



PROJET DE RECHERCHE  
SPECIALITÉ : OCÉANOGRAPHIE  
ANNÉE SCOLAIRE : 2015-2016

---

# **ANALYSE DES RÉSULTATS DE MODÉLISATION 3D COUPLÉE PHYSIQUE - BIOGÉOCHIMIQUE DE LA CAMPAGNE OSCAHR**

NON CONFIDENTIEL – PEUT ÊTRE PUBLIÉ SUR L'INTERNET

---

Luiz André Schiaveto Neto - Promotion 2017

Encadrant MIO : Christel Pinazo

Encadrant ENSTA : Laurent Mortier

Stage effectué du 10/05/2016 au 20/07/2016

MIO - Institut Méditerranéen d'océanologie

Bâtiment Méditerranée, Campus de Luminy, 163 Avenue de Luminy, 13288 Marseille

Analyse des résultats de modélisation 3D couplée physique - biogéochimique de la  
campagne OSCAHR

---

## Résumé

OSCAHR (Observing Submesoscale Coupling At High Resolution) a été une campagne océanographique avec l'objectif de caractériser une structure de submesoechelle, et a eu lieu dans la mer de Ligurie.

L'objectif principal de ce travail a été de comparer certaines mesures in-situ de cette campagne avec le modèle 3D couplé physique-biogéochimique pour une qualification du modèle et aussi pour essayer d'analyser les mesures et comprendre les enjeux de la dynamique de submesoechelle en ayant l'aide du modèle.

La thermocline calculée par le modèle est généralement plus près de la surface en comparaison avec les mesures in-situ, ce qui engendre des conséquences comme un DCM (*depth chlorophyll maximum*), et une nitracline, aussi plus près de la surface.

## Abstract

OSCAHR (Observing Submesoscale Coupling At High Resolution) was an oceanographic campaign that had the aim of characterizing a submesoechelle structure and took place in the Ligurian Sea.

The main purpose of this internship was to compare some in-situ measures of OSCAHR with a coupled 3D physical-biogeochemical model to evaluate it and also to analyse and understand the submesoechelle dynamics using the model results.

The thermocline calculated by the model was generally placed too near the sea surface, in comparison with the in-situ measures, which had consequences such as the fact that the DCM and also the nitracline were also too near the sea surface.

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>4</b>
1.1	Objectif OSCAHR . . . . .	4
1.2	Intérêt de la comparaison entre le modèle et les mesures . . . . .	5
1.3	Philosophie de la comparaison . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Matériel et Méthodes</b>	<b>7</b>
2.1	Campagne OSCAHR . . . . .	7
2.2	Mesures analysées . . . . .	8
2.2.1	CTD . . . . .	8
2.2.2	Calibration Fluorescence CTD . . . . .	8
2.2.3	Glider . . . . .	10
2.2.4	Flotteur . . . . .	11
2.3	Modèle physique-biogéochimique . . . . .	12
2.4	Méthode pour la comparaison . . . . .	14
2.5	DCM . . . . .	16
2.6	Thermocline et Nitracline . . . . .	17
<b>3</b>	<b>Résultats</b>	<b>18</b>
3.1	CTD . . . . .	18
3.2	Glider . . . . .	23
3.3	Flotteur . . . . .	27
<b>4</b>	<b>Discussion</b>	<b>31</b>
4.1	Thermocline haute . . . . .	31
4.2	Zones de dessalure . . . . .	32
4.3	Différence Côte-Large dans les mesures Glider . . . . .	34
4.4	Limites de l'étude . . . . .	36
4.4.1	Difficulté de comparer . . . . .	36

4.4.2	Problème dans les données initiales du modèle . . . . .	37
4.4.3	Problème de la discrétisation verticale . . . . .	37
<b>5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>38</b>
<b>6</b>	<b>Références</b>	<b>39</b>
<b>7</b>	<b>Annexe</b>	<b>41</b>

# Chapitre 1

## Introduction

### 1.1 OBJECTIF OSCAHR

OSCAHR (Observing Submesoscale Coupling At High Resolution) a été une campagne océanographique qui est partie de Nice, et qui est restée dans la région entre la France, l'Italie et la Corse, dans la mer de Ligurie (figure 1.1).

L'objectif principal de cette campagne a été de caractériser une structure de submésosé-  
chelle, et d'analyser ses contributions dans les cycles biogéochimiques et dans la dynamique  
des échelons trophiques de la biologie marine (comme le plancton).

Une structure de submésosé-  
chelle est une structure dans l'océan avec une largeur ho-  
rizontale de l'ordre de 1 à 10 km, avec des forts gradients verticaux de vitesse, avec beau-  
coup d'instabilités dues à la perturbation de la stratification en surface, et caractérisée  
par des micro-structures locales de turbulence. Donc son importance peut être expliquée,  
par exemple, par le fait que si le mélange vertical atteint des régions en profondeur où la  
concentration de nutriments est plus grande, ceux-ci peuvent être entraînés vers les couches  
supérieures de l'océan, ce qui pourrait favoriser la croissance de la population de phytoplanc-  
ton, puisque les éléments principaux nécessaires à son métabolisme sont disponibles.

La stratégie utilisée dans OSCAHR était d'analyser, en temps quasi-réel, des données sa-  
tellite et aussi des simulations numériques, pour identifier ces structures de submésosé-  
chelle, et ainsi les suivre avec le bateau, et faire les mesures in-situ les plus stratégiques.

A posteriori, ces mesures in-situ permettent aussi la calibration des données de télédétec-  
tion, et de plus la qualification des simulations numériques.

[Doglioli et al., 2015]



FIGURE 1.1: La méditerranée. Dans le cercle noir, la mer de Ligurie.

## 1.2 INTÉRÊT DE LA COMPARAISON ENTRE LE MODÈLE ET LES MESURES

La modélisation est une formidable avancée scientifique car l'idée de savoir ce qui va se passer dans l'avenir est fascinante. Cette capacité de prévision serait très utile dans le domaine de sciences de la Terre pour diverses raisons, comme par exemple prévoir des catastrophes environnementales.

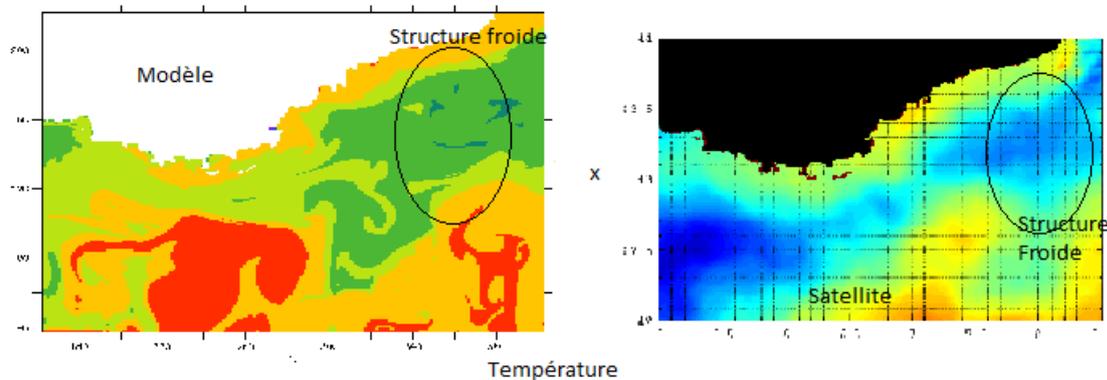
Une utilité claire de la comparaison entre les résultats de sortie d'un modèle et les données in-situ mesurées par un appareil est de qualifier les simulations et d'ainsi évaluer le modèle en tant qu'outil de prédiction des phénomènes physique-biologiques dans l'océan.

Et inversement, le modèle peut aussi nous aider à comprendre des phénomènes qui se sont déjà passés. Par exemple, expliquer la présence d'une structure de submésoséchelle dans un lieu déterminé en analysant l'environnement physique.

De plus, un bon exemple de l'utilité d'un tel modèle peut être pendant une campagne en mer : dans OSCAHR, par exemple, le modèle a été utilisé pour positionner une structure froide de submésoséchelle, qui a été suivie et échantillonnée pendant le second leg de la campagne (figure 1.2) [Doglioli et al., 2015].

## 1.3 PHILOSOPHIE DE LA COMPARAISON

La comparaison entre les données de sortie du modèle et les mesures in-situ n'est pas si évidente et facile. Comme le modèle est une représentation discrète du milieu continu qu'est l'ensemble océan-atmosphère, on ne fait pas la comparaison exactement des mêmes points



**FIGURE 1.2:** Comparaison modèle-satellite et structure de submésoséchelle mise en évidence

dans l'espace, ni au même moment.

Par exemple, en essayant de suivre la trajectoire d'une plateforme autonome comme un flotteur, s'il reste piégé dans une même masse d'eau pour un certain temps, on ne va le comparer qu'avec un seul point du modèle. Puisque on a des carrés de 1200m de coté qui ont des propriétés homogènes dues à la discrétisation, cela peut gêner la comparaison.

De plus, le long d'une trajectoire d'une plateforme autonome, comme le glider, comme la résolution spatiale est beaucoup plus fine verticalement, certaines variations continues des variables ne peuvent pas être bien calculées par le modèle.

On a le même raisonnement pour la discrétisation temporelle. Comme les sorties sont toutes les 6 heures, on a un écart entre l'horaire de mesure et l'horaire dans le modèle. Et pour des paramètres biologiques, qui sont très sensibles et peuvent varier beaucoup dans un court espace de temps, cela peut engendrer des erreurs.

D'autre part, on pourrait aussi questionner la qualité des mesures in-situ. Par exemple, dans la campagne OSCAHR, il y avait plusieurs appareils, et si on compare les mesures entre eux de la même variable, on note que ce n'est pas forcément les mêmes valeurs, donc cela devient difficile de savoir quel appareil a des mesures vraiment fiables.

# Chapitre 2

## Matériel et Méthodes

### 2.1 CAMPAGNE OSCAHR

La campagne a commencé le 29 Octobre, et a fini le 6 Novembre 2015. Elle a été divisée en deux legs : le premier jusqu'au 31 Octobre, et le deuxième du 3 Novembre jusqu'au 6 Novembre.

La stratégie pour les mesures et la caractérisation de la structure de submésoséchelle était la suivante (Figure 2.1) :

- a) par une approche horizontale, des transects ont été faits
- b) par une approche verticale, des stations d'environ une heure ont été faites, et des mesures Rosette-CTD ont aussi été faites

Un ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler), appareil qui permet de mesurer la vitesse des courants à partir des ondes acoustiques, était placé sur la coque du navire.

Un Thermosalinographe (avec fluorescence), appareil qui permet la mesure des propriétés comme la température et la salinité en surface, a permis de mesurer en continu tout au long du trajet du bateau.

Un MVP (Moving Vessel Profiler), appareil qui oscille derrière le navire et muni de différents capteurs, a permis d'effectuer des profils le long de la trajectoire du navire.

De plus, un glider a été déployé pendant la campagne, et à la fin de la campagne, un flotteur BIOARGO a également été déployé [Doglioli et al., 2015].

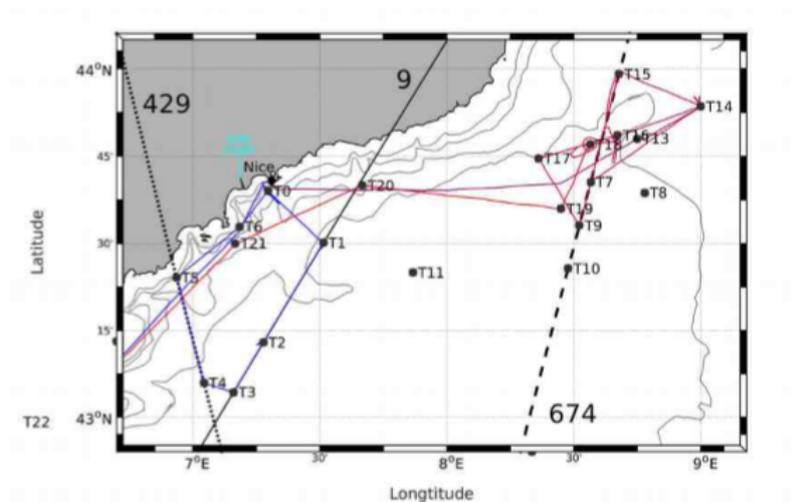


FIGURE 2.1: Plan avec les *waypoints* de la campagne. Un transect est une connexion entre deux de ses points, et des stations étaient effectuées à quelques uns de ces points

## 2.2 MESURES ANALYSÉES

### 2.2.1 CTD

La CTD (conductivity, temperature and depth) est un appareil océanographique muni de capteurs de température, de conductivité (qui peut être convertie en salinité) et de pression (qui peut être convertie en profondeur).

Cet appareil a été fixé à une rosette avec 12 bouteilles Niskin de 12 L et la rosette a été utilisée pour faire des profils aux stations de la campagne. La CTD avait aussi des capteurs de fluorescence, et d'autres comme l'oxygène et un LISST fixé à la rosette permettait d'avoir la distribution de taille des particules (figure 2.2).

C'est important de remarquer qu'avec les prélèvements d'eau qui ont été faits avec les bouteilles, les mesures de fluorescence ont pu être calibrées, et donc les mesures CTD sont les seules mesures qui peuvent être assimilées à des concentrations de chlorophylle.

Généralement les mesures de profil sont allées jusqu'à la profondeur d'environ 300m, mais dans deux stations la profondeur maximum était 80m [Doglioli et al., 2015].

### 2.2.2 Calibration Fluorescence CTD

C'est très important de noter que les mesures de fluorescence ne correspondent pas à des mesures directes de chlorophylle, car ces mesures doivent être calibrées avec des prélèvements d'eau. Donc la seule mesure de fluorescence assimilable à une concentration de

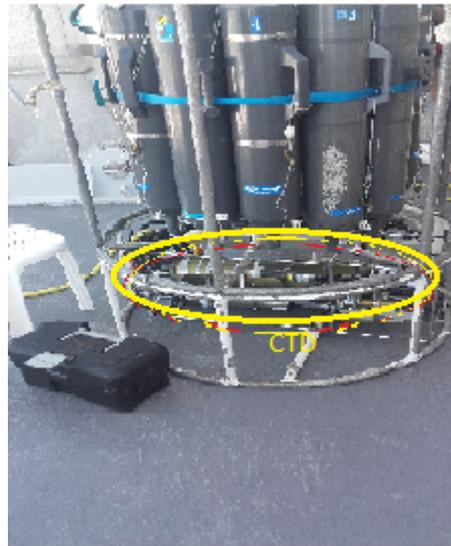


FIGURE 2.2: Appareil CTD couplée à une rosette avec 12 bouteilles Niskin

chlorophylle est celle de la CTD, puisque elle a été calibrée en laboratoire avec le prélèvement d'eau des bouteilles Niskin (figure 2.3). La loi de calibration utilisée était : [P. Marrec, comm. pers.]

OSCAHR: 2 CTD

CTD = 0m – 300m

CTD\_PUMP = 0m – 30m

Prélèvement pour Chl-a lors de CTD\_PUMP:

27 prélèvements et valeurs de Chl-a

$\text{Chl-a} = 0,3636 * \text{FLUO\_CTD\_PUMP} + 0,0422$

$r^2 = 0,52$

FLUO\_CTD vs. FLUO\_CTD\_PUMP:

Comparaison à 5 stations différentes (60 points)

$\text{FLUO\_CTD\_PUMP} = 3,3146 * \text{FLUO\_CTD}$

$r^2 = 0,848$

Conversion FLUO\_CTD en Chl-a:

$\text{Chl-a} = 0,3636 * (3,3146 * \text{FLUO\_CTD}) + 0,0422$

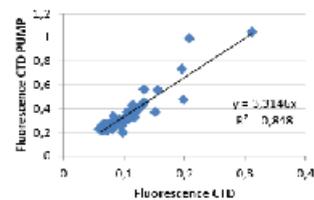
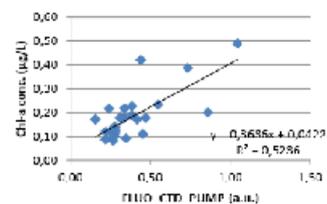


FIGURE 2.3: Régression linéaire faite pour la calibration des mesures de fluorescence de la CTD

### 2.2.3 Glider

Le glider est un véhicule autonome capable de transformer des mouvements verticaux en mouvements horizontaux, sous l'eau, et ainsi, profiler l'océan en mesurant des propriétés comme la température et la salinité (figure 2.4). En effet, il utilise des petites variations de densité, et, en utilisant des ailes et des poids intérieurs, transforme ce mouvement vertical en mouvement horizontal en ayant une trajectoire en forme des dents de scie (figure 2.5) [IFREMER, 2005].

Il est possible d'installer différents capteurs sur l'appareil.



FIGURE 2.4: Glider du MIO, produit en France

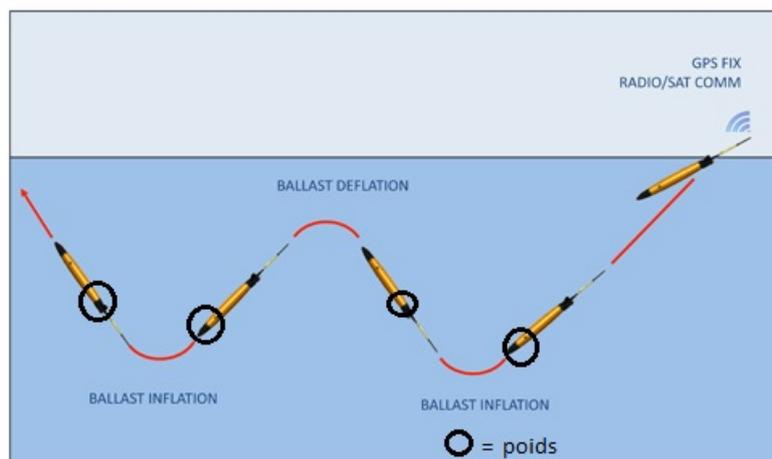


FIGURE 2.5: Schéma de la trajectoire d'un glider d'après IFREMER, 2005

Les mesures analysées et comparées avec le modèle, pour le glider, étaient la température, la salinité et la fluorescence en chlorophylle. C'est très important de mentionner que ces données n'ont pas été calibrées avec des prélèvements d'eau.

## 2.2.4 Flotteur

Le flotteur (figure 2.6) est un appareil qui est capable de faire des mouvements verticaux, en changeant sa flottabilité. Il peut atteindre jusqu'à 2000m et ainsi profiler l'océan, en montant vers la surface, pendant que, horizontalement, il dérive (figure 2.7) [Argo, 2016].

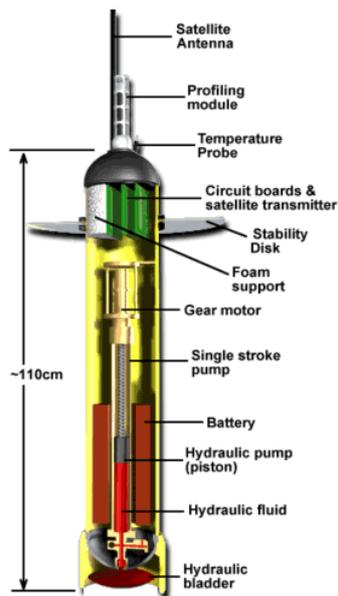


FIGURE 2.6: Schéma d'un flotteur d'après Argo, 2016

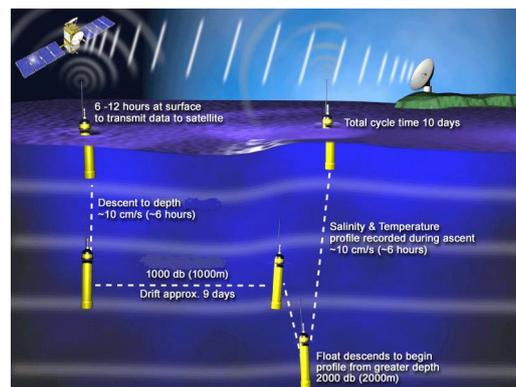


FIGURE 2.7: Trajectoire générale d'un flotteur d'après Argo, 2016

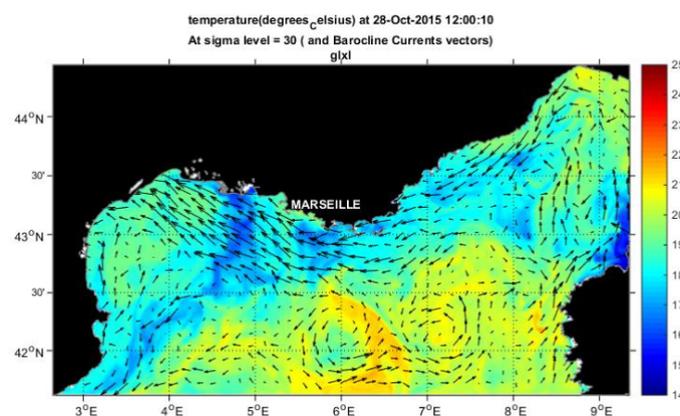
Le flotteur utilisé était un Bioargo, qui fait partie du programme global Argo, de surveillance de l'océan mondial. Ce Bioargo était muni des capteurs de pression, température, salinité, des paramètres d'irradiance solaire, aussi que la fluorescence de chlorophylle, et finalement, de nitrate. Malheureusement le capteur d'oxygène ne fonctionnait pas correctement avant le déploiement, donc ces mesures là ne sont pas fiables [Doglioli et al., 2015].

J'ai développé un script MatLab pour, à partir du fichier Netcdf de données du flotteur disponible sur le serveur Coriolis, extraire et visualiser les données voulues. Le script est présenté en détail dans l'annexe.

Le bioargo a été déployé à la fin de la campagne, le 05/11/2015 à 16 :45, et la stratégie était la suivante : au début, une résolution temporelle d'un jour pour les mesures, et à partir de 25 Novembre, des mesures tous les trois jours. Il y a des mesures jusqu'au 16 Janvier, quand le flotteur est devenu incapable de plonger et a dû être récupéré.

## 2.3 MODÈLE PHYSIQUE-BIOGÉOCHIMIQUE

Les données in-situ ont été comparées avec un modèle couplé 3D physique-biogéochimique. Le modèle physique est MARS 3D, créé par IFREMER [Lazure et Dumas, 2008 ; Nicolle et al., 2009], pour la zone géographique du nord-ouest de la méditerranée (figure 2.8).



**FIGURE 2.8:** Nord-Ouest de la méditerranée - Température et champ de vitesses de surface calculés par le modèle

Ce modèle résout les équations de Navier-Stokes (figure 2.9) et aussi les équations de transport et bilan pour la salinité, la température et les variables biogéochimiques. Les conditions aux limites sont données par le modèle OGCM (ocean general circulation model) MENOR diffusé par PREVIMER.

La grille du modèle est de type Arakawa C, dans laquelle les propriétés comme température, salinité et les traceurs biogéochimiques sont calculées en ayant comme référence le point au centre du carré, et les vitesses le point à la moitié des bords, comme on peut noter sur la figure suivante (figure 2.10) : [Garnier et al., 2013]

Le type de schéma le plus approprié dépend de la taille de la grille en comparaison avec le nombre de Rossby, qui nous donne une idée de l'influence de la force de Coriolis sur la

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - f'v = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P\alpha}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p'}{\partial x} + \frac{\partial (vz \frac{\partial u}{\partial z})}{\partial z} + F',$$

(tangent plane)

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + fu = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P\alpha}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p'}{\partial y} + \frac{\partial (vz \frac{\partial v}{\partial z})}{\partial z} + F',$$

+ equations of thermodynamics

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

$\rho' \ll \rho_0$   
 $H \ll L$

$$\frac{\partial p'}{\partial z} = \rho_0 b \quad \text{with} \quad b = -g(\rho - \rho_0) / \rho_0$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial (uT - k_r \frac{\partial T}{\partial x})}{\partial x} + \frac{\partial (vT - k_r \frac{\partial T}{\partial y})}{\partial y} + \frac{\partial (wT - k_r \frac{\partial T}{\partial z})}{\partial z} = \frac{1}{\rho_0 C_p} \frac{\partial T}{\partial z}$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial (uS - k_r \frac{\partial S}{\partial x})}{\partial x} + \frac{\partial (vS - k_r \frac{\partial S}{\partial y})}{\partial y} + \frac{\partial (wS - k_r \frac{\partial S}{\partial z})}{\partial z} = 0$$

FIGURE 2.9: Équations de Navier-Stokes et les équations de transport pour la chaleur et la salinité d'après Garnier et al., 2013

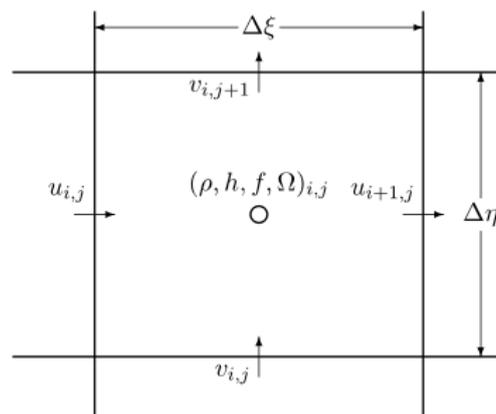


FIGURE 2.10: Schéma de la grille Arakawa type C d'après Garnier et al., 2013

dynamique de l'océan (plus le nombre est petit, plus la force de Coriolis est importante) [Computational Science Education Project, 1995]. Pour une fine résolution, la grille de type C est préférable, car une résolution spatiale est nécessaire près de la côte, comme dans le nord-ouest de la méditerranée, pour la résolution de la dynamique de cette région.

La discrétisation verticale est en coordonnées sigma. Comme la profondeur de l'océan varie beaucoup selon la position sur le globe, au lieu de faire un pas vertical constant, on fait un pas vertical en considérant le rapport entre la profondeur du point dans l'océan, et la profondeur totale de la colonne d'eau à cet endroit. Dans notre cas, nous avons utilisé trente niveaux sigma. [Garnier et al., 2013]

L'avantage de ce type de discrétisation est que la quantité de points sur la verticale reste constante, quelque soit la profondeur.

Pour avoir des données du modèle avec une résolution verticale plus précise, puisque les

données in-situ ont une résolution normalement de 1m, une interpolation linéaire a été faite pour les variables à partir des 30 niveaux sigma, sur la grille des données in-situ comparées.

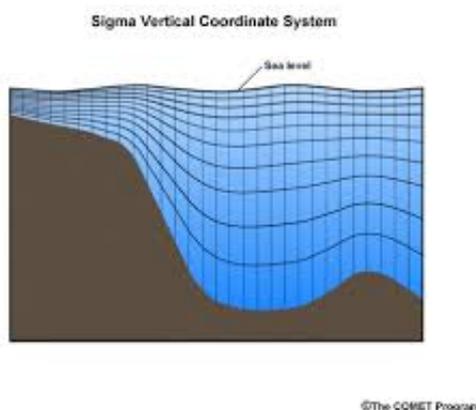


FIGURE 2.11: Exemple des coordonnées sigma

Le modèle biogéochimique est basé sur la plateforme ECO3M (Baklouti et al, 2006) dans la configuration "MASSILIA P" [Frayse et al, 2013] qui essaie de modéliser les cycles biogéochimiques et ainsi le fonctionnement de la dynamique du plancton et des substances géochimiques comme le nitrate (figure 2.12). Ce modèle est couplé au modèle MARS 3D et les deux sont résolus en même temps (pas de temps de 50 s) pour l'équation de transport, mais les termes de tendance "sources - puits" biogéochimiques sont résolus à un pas de temps de 20 minutes.

La sortie des données du modèle s'effectue normalement avec un pas de temps de 6h, mais une simulation haute fréquence a été aussi faite, avec un pas de sortie de 1h.

## 2.4 MÉTHODE POUR LA COMPARAISON

La stratégie utilisée pour la comparaison entre les données in-situ et les sorties du modèle était de prendre le point le plus proche en espace de la grille du modèle, en comparaison avec la position du profil. Pour cela, la distance sphérique entre le coordonnées (longitude et latitude) du profil mesuré, et chaque point de la grille du modèle a été calculée, et la moins grande, donc la plus proche, a été choisie pour la comparaison (figure 2.13).

On a fait cela pour tous les points de la trajectoire du glider et du flotteur. On peut donc dire qu'on a suivi les trajectoires avec le modèle. De plus, le temps le plus proche de l'heure de mesure a été choisi. Premièrement, on a comparé avec la sortie LF (low frequency) du modèle (toutes les 6 heures). Mais après, on a fait la comparaison aussi avec une sortie HF

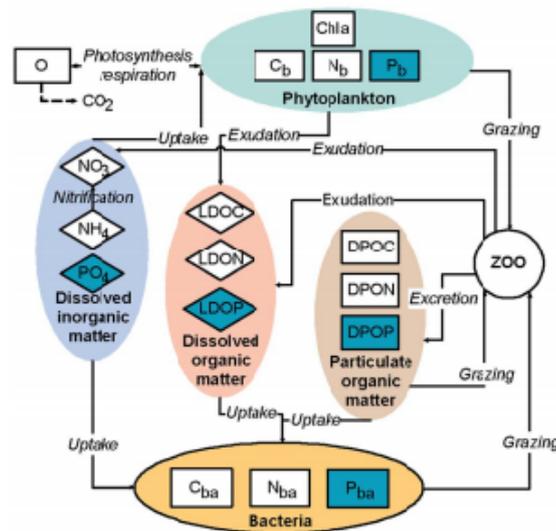


FIGURE 2.12: Le modèle biogéochimique pélagique - ECO3M-MASSILIA (noP and P)

(high frequency, toutes les heures). Pour les mesures CTD, qui ont été faites à chaque station de la campagne OSCAHR, on a fait le même processus, pour le temps et pour l'espace, mais comme ce n'est qu'un profil par station, ce n'est pas un suivi de trajectoire.

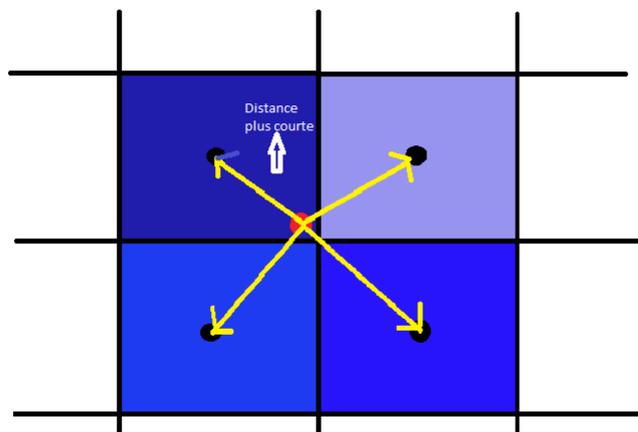


FIGURE 2.13: Méthode pour la comparaison : La distance sphérique la plus courte est choisie

## 2.5 DCM

Le DCM (*depth of chlorophyll maximum*) est la profondeur à laquelle la concentration de chlorophylle est maximum, et est un paramètre biologique important dans l'analyse de l'océan. Mais il est difficile de déterminer quelle profondeur prendre pour le maximum. Dans des cas bien définis, quand les eaux sont bien stratifiées, on peut noter clairement une profondeur à laquelle la concentration est maximum. Mais quand les eaux sont mélangées, ce n'est pas si évident, parce que la concentration est presque homogène dans la colonne d'eau, avec un écart relatif faible. Il est clair qu'il y a une profondeur où, tout d'un coup, la concentration devient presque nulle, parce que c'est la thermocline, la frontière au-dessous de laquelle il n'y a pas de mélange. Alors une meilleure représentation du DCM dans ce cas serait de prendre le plus grand gradient de chlorophylle, au-dessous duquel il n'y a plus ni de mélange, ni de chlorophylle.

L'étape suivante était de construire une méthode pour différencier les deux cas : stratifié et mélangé. En analysant les données in-situ du flotteur et du glider, j'ai noté que, dans le cas stratifié, près de la surface il n'y a pas beaucoup de chlorophylle, et en descendant, d'un coup la concentration augmente, et on a ici le plus fort gradient dans ce profil jusqu'au maximum, et après la concentration diminue lentement vers zéro (avec un plus faible gradient).

Donc la méthode était la suivante : si la profondeur du maximum est au-dessous du plus grand gradient, cela veut dire que c'est le cas stratifié, car le maximum vient après le premier et le plus fort gradient, et donc on prend la profondeur du maximum de concentration. Et dans le cas contraire, si la profondeur du maximum est au-dessus de la profondeur du gradient plus fort, cela veut dire qu'on a le cas mélangé, et donc la profondeur du plus fort gradient est choisie comme le DCM (figure 2.14).

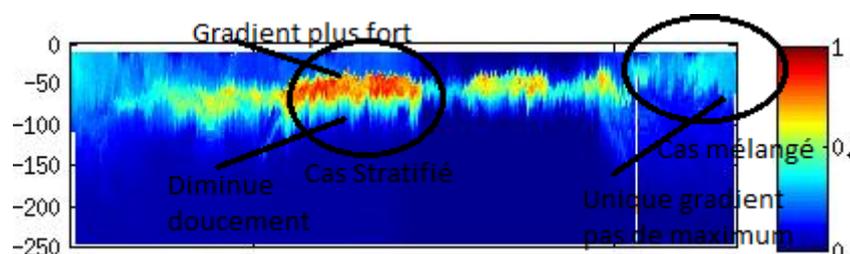
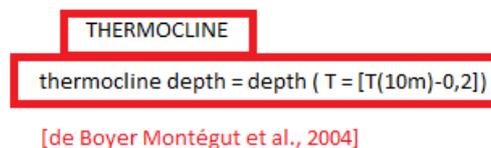


FIGURE 2.14: Exemple des situations discutées dans cette section

## 2.6 THERMOCLINE ET NITRACLINE

La thermocline est une barrière physique dans l'océan en profondeur d'origine thermique, qui en fait représente la profondeur que le mélange de surface atteint. Avec le refroidissement hivernal, l'eau refroidie et dense en surface plonge et atteint une profondeur d'équilibre. Ce processus de mouvement vertical provoque le mélange vertical. La thermocline a la propriété de séparer des eaux avec un fort gradient thermique [Fieux et Andrié, 2010]. La méthode choisie pour l'estimation de la profondeur de la thermocline était : [De Boyer de Montégut et al., 2004] (Figure 2.15) :

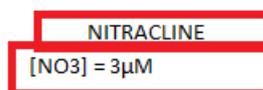


THERMOCLINE  
thermocline depth = depth (  $T = [T(10m)-0,2]$  )  
[de Boyer Montégut et al., 2004]

**FIGURE 2.15:** Méthode pour l'estimation de la thermocline : De Boyer de Montégut et al., 2004

La nitracline est aussi une limite chimique qui indique la profondeur où la concentration de nitrate devient forte. Par contre, la dynamique du nitrate est différente de celle de la température : en profondeur, sans grande consommation par le phytoplancton, (et aussi diffusée depuis le fond de l'océan) la concentration de nitrate est plus forte qu'en surface, où elle est beaucoup consommée par les organismes autotrophes (qui produisent leur nourriture à partir d'autres sources d'énergie, comme le soleil, pour les organismes photosynthétiques) du premier échelon du réseau trophique.

La méthode utilisée pour le calcul de cette profondeur était de prendre celle où la concentration de nitrate est égal a  $3 \mu\text{M}$  [Pasqueron de Fommervault, 2015].



NITRACLINE  
[NO<sub>3</sub>] =  $3\mu\text{M}$

**FIGURE 2.16:** Méthode pour l'estimation de la nitracline : Pasqueron de Fommervault, 2015

# Chapitre 3

## Résultats

### 3.1 CTD

Pour la CTD, les figures permettent de comparer le profil mesuré et le profil du modèle le plus proche de la station concernée pour la température, la salinité et la chlorophylle.

Comme on peut le noter, généralement la thermocline dans la simulation est trop haute en comparaison avec les mesures CTD (figures 3.1a, 3.2a, 3.3a, 3.4a).

De plus, le modèle reproduit bien un DCM, mais en comparaison avec les données CTD, il est trop fort et positionné trop haut vers la surface. (figures 3.1b, 3.2b, 3.3b, 3.4b)

Pour la salinité, on ne peut rien conclure sur la comparaison, mais on observe la trace d'une masse d'eau relativement dessalé vers 50m de profondeur. (figures 3.1d, 3.2d, 3.3d, 3.4d)

Analyse des résultats de modélisation 3D couplée physique - biogéochimique de la campagne OSCAHR

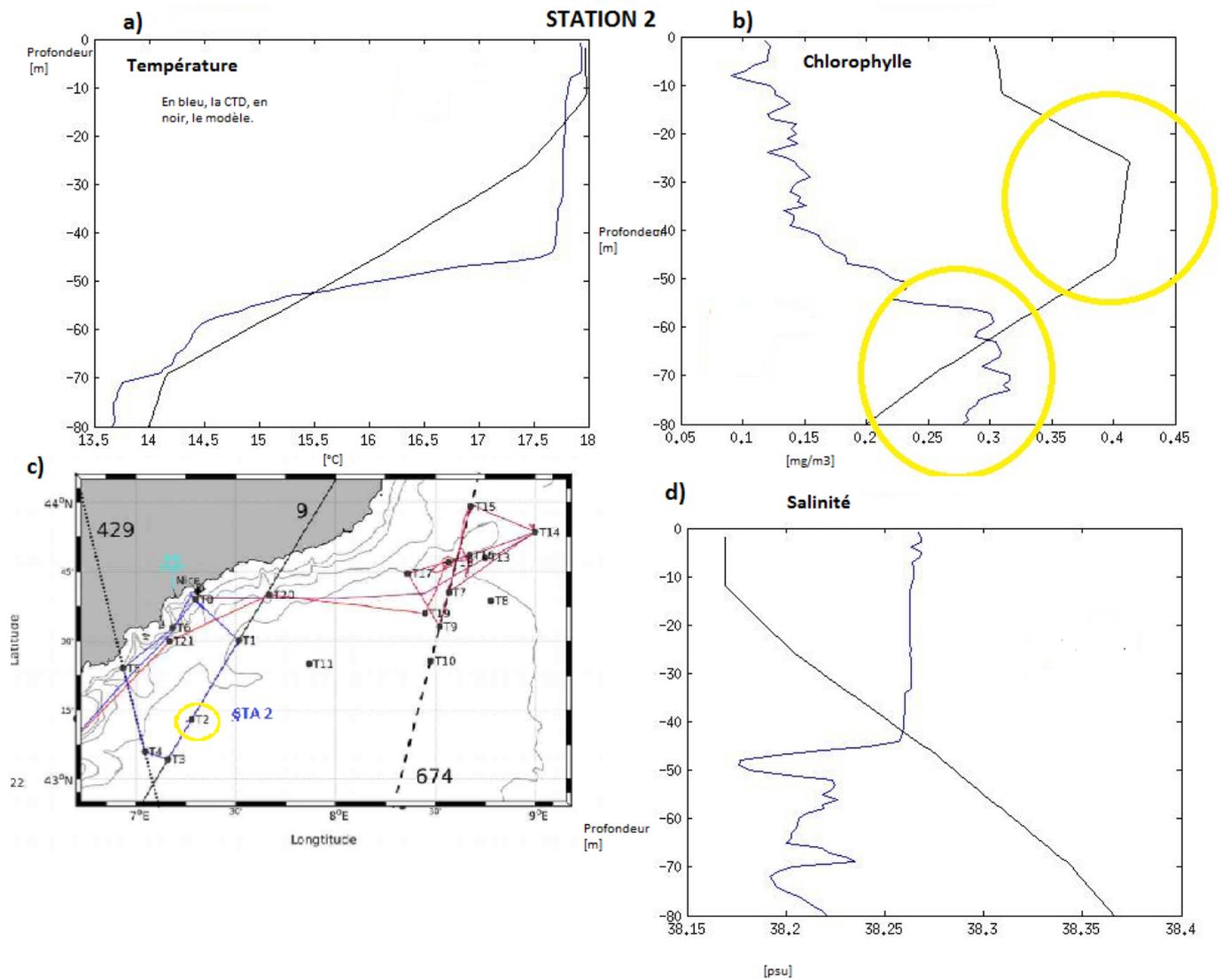


FIGURE 3.1: Comparaison CTD x modèle pour la station 2

Analyse des résultats de modélisation 3D couplée physique - biogéochimique de la campagne OSCAHR

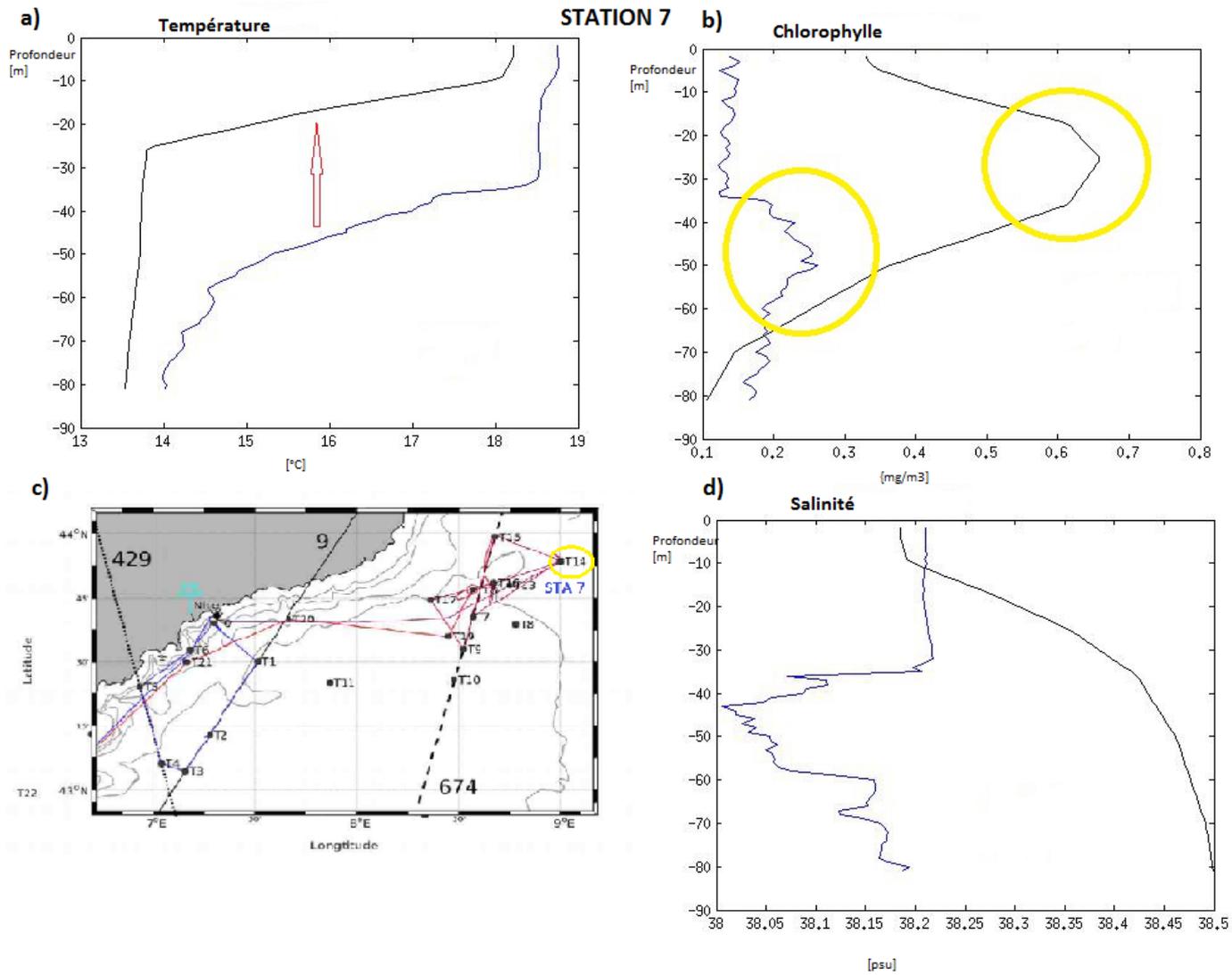


FIGURE 3.2: Comparaison CTD x modèle pour la station 7

Analyse des résultats de modélisation 3D couplée physique - biogéochimique de la campagne OSCAHR

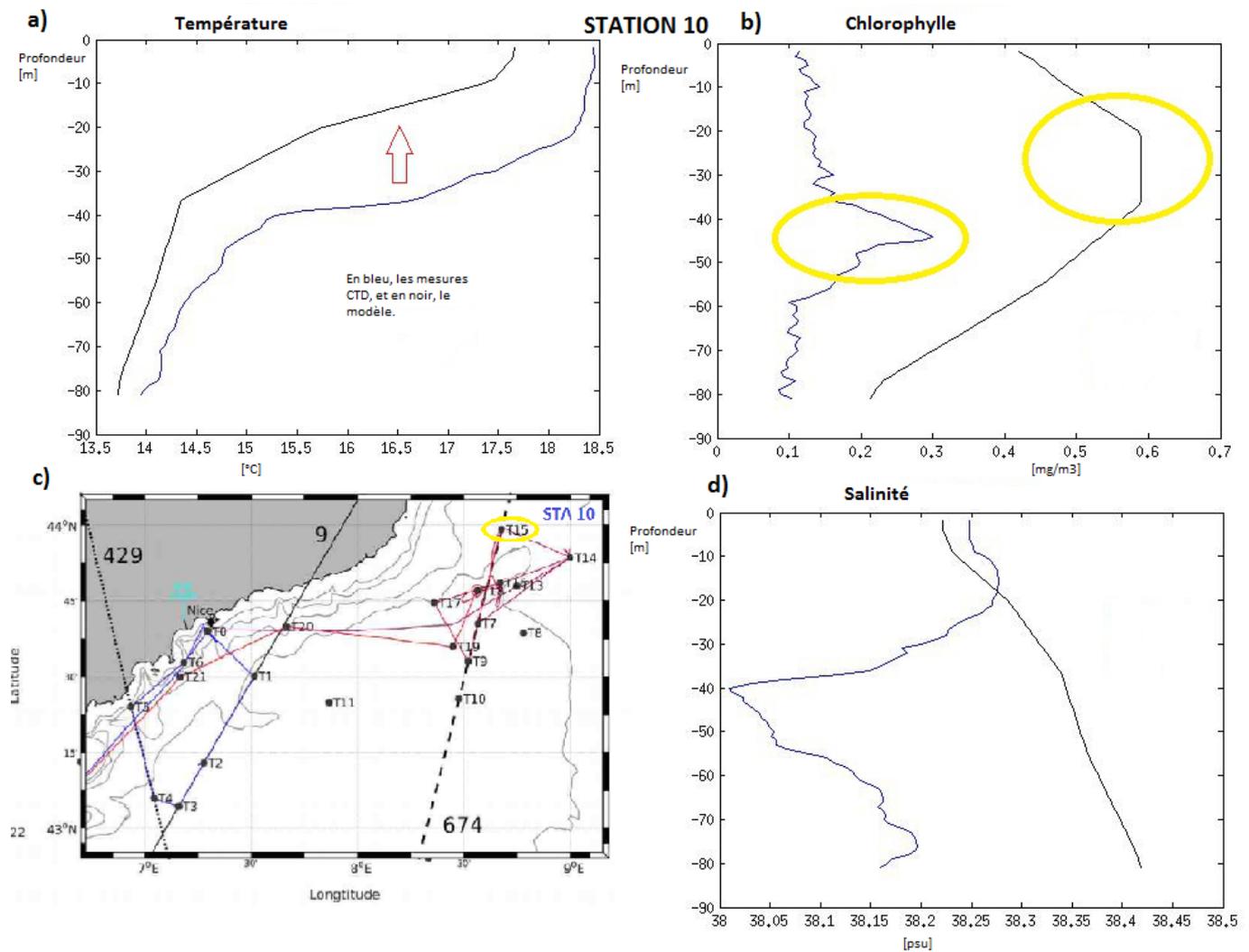


FIGURE 3.3: Comparaison CTD x modèle pour la station 10

Analyse des résultats de modélisation 3D couplée physique - biogéochimique de la campagne OSCAHR

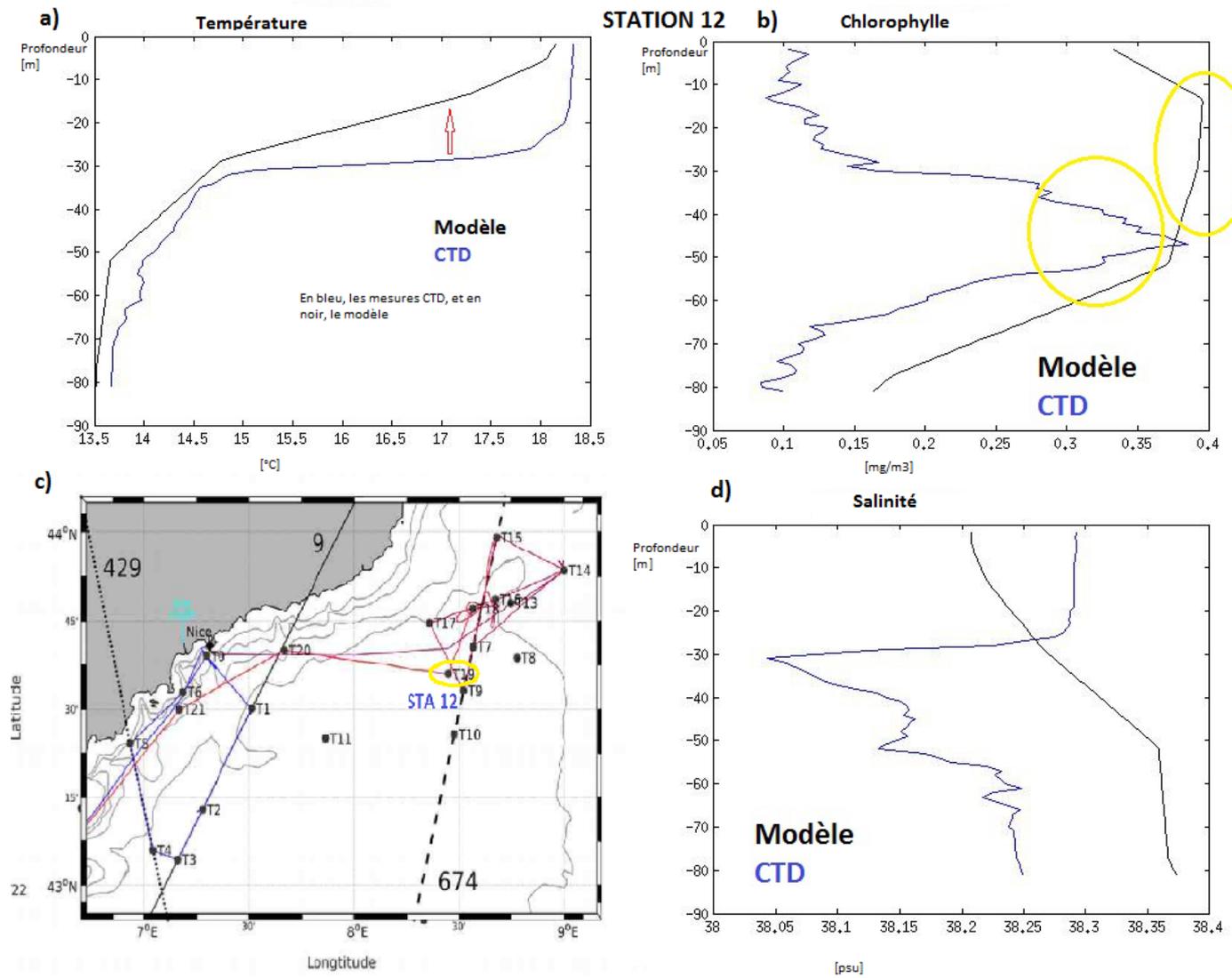


FIGURE 3.4: Comparaison CTD x modèle pour la station 12

## 3.2 GLIDER

Ensuite on a comparé les mesures du glider avec les résultats du modèle, pour la température, la salinité et la fluorescence en chlorophylle.

Comme on peut voir sur la figure 3.5, la trajectoire du glider était perpendiculaire à la côte, se déplaçant sur cette section orthogonale vers la Corse sur le transect Nice-Calvi.

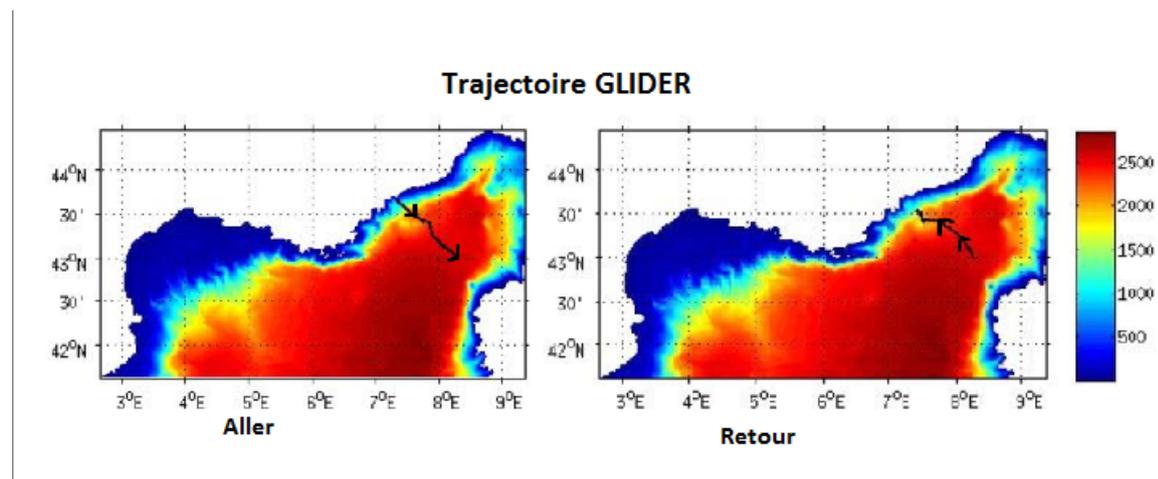


FIGURE 3.5: Trajectoire du glider

La ligne pointillée verticale blanche marque le point de demi-tour sur le trajet du glider (figure 3.6). La figure 3.6 montre les données du modèle déjà interpolées sur la grille des données in-situ. Sur la figure 3.7 de fluorescence, on peut noter qu'au milieu du trajet, en surface les mesures sont faibles (bleu foncé) dues à une erreur du capteur de fluorescence, et ces données ne doivent pas être considérées [F. Cyr, comm. pers.].

On peut voir que le modèle représente bien les tendances des mesures du glider, pour la température, bien que la thermocline soit trop haute, et les températures moins chaudes près de la surface. Près de la côte, c'est plus mélangé, et près de la ligne pointillée blanche, la thermocline est remontée (figure 3.6).

Ensuite, pour la chlorophylle (figure 3.7), le DCM est aussi trop haut dans le modèle. De plus, il est plus intense vers la surface et ne descend pas trop en profondeur comme les mesures. On peut aussi noter que près de la ligne pointillée blanche, donc entre la côte niçoise et la Corse, la concentration de chlorophylle est plus forte.

La comparaison pour la salinité ne peut pas nous donner des bonnes conclusions. Mais on peut également noter, comme dans la CTD, une masse d'eau légèrement dessalée vers 100m en profondeur, et plus près de la côte (figure 3.8).

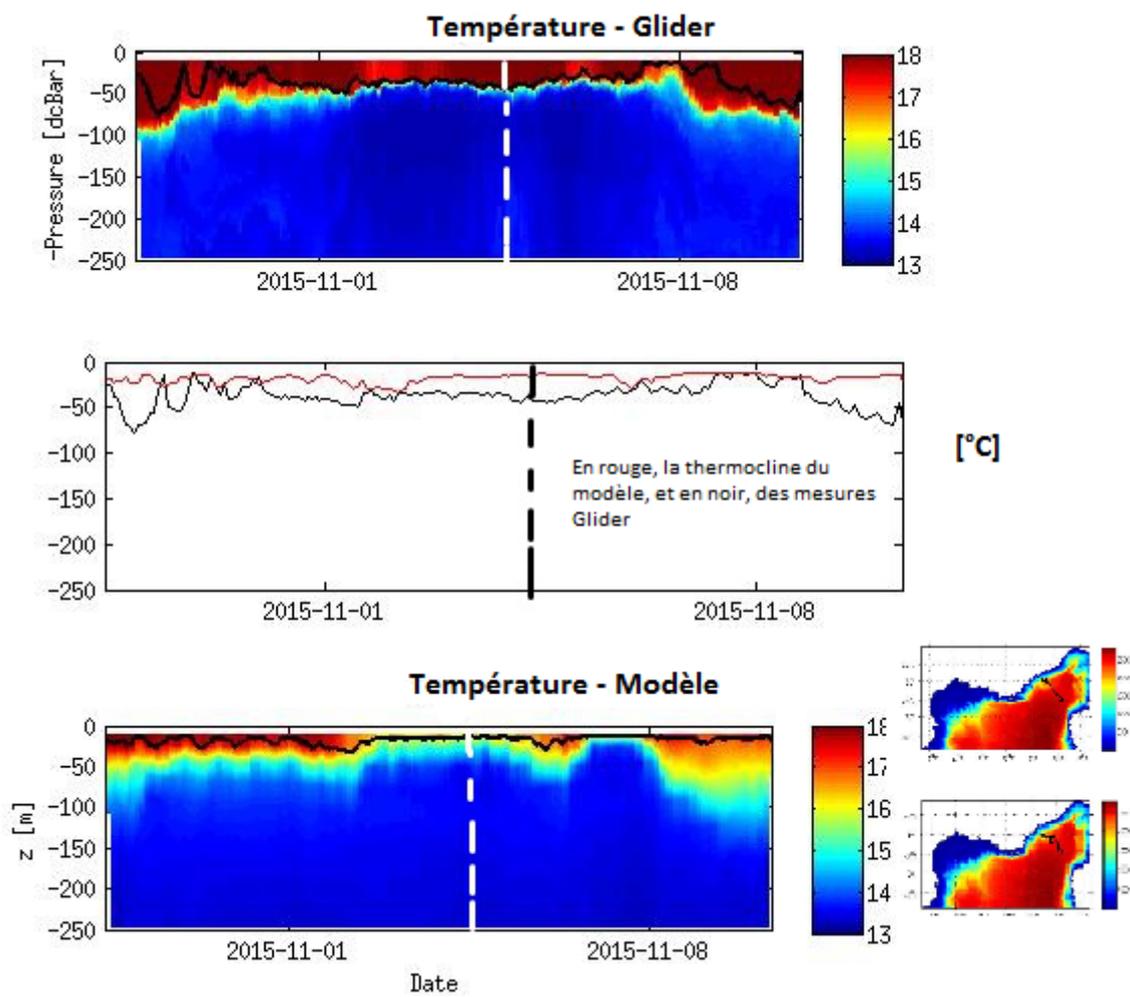


FIGURE 3.6: Comparaison entre la température du modèle et celle mesurée par le glider

Analyse des résultats de modélisation 3D couplée physique - biogéochimique de la campagne OSCAHR

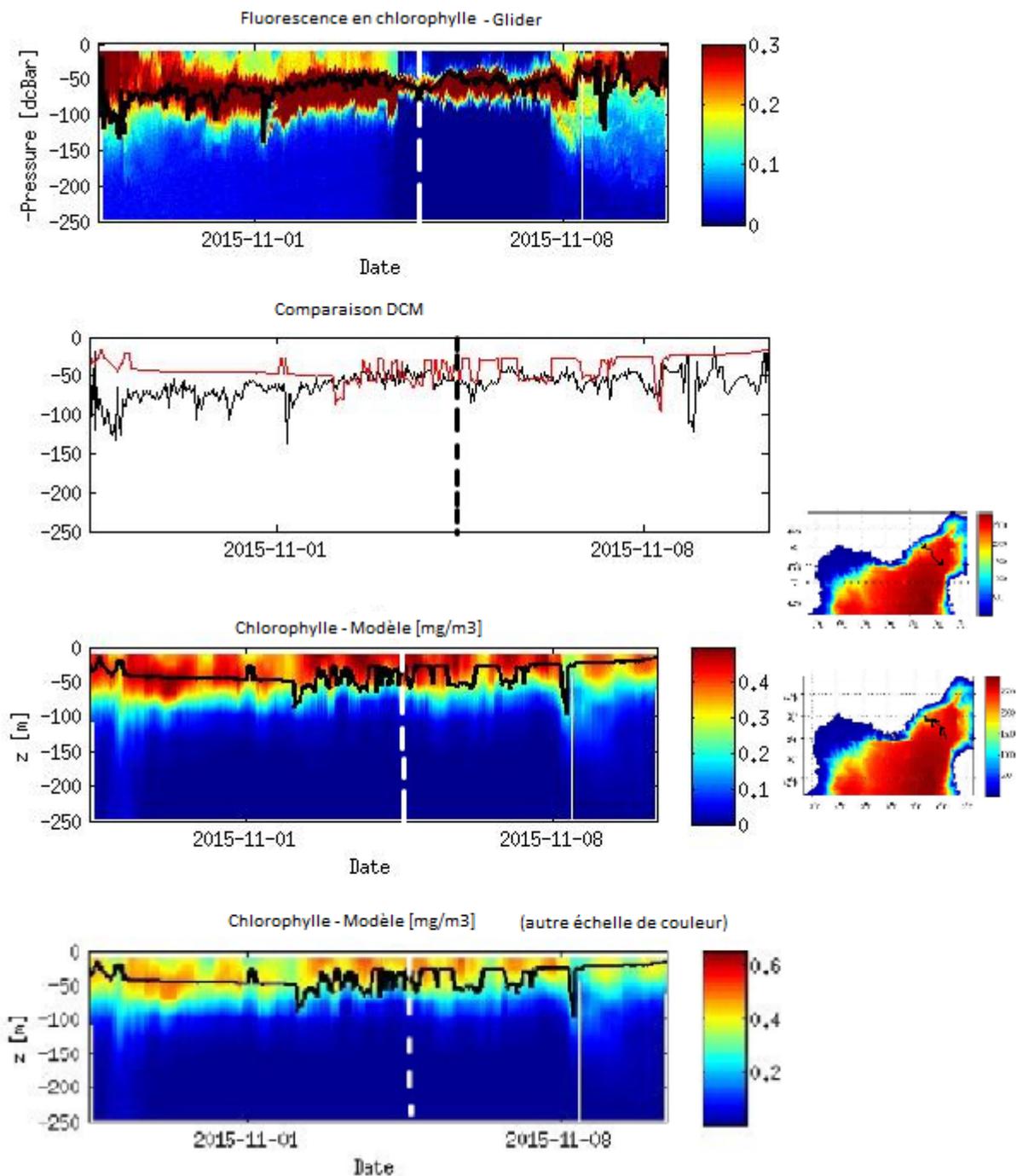


FIGURE 3.7: Comparaison entre la chlorophylle du modèle et la fluorescence en chlorophylle mesurée par le glider

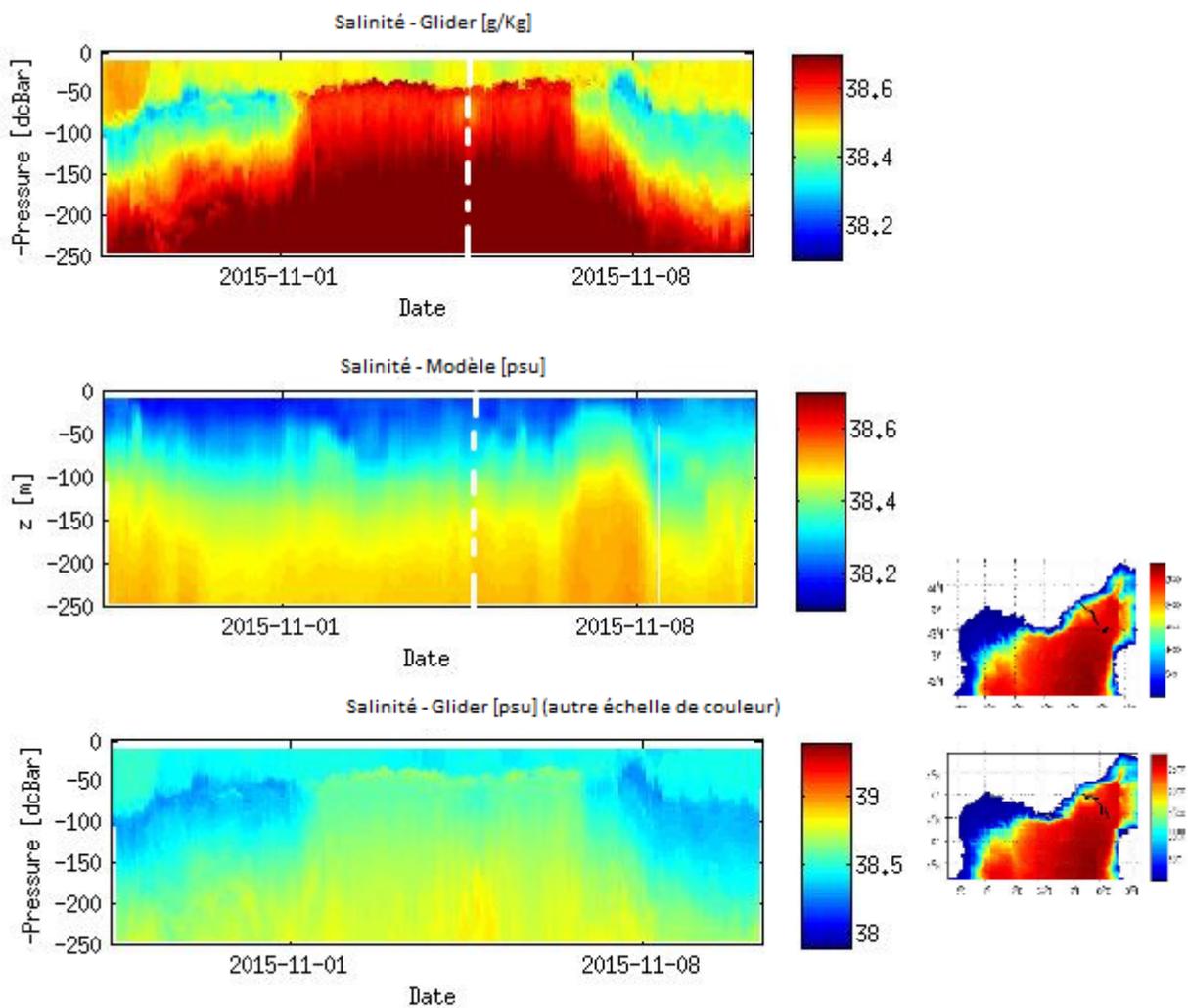


FIGURE 3.8: Comparaison entre la salinité du modèle et celle mesurée par le glider

### 3.3 FLOTTEUR

Pour le flotteur, les mesures comparées avec le modèle étaient celles de température, salinité, chlorophylle et de nitrate. C'est important de se souvenir que ce sont les mesures de fluorescence, qui n'étaient pas converties en chlorophylle. Les résultats du modèle sont déjà interpolés sur la grille de profondeur des mesures du flotteur.

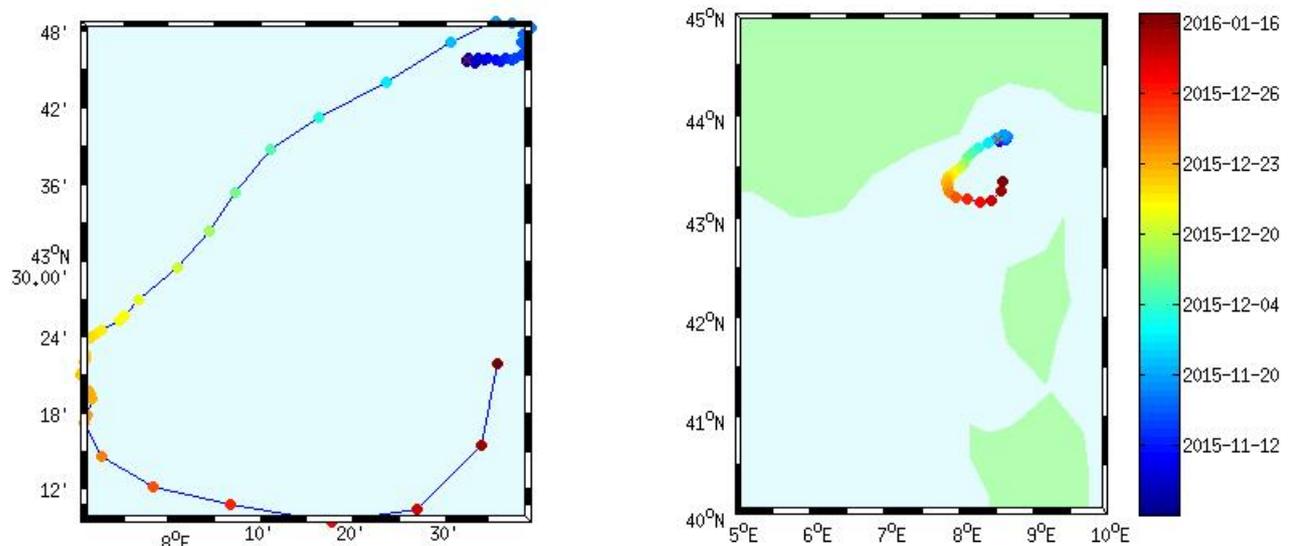


FIGURE 3.9: Trajectoire du flotteur dans la mer de Ligurie. En couleur la date.

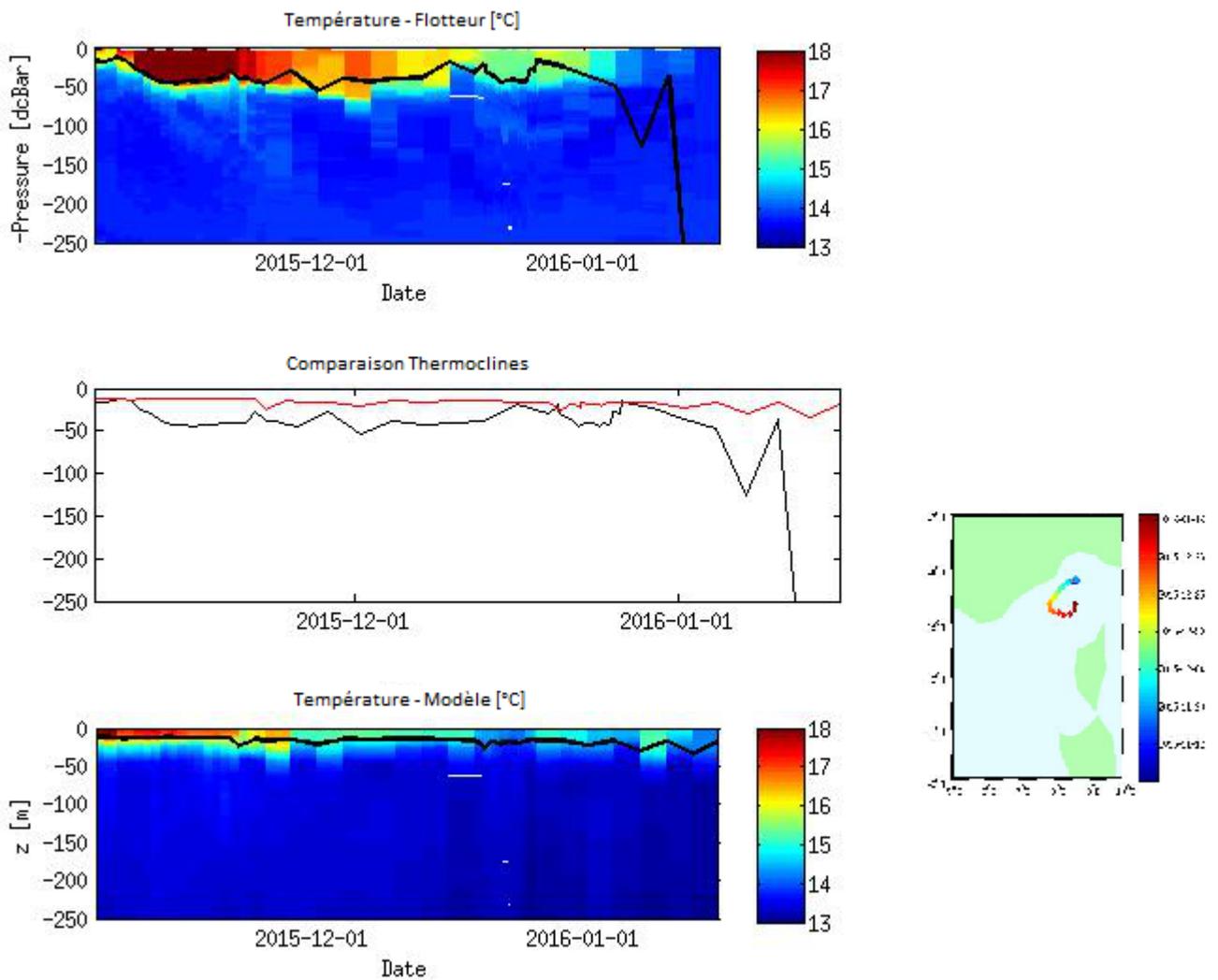
Au début de la dérive, le flotteur a été piégé au même endroit pendant un moment, et après il a été entraîné par un courant, probablement le Courant Nord, et après a été dévié vers la droite (figure 3.9).

On observe sur la figure 3.10 que la thermocline calculée par le modèle est encore une fois trop haute, en comparaison avec celle des mesures du flotteur.

Dans les mesures in-situ, on peut noter un mélange vertical qui commence en décembre et qui devient très fort en janvier. Pour le modèle on retrouve ce mélange, mais moins marqué.

Le DCM et la nitracline sont aussi trop hauts dans le modèle en comparaison avec les mesures in-situ (figure 3.11 et 3.12).

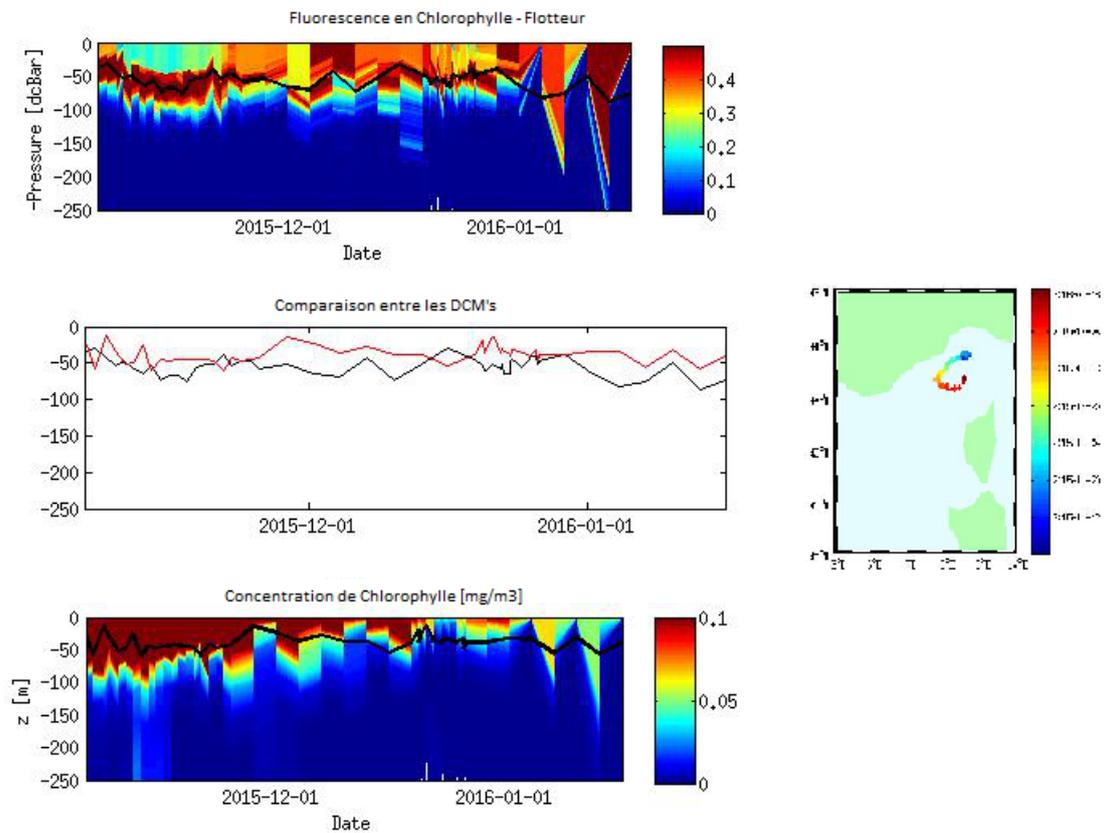
De plus, une comparaison entre les mesures CTD de la station 11 et le premier profil du flotteur, qui sont les plus proches possibles en espace et en temps, a été faite pour la validation des mesures du flotteur, pour vérifier les mesures de salinité, qui étaient très différentes de celle du glider (figure 3.14).



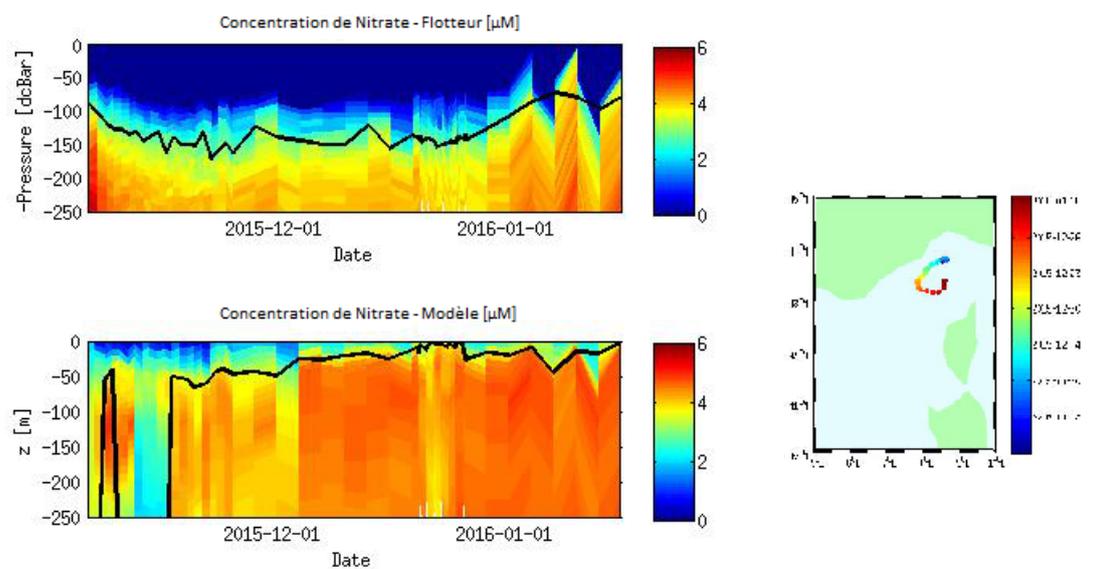
**FIGURE 3.10:** Comparaison entre la température mesurée par le flotteur et celle du modèle.

Et on peut donc conclure que les mesures de salinité s'accordent bien et on peut les considérer (figure 3.13).

Analyse des résultats de modélisation 3D couplée physique - biogéochimique de la campagne OSCAHR

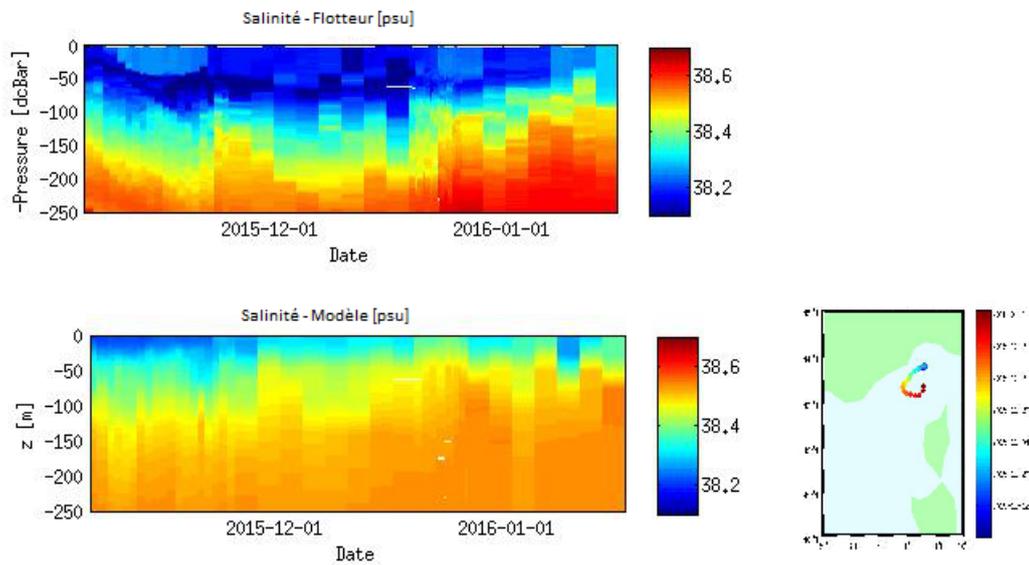


**FIGURE 3.11:** Comparaison entre la fluorescence en chlorophylle mesurée par le flotteur et la concentration de chlorophylle calculé par le modèle.

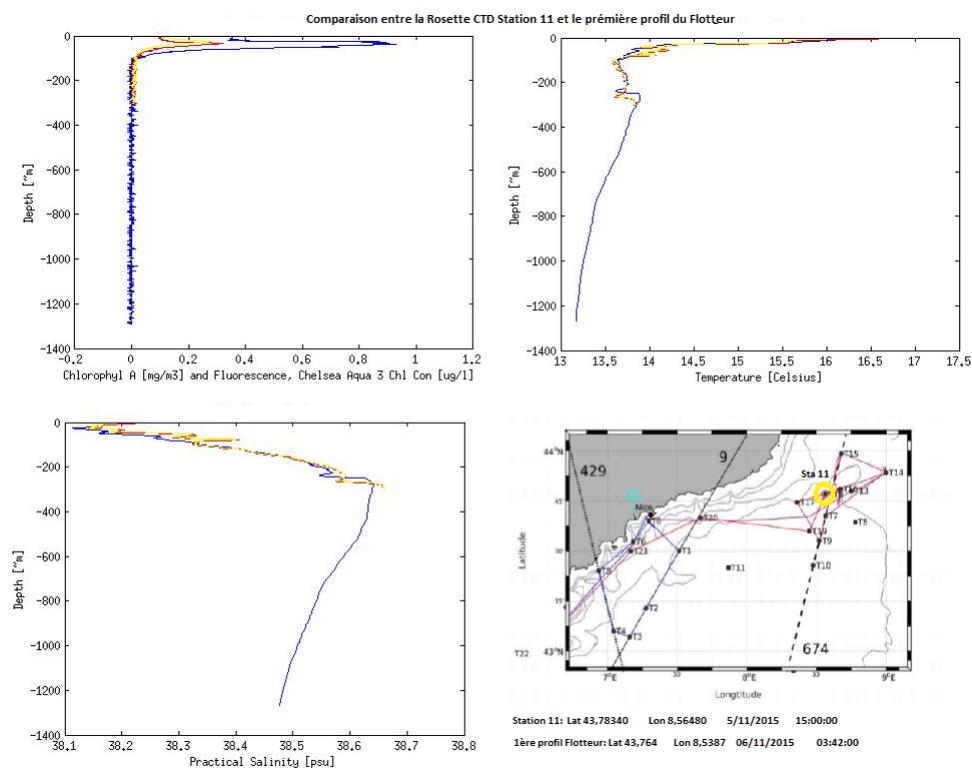


**FIGURE 3.12:** Comparaison entre la concentration de nitrate mesurée par le flotteur et celle du modèle.

# Analyse des résultats de modélisation 3D couplée physique - biogéochimique de la campagne OSCAHR



**FIGURE 3.13:** Comparaison entre la salinité mesurée par le flotteur et celle du modèle.



**FIGURE 3.14:** Comparaison entre le premier profil du Flotteur et la Rosette CTD de la Station 11

# Chapitre 4

## Discussion

### 4.1 THERMOCLINE HAUTE

Un résultat clair de la comparaison est que la thermocline dans le modèle est presque toujours placée trop haute en comparaison avec toutes les mesures in-situ. Comme la thermocline est une barrière très marquante dans la dynamique de l'océan, cela va influencer les autres "clines" aussi. Par exemple, si la thermocline est trop haute, les nutriclines (comme la nitracline) seront aussi trop hautes, car la thermocline définit la profondeur maximale de mélange. Donc tous les nutriments au-dessus de cette profondeur sont mélangés vers la surface et absorbés par le phytoplancton, car la production primaire est beaucoup plus intense là où il y a beaucoup de lumière. Et effectivement dans les comparaisons avec le flotteur, la nitracline se situe trop haute en comparaison avec les mesures in-situ. Également, le DCM va trouver son équilibre à une certaine profondeur influencée par la nitracline, qui est elle-même influencée par la thermocline, car le phytoplancton dépend aussi des nutriments pour sa croissance. De plus, le DCM dépend aussi de la lumière pour la photosynthèse. Comme la lumière décroît exponentiellement vers le fond, et de plus la nutricline est trop haute dans le modèle, le DCM sera aussi trop haut. On retrouve bien ce résultat dans toutes les comparaisons.

## 4.2 ZONES DE DESSALURE

En regardant les données in-situ du glider et de la CTD, et aussi du flotteur, on peut noter des poches d'eau relativement plus dessalées vers 50m pour la CTD, et entre 50 et 100m pour le glider et le flotteur (figure 4.1).

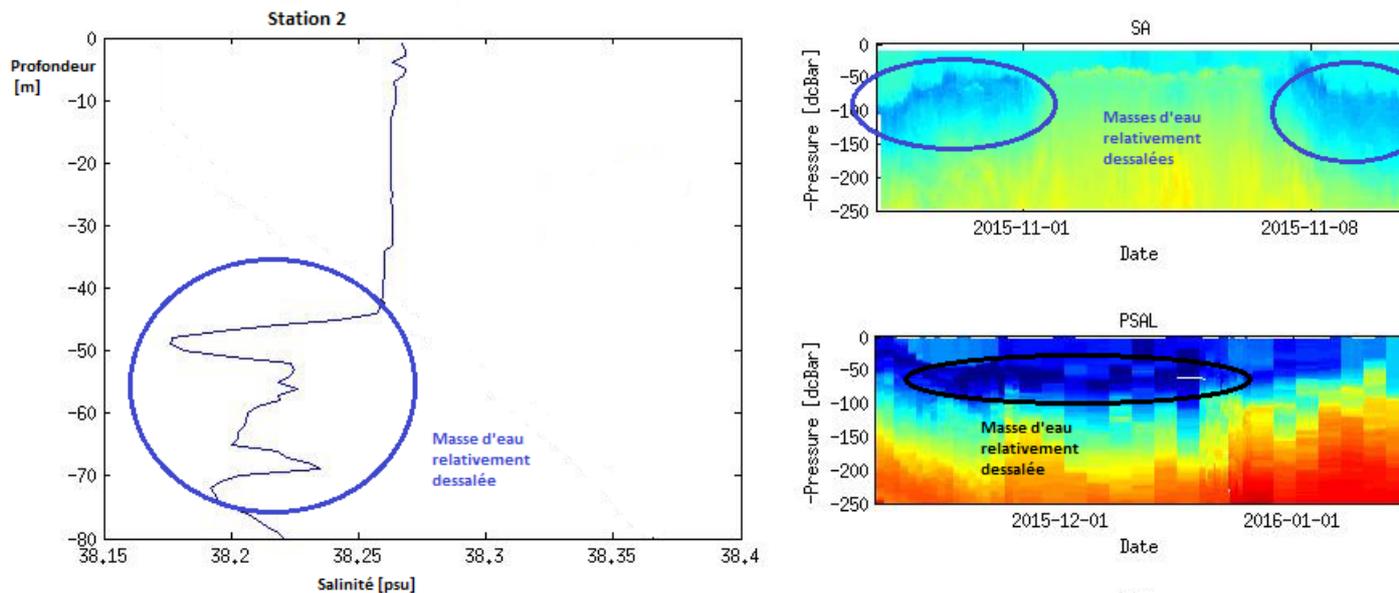


FIGURE 4.1: Focus sur les masses d'eau relativement dessalées

Dans le modèle, en suivant la trajectoire du glider, et aussi en prenant les points plus proches des mesures CTD, on ne voit pas forcément ces poches d'eau légèrement dessalées (figure 3.8). Mais si on fait des coupes continues dans l'espace à un instant donné dans la direction de la trajectoire du glider, on peut noter ces poches, comme dans la figure 4.2.

Les mesures du glider [F. Cyr, comm.pers.] montrent que ces eaux relativement dessalées n'ont pas une forte turbidité, ce qui pourrait exclure l'hypothèse que l'origine de ces eaux soient les eaux des rivières froides qui plongeraient et trouveraient leur équilibre à cette profondeur. De plus, il semble que ces eaux ont des traces d'hydrocarbures, ce qui pourrait nous faire penser que l'origine de ces eaux est l'atmosphère [M. Goutx, comm. pers.]. Une hypothèse plausible est qu'en été, les eaux de la pluie du printemps, froides mais très dessalées, donc légères, qui atteignent jusqu'à 50m par mélange, subissent l'évaporation, ce qui les laisse plus salées en surface, en isolant les eaux dessalées de printemps, froides, en profondeur. [F. Cyr, comm. Pers.]

Une autre hypothèse serait le même processus, mais à une autre échelle de temps. Les forts orages de début octobre auraient généré ces eaux dessalées et froides, qui auraient par

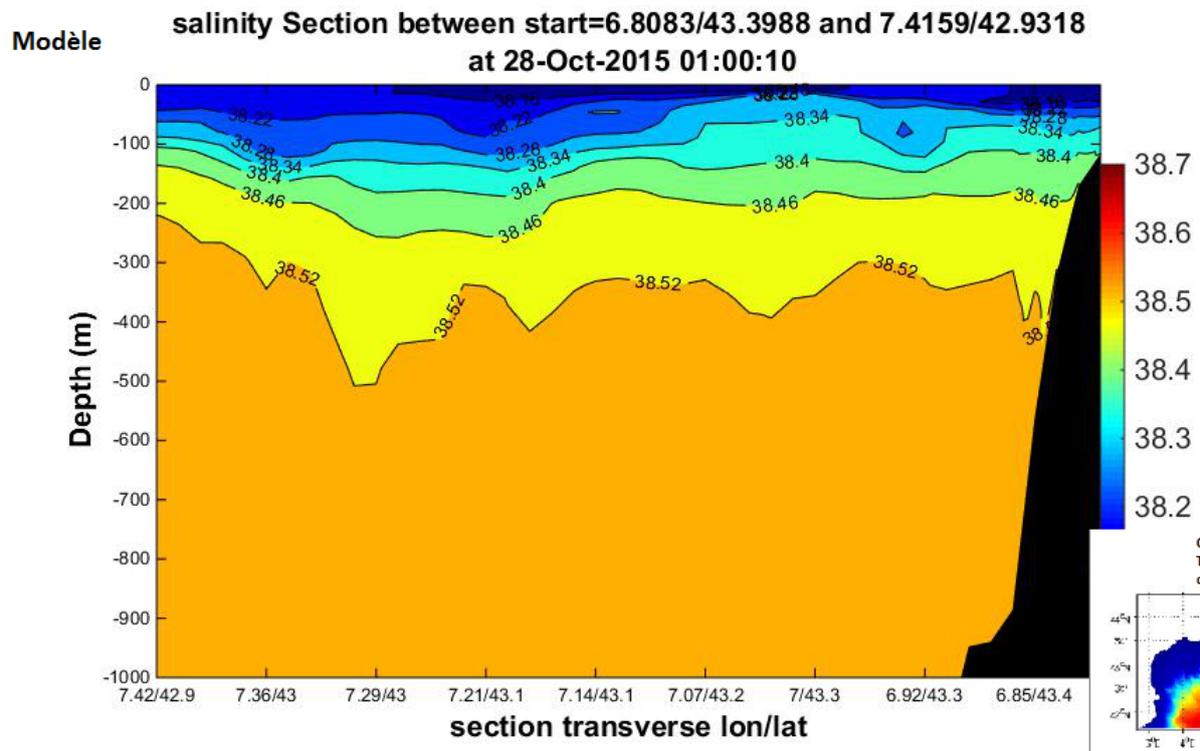


FIGURE 4.2: Focus sur les masses d'eau relativement dessalées pour un transect du modèle

la suite subi une évaporation qui les aurait rendues plus salées juste sous la surface.

### 4.3 DIFFÉRENCE CÔTE-LARGE DANS LES MESURES GLIDER

Dans les mesures in-situ du glider qui a fait le transect de la côte vers la Corse, comme on peut le voir sur la figure 3.5, on peut apercevoir que près de la côte, la thermocline est plus profonde qu'au large, ce qui nous indique un mélange plus fort près de la côte (figure 3.6).

Une explication est que près de la côte, on peut faire l'hypothèse que la turbulence est plus forte, car on a l'interaction du Courant Nord avec le continent, et donc le mélange vertical est aussi plus fort.

On a utilisé le modèle pour essayer de montrer la validité de cette hypothèse. La figure 4.3 montre que le coefficient KZ de diffusivité turbulente verticale qui a été calculé par le modèle, pour les couches "sigma" les plus proches de la surface. Ce coefficient est celui de la diffusion turbulente des particules et traceurs.

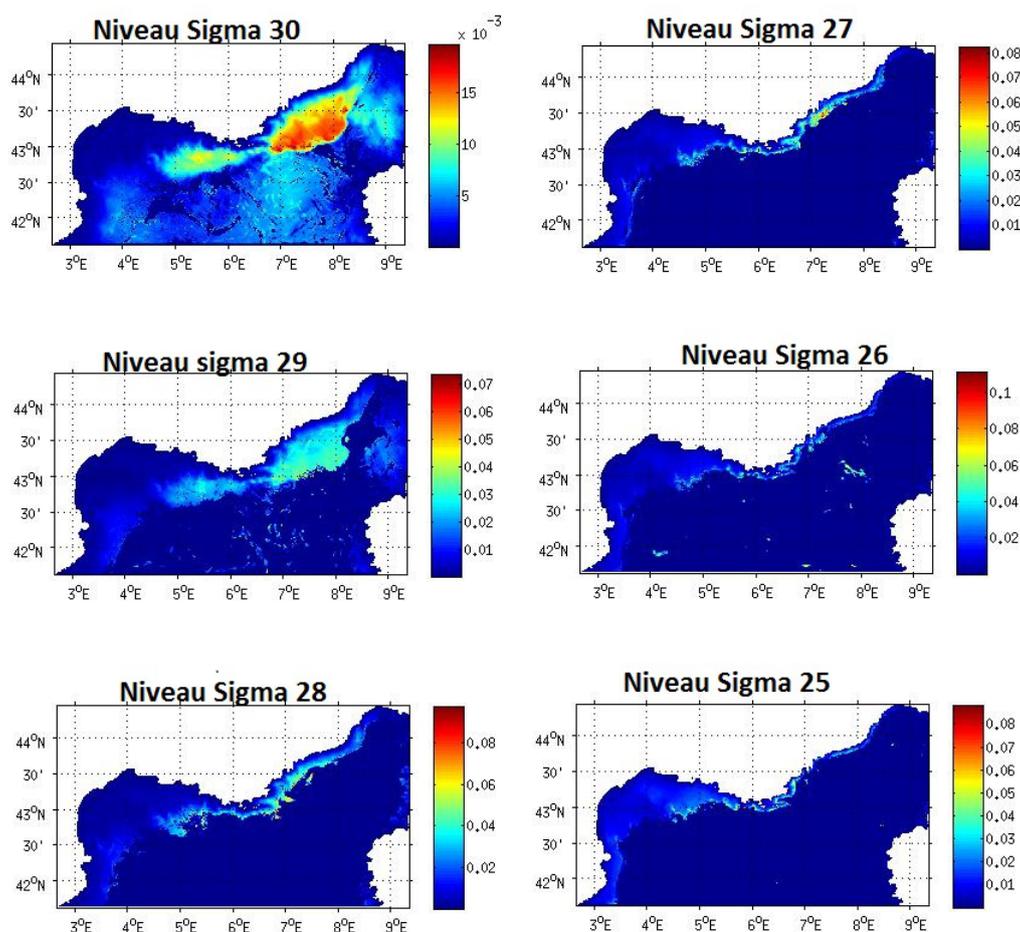


FIGURE 4.3: Coefficient de diffusion turbulente verticale en m<sup>2</sup>/s

Comme on peut noter, la turbulence est plus forte près de la côte, même en profondeur.

Toutefois cela peut être un artefact, car les couches sigma sont aussi moins épaisses près de la côte, car l'océan est moins profond près du continent.

Une autre hypothèse pour expliquer la remontée de la thermocline vers le large peut venir de la circulation générale à l'échelle de la mer Méditerranée.

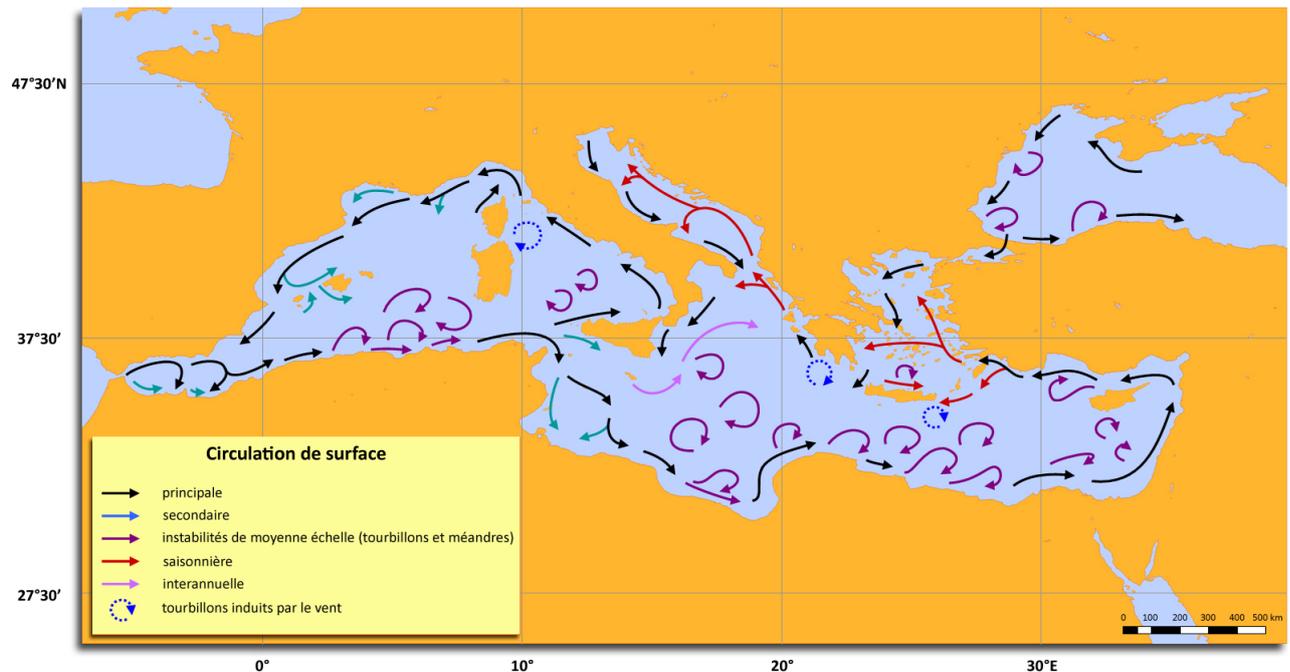


FIGURE 4.4: Carte de circulation générale de la méditerranée, d'après Millot et Taupier Letage, 2005

Comme on peut noter sur la figure 4.4, il peut y avoir une branche du Courant Nord, qui s'écoule le long de la Côte d'Azur, qui peut tourner à gauche et être transporté le long de la côte ouest de la Corse, en fermant un petit gyre cyclonique. Comme dû à la rotation de la Terre, dans l'hémisphère Nord, les eaux sont déviées vers la droite, cela engendre un dôme avec un upwelling au centre de ce gyre. Ceci est bien visible sur la trajectoire du glider, et pourrait expliquer la remontée de la thermocline au large. [Fieux et Andrié, 2010]

Finalement, on peut noter que la concentration de chlorophylle est plus forte vers le large, ce qui peut être expliqué par les deux hypothèses précédentes : premièrement, si à la côte l'eau est plus mélangée, on va avoir une distribution verticale plus homogène de chlorophylle et de plus, une concentration maximale moins forte ; deuxièmement, avec l'*upwelling* au centre du dôme, il y a aussi une remontée des nutriments, ce qui peut favoriser des concentrations plus fortes de phytoplancton.

## 4.4 LIMITES DE L'ÉTUDE

### 4.4.1 Difficulté de comparer

Il y a une difficulté à faire la comparaison entre les données de sortie des simulations et les mesures in-situ, comme expliqué dans l'introduction de ce document.

Par exemple, les tendances qu'on peut noter dans les mesures de fluorescence du glider ne sont pas forcément visualisables dans les données du modèle qu'on a choisi de représenter en essayant de suivre la trajectoire de ce véhicule autonome.

Mais si on fait une coupe continue plus ou moins sur le même transect que le glider, à un instant fixé, dans les données de sortie de la simulation, on peut noter les mêmes tendances que dans les mesures du glider : un DCM plus près de 50m de profondeur, et son intensité plus forte (moins de mélange) en allant vers le large (figure 4.5).

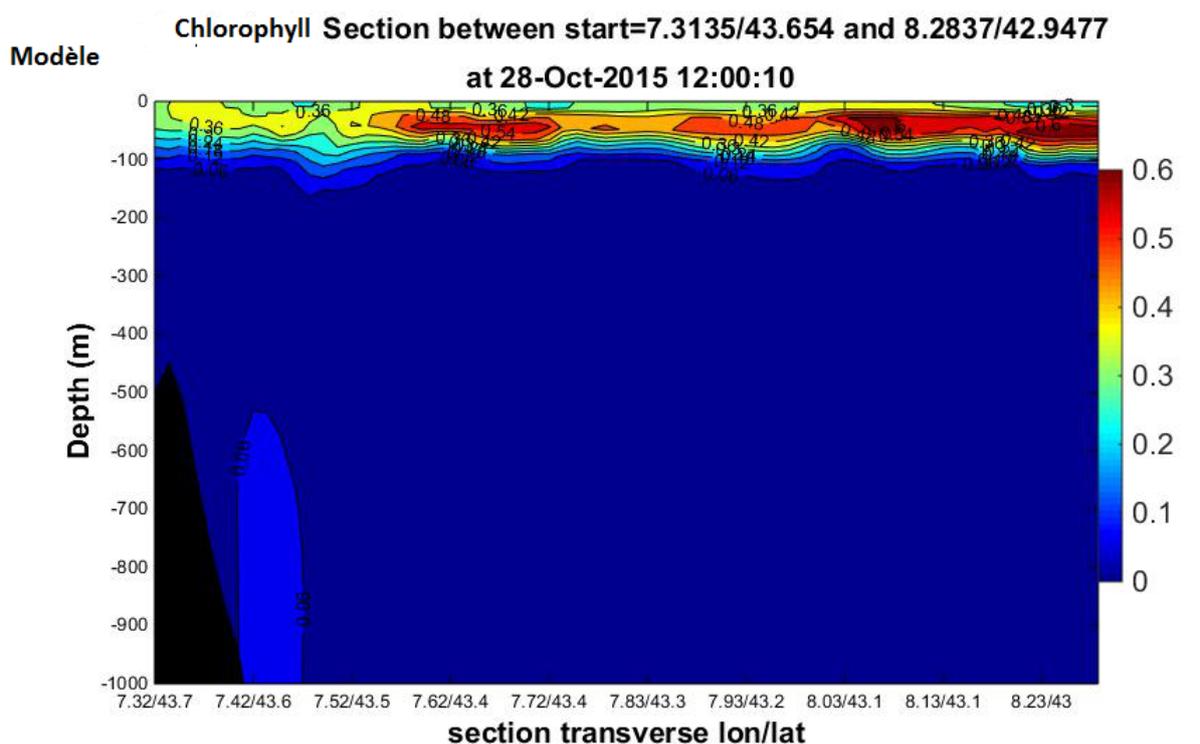


FIGURE 4.5: Section de concentration de chorophylle du modèle

De plus, la simulation haute fréquence (avec des sorties toutes les heures) est visuellement meilleure que la simulation basse fréquence (toutes les 6 heures), en comparaison avec les données in-situ, ce qui nous dit que la résolution temporelle a aussi un rôle important dans la comparaison.

#### 4.4.2 Problème dans les données initiales du modèle

Un problème qu'on a eu pendant le stage est que l'on n'a pas pu activer la pluie et l'évaporation dans la simulation, car il y a eu un problème avec les données de pluie. Mais dans les conditions aux limites, où on prend les données du modèle général (OGCM), on avait la pluie. Le seul fait que l'évaporation et la pluie ne soient pas activées dans notre modèle gêne beaucoup la qualité de la salinité de la simulation. De plus, début d'octobre, il y a eu de fortes pluies prises en compte dans les données du modèle OGCM et appliquées en OBC (*open boundary conditions*) au bord Est de la grille de notre modèle. Ces eaux de pluie dessalées, sont sûrement entraînées depuis le bord Est de notre grille vers l'Ouest par le Courant Nord, et comme il n'y a pas d'évaporation dans notre modèle, elles peuvent gêner encore plus les calculs de salinité. De plus, les valeurs de débit des fleuves ne prennent pas en compte le ruissellement, ni les valeurs maximales atteintes pendant les crues (car les debimètres ont saturé), ce qui n'est pas bon pour la salinité calculée par les simulations. Tous ces problèmes peuvent expliquer la différence entre les données in-situ de salinité et celles de la simulation. Ils doivent être résolus pour que des meilleures analyses puissent être faites.

#### 4.4.3 Problème de la discrétisation verticale

On a déjà analysé le fait que le DCM de la simulation est trop proche de la surface en comparaison avec les autres données. Mais de plus, on peut noter que l'épaisseur de la couche où la concentration de chlorophylle est importante est beaucoup plus grande dans les données de la simulation que dans les données in-situ (figures 3.3a et 3.4a).

Ceci peut lever une autre question sur la discrétisation verticale. Il est vrai que trente niveaux sigma pour une profondeur d'environ 2000m n'est pas bien adapté. Il y a des couches de 50m proches de la surface, ce qui n'est pas du tout adapté pour représenter les paramètres biologiques comme le phytoplancton, puisque proche de la surface, ils sont très fins et très variables sur une petite différence de profondeur.

Une amélioration du modèle serait d'utiliser à la place des coordonnées sigma, les coordonnées sigma généralisées, car un raffinement de la discrétisation en surface ou même au fond pourrait être utilisé pour mieux représenter ces paramètres biologiques.

# Chapitre 5

## Conclusion

En conclusion, il est vrai qu'il y a une difficulté inhérente à la comparaison de données in-situ avec une résolution spatio-temporelle très forte, avec des données de sortie de simulation qui ont une résolution spatio-temporelle beaucoup moins forte. De plus, c'est une comparaison entre un milieu continu et un milieu discret, donc susceptible d'erreurs.

Le modèle a bien reproduit des "clines" comme la thermocline, la nitracline et le DCM, quoique pas placées à la bonne profondeur.

D'après les résultats, ce qui était évident est que la thermocline est trop près de la surface dans le modèle, ce qui a des conséquences sur les autres "clines", qui sont aussi plus près de la surface.

Donc pour l'évaluation du modèle, on peut dire qu'il donne des résultats intéressants mais il y a un problème qui doit être résolu pour une meilleure estimation de la température, qui a une influence très grande dans la dynamique de toutes les autres variables. Ce problème pourrait être résolu en changeant de paramétrisation pour le mélange turbulent vertical : utiliser une paramétrisation en k-epsilon plutôt que la formulation de Gaspar.

De plus, une résolution plus fine verticalement est conseillée, au moins pour le calcul des variables biologiques qui sont plus sensibles.

Il y aura certainement une amélioration dans les résultats de la simulation si certains problèmes sont résolus, comme le problème de la pluie et de l'évaporation, et celle du ruissellement.

# Chapitre 6

## Références

**Argo, 2016.** [http://www.argo.ucsd.edu/How\\_Argo\\_floats.html](http://www.argo.ucsd.edu/How_Argo_floats.html)

**Computational Science Education Project, 1995.** *Ocean Models*. <https://www.phy.ornl.gov/csep/om/node32.html#SECTION00056000000000000000>

**de Boyer Montégut, Clément, et al.** "Mixed layer depth over the global ocean : An examination of profile data and a profile-based climatology." *Journal of Geophysical Research : Oceans* 109.C12 2004.

**Doglioli, Andrea M. 2015,** *OSCAHR cruise, Téthys II R/V*, <http://dx.doi.org/10.17600/15008800>

**Fioux M. et C. Andrieu,** Michèle, and Chantal Andrié. *L'océan planétaire*. Les Presses de l'ENSTA, 2010.

**Garnier, Valérie, Thouvenin, Bénédicte et Huret, Martin, 2013.** *MARS Manuel*. <http://wwz.ifremer.fr/mars3d/Le-modele/Documentation>

**IFREMER, 2005.** <http://www.ifremer.fr/lpo/gliders/>

**Lazure, Pascal, and Franck Dumas.** "An external-internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS)." *Advances in Water Resources* 31.2. 2008 : 233-250.

**Millot, Claude, and Isabelle Taupier-Letage.** "Circulation in the Mediterranean sea." *The*

Mediterranean Sea. Springer Berlin Heidelberg, 2005. 29-66.7.

**Nicolle, Amandine, Pierre Garreau, and Bernard Liorzou.** *"Modelling for anchovy recruitment studies in the Gulf of Lions (Western Mediterranean Sea)."* Ocean Dynamics 59.6 2009 : 953-968.

**Pasqueron de Fommervault, Orens, 2015.** *Dynamique des nutriments en Méditerranée : des campagnes océanographiques aux flotteurs Bio-Argo.* Thèse de Doctorat, Université Paris 6.

# Chapitre 7

## Annexe

Ce script que j'ai développé prend les données du fichier "*numero\_flotteur\_Mprof.nc*", en format netcdf et les organise en variables dans MatLab.

Le but était d'avoir les données en format matrice dans laquelle les colonnes correspondent à des profils mesurés, alors le nombre de colonnes indique le nombre de profils enregistrés par le flotteur.

Mais directement dans le fichier netcdf, les données sont en format matriciel mais avec beaucoup plus de colonnes. En fait, si par exemple il y a 6 capteurs, les matrices ont 6\*nombre de profils colonnes. Alors à chaque groupe, dans cet exemple de 6 colonnes, ce sont les mesures d'un profil fait par le flotteur. De plus, comme chaque capteur installé sur le flotteur a une fréquence de mesure différente, ces 6 colonnes ont des correspondances différentes avec la matrice de pression. Et par exemple, pour la fluorescence en chlorophylle, comme il n'y a qu'un capteur qui la mesure, alors seulement une de ces 6 colonnes sera remplie, et les autres seront remplies par des NaNs (*Not a Number*). C'est pour cela que j'ai créé une fonction qui efface ces colonnes.

Au tout début du script, il y a quelques options que l'utilisateur doit choisir. Premièrement, s'il veut les données ascendantes, ou descendantes, ou les deux, ou ne pas faire distinction entre elles (figure 2.7). Comme il y a un traitement des données et aussi une qualification des mesures (*QC : quality control*), un nettoyage est aussi possible pour les mesures qui ont une faible fiabilité. On peut choisir de faire un nettoyage pour les données d'une variable, et dans ce cas, les données respectives de pression seront aussi effacées. Et un nettoyage des données de pression peut être fait aussi, et dans ce cas, les données respectives de la variable seront aussi effacées. Il y a aussi une option pour effacer une colonne de données, c'est-à-dire, les mesures d'un profil, s'il y a des problèmes connus dans ces mesures.

Au final, on aura toutes les variables en format matriciel comme expliqué avant, et de

Analyse des résultats de modélisation 3D couplée physique - biogéochimique de la campagne OSCAHR

---

plus beaucoup d'informations, comme : si le profil est ascendant ou descendant, le nombre de cycles fait par le flotteur, et aussi les données de position et de temps.