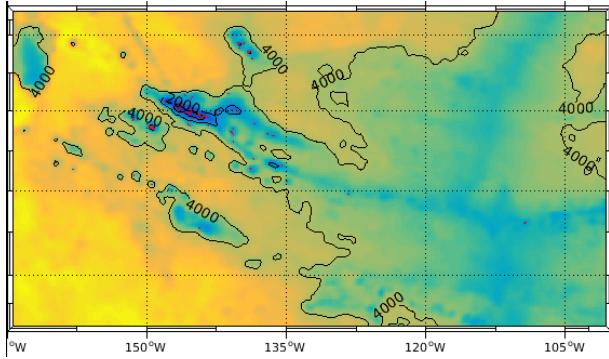
## 1.2 Modélisation du gyre subtropical du Pacifique Sud

Le gyre subtropical du Pacifique Sud a été choisi dans le cadre du projet Modélisation 3D océanique, afin d'étudier l'évolution de sa dynamique au cours des années, à l'aide du modèle CROCO<sup>2</sup>. Dans le but d'obtenir un compromis optimal entre un temps de calcul de modélisation raisonnable, et une résolution élevée du modèle, seul un quart du gyre a été modélisé, avec la partie comprenant les îles polynésiennes (Fig. 1.2).

L'objectif de la simulation du gyre consiste ici à vérifier dans un premier temps, la stabilité du modèle exécuté par CROCO, puis à comparer les résultats des variations décennales du gyre à ceux publiés dans l'article de Roemmich et al. (2016) *Multidecadal Change of the South Pacific Gyre Circulation*, et ce afin d'estimer s'il est possible ou non d'observer une évolution du gyre sur le long terme, et de déterminer les éventuelles améliorations à apporter en vue d'une prochaine simulation.

<sup>1</sup>. Un pôle d'inaccessibilité correspond au lieu le plus difficile à atteindre selon un critère géographique d'inaccessibilité. Ce dernier est défini souvent par le point le plus éloigné du littoral.

## *2. Coastal and Regional Ocean Community*



**Figure 1.2** – Bathymétrie d’une partie du gyre subtropical du Pacifique Sud, réalisée à l’aide du modèle CROCO

## 2 Matériels et méthodes

### 2.1 Le modèle CROCO

#### 2.1.1 Généralités

La modélisation du gyre a été réalisée à partir de CROCO, une plateforme de modélisation 3D de l’océan régional et côtier, récemment construite à partir du modèle préexistant ROMS<sup>3</sup>, version AGRIF. Cette plateforme repose sur un travail collaboratif de chercheurs de différents horizons, notamment Ifremer<sup>4</sup>, IRD<sup>5</sup>, CNRS<sup>6</sup>, SHOM<sup>7</sup>, etc.

CROCO a d’ores et déjà fait ses preuves, et a permis d’apporter une meilleure compréhension des activités physique et biogéochimique des zones côtières du sud, en Afrique australe par exemple, notamment sur le fonctionnement des systèmes d’upwelling d’Afrique du Sud, du canal du Mozambique, ou encore du courant des aiguilles, etc.

Par rapport à ROMS, ce modèle amélioré présente les nouvelles caractéristiques suivantes :

- Un solveur non hydrostatique ;
- Des capacités de couplage avec l’atmosphère, les ondes de surface, la dynamique des sédiments, la biogéochimie océanique, etc.

#### 2.1.2 CROCO et les équations primitives

De la même façon que ROMS, le modèle CROCO résout les équations dites primitives, qui comprennent les équations de mouvement (Éq. 2.1), de conservation (Éq. 2.2 et 2.3) et d’état de l’eau de mer (Éq. 2.4). Ces équations primitives sont utilisées, car elles représentent un moyen efficace pour décrire approximativement l’océan, pour des résolutions supérieures à 1km.

La représentation des équations primitives dépend du système de coordonnées choisies. Ici, les équations primitives sont décrites dans un système de coordonnées cartésiennes ( $O, x, y, z$ ).

---

3. *Regional Ocean Modeling System*

4. Institut français de recherche pour l’exploitation de la mer

5. Institut de recherche pour le développement

6. Centre national de la recherche scientifique

7. Service hydrographique et océanographique de la Marine

Ainsi, CROCO résoud les équations primitives suivantes :

- 1- Les équations du mouvement pour les axes  $x$  et  $y$  :

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + fv + A_h \nabla_h^2 u + A_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \cdot \nabla v = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} - fu + A_h \nabla_h^2 v + A_v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \\ 0 = \frac{\partial p}{\partial z} + \rho g \end{cases} \quad (2.1)$$

- 2- L'équation de conservation de la masse, ou équation de continuité :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.2)$$

- 3- Les équations de conservation de la chaleur et de la salinité :

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial t} + u \cdot \nabla T = K_h \nabla_h^2 T + K_v \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \\ \frac{\partial S}{\partial t} + u \cdot \nabla S = K_h \nabla_h^2 S + K_v \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} \end{cases} \quad (2.3)$$

- 4- Les équations d'état de l'eau de mer, calculées à partir de l'algorithme TEOS10<sup>8</sup> :

$$\rho = \rho(T, S, p) \quad (2.4)$$

Les variables utilisées dans les équations sont les suivantes :

**Table 1** – Variables des équations primitives calculées par CROCO.

Variables	Noms	Variables	Noms
$x, y, z$	Axes du référentiel terrestre	$u, v, w$	Composantes du vecteur vitesse $\vec{V}$
$f$	Paramètre de Coriolis	$p$	Pression
$\rho$	Masse volumique	$g$	Force de gravité
$T$	Température	$S$	Salinité
$A_h, A_v$	Coefficient de viscosité turbulente sur l'axe horizontal et l'axe vertical	$K_h, K_v$	Coefficient de diffusivité turbulente

Ces équations simplifiées ont pu être 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, qui considère que la masse volumique est, en tout point de l'espace et à tout instant, la somme d'une valeur de référence  $\rho_0$  et d'une fluctuation  $\rho'(x, y, z, t)$

---

8. Thermodynamic Equation Of Seawater 2010

- 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 de la turbulence

## 2.2 Paramétrisation du modèle

### 2.2.1 Paramétrisation de la grille spatiale

Une fois le système CROCO installé, la première étape de paramétrisation du modèle consiste à définir la zone d'étude sur Matlab à l'aide de la commande *ad\_findgeocoord.m*, et d'enregistrer sur le fichier *crocotools\_param.m* les coordonnées géographiques du domaine de calcul, ainsi que la résolution horizontale choisie.

Il est important de préciser sur ce même fichier, l'état des frontières ; en l'occurrence, dans le cas du gyre, l'ensemble des frontières sont ouvertes. Cette manipulation est à réitérer sur un autre fichier, *cppdefs.h*, en activant les clés correspondantes aux frontières ouvertes.

Ensuite, à l'aide de l'exécution *make\_grid* sur Matlab, nous obtenons la figure bathymétrique (Fig.1.2), ainsi que les valeurs de la grille qui seront utilisées pour le calcul du critère CFL<sup>9</sup>. Ces valeurs, à savoir ici  $LLm0=324$  (taille de la grille en longitude),  $MMm0=174$  (taille de la grille en latitude),  $N=32$  (taille de la grille verticale), sont ensuite intégrées au fichier *param.h*.

Enfin, il est nécessaire de calculer la taille de la grille à partir des valeurs précédentes ( $LLm * MMm * N$ ), afin de ne pas exécuter des simulations trop longues à l'issue de la paramétrisation. Ici, la grille a une taille totale de 1 804 032 mailles.

Afin de pouvoir reproduire l'ensemble de cette première manipulation dans le gyre subtropical du Pacifique Sud, l'ensemble des valeurs et commandes entrées ont été résumées dans le tableau suivant (Tab.2) :

**Table 2** – Valeurs et commandes adaptées au gyre subtropical du Pacifique Sud et entrées dans le fichier *crocotools\_param.m* (nom de la commande sur le fichier en bleu)

Coordonnées géographiques	Résolution du modèle	Frontières
Grid dimensions	Grid resolution [degree]	Open boundaries switches [S E N W]
lonmin=-165, lonmax=-100, latmin=-37, latmax=-5,	dl=1/5	obc=[1 1 1 1] où *1=open

### 2.2.2 Paramétrisation temporelle

Une fois la grille spatiale paramétrée, il s'agit d'établir la grille temporelle. À l'aide de la commande *ad\_cfl.m* sur Matlab, le pas de temps interne *dt* de la simulation est calculé à partir

9. *Courant, Friedrichs et Lewy* : "Condition nécessaire pour qu'un schéma numérique produise une solution cohérente lors de la résolution d'une équation différentielle hyperbolique ou d'un système d'équations aux dérivées partielles." - tiré de Wikipédia

des valeurs de la grille et du pas de temps externe *NDTFAST* référencé, sur la base du critère CFL, ce qui donne dans le cas du modèle du gyre :  $dt = 1440\text{ s}$  pour un  $NDTFAST = 60$ .

Il faut également fixer les valeurs suivantes :

- La durée de la simulation *NTIMES*.
- La fréquence de sauvegarde des sorties instantanées *NWRT* dans le fichier *history*.
- La fréquence de sauvegarde des sorties moyennées *NAVG* dans le fichier *average*.
- La fréquence de sauvegarde des sorties pour relancer le modèle *NRST*, à l'aide d'un fichier *restart*. Ce dernier permet d'éviter de relancer l'ensemble de la simulation, dans l'éventualité d'un incident informatique du modèle.

L'ensemble des valeurs utilisées pour la grille temporelle du gyre ont été consciencieusement ajoutées aux fichiers *croco.in* et *run\_croco.bash* et sont résumées dans le tableau Tab.3.

**Table 3** – Valeurs de la grille temporelle adaptées au gyre subtropical du Pacifique Sud

<b><i>dt</i></b>	<i>1440 s</i>	<b><i>NDTFAST</i></b>	<i>60 s</i>
<b><i>NTIMES</i></b>	<i>1800 h</i>	<b>Temps de simulation</b>	<i>10 ans</i>
<b><i>NWRT</i></b>	<i>60 h</i>	<b><i>NAVG</i></b>	<i>60 h</i>
<b><i>NRST</i></b>	<i>600 h</i>		

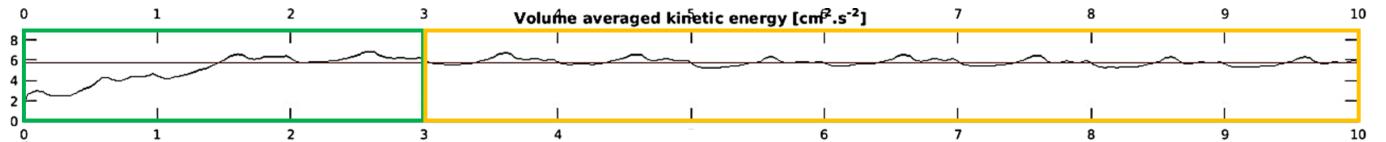
*In fine*, il ne reste plus qu'à exécuter le modèle, tout en en ayant pris soin au préalable de régler le temps total d'exécution du modèle, afin que la simulation ne s'interrompe pas en cours de route.

## 3 Résultats

### 3.1 Diagnostiques

La première étape pour vérifier si la simulation exécutée est stable ou non, consiste à utiliser la commande *croco\_diags.m* sur Matlab, ce qui permet d'obtenir des séries temporelles de certains paramètres 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. Autrement dit, le temps *spin-up* est le temps mis par le modèle pour arriver à son équilibre, avec des données plus réalistes.

Dans le cas de la simulation du gyre subtropical du Pacifique Sud, le modèle se stabilise à partir de la 3<sup>ème</sup> année de simulation, comme l'atteste la série temporelle de la vitesse cinétique moyenne (Fig. 3.1). Ainsi, dans la suite de cette étude, seules les sept dernières années de cette simulation décennale peuvent être analysées.



**Figure 3.1** – Temps *spin-up* du modèle du gyre subtropical du Pacifique Sud estimé à 3 ans à partir de la série temporelle de la vitesse cinétique moyenne.  
Temps *spin-up* en vert, temps à l'équilibre en jaune.

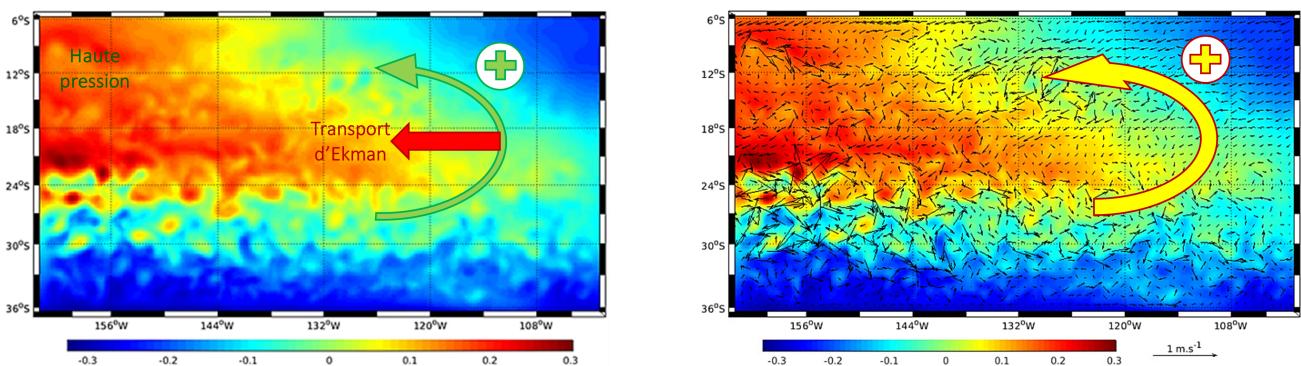
## 3.2 Le gyre subtropical du Pacifique Sud modélisé

Un autre moyen pour vérifier la stabilité du modèle, consiste à comparer les concordances entre le gyre simulé avec nos connaissances actuelles sur l'océanographie physique.

### 3.2.1 Transport d'Ekman - transport horizontal

Le gyre se situe dans l'hémisphère Sud, dans la zone subtropicale du Pacifique Sud, juste au-dessous de l'équateur. Cette zone est connue pour son forçage météorologique anticyclonique, *i.e.* que le vent effectue un forçage à la surface de l'océan avec un rotationnel positif car dans le sens trigonométrique ; autrement dit, le vent tourne dans le sens anti-horaire autour d'une haute pression. Étant donné qu'il s'agit de l'hémisphère Sud, le transport d'Ekman n'agit plus à droite du vent, comme c'est le cas pour l'hémisphère Nord, mais à gauche du vent. Le transport engendre ainsi une convergence des masses d'eau de surface.

Ce phénomène de convergence s'observe bien sur la figure modélisant la déformation de la surface libre  $\eta$ , laquelle correspond à la hauteur de la surface de l'eau par rapport à un niveau de référence coïncidant avec la surface de l'océan au repos (Fig. 3.2 (a)). En effet, la zone en rouge caractérise une déformation  $\eta$  élevée, se traduisant par une accumulation des masses d'eau au centre du gyre.

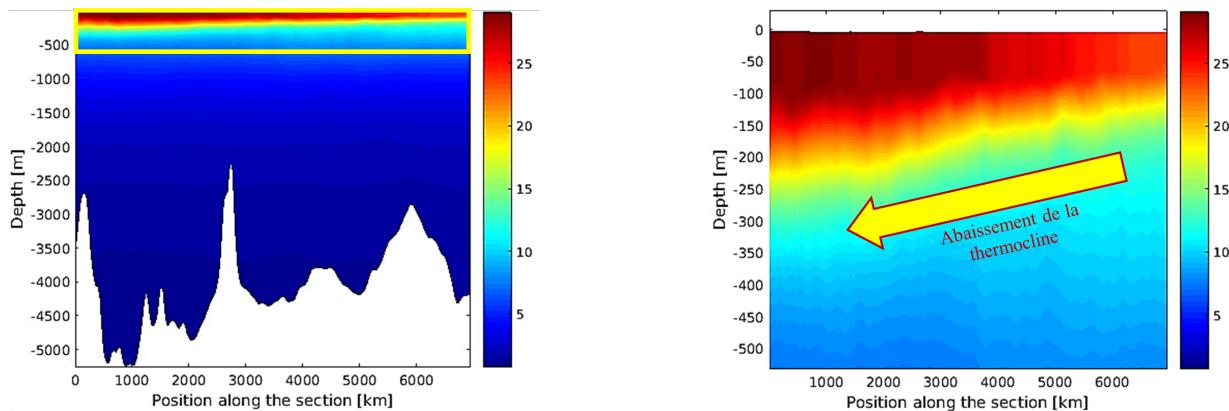


**Figure 3.2** – Modélisation du gyre subtropical du Pacifique Sud au mois de janvier de la 3<sup>ème</sup> année de simulation, obtenue à partir de *croco-gui* sur Matlab. (a) Déformation de la surface libre  $\eta$  en m avec représentation du **forçage météorologique** et du **transport d'Ekman**; (b) Champ de vitesse en m/s avec représentation du **courant géostrophique**

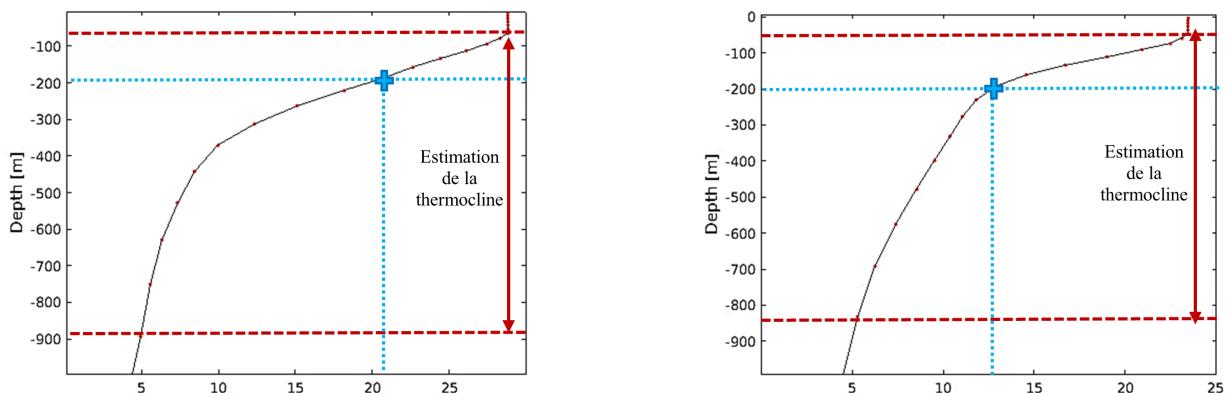
### 3.2.2 Pompage d'Ekman - transport vertical

La conservation de la masse implique un transport vertical, soit descendant dans le cas d'une convergence, soit ascendant dans le cas d'une divergence. Ce transport est appelé pompage d'Ekman ; il est négatif car descendant dans le cas du gyre subtropical. Ce type de transport est connu sous le nom de *downwelling* (qui s'oppose à *upwelling*), et engendre une descente des eaux de surface en profondeur, abaissant ainsi la thermocline.

Ainsi, sur le modèle CROCO, le phénomène de *downwelling* apparaît avec une thermocline plus basse au centre du gyre par rapport à son extrémité, comme l'atteste la section verticale (Fig. 3.3). De plus, en étudiant les profils verticaux (Fig. 3.4), il apparaît que pour une même profondeur - choisie à 200 m sur la figure - la température n'est pas la même au centre et à l'extrémité du gyre. Au centre, la température s'élève à un peu plus de 20°C, alors qu'à l'extrémité elle avoisine les 13°C, ce qui signifie qu'au plus on se rapproche du centre, au plus la température augmente pour une même profondeur, impliquant une baisse de la thermocline.



**Figure 3.3** – Sections verticales de la température du gyre subtropical du Pacifique Sud au mois de janvier de la 3<sup>ème</sup> année de simulation, obtenues à partir de *croco\_gui* sur Matlab. (a) Section sur l'ensemble du gyre étudié ; (b) Zoom sur la section encadrée en jaune



**Figure 3.4** – Profils verticaux de la température du gyre subtropical du Pacifique Sud au mois de janvier de la 3<sup>ème</sup> année de simulation, obtenus à partir de *croco\_gui* sur Matlab. (a) Profil au centre du gyre ; (b) Profil à l'extrémité du gyre

### 3.2.3 Courant géostrophique

À présent, pour déterminer le sens de rotation du courant, il faut passer par l'approximation du fluide en équilibre géostrophique.

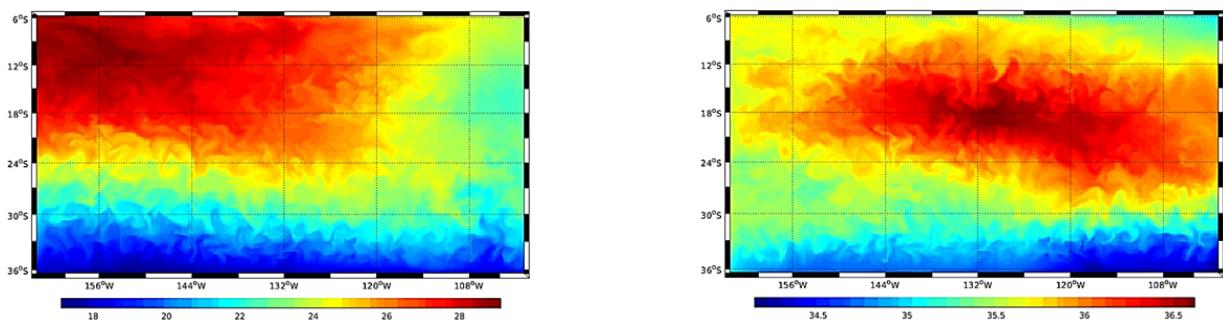
Lors d'une surrélevation du niveau marin, la résultante des forces de pression a tendance à générer un déplacement des particules d'eau des hautes pressions vers les basses pressions. Ici, dans le cas de la convergence, cette force est dirigée du centre du gyre vers l'extrémité du gyre.

Selon l'approximation du fluide en équilibre géostrophique, la force de Coriolis va avoir tendance à s'équilibrer avec la résultante des forces de pression au cours du temps. La résultante de cet équilibre est connue sous le nom de courant géostrophique. Dans le cas de la convergence, la force de Coriolis se dirige vers l'intérieur du gyre, à l'opposé de la résultante des forces de pression. De plus, le gyre se situant dans l'hémisphère Sud, la force de Coriolis s'applique à gauche du courant (et non à droite comme dans l'hémisphère Nord), ce qui implique un courant géostrophique qui tourne dans le sens trigonométrique, tout comme le sens d'orientation du vent en surface. Le gyre est donc un gyre anticyclonique.

Dans le modèle CROCO, le champ de vitesse de surface peut être appliqué au gyre (Fig. 3.2 (b)), et il apparaît que dans l'ensemble - tout en faisant abstraction des méandres - le gyre tourne effectivement dans le sens anti-horaire.

### 3.2.4 Température et salinité

Enfin, les connaissances théoriques actuelles des gyres nous indiquent qu'au sein d'un gyre anticyclonique subtropical, la température est élevée au centre, ce qui se vérifie sur la simulation gyre subtropical du Pacifique Sud avec CROCO (Fig. 3.5 (a)). De plus, le forçage climatique des zones subtropicales implique de fortes évaporations, qui engendrent des pics de salinité visibles sur le modèle CROCO. Ce phénomène est plus largement réparti dans la zone subtropicale, au-delà du gyre (Fig. 3.5 (b)).



**Figure 3.5** – Modélisation du gyre subtropical du Pacifique Sud au mois de janvier de la 3<sup>ème</sup> année de simulation, obtenue à partir de *croco\_gui* sur Matlab. (a) Température de surface en °C; (b) Salinité de surface

Suite aux informations mises en exergue à l'aide de la simulation, il apparaît que le modèle CROCO est de prime abord un modèle efficace, fidèle à la théorie des dynamiques des océans.

### 3.3 Étude décennale du gyre subtropical du Pacifique Sud

En 2005, une étude menée entre autre, par les chercheurs de la *Scripps Institution of Oceanography*, avait pour objectif d'étudier les changements à long terme du gyre subtropical du Pacifique Sud. Cette étude reposait sur l'analyse des données issues de l'altimétrie satellitaire, des observations hydrographiques dans le Pacifique Sud de la campagne WOCE, d'un transect hydrographique le long du méridien 170 °W, et de flotteurs-profileurs Argo. Les scientifiques ont constaté une augmentation de 12 cm de la hauteur de la surface de la mer *SSH*, au coeur du gyre subtropical du Pacifique Sud, et ce sur une période de 12 ans, de 1993 à 2004. En 2016, l'étude a été renouvelée par la même équipe, en prenant en compte les données de 2003 à 2014. Les résultats des études combinées figurent dans l'article de Roemmich et al. (2016). Cette recherche dite multidécennale confirme la tendance à l'augmentation de la circulation du gyre, qui s'est poursuivie jusqu'en 2014.

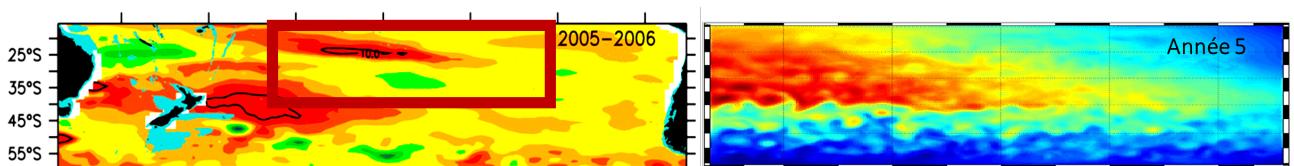
Dans le cadre du projet Modélisation 3D Océanique, l'objectif est de simuler une évolution décennale du gyre à l'aide du modèle CROCO, et de comparer les résultats à ceux de l'évolution de 2003 à 2014. La figure apparaît dans son ensemble en annexe (Fig. 5.1).

Afin de simuler cette évolution, trois points doivent être pris en compte. Tout d'abord, il est à noter que dans l'article, la variable représentée est la hauteur de la surface de la mer *SSH*. Cependant, dans le modèle CROCO ne figure que la variable  $\eta$ , *i.e.* la déformation de la surface libre. Ces deux variables mesurent toutes deux la hauteur de la surface des eaux par rapport à un référentiel, sauf que ce référentiel n'est pas le même ; alors que pour  $\eta$  le niveau de référence correspond à la surface de l'océan au repos, pour ce qui est de la *SSH*, le référentiel correspond à l'ellipsoïde. Afin de faciliter la suite de l'étude, les deux variables sont supposées comme identiques, et sont décrites sous le terme général de la *SSH*.

Ensuite, rappelons que le modèle CROCO a été simulé sur une période totale de 10 ans, et que le temps spin-up est de 3 ans. Ainsi, dans ce cas de figure, une simulation décennale n'est pas possible, et n'est réalisée que sur sept ans.

Enfin, l'article présente chaque figure par des données moyennées sur deux ans. Or dans le cas du modèle CROCO, les figures correspondent à un jour d'une année de simulation.

L'évolution du gyre a donc été simulée à partir de la 3<sup>ème</sup> jusqu'à la 10<sup>ème</sup> année. Afin de faciliter la mise en page, la figure simulée sur l'ensemble de la période (Fig. 5.2) se trouve en annexe. Un exemple de comparaison entre l'année de 2005-2006 de l'article et la 5<sup>ème</sup> année de simulation du modèle figure ci-dessous (Fig. 3.6) :



**Figure 3.6 –** Comparaison de l'évolution de la *SSH* du gyre subtropical du Pacifique à partir (a) des données *in situ* de 2005-2006 dans la zone d'étude encadrée en rouge et (b) du modèle CROCO de la 5<sup>ème</sup> année simulée. Les légendes sont en annexe sur les figures d'ensemble.

## 4 Discussion

Le modèle CROCO a permis de simuler un gyre anticyclonique dans l'hémisphère sud, tournant autour d'une zone de convergence de haute pression, ce qui est en adéquation avec la théorie de la dynamique des océans.

Cependant, il semble qu'il y ait un écart entre l'évolution décennale du gyre subtropical du Pacifique Sud reconstituée à partir des données *in situ*, et l'évolution de ce même gyre simulée par CROCO. En effet, sur les figures de l'article (dans l'encadré rouge de la zone d'étude choisie), le gyre n'apparaît pas de la même façon que dans la simulation. Il n'y a qu'au cours des années 2005-2006 que le gyre simulée semble concorder avec les données de la campagne, si on considère la position et l'ordre de grandeur de la *SSH* au centre du gyre, entre 15 et 20 cm. De plus, en étudiant l'évolution sur sept ans, il apparaît que le gyre simulé ne subit que de légères modifications en terme de courantologie, et que dans l'ensemble la *SSH* n'augmente pas au cours des années, ce qui est en contradiction avec les résultats de l'article de 2016.

Ces écarts peuvent s'expliquer par plusieurs facteurs, à commencer par le fait que la *SSH* a été associée à la déformation de la surface libre  $\eta$ . Il serait préférable d'utiliser les mêmes variables de l'article, afin de permettre une comparaison plus précise. Par ailleurs, l'article présente des données moyennées sur deux ans. La modélisation CROCO devrait également être moyennée sur la même période de temps, pour établir une meilleure comparaison. Enfin, la raison principale qui explique ces écarts des évolutions des gyres, est le temps de simulation sur CROCO. Cette période de sept ans est trop courte, si l'on considère que les forçages climatologiques s'étendent sur 50 ans de données historiques. Cette simulation ne permet donc pas de prendre en compte l'ensemble des forçages et simuler des phénomènes océaniques connus pour varier sur des périodes de temps longues, à l'échelle décennale voire inter-décennale.

## 5 Conclusion

La plateforme de modélisation 3D de l'océan régional et côtier CROCO est un outil très performant qui a permis de nombreuses avancées scientifiques depuis sa conception. La représentation du gyre subtropical du Pacifique Sud s'est avéré fidèle à la théorie de la dynamique des océans. Toutefois, des divergences ont pu être observées avec des études menées *in situ*.

Le problème de fiabilité qui s'est manifesté ici relève de la conséquence d'un temps de simulation beaucoup trop court, comparativement à des phénomènes océanographiques qui devraient être simulés sur des périodes décennales voire inter-décennales. À l'avenir, il serait intéressant de refaire cette même simulation mais sur des échelles de temps beaucoup plus longues, afin de se rapprocher des données mesurées par la campagne WOCE<sup>10</sup>. Cependant, se pose alors le problème du coût de calcul que générerait une simulation aussi longue, sur une zone d'étude aussi vaste. Il s'agit d'un compromis auquel les scientifiques sont souvent confrontés.

---

10. World Ocean Circulation Experiment

# Références bibliographiques

CAMBON G. et al., 2019. *Introduction to CROCO model* - [Disponible sur Internet](#).

DOGLIOLI, A., & MAZOYER, C., 2022. *Notes de Cours et Travaux Dirigés de Modélisation 3D Océanique* - Cours de Master 1 Sciences de la mer OSU PYTHEAS [Disponible sur Internet](#).

JULLIEN, S., et al., 2022. *Technical and numerical doc - Release 1.2* - [Disponible sur Internet](#)

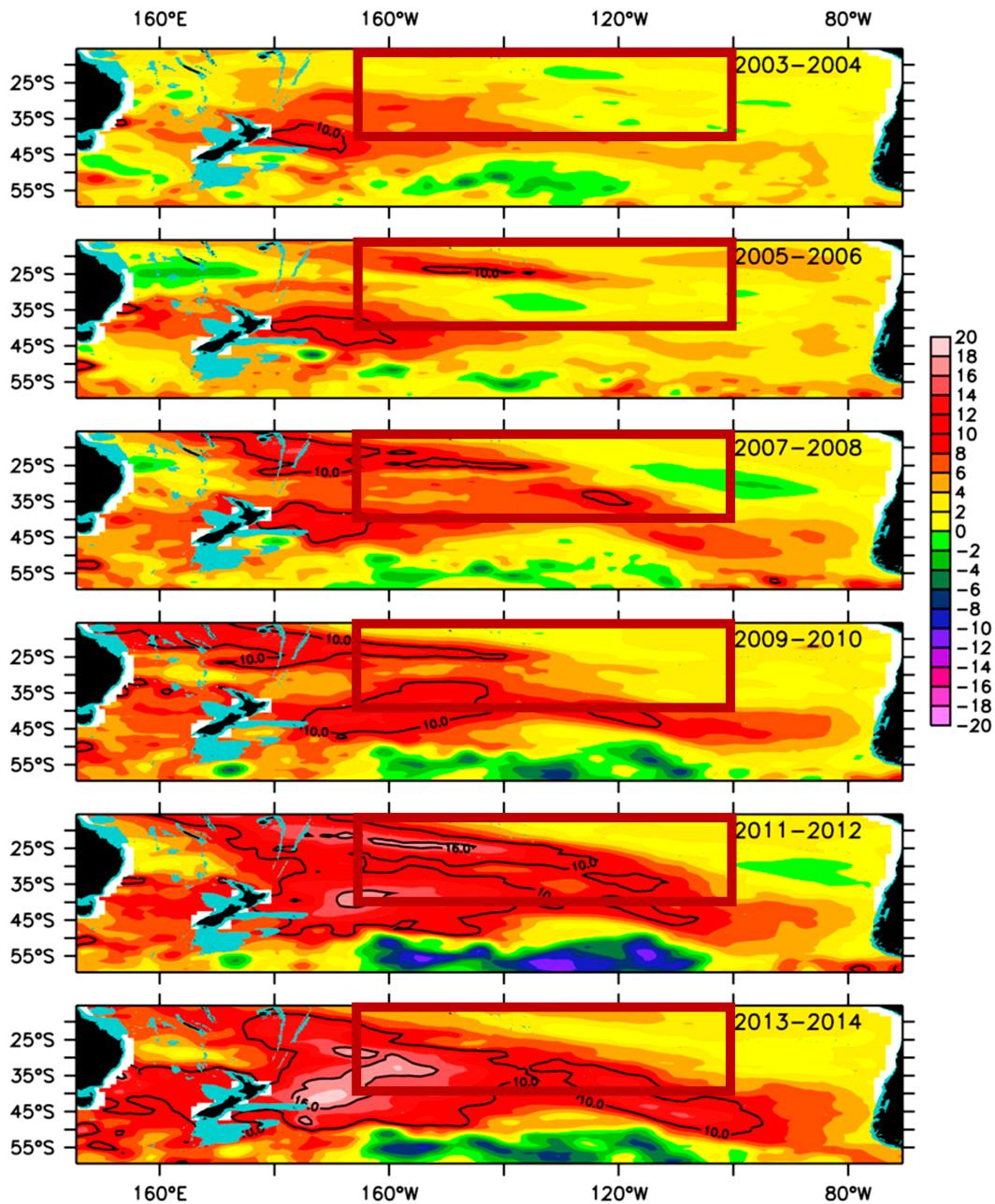
MELIKA, B., 2022. *OPB 206 : Océnographie physique* - Cours de Master 1 Sciences de la mer OSU PYTHEAS.

RENAULT, L. [Projet] *CROCO – Modèle communautaire océanographique côtier et régional* - [Disponible sur Internet](#).

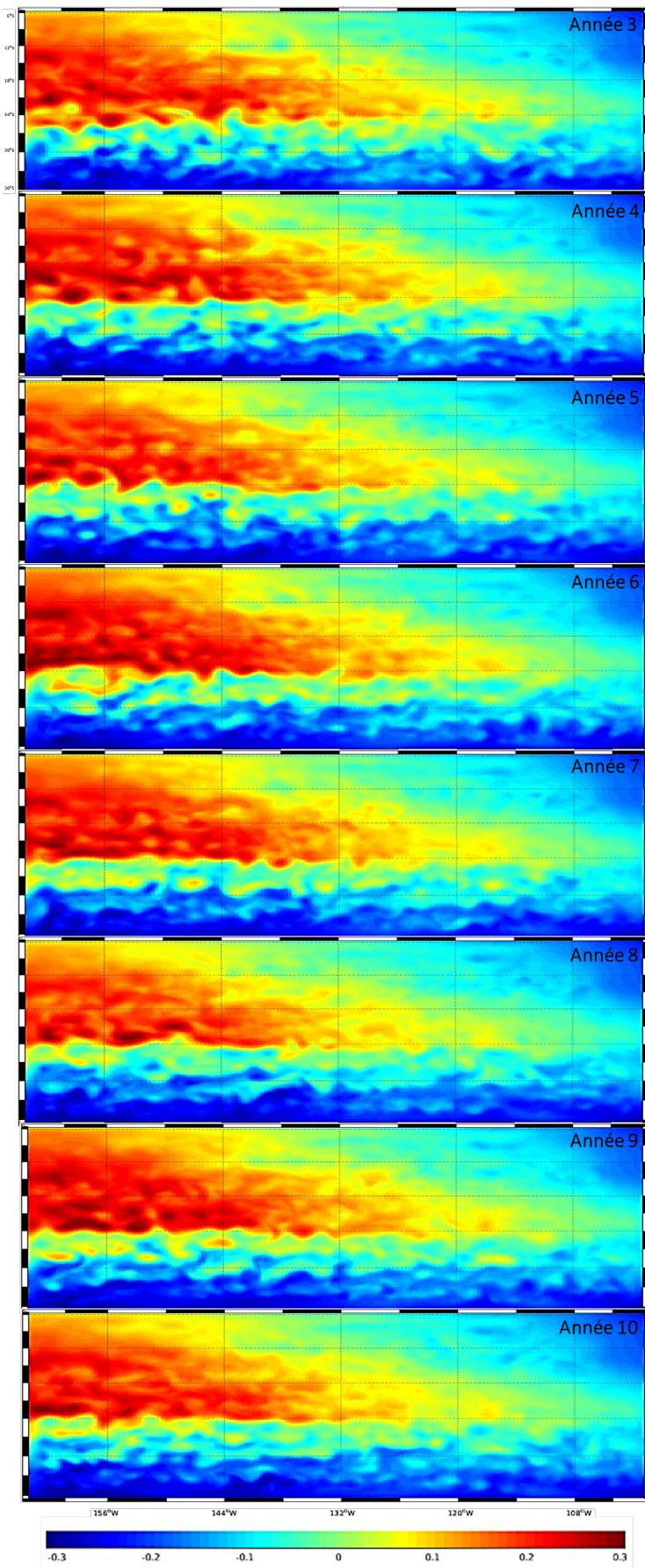
ROEMMICH, D., GILSON, J., DAVIS, R., SUTTON, P., WIJFFELS, S., & RISER, S., 2005. Decadal Spinup of the South Pacific Subtropical Gyre. *Journal of Physical Oceanography* :162-173.

ROEMMICH, D., GILSON, J., SUTTON, P., & ZILBERMAN, N., 2016. Multidecadal Change of the South Pacific Gyre Circulation. *Journal of Physical Oceanography* :1871–1883.

## Annexes



**Figure 5.1** – Hauteur de la surface de la mer *SSH* (en cm) dans le Pacifique Sud subtropical, à partir des données *in situ*, pour des périodes moyennées de 2 ans allant de 2003 à 2014. La zone encadrée en rouge correspond à la zone d'étude choisie pour le gyre dans le modèle CROCO. Figure issue de l'article de Roemmich et al. (2016) *Multidecadal Change of the South Pacific Gyre Circulation*



**Figure 5.2** – Déformation de la surface libre  $\eta$  (en m) dans le gyre subtropical Pacifique Sud modélisée sur CROCO, pour une période de sept ans, allant de la 3<sup>ème</sup> à la 10<sup>ème</sup> année de simulation, au mois de juillet.