



**HAL**  
open science

## **Projet collaboratif en océanographie côtière projet LEFE-GMMC. Action vers une modélisation intégrée côtière opérationnelle (AMICO)**

Christel Pinazo, Oliver N. Ross, Frédéric Diaz, Andrea M. Doglioli, Fabrizio d'Ortenzio, Claude Estournel, Philippe Forget, Valérie Garnier, Elodie Gutknecht, Marion Kersale, et al.

### ► **To cite this version:**

Christel Pinazo, Oliver N. Ross, Frédéric Diaz, Andrea M. Doglioli, Fabrizio d'Ortenzio, et al.. Projet collaboratif en océanographie côtière projet LEFE-GMMC. Action vers une modélisation intégrée côtière opérationnelle (AMICO): AMICO-BIO Action vers une modélisation intégrée côtière opérationnelle en BIOgéochimie couplée. Amélioration de la gestion des conditions de frontières ouvertes biogéochimiques dans les modèles physiques et biogéochimiques couplés régionaux afin de reproduire les principaux processus d'échanges côte -large. Mediterranean Institute of Oceanography. 2016. hal-03978765

**HAL Id: hal-03978765**

**<https://hal.science/hal-03978765>**

Submitted on 8 Feb 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



## **Projet collaboratif en Océanographie Côtière**

### **Projet LEFE-GMMC**

**Action vers une Modélisation Intégrée Côtière Opérationnelle  
(AMICO)**

**AMICO-BIO**

**Action vers une Modélisation Intégrée Côtière Opérationnelle en  
BIOgéochimie couplée**

# **Amélioration de la gestion des conditions de frontières ouvertes biogéochimiques dans les modèles physiques et biogéochimiques couplés régionaux afin de reproduire les principaux processus d'échanges côte - large**

C. Pinazo<sup>1</sup>, O. N. Ross<sup>1</sup>, F. Diaz<sup>1</sup>, A.M. Doglioli<sup>1</sup>, F. D'Ortenzio<sup>2</sup>, C. Estournel<sup>3</sup>, P. Forget<sup>1</sup>, V. Garnier<sup>4</sup>, E. Gutknecht<sup>5</sup>, M. Kersalé<sup>4</sup>, F. Kessouri<sup>3</sup>, C. Lathuilière<sup>6</sup>, L. Marie<sup>4</sup>, J. Marmain<sup>1</sup>, P. Marsaleix<sup>3</sup>, C. Perruche<sup>5</sup>, A. Petrenko<sup>1</sup>, G. Reffray<sup>5</sup>, M. Sourisseau<sup>7</sup>, V. Taillandier<sup>2</sup>, I. Taupier-Letage<sup>1</sup>, P. Testor<sup>8</sup>, B. Thouvenin<sup>9</sup>, C. Ulse<sup>3</sup> and G. Eldin<sup>10</sup>

<sup>1</sup>*Aix-Marseille Université, Université de Toulon, CNRS, IRD, Mediterranean Institute of Oceanography (M.I.O.), Marseille, France*

<sup>2</sup>*Université Pierre et Marie Curie, UMR 7093 CNRS, Laboratoire d'Océanographie de Villefranche-sur-mer, France*

<sup>3</sup>*Laboratoire d'Aérodologie, UMR 5560 CNRS, Université Paul Sabatier, Observatoire Midi-Pyrénées, Toulouse, France*

<sup>4</sup>*Laboratoire d'Océanographie Physique et Spatiale, UMR 6523 CNRS, IFREMER, IRD, Université de Bretagne Occidentale, Brest, France.*

<sup>5</sup>*MERCATOR Ocean, Ramonville St Agne, France*

<sup>6</sup>*Service Hydrographique et Océanographique de la Marine, Brest, France*

<sup>7</sup>*Laboratoire d'Ecologie Pélagique, IFREMER, Brest, France*

<sup>8</sup>*Laboratoire d'Océanographie et du Climat, Expérimentations et Approches Numériques, UMR 7159 CNRS, IRD, MNHM, Université Pierre et Marie Curie, Paris, France*

<sup>9</sup>*Laboratoire de Physique Hydrodynamique et Sédimentaire, IFREMER, Brest, France*

<sup>10</sup>*Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales, UMR 5566 CNRS, IRD, CNES, Université Paul Sabatier, Observatoire Midi-Pyrénées, Toulouse, France*

## **1 Contexte scientifique**

Les applications de l'Océanographie Côtière Opérationnelle, et notamment de l'élaboration et de la fourniture de champs et de prévisions de variables marines, sont nombreuses et connues (e.g. Nicholls and Small, 2002; Liqueste et al., 2013). Citons de manière non exhaustive les applications autour de la sécurité en mer, de la navigation, de la gestion des stocks de pêche, de la gestion des parcs marins, des énergies marines renouvelables, des risques liés à la protection environnementale et à la qualité des eaux pour la baignade et l'aquaculture, etc. Par ailleurs, la compréhension et les capacités d'analyse et de prévision de l'océan côtier demandent une prise en compte de la complexité du milieu naturel, caractérisée par :

- Une influence forte des surfaces continentales (contrainte géométrique des bassins, apports continentaux...),
- La superposition et la combinaison d'un grand nombre de phénomènes physiques (marées, circulation forcée par le vent, ondes internes et inertielles, vagues ...),
- Une dynamique haute fréquence importante, en partie d'origine atmosphérique locale et distante, superposée à une variabilité saisonnière de basse fréquence,
- Des processus de petite échelle (fronts de marée et de panache, filaments, marée interne, ondes solitaires, thermoclines extrêmement pincées, maximum de chlorophylle profond et étroit),

- Une forte hétérogénéité des écosystèmes et du substrat (sédiments et habitats benthiques, nature « patchy » des distributions de plancton et de poissons).

L'offre actuelle nationale provenant des services opérationnels répond partiellement aux attentes de la société pour la sécurité des biens et des personnes mais doit être encore améliorée pour être à la hauteur des enjeux associés aux usages croissants des mers côtières, ou au renforcement du cadre réglementaire (eaux de baignade, directive cadre sur le milieu marin...). A la différence du hauturier, la complexité et l'interdépendance des phénomènes côtiers demandent une approche interdisciplinaire qui dépasse les compétences propres des opérateurs actuels. A moyen terme, le développement d'approches côtières multidisciplinaires et relocalisables sera nécessaire pour répondre aux demandes très variées des utilisateurs de l'Océanographie Côtière Opérationnelle.

La modélisation numérique des écosystèmes planctoniques pélagiques est un vaste domaine de recherche qui a vu son essor prendre avec un nombre de tentatives de modélisation et de modèles grandissant de manière exponentielle entre les années 1980 et 2004 (passant par exemple de moins de 100 à 350 articles par an dans *Ecological Modelling*, (Jorgensen, 2005)). Ces modèles présentent une grande variabilité dans leur structure, du plus simple simulant la croissance du phytoplancton en fonction d'un nutriment, de la lumière ou de la température aux plus complexes visant à décrire le fonctionnement détaillé de plusieurs classes de tailles ou groupes fonctionnels des compartiments du réseau trophique en tenant compte de l'environnement hydrodynamique hauturier ou côtier (Friedrich et al., 2006).

Pour mener à bien la surveillance des zones côtières, il est crucial de mettre en œuvre un système de downscaling avec des modèles physiques et biogéochimiques couplés de grande échelle (globale), puis de mettre en place des configurations régionales et ensuite des zooms pour les zones clés à étudier. En complément de la modélisation, il s'agit d'utiliser la couverture spatiale synoptique de l'imagerie satellite et de compléter les données avec un système d'observation permettant d'être proche de la vérité terrain. Il est important en effet d'alimenter le système de modélisation en données, surtout dans la perspective d'un système d'océanographie opérationnelle de type OSS.

## **1.1 Objectifs scientifiques**

Le Projet proposé est orienté vers le développement d'une approche intégrée du continuum côte-large afin d'améliorer la capacité des différents types de modèles à communiquer entre eux, en particulier pour améliorer la représentation de la continuité d'échelles et de processus entre l'océan hauturier et l'océan côtier.

AMICO-BIO concerne l'amélioration du couplage physique-biogéochimique dans les systèmes de modélisation régionaux. Les questions de recherche dans cette thématique sont très nombreuses. Pour commencer, nous avons défini une question de recherche prioritaire à adresser dans les 2 années du projet. En effet, force est de constater que les systèmes opérationnels *Copernicus* de modélisation couplée physique-biogéochimique existent en hauturier opérés par Mercator Ocean (pour le Global) ou par OGS (pour la Méditerranée), et en régional opérés par Ifremer, le SHOM, ou des équipes Recherche, mais qu'ils ne sont pas connectés entre eux. La difficulté réside dans le fait

que forcer les conditions biogéochimiques aux frontières ouvertes par une source externe (ayant un autre comportement que le modèle biogéochimique utilisé pour l'étude) donne de piètres résultats. A tel point que pour contourner ce problème, les équipes Recherche travaillant sur l'océan côtier utilisent actuellement un mode de forçage plutôt interne avec des gradients nuls, ou bien en déployant leur modèle biogéochimique sur la grille hauturière pour ne pas avoir à résoudre le problème de forçage par une source externe, au prix du doublement du travail. Une avancée notable attendue de cette étude associant les équipes d'océanographie opérationnelle et recherche, est la possibilité de forcer les modèles régionaux à partir des simulations hauturières déjà effectuées pour *Copernicus*. Les équipes opérationnelles de Mercator Ocean, Ifremer et du SHOM étant partie prenante de ce projet et en collaboration avec l'équipe de l'OGS, les résultats obtenus sont directement transférés aux modèles opérationnels.

L'objectif principal est l'amélioration de la gestion des frontières ouvertes (Open Boundary Conditions: OBCs) biogéochimiques dans les modèles physiques et biogéochimiques couplés régionaux. Il s'agit de comprendre comment gérer les forçages biogéochimiques imposés aux frontières ouvertes (OBCs) des modèles régionaux quand ils proviennent d'une source externe au modèle forcé (modèle plus grande échelle, climatologie, mesures *in situ*/spatiales), pour obtenir une meilleure description des processus aux interfaces, notamment les échanges côte-large au niveau du talus, entre la plaine abyssale et le plateau continental. Un protocole de recommandations a été produit en synthèse du projet. Ceci permettra de faciliter la connexion entre les modèles biogéochimiques couplés utilisés dans le *Copernicus Marine Environment and Monitoring Service* (CMEMS), avec les modèles du futur *Copernicus* côtier national.

## **1.2 Questionnement scientifique**

Ce travail peut se décliner en deux séries de questions principales, pour reproduire au mieux les processus d'échange côte-large ciblés ci-dessus:

(1) Résolution spatiale et temporelle du forçage des OBCs biogéochimiques :

Faut-il la même consistance spatiale et temporelle dans les OBCs biogéochimiques que celle nécessaire pour la physique? Vaut-il mieux avoir des conditions OBCs dynamiques (variables dans le temps) issues d'un modèle ou bien des mesures à basse résolution spatiale et/ou temporelle plus représentatives?

(2) Sensibilité des différents compartiments du modèle biogéochimique aux forçages biogéochimiques des OBCs :

Faut-il forcer toutes les variables biogéochimiques de la même manière (gradients nuls pour certaines variables, climatologie pour d'autres) pour reproduire au mieux les processus attendus à la frontière? Peut-on forcer les OBCs bio à partir de n'importe quel autre modèle bio?

D'autres questions sont effleurées dans le projet car les modèles biogéochimiques utilisés ont des complexités différentes, mais ne pourront pas être traitées de manière exhaustive, faute de temps :

Quelle est l'influence de la complexité du modèle biogéochimique forçant par rapport au modèle à forcer? Si le modèle forçant est plus simple du point de vue de sa structure (moins de variables) que le modèle à forcer, l'utilisation de coefficients de conversion, d'agrégation ou de désagrégation de variables est-elle une solution acceptable ou bien doit-on nécessairement utiliser un modèle au moins aussi complexe?

Pour répondre à ces questions, il s'est agi de comparer pour un même modèle régional couplé, sa capacité à reproduire le comportement biogéochimique lié aux processus côte-large étudiés près de la frontière ouverte et à l'intérieur du domaine, en utilisant différents types d'OBCs (gradient nul, climatologie, modèle hauteurier (OGCM), profil vertical mesuré, mesures satellites de surface...), mais en conservant par ailleurs tous les autres forçages identiques (même forçage atmosphérique, radiatif, hydrodynamique et terrigène).

Afin de comprendre, l'impact des OBCs biogéochimiques sur le comportement des modèles régionaux, nous nous sommes intéressés plus particulièrement à la distance à laquelle sont placées les OBCs, à l'impact des différents types d'OBCs avec des conditions de type Neumann (gradient nul), et des conditions de Dirichlet (des climatologies basées sur des données et/ou des résultats de modèle à basse résolution spatiale et temporelle (climatologie pluriannuelle, climatologie avec une année « type »), simulations à haute résolution temporelle avec le même modèle (avec la même résolution spatiale, avec une plus basse résolution spatiale), simulations avec le modèle *Copernicus* de plus basses résolutions spatiale et temporelle (avec ou sans assimilation de données).

## 2 Méthodologie

### 2.1 Modèles utilisés

Ces travaux sont déclinés sur les 2 façades (Atlantique et Méditerranée), entre l'échelle hauturière et régionale. Ce sont sur les modèles de niveau régional que l'on a testé l'effet du forçage par différents types d'OBCs cités ci-dessus. Les modèles disponibles pour ces tests sur les 2 façades sont listés ci-dessous. Les simulations sont réalistes afin de pouvoir les comparer aux données, et sont opérées pour une période de simulation commune sur chaque façade avec les différents modèles. Les configurations impaires (R1 et R3) présentent des OBCs situées loin du domaine d'étude, alors que les configurations paires (R2 et R4) ont des OBCs proches du domaine d'étude (Figure 1 et Figure 2).

*Façade Atlantique: Année 2011 à mi-2012*

Configuration globale Copernicus:

BIOMER: Mercator-Vert (1/4°) (Gehlen et al., 2007)

Configurations régionales:

R1: IBI12-PISCES (1/12°) (Dol, 2011)

R2: MANGA-ECOMARS3D (4 km) (Huret et al., 2013 ; Ménesguen et al., 2007 ; Ménesguen & Dussauze, 2011)

*Façade Méditerranéenne: Année 2011 à mi-2012*

Configuration globale Copernicus:

BFM: MED16-BFM (1/16°) (Lazzari et al., 2012)

Configurations régionales:

R3: Symphonie-ECO3M (1 km) (Auger et al., 2011)

R4: GULI-ECO3M (2007-2012) (1.2 km). (Pinazo et al., 2012; Fraysse et al., 2013 ; 2014)

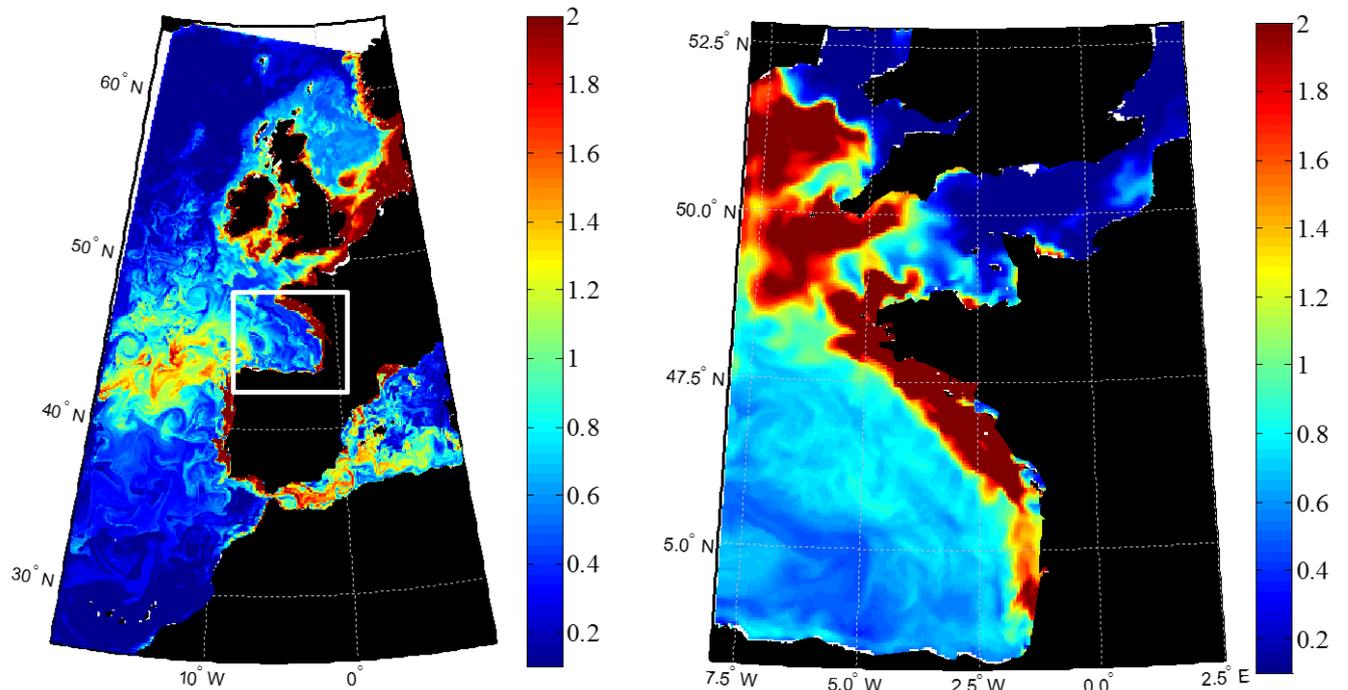
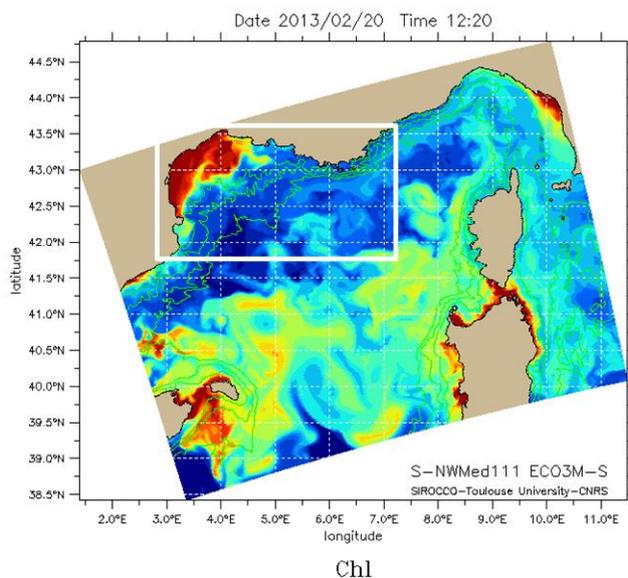
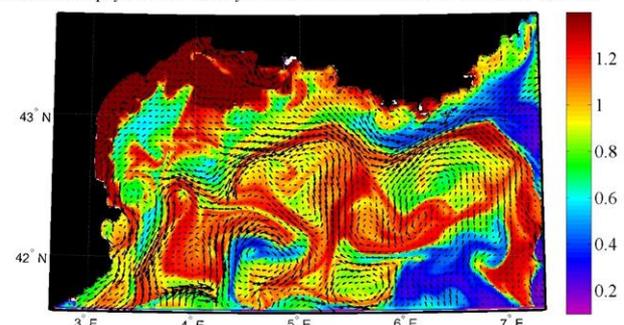


Figure 1 : Configurations régionales en Atlantique R1 à gauche et R2 à droite, le domaine d'étude est le Golfe de Gascogne encadré en blanc à gauche.



Surface chlorophyll-a with velocity vectors from run 311d for 23-Mar-2011 12:00:00



OC5 chlorophyll-a concentration [ $\text{mg m}^{-3}$ ] - MODIS - 23/03/11 12:00

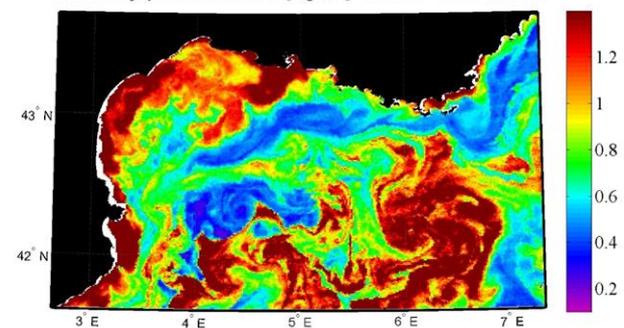


Figure 2 : Configurations régionales en Méditerranée R3 à gauche et R4 à droite, le domaine d'étude est le Golfe du Lion encadré en blanc à gauche.

## 2.2 Simulations effectuées

Tableau 1 : Simulations effectuées avec les 4 configurations régionales au cours du Projet

Modèle Régional	Neumann	Dirichlet			
		Même modèle	Climato pluriannuelle	Climato annuelle « type »	Autre modèle
Atlantique					
R1 IBI 1/12°	Gradient nul	Basse Résolution BIOMER (semaine ; ¼°)	Climato LEVITUS + gradient nul pour les variables manquantes (mois ; 1°)		
R2 4 km (2 options)	Gradient nul	(pas présentée)	Moyennes mensuelles	Même modèle bio (mois ; 4km)	BIOMER (semaine ; ¼°)
Méditerranée					
R3	Gradient nul	Basse Résolution (jour ; 1/12°)			
R4	Gradient nul	Même Résolution (6h ; 1.2 km)	Année « type » BFM 2011 appliquée de 2010 à 2012 (jour ; 1/16°)	BFM bornage en DIN Assim° Chl (jour ; 1/16°)	BFM_sb sans bornage Assim° Chl (jour ; 1/16°)

## 2.3 Métriques utilisées pour les comparaisons modèle-modèle

Tableau 2: Métriques utilisées pour les comparaisons modèle-modèle

MODEL-MODEL	
ATLANTIC	MED
<b>Vertical Sections:</b> 1) Along 44°N 2) The Loire and Gironde transects	<b>Vertical sections:</b> 1) Along 6.17°E (ANTARES) using: Chl, NO3, PO4, NH4 2) Along 4.62°E (Lion) 3) Along the Nice-Calvi trajectory (for R3)
<b>Vertical Points:</b> ASPEX (3, 6 & 10) moorings + 5 Spanish moorings: time series analyses (daily + weekly) Perhaps also ASPEX 11 & 12 which sit also on the 44°N latitude (see above)	<b>Vertical points:</b> ANTARES, SOMLIT stations: SOLA and SOLEMIO, Point B (Villefranche)
<b>Hovmöller:</b> Along boundaries: Hovmöller diagrams at boundaries to look at seasonal variability of OBC forcing, also look at budgets and bias. Along isobaths: along the 450/300m isobaths in ATL/MED.	
<b>Spatial averages:</b> bias (Figure 3 et Figure 5), RMSD, Correlation (-> Taylor diagrams). Use distance to boundary as a measure.	

### 3 Déroulement du Projet

Le projet a démarré avec le Recrutement du Post-Doctorant Oliver Ross soutenu par le projet AMICO-INSU-MEDDE. La Première réunion d'AMICO-BIO a compté plus de vingt participants: G. Charria, F. Diaz, A. Doglioli, G. Eldin, P. Forget, P. Garreau, M. Hermann, F. Kessouri, B. Le Vu, P. Marsaleix, I. Pairaud, C. Peruche, A. Petrenko, C. Pinazo, G. Reffray, O. Ross, M. Sourisseau, V. Taillandier, P. Testor, B. Thouvenin, C. Ulses, B. Zakardjian ainsi que des discussions le lendemain avec M. Baklouti, J.C. Dutay et C. Estournel.

Un site web dédié à AMICO-BIO a été construit, sur lequel se trouvent de nombreuses informations concernant le projet, les participants au projet et les modèles utilisés:

<http://oliver.ross.p.luminy.univ-amu.fr/amico/index.html>

Durant cette réunion, les choix de simulations réalistes globales et régionales à produire en livrables ont été effectués. Les métriques modèle-modèle et modèle-données ainsi que les données à utiliser pour la qualification des simulations ont été définies par l'ensemble des participants.

Les spécifications techniques des modèles ont également été étudiées afin d'envisager les aspects techniques à résoudre afin de forcer les simulations régionales par les résultats des simulations globales. Les aspects techniques de gestion des OBCs dans les différents modèles et également la méthodologie pour appliquer les gradients nuls ont été passés en revue. Les protocoles d'échanges et de mise à disposition des résultats des simulations ont été établis avec les différentes équipes. L'harmonisation des noms et la compatibilité des variables biogéochimiques des modèles variés utilisés ont été envisagés, mais pas retenues à l'échelle de ce court projet.

Les métriques et les variables de comparaisons modèle-données définies pour les façades Atlantique et Méditerranéenne se trouvent en Annexe de ce document. Toutes les données de glider, profileurs et images de Couleur de l'eau ainsi que certaines données de mouillages nécessaires à ces métriques ont été récupérées. Les métriques modèle-données in situ (glider, flotteur) sont très prometteuses et les scripts développés seront très utiles pour qualifier les simulations de l'océanographie opérationnelle régionale (par exemple dans les projets : MEDDE-INSU AMICO-Next, Tenders Service Evolution MASSIMILI).

Les équipes impliquées pour les configurations régionales (d'étude) ont fourni les résultats physiques et biogéochimiques de plusieurs simulations réalistes (avec OBCs interne/externe) obtenus avec leur configuration pour l'année choisie (Mercator, Ifremer, LA, MIO) (

Tableau 1). Les équipes impliquées pour les configurations CMEMS (de forçage) ont fourni un jeu de résultats physiques et biogéochimiques de simulations réalistes pour l'année choisie obtenus avec leur configuration hauturière (Mercator, OGS).

La qualification des simulations régionales à partir de métriques définies modèle-modèle et modèle-mesures a été effectuée par le post doctorant en collaboration avec Mercator, Ifremer, LA, M.I.O (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.** et ANNEXE 1 Tableau 2). Les résultats des tests de comparaison du forçage interne/externe des OBCs biogéochimiques ont été analysés sur les configurations régionales en évaluant, grâce à des indicateurs statistiques et les métriques préalablement définies et communes sur chaque façade, l'importance du forçage utilisé aux OBCs.

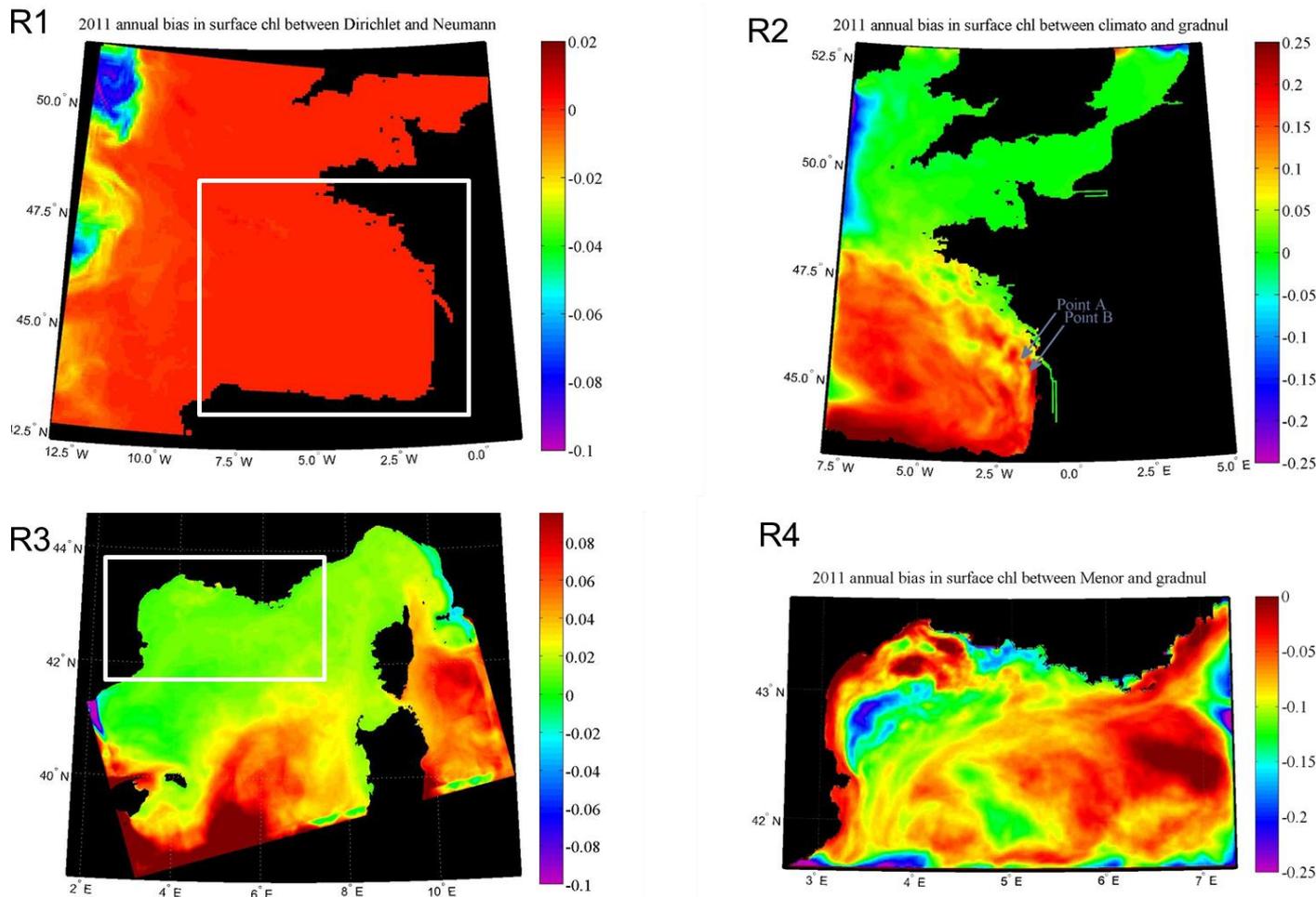
Grâce à l'analyse de ces résultats, un protocole de forçage des OBCs biogéochimiques dans les modèles régionaux est proposé à la fin de ce document.

## 4 Résultats

Pour répondre aux questions posées nous avons utilisé principalement les métriques modèle-modèle et modèle-données satellites suffisamment fines.

### 4.1 Distance d'influence des OBCs

Grâce à nos résultats, nous avons confirmé l'hypothèse que plus l'OBC est située loin du domaine d'intérêt plus l'influence est faible (cas des configurations R1 et R3), et ce quel que soit le type d'OBC testée (Neumann ou Dirichlet) (Figure 3).



**Figure 3 :** Biais moyen annuel de chlorophylle de surface pour l'année 2011 pour les 4 configurations régionales entre la simulation à gradient nul et une simulation Dirichlet.

Par exemple pour la configuration R3, nous avons noté qu'il n'y a pas d'influence au-delà de 100 km de distance des OBCs pour une simulation de 2 ans, et pour la configuration R1, il n'y a pas d'influence du Golfe de Gascogne pour une simulation de 1,5 an (Figure 4).

L'évolution de la distance d'influence selon le temps de simulation est démontrée mais reste à préciser pour chaque configuration. Des tests avec des traceurs passifs ou en calculant l'âge des masses d'eau effectués au cours du projet avec les configurations R2 et R4 (non présentés ici),

permettent d'estimer les zones d'influence des OBCs en fonction des configurations et du temps de simulation. Ce genre de test pourrait constituer un préalable au choix de la position des OBCs dans les configurations régionales.

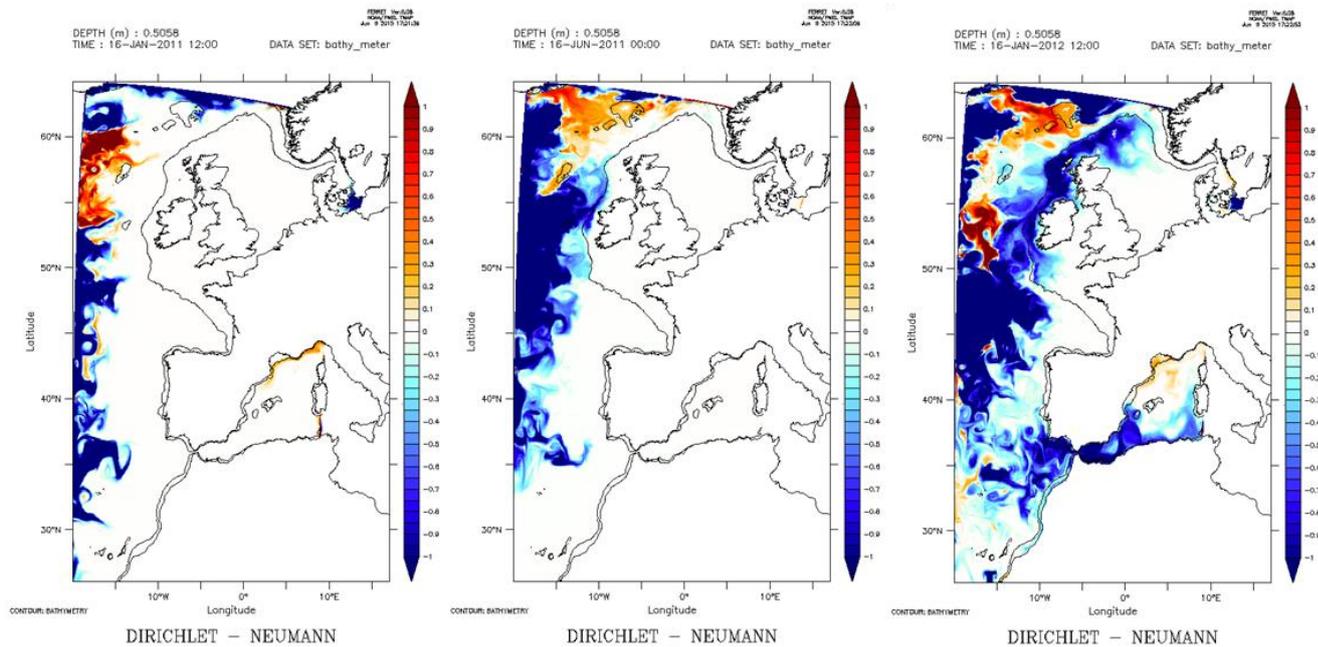
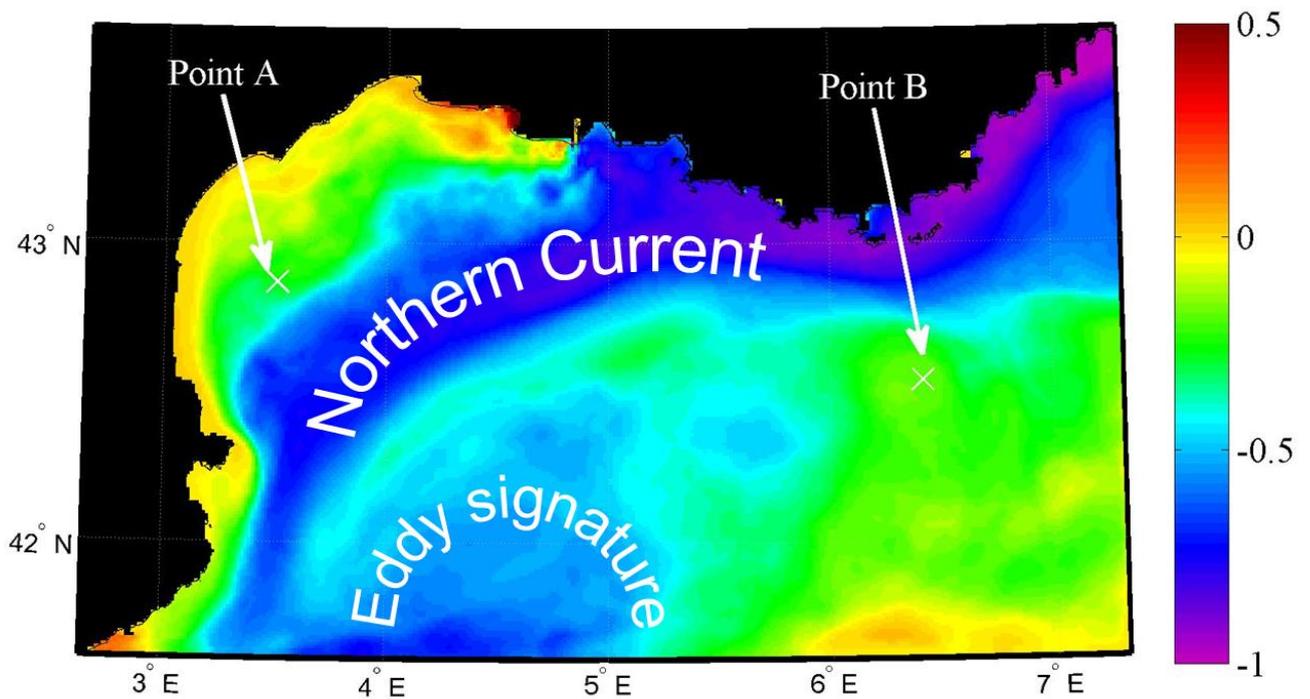


Figure 4 : Différence de concentration de nitrate de surface entre la simulation à OBCs de type Dirichlet (Climatologie) et de Neumann (gradient nul) pour la configuration R1 en janvier, juin 2011 et janvier 2012.

2011 annual bias in surface  $\text{NO}_3$  between BFM and gradnul



**Figure 5 : Biais moyen annuel de nitrate de surface pour l'année 2011 pour la configuration R4 entre la simulation à gradient nul et la simulation Dirichlet BFM bornée en DIN.**

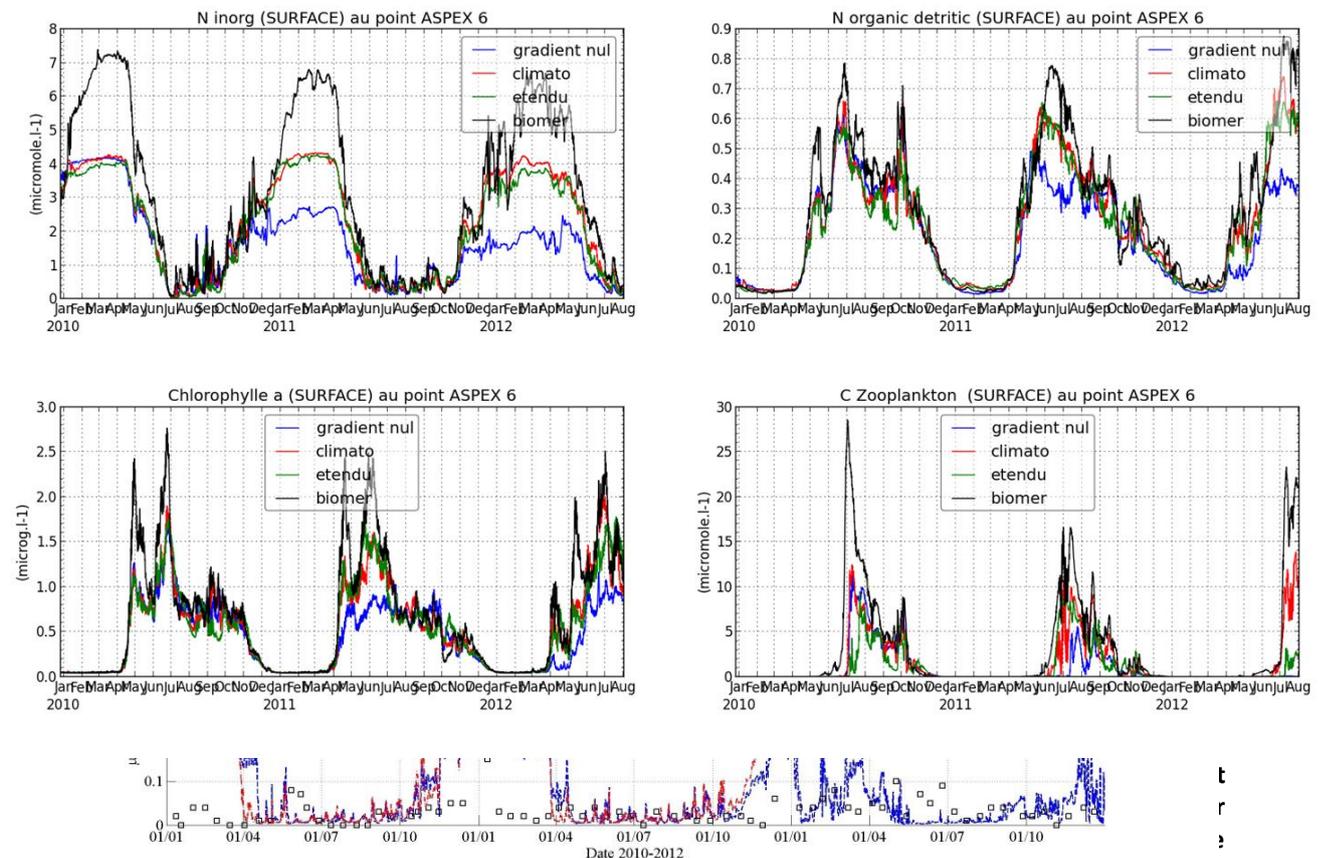
De plus, d'après nos résultats, il semble également qu'il y ait une dépendance de cette distance en fonction de la zone étudiée et de ses particularités (ex: circulation locale (courants forts, zones abritées par la bathymétrie). Le golfe de Gascogne semble abrité par la bathymétrie dans la configuration R1 et moins affectée par les OBCs (Figure 4). Les zones très dynamiques comme celles de la configuration R4, montrent une influence des OBCs très liées à l'hydrodynamisme (zone du Courant Nord, zone de tourbillons) (Figure 5).

Dans un contexte d'applications opérationnelles, les simulations sont généralement de deux grands types. Dans le cas de prévisions, les simulations sont courtes et réinitialisées (souvent avec assimilation de données), dans ce cas l'influence des OBCs sera alors d'autant plus réduite.

Dans le cas de ré-analyses, les simulations sont longues (run long terme) et parfois sans assimilation de données, dans ce cas l'impact des OBCs sera sans doute plus fort et reste à préciser selon le rapport « distance de l'OBC / temps de simulation » vu précédemment.

## 4.2 Condition de Neumann : gradient nul

Avec l'utilisation d'un gradient nul à la frontière et si la frontière est placée dans une zone pauvre (en particulier en nutriments), comme par exemple sur la plaine abyssale pour la configuration R2, les nutriments vont diminuer d'une année sur l'autre et provoquer une sous-estimation de l'ensemble des variables (Figure 6).



En revanche, si la frontière est placée dans une zone riche grâce au mélange hivernal faisant remonter les nutriments jusqu'en surface comme par exemple pour la configuration R4, alors les nutriments vont augmenter d'une année sur l'autre et provoquer une surestimation de l'ensemble des variables (Figure 7). Ce type d'OBC amplifie avec le temps les erreurs de sur(sous)-estimation des variables biogéochimiques. Ce type d'OBC n'est pas donc recommandé, et d'une manière générale cette recommandation concerne toutes les conditions basées sur le gradient de la variable.

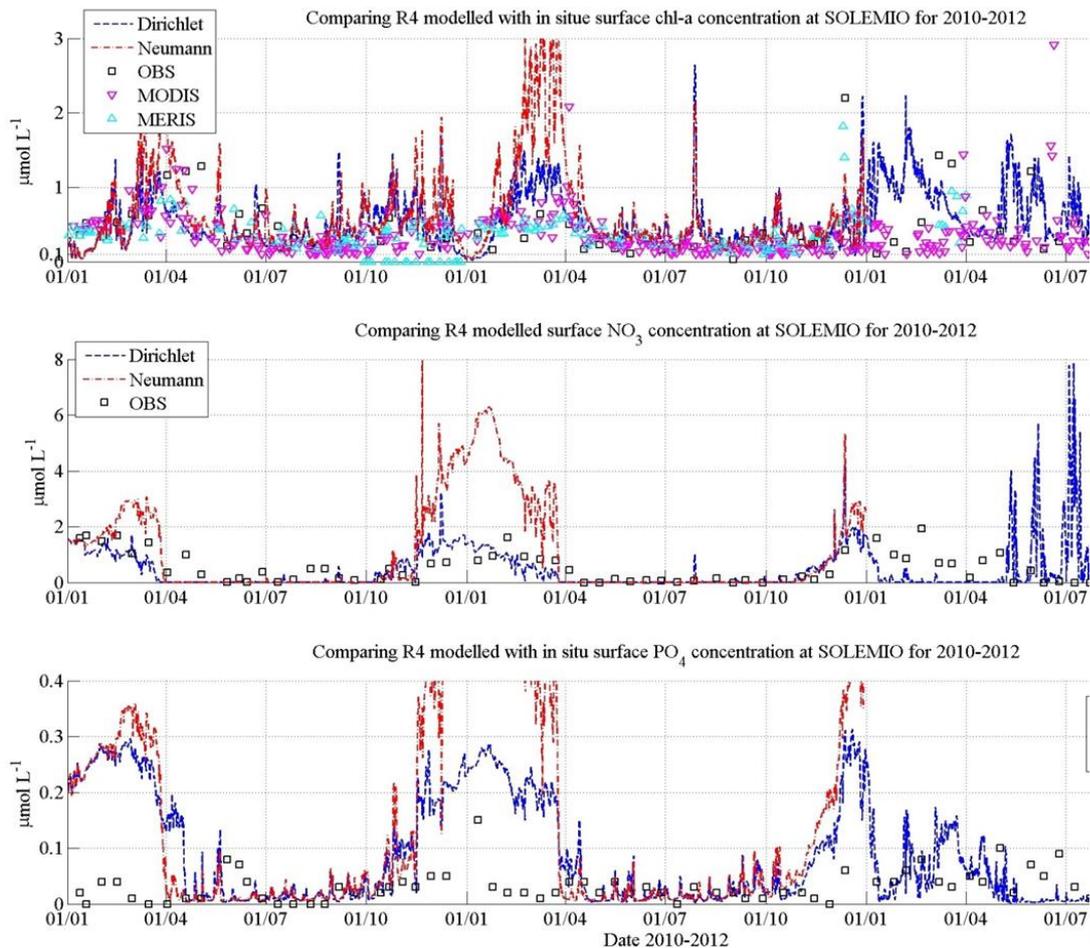
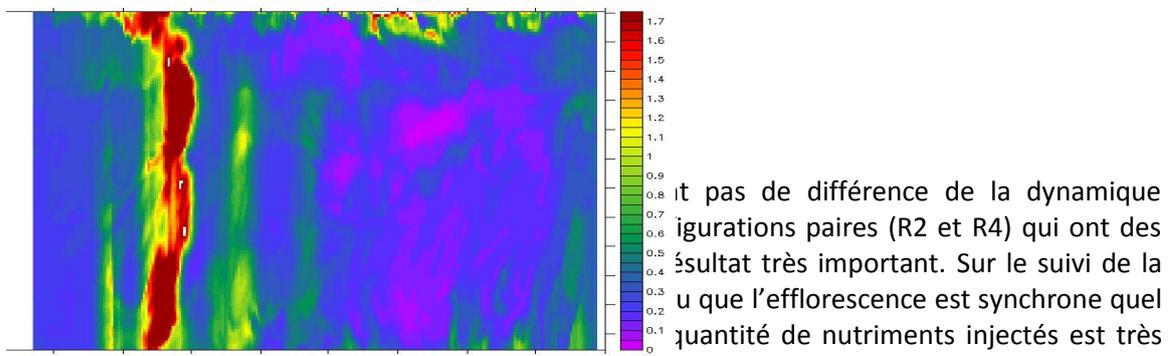


Figure 7 : Résultats de simulations (Dirichlet avec BFM borné, et Neumann en gradient nul) avec la configuration R4 pour la période 2010-2012 en surface au point SOLEMIO du réseau SOMLIT pour la Chlorophylle  $a$ , les nitrates et les phosphates.

### 4.3 Dynamique intrinsèque du modèle Régional

Nous nous sommes particulièrement intéressés à l'effet des différents types d'OBCs biogéochimiques sur la dynamique de l'écosystème régional. En effet, nous nous demandons si par exemple une dynamique saisonnière non synchronisée (e.g. un décalage de l'efflorescence printanière) des variables biogéochimiques appliquées aux OBCs pouvait influencer la dynamique interne du modèle régional.

Après de nombreux tests effectués avec les quatre configurations où on retrouve les mêmes types de résultats, nous avons pu établir des conclusions relativement fiables. Les configurations impaires (R1



Il n'y a pas de différence de la dynamique des efflorescences algales (R2 et R4) qui ont des résultats très importants. Sur le suivi de la chlorophylle, on voit que l'efflorescence est synchronisée quel que soit la quantité de nutriments injectés est très

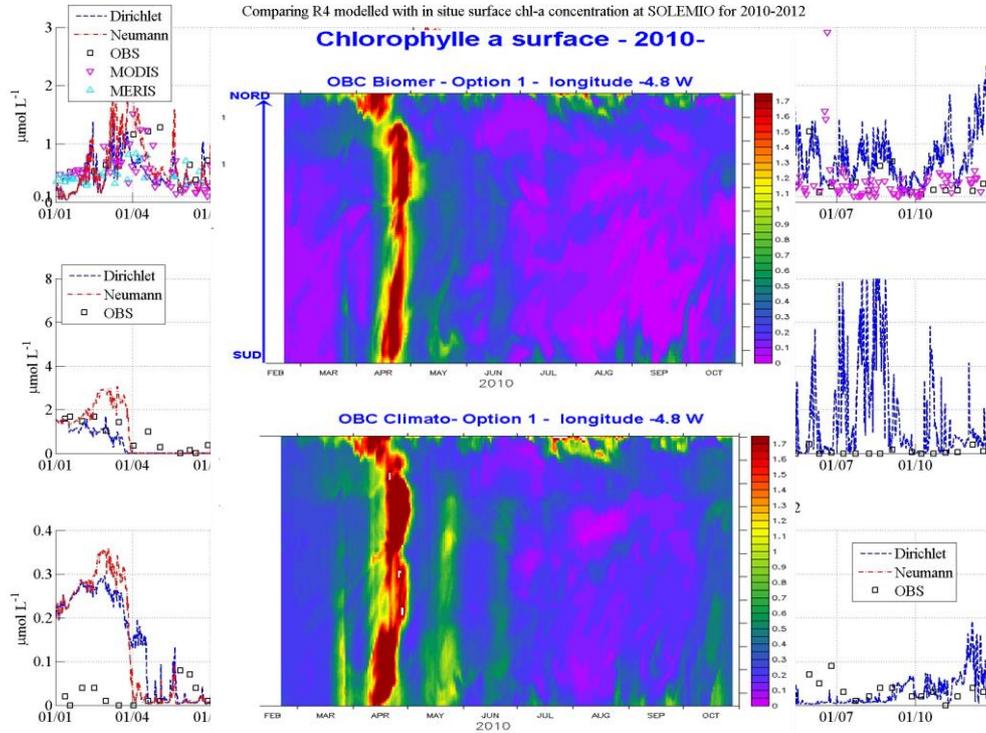


Figure 8 : Diagramme Hovmöller de la chlorophylle *a* de surface en 2010 à la longitude – 4.8 W pour la configuration R2 forcée aux OBCs par le modèle BIOMER Copernicus (en haut) et une climatologie « année type » (en bas).

Nous avons donc voulu vérifier que cette dynamique intrinsèque du modèle pouvait tenir compte de la variabilité interannuelle même si l'on impose aux frontières une « année type », reproduite à l'identique chaque année. Pour conforter les résultats, nous avons fait le test sur les deux configurations paires R2 et R4 qui sont en Atlantique et en Méditerranée avec des modèles biogéochimiques complètement différents. Nous avons vu que pour les deux configurations, les modèles régionaux sont capables de reproduire la variabilité

interannuelle même si ils sont forcés grâce à des climato « année type » identique (Figure 10 et

Figure 11).

Enfin, nous avons voulu vérifier que l'on retrouve cette dynamique intrinsèque propre aux modèles régionaux en utilisant des modèles biogéochimiques identiques, mais sur des configurations différentes en résolution ou en extension (Figure 12).

Nous voyons que si le même modèle biogéochimique est déployé à une plus basse résolution, cela facilite l'implémentation des OBCs car les variables sont strictement identiques, mais la plus grande résolution est nécessaire pour capturer des processus fins comme ceux de sub méso-échelle (Figure 12 à gauche).

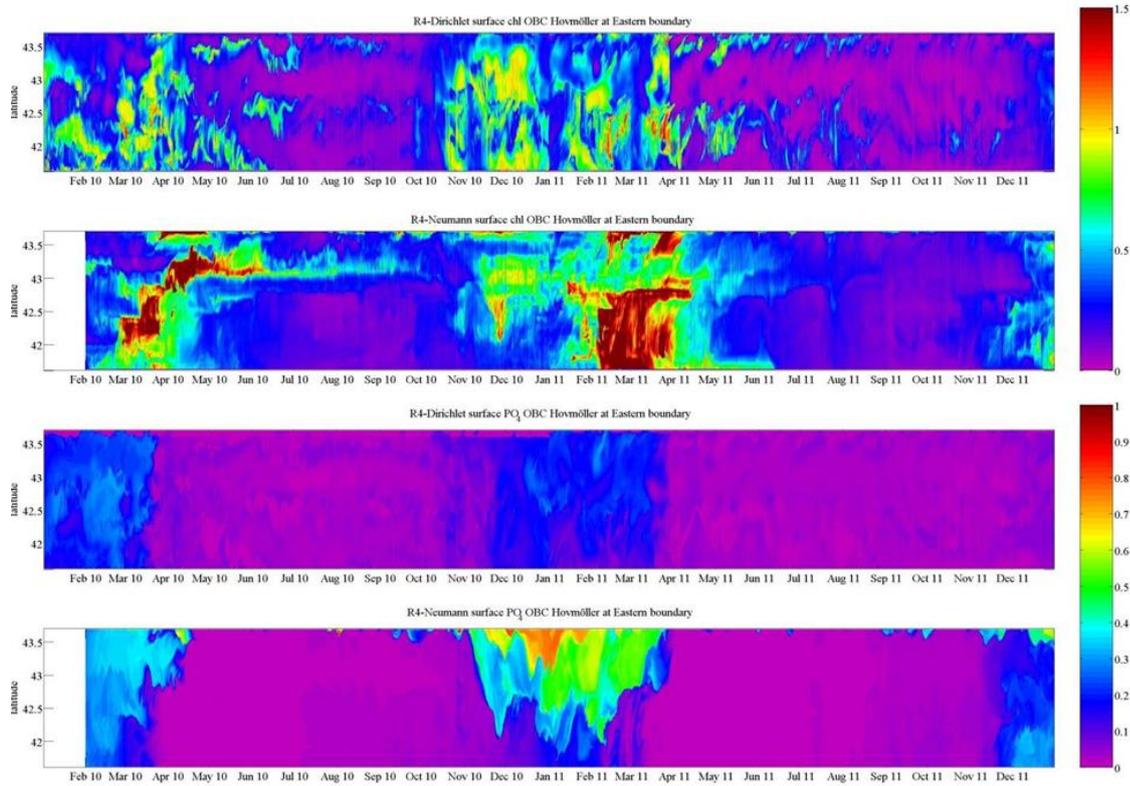


Figure 9 : Diagramme Hovmöller de la chlorophylle *a* et des phosphates de surface en 2010-2011 à la frontière Est (7.2 E) pour la configuration R4 forcée aux OBCs par le modèle BFM borné *Copernicus* (Dirichlet) et un gradient nul (Neumann).

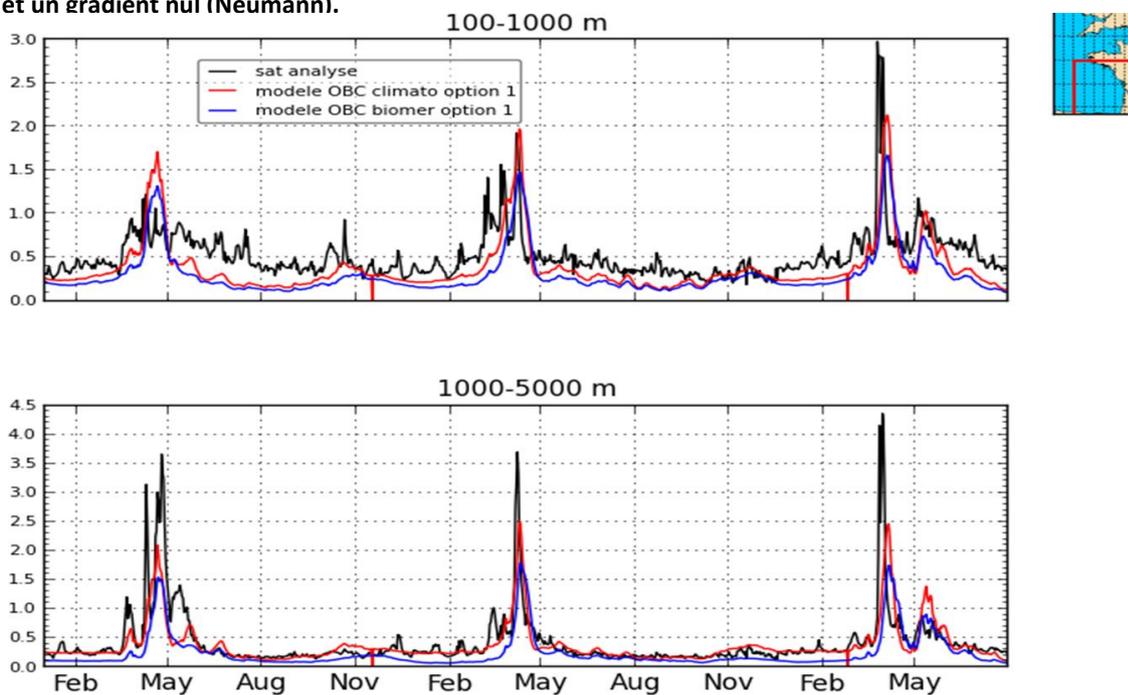
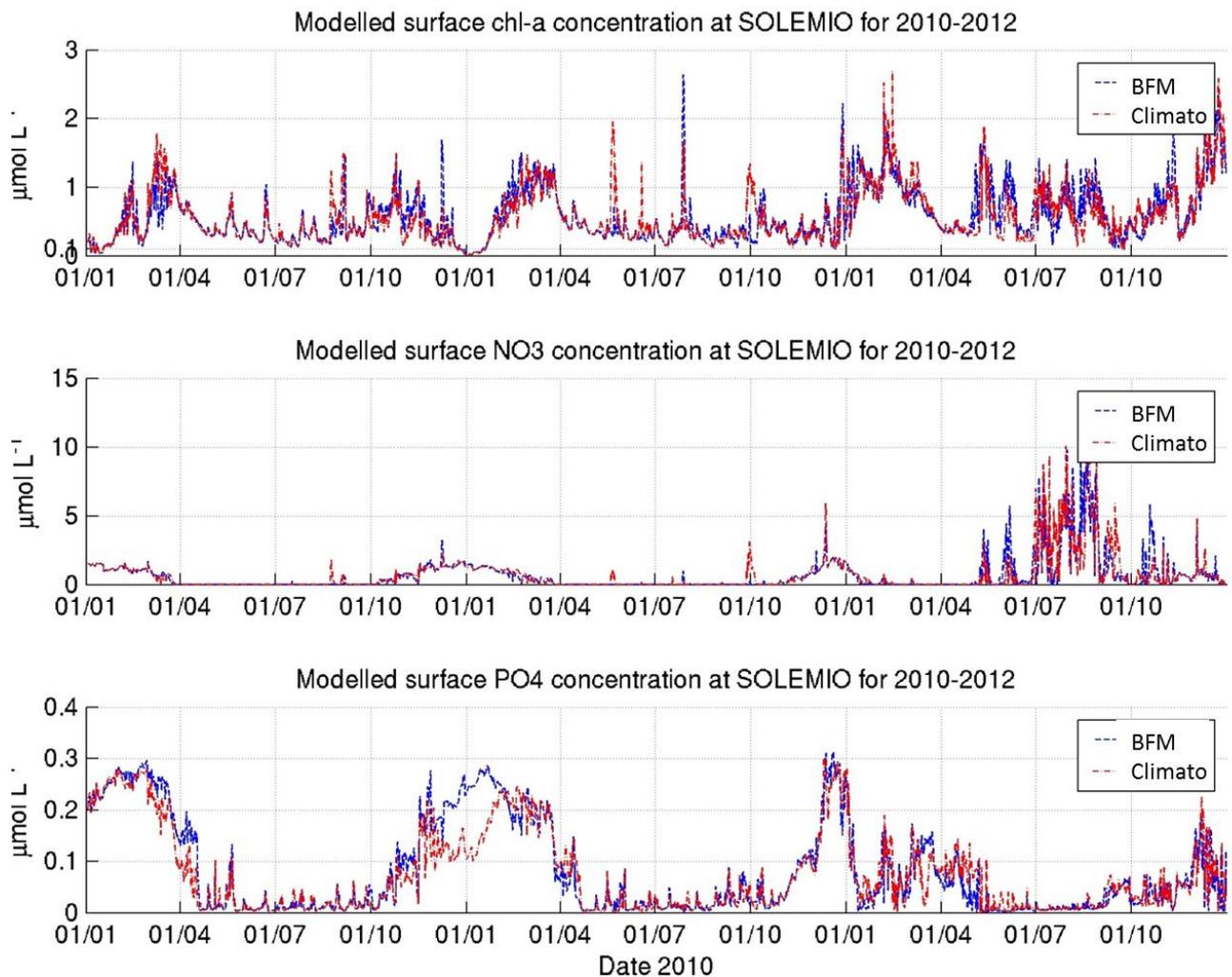


Figure 10 : Moyennes de chlorophylle *a* de surface pour la zone de bathymétrie 100-1000m (en haut) et 1000-5000 m (en bas) simulées par la configuration R2 dans le Golfe de Gascogne avec un forçage aux OBCs de BIOMER *Copernicus* et une climatologie avec une « année type »; comparaison avec la valeur satellite analysée par Prévimer sur les mêmes zones (en noir).

D'autre part, si nous forçons le modèle régional avec des OBCs du même modèle biogéochimique à la même résolution, nous pouvons voir que le modèle régional a sa dynamique propre, différente de celle du modèle étendu, car en forçant les OBCs seulement toutes les six heures en physique et en biogéochimie, on ne peut pas reproduire une dynamique « on-line » où l'advection-diffusion des variables biogéochimiques est calculée toutes les 50 s avec des variables physiques également recalculées toutes les 50 s (Figure 12 à droite).



**Figure 11 : Concentrations de chlorophylle  $a$ , de nitrate et de phosphate de surface à la station SOLEMIO du réseau SOMLIT, simulées par la configuration R4 avec un forçage aux OBCs de BFM borné *Copernicus* et une climatologie avec une « année type ».**

En conclusion, nous avons pu montrer que les variables biogéochimiques appliquées aux OBCs affectent la quantité de nutriments injectés dans le domaine régional et par conséquent la valeur maximum atteinte lors de l'efflorescence phytoplanctonique, mais pas la dynamique temporelle intrinsèque du modèle régional (qui dépend de la physique et des autres forçages), et ce quel que soit le type d'OBC utilisé, y compris avec la même « année type » imposée chaque année, qui n'empêche pas de produire une variabilité interannuelle du modèle régional. Les modèles *Copernicus*

du CMEMS peuvent donc avoir une dynamique et une quantité de nutriments différentes, mais cela ne change pas la dynamique intrinsèque du modèle régional.

Le même modèle biogéochimique à plus grande emprise permet d'implémenter de manière aisée les OBCs car ce sont exactement les mêmes variables biogéochimiques et peut donner les meilleurs résultats car les grands équilibres de l'écosystème sont proches, mais sous réserve que le modèle biogéochimique utilisé fonctionne bien à grande échelle.

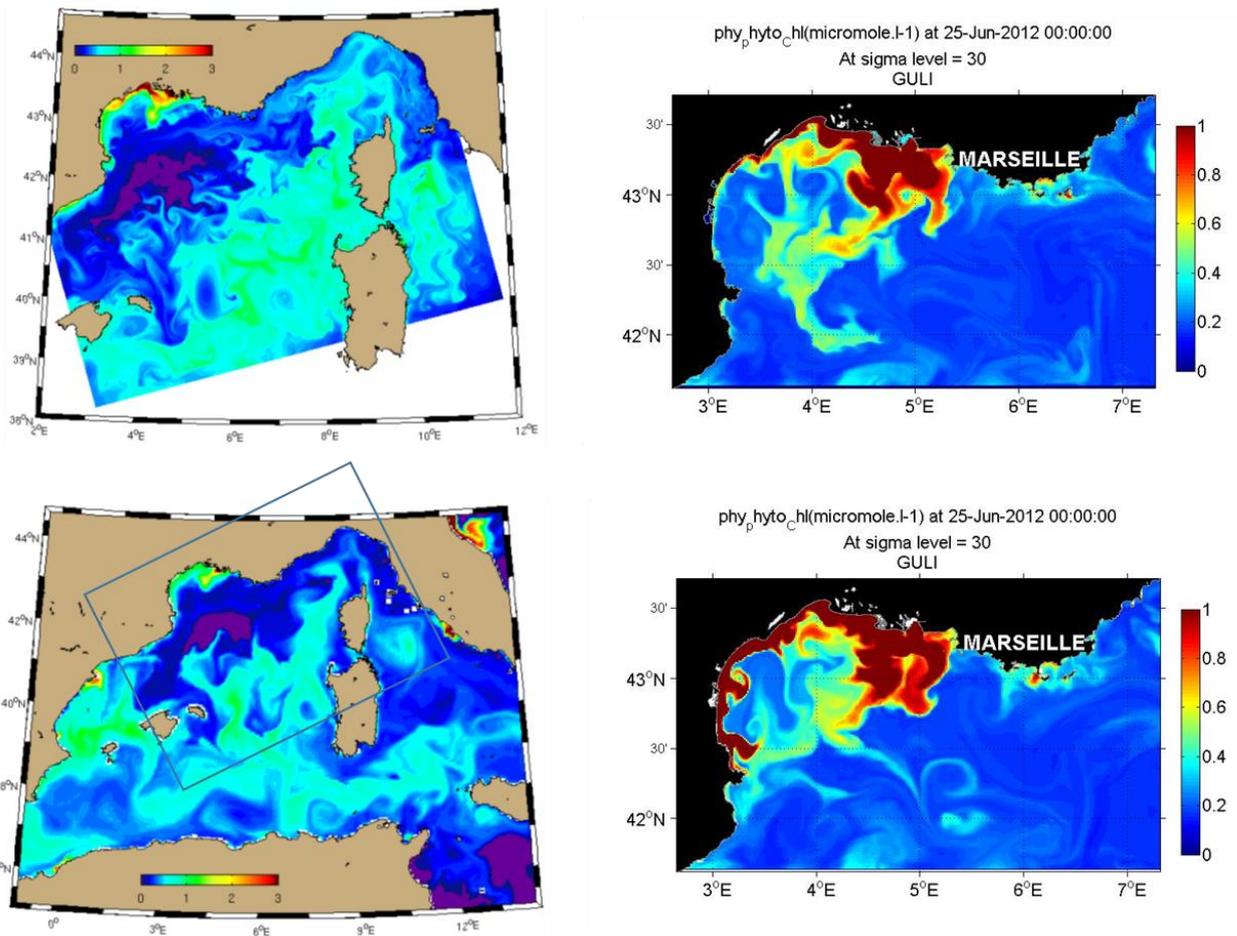
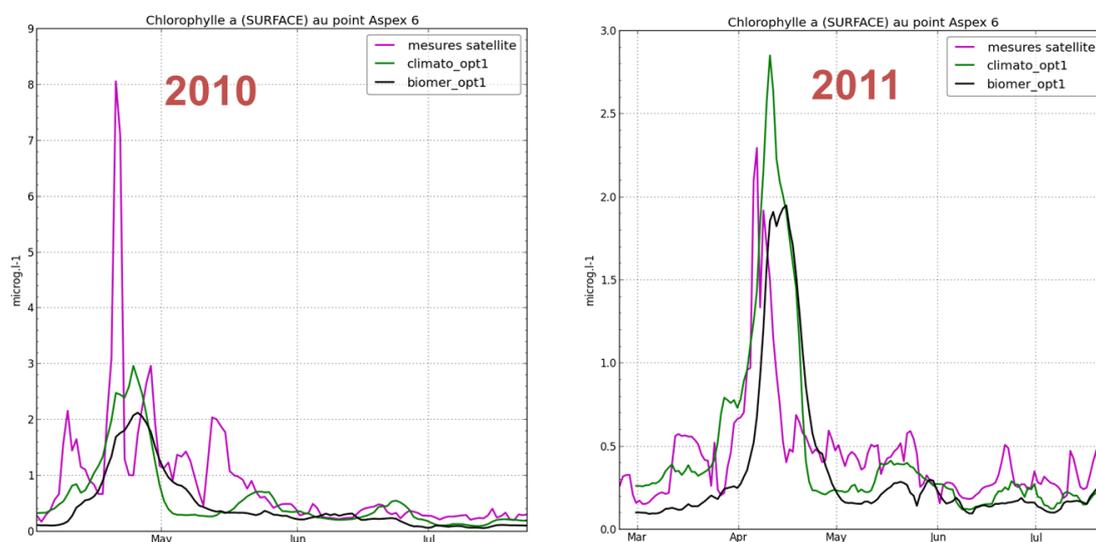


Figure 12 : Comparaison de chlorophylle a de surface à la même date, à gauche le 4 février 2011 pour la configuration R3 à 1 km (en haut) et le même modèle biogéochimique déployé à une résolution du 1/12° (en bas); à droite le 25 juin 2012 pour la configuration R4 à 1.2 km (en haut) et le même modèle biogéochimique déployé à la même résolution (1.2 km) mais sur un domaine étendu à l'Est avec une frontière à 9° E (en bas).

#### 4.4 Utilisation des modèles Copernicus

L'objectif principal de ce projet est de faciliter la connexion entre Océanographie Opérationnelle développée dans Copernicus et le CMEMS et la future Océanographie Opérationnelle Régionale développée par les états. Nous nous sommes donc particulièrement intéressés aux forçages aux OBCs des régions métropolitaines en Atlantique et en Méditerranée provenant des modèles BIOMER (global) et BFM (de bassin pour la Méditerranée) opérés respectivement par Mercator Océan et l'OGS pour Copernicus.

Nous avons vu que le forçage par BIOMER de la configuration R2 (option 1 modèle de PREVIMER), donne des résultats comparables à la climatologie habituellement utilisée. Avec les 2 types de forçages aux OBCs, le modèle reproduit la même dynamique temporelle pour le bloom assez proche de ce qui est observé par satellite (Figure 13).



**Figure 13 : Résultats de chlorophylle a de surface au mouillage Aspex 6 simulés par la configuration R2 dans le Golfe de Gascogne avec un forçage aux OBCs de BIOMER Copernicus et une climatologie avec une « année type »; comparaison avec la valeur satellite analysée par Prévimer au même point durant les blooms printaniers de 2010 et 2011.**

Nous avons vu que le forçage par BFM de la configuration R4 donne de bons résultats lorsque les quantités d'azote inorganique dissous ( $\text{NO}_3$  et  $\text{NH}_4$ ) sont bornées car elles sont trop importantes. Sans bornage, ces quantités sont surestimées de la même manière que si on utilise une condition de Neumann (gradient nul). En effet, ce modèle étant assimilé avec des données de couleur de l'eau uniquement pour corriger les quota cellulaires du phytoplancton, sans corriger les nutriments avec une méthode multivariée, il ne reproduit pas l'équilibre entre les nutriments azotés et la chlorophylle a du modèle régional R4 (Figure 14), ni du modèle forçant BFM d'ailleurs (Teruzzi et al., 2014).

A l'issue de nos nombreux tests (dont la plupart ne peut être présentée ici), nous pouvons dire que les modèles régionaux peuvent être forcés par les modèles hauturiers car les modèles régionaux semblent conserver leur dynamique temporelle propre. Ceci sous la réserve de faire des simulations courtes, d'avoir une concentration de nutriments réaliste et de vérifier la position des nutriclines que l'on impose aux OBCs, et enfin de veiller à la cohérence des variables biogéochimiques (vis-à-vis des équilibres fondamentaux de l'écosystème régional), notamment dans le cas d'assimilation de données de Couleur de l'eau pour la chlorophylle a (ou alors assimiler aussi le  $\text{NO}_3$  mesurés par les flotteurs Provbio par exemple).

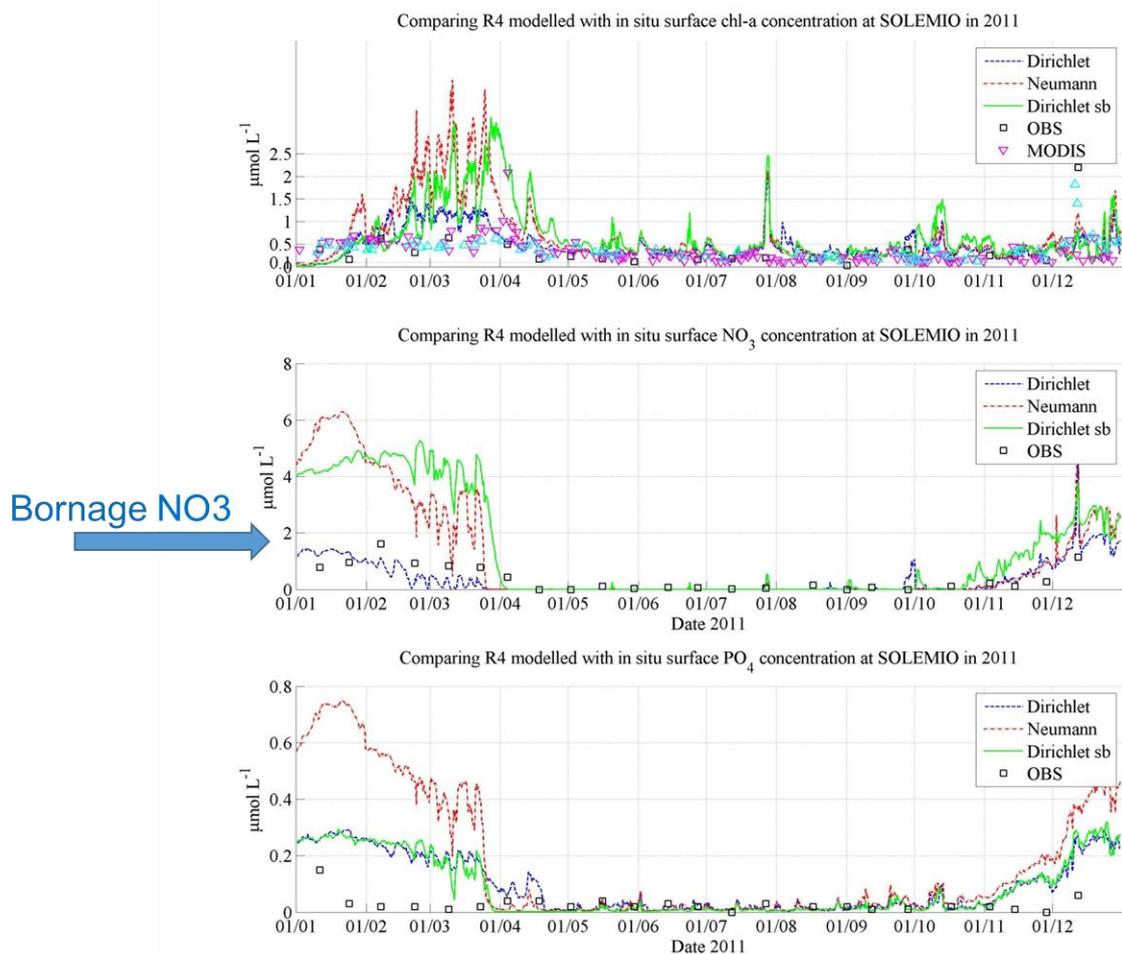


Figure 14 : Résultats de chlorophylle a, nitrate et phosphate de surface à la station SOLEMIO du réseau SOMLIT simulés par la configuration R4 avec un forçage aux OBCs de BFM *Copernicus* sans bornage (en vert), avec un bornage sur les DIN (en bleu) et avec un gradient nul (Neumann); comparaison avec les valeurs de chlorophylle satellite calculées avec l'algorithme OC5 à partir des capteurs MODIS et MERIS et les valeurs de chlorophylle *in situ* mesurées au même point durant l'année 2011.

## 5 Protocole de forçage des OBCs biogéochimiques

A partir de nos travaux et des divers tests effectués sur ces quatre configurations régionales, nous pouvons affirmer que les deux choix principaux que l'utilisateur devra faire concernant la gestion des OBCs concernent :

- La distance de l'OBC par rapport au domaine d'étude,
- Le type d'OBC utilisé.

### 5.1 La distance de l'OBC par rapport au domaine d'étude

Nous avons conclu de nos travaux que la détermination de la distance à laquelle placer l'OBC par rapport au domaine étudié dépend principalement de la longueur de la simulation, de l'hydrodynamisme de la zone étudiée ainsi que des moyens de calculs mis à disposition.

En effet, nous avons mis en évidence que la longueur de la simulation est déterminante, car l'influence des OBCs évolue clairement au cours du temps lors des tests effectués. Dans le cas de simulations de prévision, courtes avec réinitialisation de la simulation de manière régulière, cette distance peut être faible. Dans le cas de ré-analyses de longue durée, l'influence des OBCs sera sans doute importante, et une distance convenable devra être déterminée en fonction des deux critères suivants.

Le premier critère est le temps de renouvellement des eaux, car nous avons vu que l'influence des OBCs peut être très forte dans le cas de systèmes très dynamiques (forts courants, tourbillons, marée...). Nous préconisons de déterminer le temps de renouvellement des masses d'eaux (en surface et au fond) des zones sous influence des OBCs grâce par exemple à des simulations idéalisées avec traceurs passifs injectés aux frontières ouvertes, ou en calculant « l'âge des masses d'eau ». Il est également utile d'identifier les différentes sources de nutriments dans chaque zone en « marquant » les nutriments provenant des OBCs par rapport à ceux provenant des fleuves, ou d'autres sources. Cela permet en effet de se rendre compte à quel point les valeurs placées aux OBCs vont influencer la solution à l'intérieur du domaine étudié.

Le second critère qui ne peut être négligé, dans certaines circonstances, va être lié aux moyens de calcul disponibles et de la durée maximum possible pour la simulation. En effet, un compromis devra être trouvé entre la taille du domaine régional (et donc la distance des OBCs par rapport au domaine étudié) et la durée de la simulation sur les calculateurs utilisés, surtout dans le cas de réanalyses sur une grande période de temps, pour lesquelles il vaut mieux repousser au plus loin les frontières dans la mesure de ce qui est possible au niveau calcul.

### 5.2 Le type d'OBC utilisé

Le modélisateur va également avoir à choisir le type d'OBCs qui va être utilisé. Le choix sera à faire entre l'utilisation de climatologies construites à partir de données réelles, de sorties du même modèle biogéochimique à plus basses résolutions spatiale et temporelle ou de sorties des modèles mis en production par le CMEMS. Nos tests sur les conditions de Neumann en gradients nuls nous incitent à ne pas recommander ce type d'OBCs, sauf ponctuellement pour compléter des variables qui seraient manquantes.

La climatologie établie à partir de données réelles présente l'avantage de reproduire de manière assez réaliste la quantité de nutriments injectée aux frontières, ce que nous avons montré comme primordial lors de nos tests afin d'atteindre une valeur maximale d'efflorescence représentative. D'après les tests effectués, le désavantage de la faible résolution ne semble pas trop rédhibitoire. De plus, contrairement à ce qui pouvait être attendu, nous avons montré que même avec une année type « identique » apposée aux OBCs, le modèle régional est capable de simuler une variabilité interannuelle qui doit, sans doute, plus dépendre des conditions hydrodynamiques et atmosphériques.

Le modélisateur a également la possibilité de déployer le même modèle biogéochimique sur la grille du modèle hauturier afin de produire des conditions aux frontières de plus basse résolution spatiale et/ou temporelle, voire même d'utiliser ces résultats pour faire une climatologie à partir des données du modèle.

Cette option présente l'avantage d'une compatibilité parfaite des variables biogéochimiques forçantes et forcées.

Cependant, plusieurs désavantages apparaissent dans le déploiement souvent lourd (en temps de calcul) du modèle sur la grille hauturière ainsi que dans l'accentuation de défauts que pourraient avoir le modèle biogéochimique utilisé en régional (qui de plus pourrait ne pas être adapté au hauturier).

Enfin, le modélisateur peut utiliser les OBCs physiques et biogéochimiques du modèle couplé physique-biogéochimique hauturier (produit par le CMEMS), choix qui a en grande partie initié les réflexions de ce projet.

Cette option présente l'avantage évident d'utiliser un produit disponible via le CMEMS en temps réel et de valoriser ainsi ces produits aussi bien pour des applications de Recherche ou la mise en place de systèmes de prévision régionale ou côtière.

Cependant, il existe quand même certains désavantages en temps réel par exemple, où seulement certaines variables sont distribuées, or en général le forçage d'un modèle biogéochimique nécessite un grand nombre de variables. Les désavantages principaux même en temps différé résident dans le fait que, en général les modèles biogéochimiques du CMEMS (forçant) et régional (forcé) sont différents et leurs variables biogéochimiques ne correspondent pas. Dans ce cas, il faut effectuer des agrégations ou désagrégations de variables qui peuvent parfois être lourdes (en manipulation) mais surtout hasardeuses car les correspondances sont très difficiles à établir.

Enfin, dans le cas d'assimilation de données biogéochimiques, il faut de plus veiller à la cohérence des variables biogéochimiques entre elles vis-à-vis des équilibres fondamentaux de l'écosystème régional. En cas de déséquilibres notables, le forçage aux OBCs du modèle régional pourra conduire à des dynamiques et des résultats complètement inattendus.

## **6 Références**

### **6.1 Références citées**

Friedrichs, M. A. M., R. R. Hood, et al., 2006. Ecosystem model complexity versus physical forcing: Quantification of their relative impact with assimilated Arabian Sea data. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 53(5-7): 576-600.

Jorgensen, S. E., 2005. Ecological Modelling: editorial overview 2000-2005. *Ecological Modelling*, 188(2-4): 137-144.

- Liquete C, Piroddi C, Drakou EG, Gurney L, Katsanevakis S, et al., 2013. Current Status and Future Prospects for the Assessment of Marine and Coastal Ecosystem Services: A Systematic Review. *PLoS ONE* 8(7): e67737. doi:10.1371/journal.pone.0067737
- Nicholls, R.J. and C. Small, 2002. Improved Estimates of Coastal Population and Exposure to Hazards Released. *Eos Transactions*, 83(2), 301 and 305

## 6.2 *Références bibliographiques de l'équipe*

- Alekseenko E., Raybaud V., Espinasse B., Carlotti F., Queguiner B., **Thouvenin B.**, **Garreau P.**, **Baklouti M.**, 2014. Seasonal dynamics and stoichiometry of the planktonic community in the NW Mediterranean Sea: a 3D modeling approach. *Ocean Dynamics* 64 (2): 179-207. <http://dx.doi.org/10.1007/s10236-013-0669-2>
- Auger P.A., **Diaz F.**, Ulses C., **Estournel C.**, Neveux J., Joux F., Pujo-Pay M., and Naudin J.J., 2011. Functioning of the planktonic ecosystem of the Rhone River plume (NW Mediterranean) during spring and its impact on the carbon export: a field data and 3-D modelling combined approach. *Biogeosciences*, 8, 3231-3261.
- Auger, P.A., Ulses C., **Estournel C.**, Stemmann L., Somot S., **Diaz F.**, 2014. Interannual control of plankton ecosystem in a deep convection area as inferred from a 30-year 3D modelling study: winter mixing and prey/predator interactions in the NW Mediterranean. *Progress in Oceanography* 124, 12-27.
- Baklouti, M.**, **F. Diaz**, **C. Pinazo**, V. Faure, B. Queguiner, 2006 a. Investigation of mechanistic formulations depicting phytoplankton dynamics for models of marine pelagic ecosystems and presentation of a new model, *Progress in Oceanography* , 71(1), 1-33
- Baklouti, M.**, V. Faure, L. Pawlowski, A. Sciandra, 2006 b. Investigation and sensitivity analysis of a mechanistic phytoplankton model implemented in a new modular numerical tool (Eco3M) dedicated to biogeochemical modelling, *Progress in Oceanography*, 71(1), 34-58
- Beuvier J.**, **Béranger K.**, Lebeau-pin Brossier C., Somot S., Sevault F., **Drillet Y.**, Bourdallé-Badie R., Ferry N., Lyard F., 2012. Spreading of the Western Mediterranean Deep Water, *Journal of Geophysical Research*, 117, C07022 DOI:10.1029/2011JC007679.
- Beuvier J.**, C. Lebeau-pin Brossier, **K. Béranger**, **T. Arsouze**, R. Bourdallé-Badie, C. Deltel, **Y. Drillet**, P. Drobinski, N. Ferry, F. Lyard, F. Sevault and S. Somot, 2012b. MED12, oceanic component for the modeling of the regional Mediterranean earth system , *Mercator Ocean Quarterly Newsletter #46*, Special Issue NEMO-MyOcean, Novembre 2012.
- Beuvier J.**, 2011. Modélisation de la variabilité climatique de la circulation et des masses d'eau en mer Méditerranée : impact des échanges océan-atmosphère, PhD thesis, Ecole Doctorale de l'Ecole Polytechnique, Décembre 2011.
- Campbell, R., **F. Diaz**, Z. Hu, **A. Doglioli**, **A. Petrenko**, I. Dekeyser, 2013. Nutrients and plankton spatial distributions induced by a coastal eddy in the Gulf of Lion. Insights from a numerical model. *Progress in Oceanography* 109, 47-69, doi: 10.1016/j.pocean.2012.09.005.
- Carlotti F., L. Eisenhauer, R. Campbell, **F. Diaz**, 2014. Modelling spatial and temporal population dynamics of the Copepod *Centropages typicus* in the North western Mediterranean Sea during the year 2001 using a 3D ecosystem model. *Journal of Marine Systems* 2, 135, 97-116.
- Dol M., 2011. Implémentation d'un modèle couplé online physique biogéochimie sur la façade européenne. Rapport de stage de Master 2 professionnel mention "surveillance et gestion de l'environnement", Toulouse.

- Eisenhauer, L., F. Carlotti, **M. Baklouti**, and **F. Diaz**, 2009. Zooplankton population model coupled to a biogeochemical model of the north western Mediterranean sea ecosystem. *Ecological Modelling*, 220(21), 2865-2876.
- Gehlen M.**, R. Gangstø1, B. Schneider, L. Bopp, O. Aumont, and C. Ethe, 2007. The fate of pelagic CaCO<sub>3</sub> production in a high CO<sub>2</sub> ocean: a model study. *Biogeosciences*, 4, 505–519.
- Faure V., Pinazo C., Torrétón J-P. and S. Jacquet, 2010a. Modelling the spatial and temporal variability of the SW lagoon of New Caledonia I: a new biogeochemical model based on microbial loop recycling. *Marine Pollution Bulletin*, 61 : 465–479.
- Faure V., **Pinazo C.**, Torrétón J-P. and P. Douillet, 2010b. Modelling the spatial and temporal variability of the SW lagoon of New Caledonia II: 3D realistic simulations compared with *in situ* data. *Marine Pollution Bulletin*, 61 : 480-502.
- Fontana C., C. Grenz, **C. Pinazo**, **P. Marsaleix**, **F. Diaz**, 2009. Assimilation of SeaWiFS chlorophyll data into a 3D coupled physical biogeochemical model applied to a freshwater influence coastal zone. *Continental Shelf Research*, 29 : 1397–1409.
- Fontana C., C. Grenz, **C. Pinazo**, 2010. Sequential assimilation of a year-long time-series of SeaWiFS chlorophyll data into a 3D biogeochemical model on the French Mediterranean coast. *Continental Shelf Research*, 30(16): 1761-1771. <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2010.08.003>
- Frayse M., **C. Pinazo**, Faure V., Pairaud I., 2011. 3D coupled physical and biogeochemical modelling approach: limitation on biological productions by the different nutrients in Marseilles coastal area. EGU General Assembly, 3 - 8 April 2011, Vienna, Austria.
- Frayse M., **C. Pinazo**, V. Faure, R. Fuchs, P. Lazzari, P. Raimbault, I.L. Pairaud. 3D coupled physical-biogeochemical model development around Marseille's coastal area (NW Mediterranean Sea): What complexity is required in coastal zone? *PLoS ONE*, 8 (12): e80012.
- Fuchs R., C. Dupouy, P. Douillet, M. Caillaud, A. Mangin, **C. Pinazo**, 2012. Modelling La Niña event impact on a South West Pacific Lagoon (New Caledonia). *Marine Pollution Bulletin*, 64 : 1596–1613.
- Fuchs R., **C. Pinazo**, P. Douillet, A. Mangin, M. Frayse, C. Dupouy, 2013. Modeling the ocean-lagoon interaction during upwelling processes on the South West of New Caledonia. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 135 : 5-17.
- Herrmann M., **Diaz F.**, **Estournel C.**, **Marsaleix P.**, **Ulses C.**, Impact of atmospheric and oceanic interannual variability on the Northwestern Mediterranean Sea pelagic planktonic ecosystem and associated carbon cycle. *Journal of Geophysical Research*, 118: 1-22.
- Hu Z.H., **Doglioli A.M.**, **Petrenko A.A.**, **Marsaleix P.**, Dekeyser I., 2009. Numerical simulations of eddies in the Gulf of Lion. *Ocean Model.*, Vol.28/4, pp.203-208, doi: 10.1016/j.ocemod.2009.02.004 .
- Hu Z.H., **Petrenko A.A.**, **Doglioli A.M.**, Dekeyser I., 2011. Numerical study of eddy generation in the western part of the Gulf of Lion. *J. Geophys. Res.*, Vol.116, C12030, doi:10.1029/2011JC007074
- Huret M., **Sourisseau M.**, Petitgas P., Struski C., Leger F., Lazure P., 2013. A multi-decadal hindcast of a physical–biogeochemical model and derived oceanographic indices in the Bay of Biscay. *Journal of Marine Systems*, 109-110, S77-S94.
- Kersalé M., **Petrenko A.A.**, **Doglioli A.M.**, Dekeyser I., Nencioli F., 2013. Physical characteristics and dynamics of the coastal Latex09 Eddy derived from in situ data and numerical modeling. *J. Geophys. Res.*, Vol.118, pp.1-11, doi: 10.1029/2012JC008229
- Lazzari P, Solidoro C, Ibello V, Salon S, Teruzzi A, et al., 2012. Seasonal and inter-annual variability of plankton chlorophyll and primary production in the Mediterranean Sea: a modelling approach. *Biogeosciences* 9: 217–233.

- Lenhart H.-J., Mills D.K., Baretta-Bekker H., van Leeuwen S.M., van der Molen J., Baretta J.W., Blaas M., Desmit X., Kühn W., Lacroix G., Los H.J., **Ménesguen A.**, Neves R., Proctor R., Ruardij P., Skogen M.D., Vanhoutte-Brunier A., Villars M.T., Wakelin S.L., 2010. Predicting the consequences of nutrient reduction on the eutrophication status of the North Sea. *J. Mar. Sys.*, 81, 148-170.
- Ménesguen A.**, Cugier P., Loyer S., Vanhoutte-Brunier A., Hoch T., Guillaud J.-F., Gohin F., 2007. Two- or three-layered box-models versus fine 3D-models for coastal ecological modelling? A comparative study in the English Channel (Western Europe). *J.Mar. Sys.*, 64, 47-65.
- Ménesguen A.**, Dussauze M., 2011. Calibration/validation du modèle ECO-MARS3D sur la façade française Manche-Atlantique. *Rapport Ifremer*, 93 p. (+ annexes).
- Palmiéri J.**, J. C. Orr, **J-C Dutay**, **K. Béranger**, A. Schneider, **J. Beuvier** and S. Somot. Simulated anthropogenic CO<sub>2</sub> uptake and acidification of the Mediterranean Sea. In prep. Biogeoscience Discussions.
- Pinazo C.**, M. Fraysse, R. Fuchs, B. Thouvenin, I. Pairaud , P. Garreau, 2012. Modelling the Gulf of Lions coastal area with a 3D coupled physical and biogeochemical approach. 50th ECSA Conference, 3-7 June 2012, Venice, Italy
- Qiu Z.F., **Doglioli A.M.**, Hu Z.Y., **Marsaleix P.**, Carlotti F., 2010. The influence of hydrodynamic processes on zooplankton transport and distributions in the North Western Mediterranean: estimates from a Lagrangian model. *Ecol. Model.*, Vol.221/23, pp.2816-2827, doi: 10.1016/j.ecolmodel.2010.07.025 .
- Teruzzi A., S. Dobricic, C. Solidoro, G. Cossarini, 2014. A 3-D variational assimilation scheme in coupled transport-biogeochemical models: Forecast of Mediterranean biogeochemical properties. *J. Geophys. Res.*, 119, 1–18, doi:10.1002/2013JC009277.
- Vanhoutte-Brunier A., Fernand L., **Ménesguen A.**, Lyons S., Gohin F., Cugier P., 2008. Modelling the *Karenia mikimotoi* bloom that occurred in the western English Channel during summer 2003. *Ecol. Model.*, 210, 351-376.
- Vaugeois M., **Diaz F.**, F. Carlotti, 2013. A mechanistic individual-based model of the feeding processes for *Oikopleura dioica*. *PLoS ONE*, 8(11): e78255.

<b>MODEL-DATA COMPARISONS</b>	
<b>ATLANTIC</b>	<b>MED</b>
<p><b>Gliders:</b> create sections from the model data mapped onto the glider transects. Check for position of thermocline, Deep Chlorophyll Maximum (DCM), nitracline.</p>	<p>Gliders: create sections from the model data mapped onto the glider transects focussing on Nice-Calvi &amp; Toulon. Check for (seasonal variability in) position of thermocline, DCM, nitracline, presence of Northern Current (NC) (Figure 16, Figure 17, Figure 18 &amp; Figure 19).</p>
<p>Moorings: check whether the ASPEX currents are represented in the model in winter 2011 (Jan-Mar). Check for intrusions of the current into the upper water column. Check for direction changes.</p>	<p>Moorings: get ANTARES data including vessel data for comparison of bio. Use SOMLIT (SOLA, SOLEMIO) data for comparisons with R3/R4 and obtain point B (Villefranche) for comparison.</p>
<p><b>Vessels:</b> Point-by-point comparisons of vertical profiles from Pelgas and Protevs campaigns, focussing on those periods where we see a reversal in ASPEX current direction. Also focus on Aug 2011 using Aspex CTD + scanfish + glider. Also Oct 2011 using Protevs to look a position of nitracline using values of 5-6<math>\mu</math>M as indication of nitracline. Compare monthly means with climatologies from Ferrybox.</p>	<p><b>HF Radar:</b> Use this data to verify existence, strength and position of NC and compare to the models. Look at seasonal variability. Create Hovmöller diagram along 6.17°E (ANTARES) with wind forcing on top. Extract data along ANTARES longitude and compare to models. Look at Mistral events (July 2011 and 2012) and how they can shift the NC. Look at the meander during spring (March/April) 2011. Also look at Surface Velocity Programme (SVP) if there is any additional data.</p>
<p><b>Satellites:</b> Focus on early year (Jan-Jul), choose 1-2 images that look like a non-composite and focus on those. Pixel-by-pixel: find the max value of chl in each pixel and plot a map of the time when it occurs - &gt; provides indication of northward (ATL) progression of spring bloom.</p>	<p><b>Satellites:</b> AVHRR: Look at period of upwelling (mid Jul -Aug 2011) and try to validate with data from Port-Cros (T-Med-NET, see below). See whether the meander in the NC in March/April 2011 is visible in AVHRR. Look for presence/absence strength and duration of events. Ocean colour: Pixel-by-pixel: find the max value of chl in each pixel and plot a map of the time when it occurs - &gt; provides indication of progression of spring bloom. Define small boxes based on bloom timing and produce temporal means which can be compared to sat composites.</p>
<p>Compare monthly/weekly means with composites -&gt; Check out Globcolour (MyOcean mixed OC4/OC5 product) and see if that can be used in addition to the OC5 products. Normalise model and sat chl concentrations (to get rid of errors) and apply a low pass filter to images (and model results) to see whether the model reproduces the concentrations correctly on meso-scale.</p>	
	<p><b>T-MED-NET:</b> Use the data/images to validate T data from the model.</p>
	<p><b>Floats:</b> If consecutive profiles are in close spatial and temporal proximity, create a</p>

section and compare with models, looking for DCM and nitracline depth. Otherwise use point-by-point comparisons.

Tableau 2: Métriques utilisées pour les comparaisons modèles-mesures

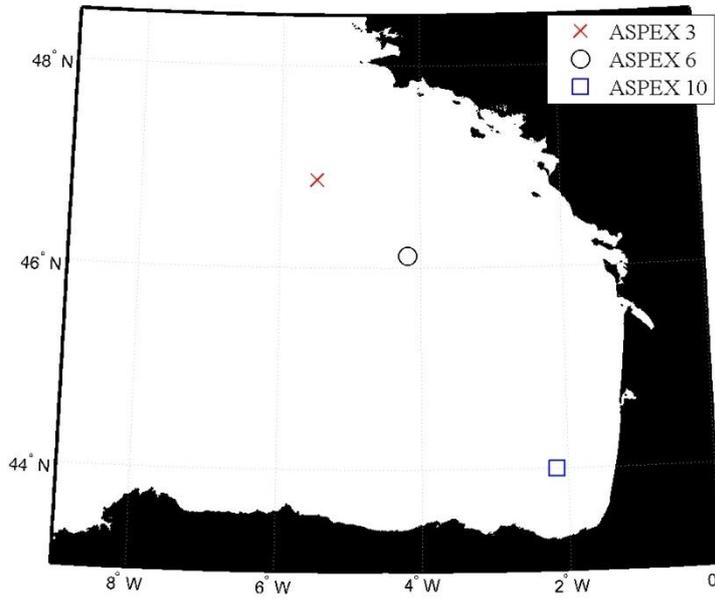


Figure 15 : localisation des mouillages ASPEX utilisés

## ANNEXE 2: Exemples de résultats obtenus avec ces métriques

A titre d'exemple en Méditerranée, la comparaison des simulations avec les mesures glider, en se focalisant sur les deux métriques: la profondeur du Deep Chlorophyll Maximum (DCM) et celle de la nitracline, définies lors de la réunion annuelle de juillet sont présentées (Figure 16, Figure 17). A noter que le temps PostDoc imparti pour le projet ne nous a pas permis d'appliquer la méthode de calibration de la chlorophylle de Lavigne et al. (2013) en 2011-mi2012 en plus des autres tâches prioritaires à mener à bien pour le projet. Cependant, même sans calibration, la profondeur du DCM peut être détectée et l'on observe un biais de seulement quelques % et une RMSD de l'ordre d'une trentaine de mètres.

Cette métrique de profondeur du DCM est intéressante pour qualifier les simulations, mais peut-être pas suffisamment précise pour comparer l'impact des OBCs interne et externe car il y a assez peu de différences dans les résultats (Figure 18). Le même travail a été fait pour la profondeur de la nitracline (Figure 19) pour une simulation de R3 et des mesures glider de nitrate traitées avec la calibration de Sakamoto et al. (2009).

Ces comparaisons modèle-mesures et la définition des métriques associées sont très novatrices et pourront être utilisées en routine pour la qualification des simulations d'un futur système opérationnel régional. Elles vont cependant devoir être affinées, grâce aux nombreux tests avec les 4 configurations régionales, afin de les utiliser de manière efficace pour l'étude sur l'impact des différents types de forçages des OBCs. En fonction des résultats obtenus, certaines métriques pourront apparaître prioritaires par rapport à d'autres, mais l'ensemble des critères d'évaluation devront être pris en compte afin de rendre les conclusions sur les OBCs les plus robustes possibles.

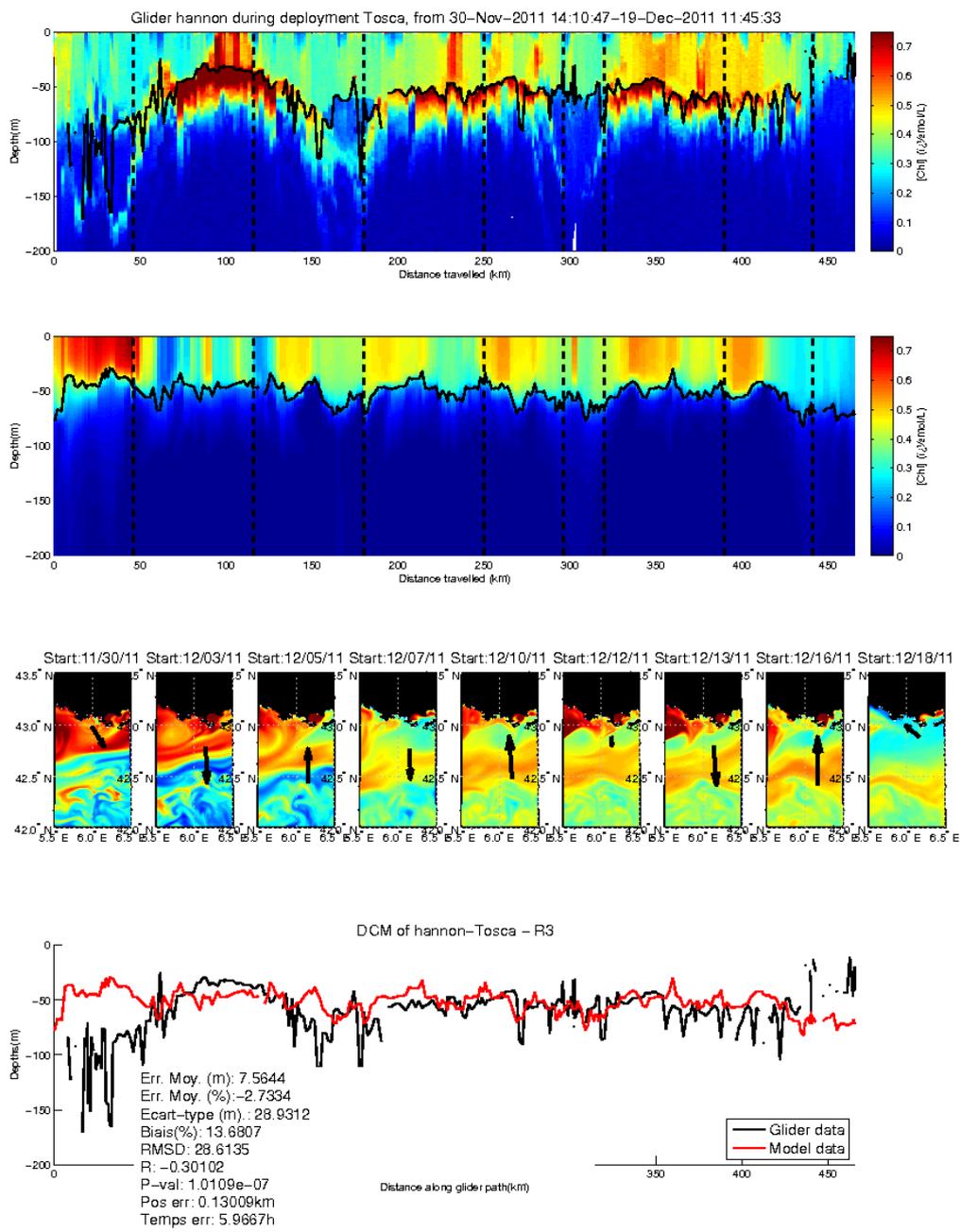


Figure 16: Distribution de la chlorophylle dans les 0-200 m mesurée par le glider sans calibration (haut) simulé par R3 (milieu) et comparaison de la position du DCM avec calcul des indices statistiques sur les profondeurs du DCM (bas) lors de la mission du glider Hannon en automne 2011 au large de Toulon.

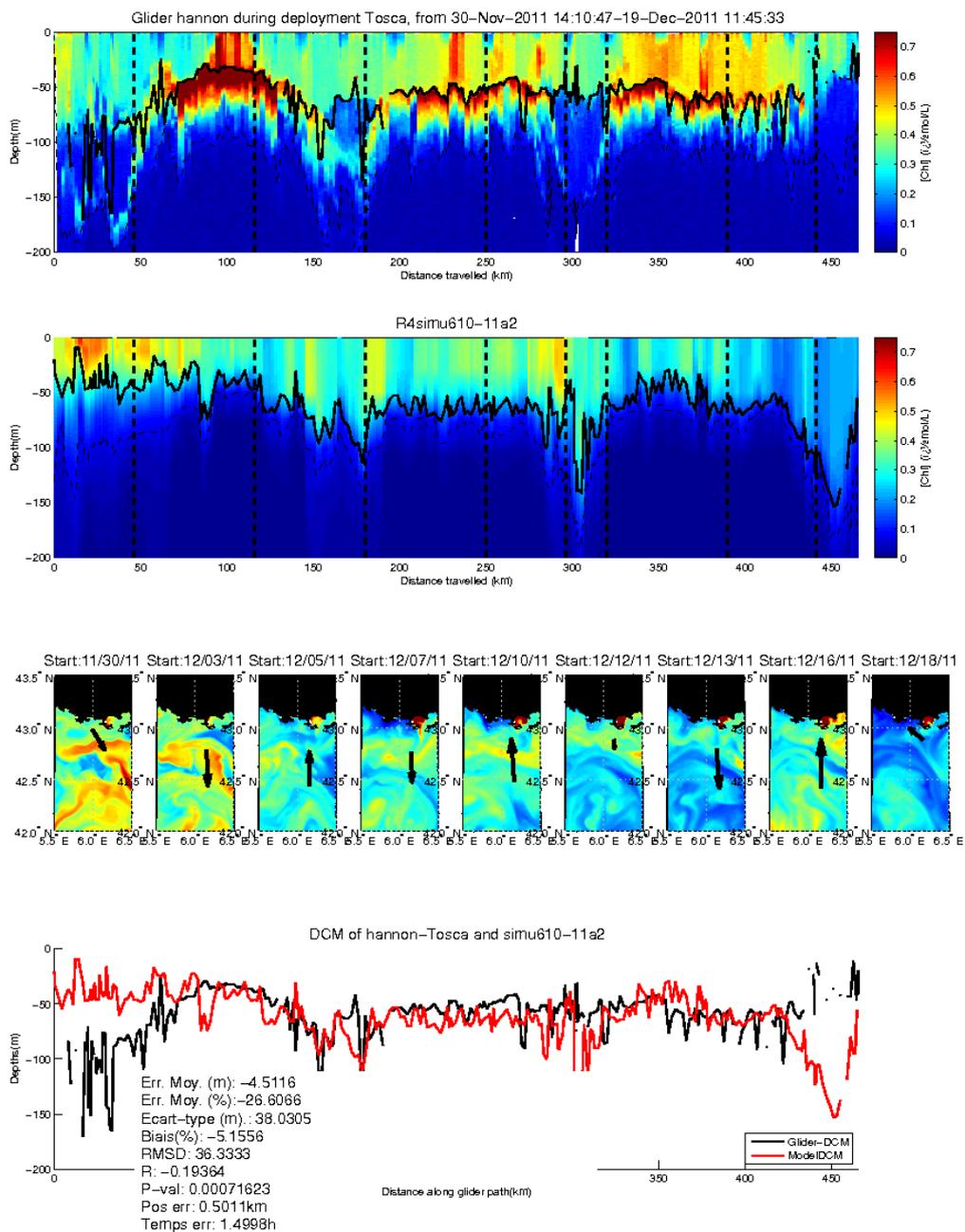
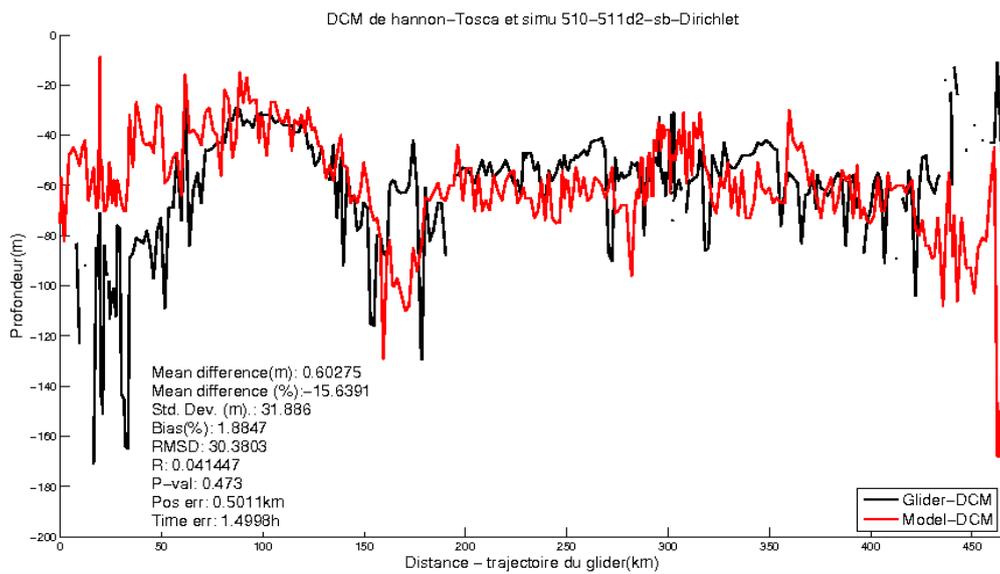
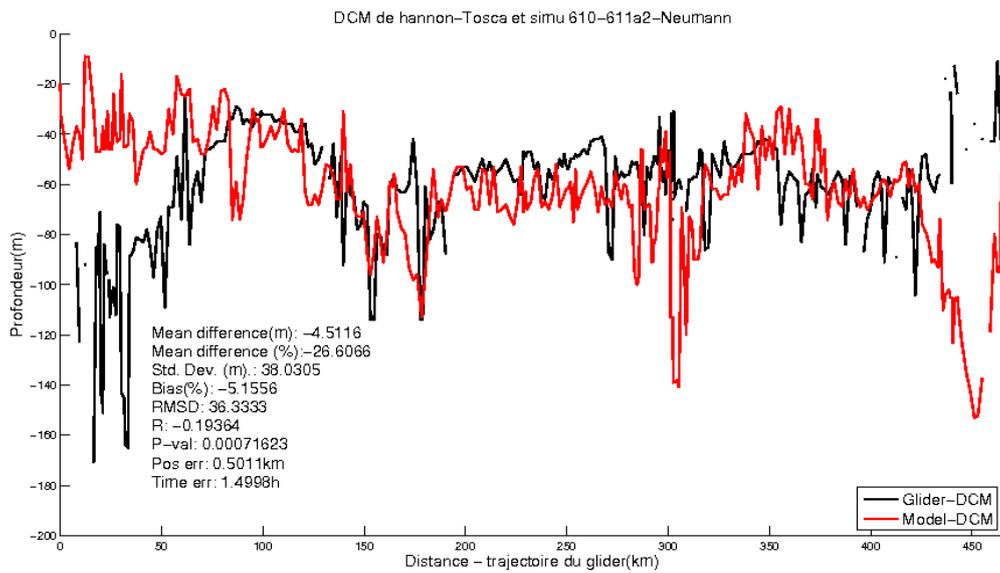
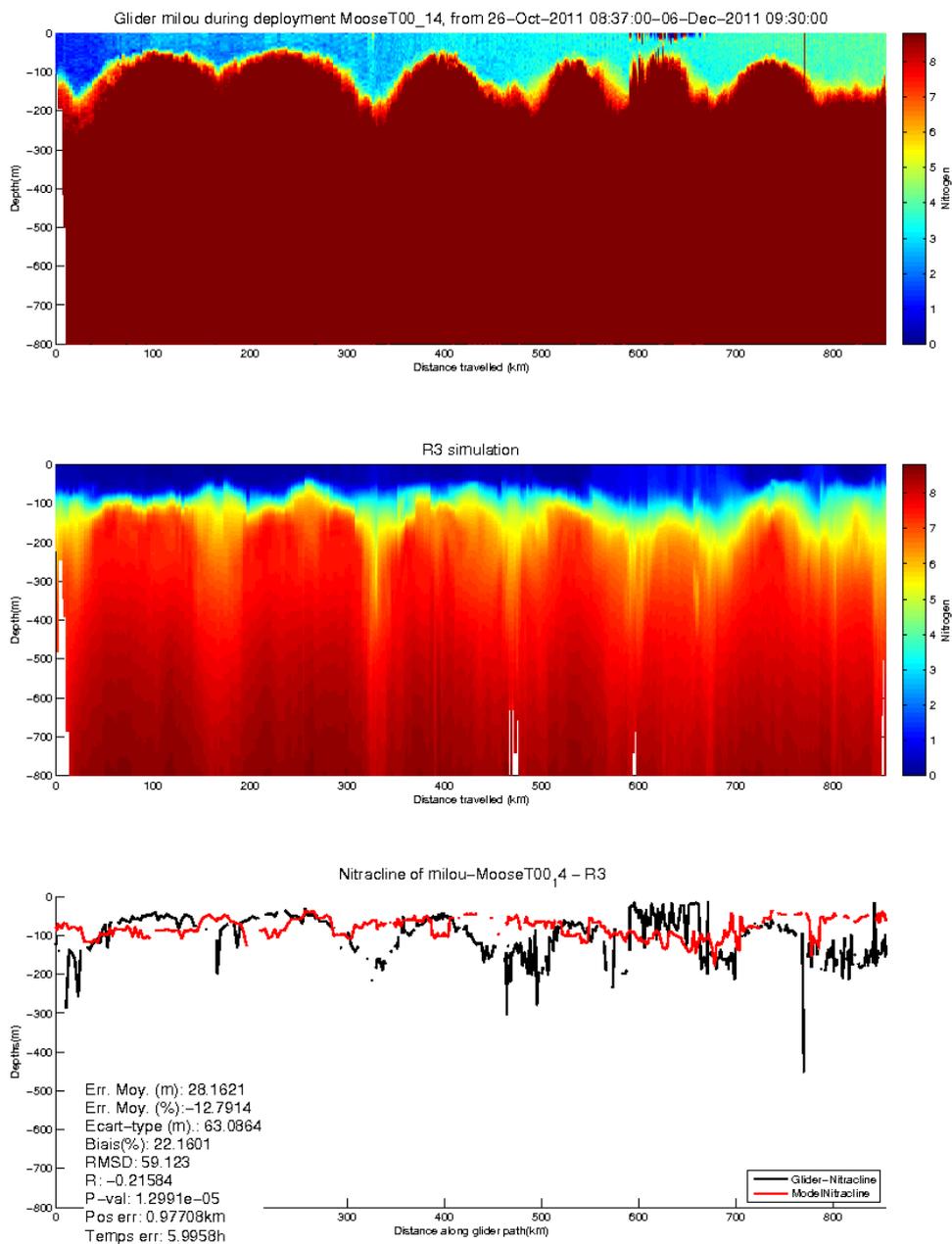


Figure 17: Distribution de la chlorophylle dans les 0-200 m mesurée par le glider sans calibration (haut) simulé par R4 avec localisation des trajets du glider dans les vignettes (milieu) et comparaison de la position du DCM avec calcul des indices statistiques sur les profondeurs du DCM (bas) lors de la mission du glider Hannon en automne 2011 au large de Toulon.



**Figure 18: Comparaison de la profondeur du DCM mesurée par le glider Hannon à l'automne 2011 et modélisée par la configuration R4 avec un forçage interne pour les OBCs (Neumann en haut) et un forçage externe aux OBCs (Dirichlet en bas).**



**Figure 19: Distribution des nitrates dans la couche 0-800 m mesurée par le glider avec la calibration de Sakamoto et al. (2009) (haut) simulé par R3 (milieu) et comparaison de la position de la nitracline avec calcul des indices statistiques sur les profondeurs de la nitracline (bas) lors de la mission du glider Milou en automne 2011 entre Nice et Calvi.**

ANNEXE 3: Données et Métriques modèle-mesures in situ définies et/ou utilisées dans la première phase AMICO-BIO, les métriques non encore utilisées pourront être envisagées par la suite :

Nom (a)	Définition(b)	Types d'observation (c)	Utilisation
T (°C)	Température de l'eau de mer à toute profondeur	Thermistance (ex : TMedNet), CTD, mouillage, Flotteur, ADCP, Glider, Ferrybox, satellite (SST)	Utilisée
S	Salinité de l'eau de mer à toute profondeur	Salinomètre (ex : bouée smatch), CTD, mouillage, Flotteur, Glider, Ferrybox, satellite (SSS)	Utilisée sauf SSS
PAR (J/m <sup>2</sup> /s=W/m <sup>2</sup> =μmol/m <sup>2</sup> /s)	Photosynthetic Available Radiation de l'eau de mer à toute profondeur	Capteur ponctuel (pont du bateau, station météo), mouillage, CTD	Non utilisée faute de temps
Courant (u, v, w) (m/s)	Intensité et direction du courant horizontal, et courant vertical	ADCP (mouillage au fond ou dans la colonne d'eau, de coque), radar HF	Utilisée sauf vertical
Kz (m <sup>2</sup> /s)	Intensité du coefficient de diffusivité verticale	Appareil de mesure (profil vertical): Scamp, microrider	Non utilisée faute de temps
O <sub>2</sub> (mmol/m <sup>3</sup> )	Concentration d'oxygène dissous dans l'eau de mer à toute profondeur	CTD, Flotteur, Glider	Non utilisée faute de temps
Fluo (FTU à calibrer en mg/m <sup>3</sup> ou μg/L)	Fluorescence de l'eau de mer à toute profondeur	CTD, Flotteur, Glider	Utilisée non calibrée
Turbidité (NTU à calibrer en kg/m <sup>3</sup> =g/L)	Turbidité de l'eau de mer à toute profondeur	Capteur ponctuel, CTD	Non utilisée
Backscattering (qualitatif à calibrer en kg/m <sup>3</sup> =g/L)	Rétrodiffusion de l'eau de mer à toute profondeur	Capteur ponctuel, Trios, ADCP	Non utilisée
CDOM	Matière dissoute colorée	Mesures labo, capteurs Flotteurs, Glider	Non utilisée
Chl (mg/m <sup>3</sup> =μg/L)	Contenu en Chlorophylle-a de l'eau de mer toute profondeur	Filtration (HPLC, acétone), Fluorimètre calibré, Couleur de l'eau calibrée (algorithmes OC4, OC5, GSM, ...)	Utilisée seulement en surface, DCM et au fond, faute de données
NO <sub>3</sub> (mmol/m <sup>3</sup> =μmol/L)	Concentration en	Prélèvement,	Utilisée

	nitrates (ou NO <sub>3</sub> +NO <sub>2</sub> ) dans l'eau de mer à toute profondeur	capteur in situ (mouillage, Flotteur, Glider, Ferrybox)	
NH <sub>4</sub> (mmol/m <sup>3</sup> =μmol/L)	Concentration en ammonium dans l'eau de mer à toute profondeur	Prélèvement	Utilisée
PO <sub>4</sub> (mmol/m <sup>3</sup> =μmol/L)	Concentration en ammonium dans l'eau de mer à toute profondeur	Prélèvement	Utilisée
SiO <sub>4</sub> (mmol/m <sup>3</sup> =μmol/L)	Concentration en ammonium dans l'eau de mer à toute profondeur	Prélèvement	Non utilisée faute de temps
POC (mmol/m <sup>3</sup> =μmol/L)	Concentration en ammonium dans l'eau de mer à toute profondeur	Prélèvement	Non utilisée faute de temps
PON (mmol/m <sup>3</sup> =μmol/L)	Concentration en ammonium dans l'eau de mer à toute profondeur	Prélèvement	Non utilisée faute de temps
POP (mmol/m <sup>3</sup> =μmol/L)	Concentration en ammonium dans l'eau de mer à toute profondeur	Prélèvement	Non utilisée faute de temps
DOC (mmol/m <sup>3</sup> =μmol/L)	Concentration en ammonium dans l'eau de mer à toute profondeur	Prélèvement	Non utilisée faute de temps
DON (mmol/m <sup>3</sup> =μmol/L)	Concentration en ammonium dans l'eau de mer à toute profondeur	Prélèvement	Non utilisée faute de temps
DOP (mmol/m <sup>3</sup> =μmol/L)	Concentration en ammonium dans l'eau de mer à toute profondeur	Prélèvement	Non utilisée faute de temps
Nombre de cellules	Nombre de cellules par classes de tailles, par groupes	Prélèvement, cytomètre in situ	Non utilisée
Profondeur de la Thermocline (m)	Profondeur en mètres du plus fort gradient de température	Déduite à partir des mesures dans la colonne d'eau (CTD, Flotteur, Glider)	Utilisée
Profondeur de la Nitracline (m)	Profondeur en mètres d'une valeur de NO <sub>3</sub> fixe supposée	Déduite à partir des mesures dans la colonne d'eau (Flotteur, Glider)	Utilisée

	représenter la cline		
Profondeur du maximum de Chlorophylle (DCM) (m)	Profondeur en mètres du plus fort gradient de Chlorophylle	Déduite à partir des mesures dans la colonne d'eau (CTD, Flotteur, Glider)	Utilisée
Pseudo- Profondeur du maximum de Chlorophylle (PseudoDCM) (m)	Quand il n'y a pas de réel DCM, Profondeur en mètres du bas de la couche contenant les fortes valeurs de Chlorophylle et déterminée par le plus fort gradient de Chlorophylle	Déduite à partir des mesures dans la colonne d'eau (CTD, Flotteur, Glider)	Utilisée
Production primaire	Mesure de la production primaire brute, nette	C13	Non utilisée
respiration	Mesure de la respiration à la lumière et à l'obscurité	oxygène	Non utilisée
uptake	Mesure de l'assimilation d'azote	N15	Non utilisée