



CENTRE  
D'OCÉANOLOGIE  
DE MARSEILLE  
UNIVERSITÉ DE LA MÉDITERRANÉE  
AIX-MARSEILLE II



## UNIVERSITÉ de la MÉDITERRANÉE CENTRE d'OCÉANOLOGIE de MARSEILLE

---

### MASTER d'OCÉANOGRAPHIE

Spécialité : Océanographie physique et météorologie côtière

*Rose CAMPBELL*

*Evaluation de l'impact d'une structure tourbillonnaire de  
mesoéchelle sur la structuration du réseau trophique planctonique  
dans le golfe du Lion.*

Stage de recherche réalisé au sein du laboratoire : *Laboratoire  
d'Océanographie Physique et Biogéochimique*

Sous la direction de *Frédéric DIAZ,*  
*Andrea DOGLIOLI (cotutelle), Anne PETRENKO (cotutelle)*

Année Universitaire 2007–2008

## **Remerciements**

Je tiens à remercier tout d'abord Frédéric Diaz de m'avoir dirigée avec autant de patience et de disponibilité pendant ce stage. Cette première expérience en laboratoire de recherche a été fort agréable en raison du soutien de l'équipe de recherche. Je remercie également Andrea Doglioli et Anne Petrenko de tous leurs conseils au long du stage. Je dois aussi remercier tous les enseignants du COM qui m'ont encouragé et aidé au cours de mon master.

Je remercie Claude Estournel du Pôle d'Océanographie Côtière à Toulouse d'avoir développé le code Symphonie et de nous l'avoir mis à disposition. Clément Fontana est aussi remercié pour son aide avec le traitement des images SeaWiFS.

Je remercie aussi mes collègues de l'étage de leur gentillesse au quotidien, notamment Mathias, Lalaina et Ziyuan.

Thank you to all of my family and friends for all of your support over the last few years. I could never have accomplished this without your love and encouragement.

## Résumé

Le but de ce travail est d'étudier l'impact des structures tourbillonnaires de méso-échelle présentes dans le golfe de Lion sur la structuration du réseau trophique planctonique. Ces structures tourbillonnaires ont déjà été identifiées à l'aide du modèle d'hydrodynamique côtière Symphonie et d'une analyse en ondelettes qui a permis de les localiser au cours de l'année 2001 (Hu, 2007). En couplant le modèle Symphonie à un modèle biogéochimique, multi-nutriments, multi-groupes fonctionnels de plancton, ECO3M-NWMED, nous avons pu effectuer une analyse détaillée du réseau trophique planctonique dans et au voisinage de ces structures hydrodynamiques. En préalable à cette étude, les résultats du modèle couplé ont été confrontés à différents types de données disponibles (images SeaWiFS, mesures *in situ* provenant de campagnes de mesures ponctuelles et de suivis à long terme) afin de vérifier les performances du modèle couplé. Le modèle couplé produit des résultats très proches des données à la fois du point de vue de la variabilité spatiale et temporelle en particulier sur les concentrations en chlorophylle sur le plateau du golfe du Lion. Concernant le tourbillon anticyclonique étudié, une structure verticale avec un approfondissement central des isoconcentrations (nutriments, plancton) et isothermes est donné par le modèle ce qui est attendu pour une telle structure. Sur la durée de vie du tourbillon, des concentrations décroissantes en biomasse phytoplanctonique (chlorophylle et carbone) dans les trois groupes de phytoplancton sont prédites et pourraient s'expliquer par une prédation zooplanctonique et une disponibilité réduite en phosphate. A la fin de la vie du tourbillon, on observe une remontée des diverses quantités biogéochimiques sur les bords (en particulier ouest) du tourbillon jusqu'à la thermocline.

## Abstract

The purpose of this study is to examine the biogeochemical properties of mesoscale eddies in the Gulf of Lions (NW Mediterranean) and study their impact on the structure of the plancton community. These structures were previously identified using wavelet analysis on the outputs of a 3-dimensional hydrodynamic model, Symphonie (Hu, 2007). By adding to Symphonie a multi-nutrient, multi-functional groups of plankton, biogeochemical model, ECO3-NWMED, we were able to analyse the biogeochemical activity within these eddies. Additionally, the ouputs of this version of the coupled model are compared to several different types of datasets (SeaWiFS images, *in situ* data from short cruises and long term sampling) in order to fully verify its realism. The coupled model produces results which are similar from a spatial and temporal point of view to the measured data, particularly with regard to chlorophyll concentrations in the Gulf of Lions. A study of an anti-cyclonic eddy indicates a downwelling phenomenon which could be observed using various biogeochemical tracers such as nutrients, phytoplankton and bacteria. Decreasing concentrations of phytoplankton biomass (all groups) throughout the period of the anticyclone are predicted and can be explained by predation by zooplankton and reduced availability of phosphate. At the end of the eddy episode, we observe various biogeochemical tracers rising up to the thermocline on the edge of the eddy (particularly the western edge).

---

 Table des matières
 

---

1	Introduction .....	1
2	Zone d'étude : le golfe du Lion .....	1
2.1	Caractéristiques géomorphologiques .....	1
2.2	Le bassin versant.....	2
2.3	Quelques caractéristiques de la circulation hydrodynamique.....	3
3	Matériel et méthodes .....	3
3.1	Le modèle Symphonie .....	3
3.1.1	Fermeture de la turbulence.....	4
3.1.2	Equations de transport.....	6
3.2	Domaine et grille de modélisation .....	6
3.3	Le modèle biogéochimique Eco3M .....	7
3.3.1	Zooplancton.....	9
3.3.2	Phytoplancton.....	11
3.3.3	Bactéries.....	15
3.3.4	Autres fonctions liées à l'activité bactérienne.....	17
3.3.5	Fonctions de flux et paramètres du modèle.....	18
3.4	Le couplage.....	18
3.4.1	Atténuation de la lumière .....	19
3.4.2	Conditions aux limites.....	19
4	Résultats et discussion .....	19
4.1	Validation du modèle .....	19
4.1.1	Détermination du spin-up.....	20
4.1.2	Validation à l'aide d'images satellites SeaWiFS.....	20
4.1.3	Validation à l'aide des mesures <i>in situ</i> (Campagnes SARHYGOL 2001).....	22
4.1.4	Validation à l'aide de mesures <i>in situ</i> du réseau SomLIT .....	26
4.2	Etude d'un tourbillon de mesoéchelle et caractérisation du réseau trophique planctonique .....	29
4.2.1	Localisation des tourbillons .....	29
4.2.2	Etude des propriétés biogéochimiques et du réseau planctonique du tourbillon A1 ...	30
5	Conclusions .....	36
6	Annexes .....	38
6.1	Annexe 1 : Fonctions de flux biogéochimiques.....	38
6.1.1	Zooplancton.....	38
6.1.2	Phytoplancton.....	38
6.1.3	Bactéries.....	38
6.1.4	Matière organique particulaire de petite taille ( $D_p$ ) .....	38
6.1.5	Matière organique particulaire de grande taille ( $D_G$ ) .....	39
6.1.6	Matière organique dissoute .....	39
6.1.7	Sels nutritifs .....	39
6.2	Annexe 2 : Paramètres du modèle ECO3M-NWMED .....	40
6.3	Annexe 3: Comparaisons images SeaWiFS OC5- sortie du modèle sur l'année 2001 .....	42
7	Bibliographie .....	44

## 1 Introduction

L'océan côtier ne représente que 8% de la surface océanique, mais il forme un lien essentiel entre le milieu océanique hauturier et continental. Afin de mieux appréhender le fonctionnement de cette zone, il faut étudier les processus hydrodynamiques à moyenne échelle (20-100km) qui contrôlent une partie des échanges côte-large. L'intérêt de mener de telles études touche aussi bien aux acteurs politiques et de gestion de ressources qu'aux océanographes. En sachant que 40% de la population mondiale vit à moins de 100km des côtes, la pression anthropique dans la zone côtière reste forte. Une meilleure compréhension des processus biogéochimiques et physiques dans ces zones guidera ces acteurs dans des futurs projets dans la zone côtière.

On souhaitera quantifier la matière et l'énergie transportée entre l'océan côtier et l'océan hauturier. Cet échange se produit par le moyen de divers processus, dont certains ont été bien étudiés du point de vue de la circulation hydrodynamique, tels les *upwellings* (*e.g.* Millot, 1990) et la formation des eaux denses (Ulses *et al.* 2008; Duffau-Julliand *et al.*, 2004). Il est très difficile d'acquérir des données *in situ* à haute résolution spatiale et temporelle qui seraient suffisantes pour mener à bien une étude réellement couplée des processus physiques et biogéochimiques. Il reste des incertitudes sur les échelles temporelles et spatiales qui conviendront à de telles études. Les campagnes océanographiques sont le plus souvent orientées soit vers la physique soit la biogéochimie, mais rarement une approche couplée étroite est employée. Le programme LATEX (LAgrangian buoys and a Tracer EXperiment), dans lequel s'inscrit ce travail, réunit des techniques de l'océanographie physique et de l'océanographie biogéochimique afin de mener une telle étude. La modélisation couplée, telle présentée par la suite, est un outil-clé de ce programme pour l'étude des structures mesoéchelles.

## 2 Zone d'étude : le golfe du Lion

### 2.1 Caractéristiques géomorphologiques

La zone étudiée, le golfe du Lion, est située dans la partie nord-ouest du bassin occidental de la mer Méditerranée. Il est important de comprendre la bathymétrie, les forces climatiques et les caractéristiques hydrodynamiques du golfe afin de mener une étude complète sur le couplage physique-biogéochimie. Le golfe a une forme semi-circulaire

ouverte sur la Méditerranée. Cette zone est située principalement au large du sud de la France, mais l'extrême sud-ouest touche la côte espagnole. Le golfe est ouvert sur la mer Méditerranée sur une largeur d'environ 200 kilomètres (Figure 1). La bathymétrie du golfe est unique dans la Méditerranée à cause de son plateau continental très étendu. Le talus continental est entaillé par de nombreux canyons.

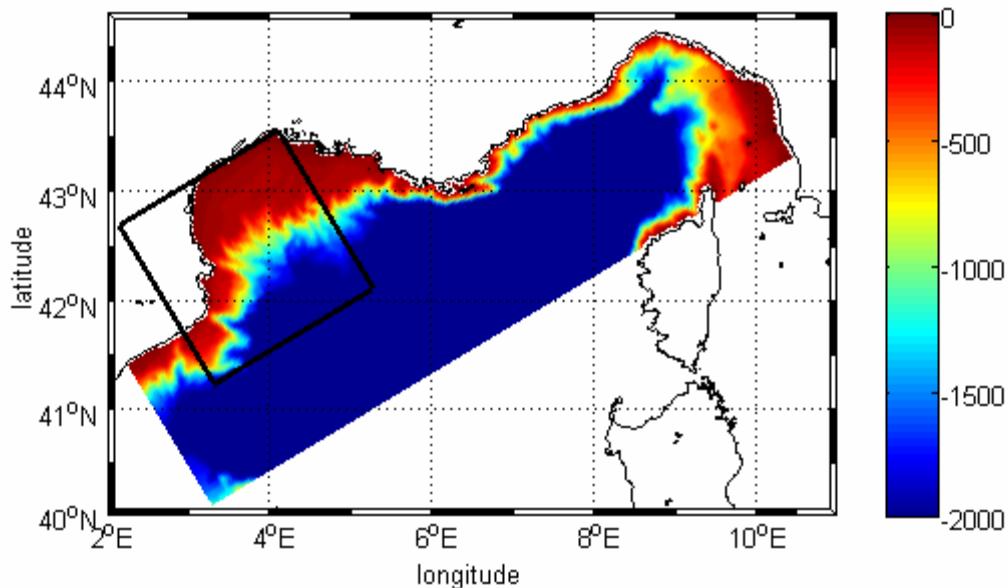


Figure 1: Carte bathymétrique en mètres de la zone étudiée. Le carré noir représente le domaine de l'analyse en ondelettes qui a été utilisé pour la localisation des tourbillons.

La région du golfe de Lion a un climat typiquement méditerranéen : chaud et sec. Cette région se distingue du reste de la Méditerranée par des vents forts et fréquents. Les vents typiques sont les vents du nord-ouest, le Mistral et la Tramontane, et les vents du sud-est.

## 2.2 ***Le bassin versant***

Plusieurs fleuves alimentent le golfe du Lion. Les quatre plus importants sont le Rhône, l'Hérault, l'Aude et l'Orb. Le Rhône est le fleuve dominant (Margat, 1992) avec un débit moyen de  $1830\text{m}^3/\text{s}$  (Martin et Saliot, 1992), dix fois plus important que la somme des trois autres. Le panache du Rhône s'étend généralement vers le sud-ouest sur tout le golfe du Lion, créant des forts gradients de densité. L'ensemble du bassin versant du golfe du Lion et son littoral sont une région très peuplée, avec des activités industrielles et agricoles très nombreuses.

## 2.3 Quelques caractéristiques de la circulation hydrodynamique

Dans le golfe du Lion, tout comme dans le reste de la Méditerranée nord occidentale, le Courant Nord est un élément majeur de la circulation à grande échelle dans cette région (Millot, 1990). Ce courant, parfois dénommé Liguro-Provençal-Catalan, est un courant de pente qui longe le talus continental de la mer Ligure jusqu'à la mer Catalane, en passant par le golfe du Lion. Il s'agit d'une partie de la circulation cyclonique observée dans l'ensemble du bassin nord-ouest méditerranéen. La veine principale de ce courant a une vitesse maximale annuelle de 0,7m/s en hiver et s'étend jusqu'à environ 300m en profondeur. En été, elle se ralentit ayant une vitesse de 0,5m/s et elle devient moins profond (~200m) (Petrenko, 2003). Les interactions entre les différents forçages dans le golfe du Lion amènent à observer la présence de nombreuses structures tourbillonnaires de mesoéchelle (20-100km).

## 3 Matériel et méthodes

### 3.1 Le modèle Symphonie

Nous avons utilisé le modèle Symphonie, qui a été développé au Pôle d'Océanographie Côtière du Laboratoire d'Aérologie (Estournel et al., 2005; Marsaleix et al., 2008). Ce modèle est utilisé pour des simulations à l'échelle régionale. Ce modèle ayant déjà été décrit dans diverses publications, nous reprendrons pour ce travail seulement ses caractéristiques principales.

Ce modèle prend en compte les hypothèses suivantes :

- Incompressibilité
- Boussinesq
- Hydrostatique

Nous utilisons les équations de Navier Stokes :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} u = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + f \cdot v + v_h \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial (-u' w')}{\partial z} \quad \text{Équation 1}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} v = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} - f \cdot u + v_h \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial (-v' w')}{\partial z} \quad \text{Équation 2}$$

Où  $u$ ,  $v$  sont les composantes horizontales de la vitesse,  $\rho$  est la masse volumique de référence,  $P$  est la pression,  $f$  est le paramètre de Coriolis,  $v_h$  est le coefficient de viscosité turbulente horizontale. Les termes  $u'$ ,  $v'$ ,  $w'$  sont les composantes turbulentes de la vitesse.

Nous pouvons transformer l'équation de continuité afin de calculer la vitesse verticale :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial z} = 0 \quad \text{Équation 3}$$

A la surface, nous supposons qu'il n'y a pas de flux de particules. De ce fait, à la surface libre  $z=\eta$ , nous avons :

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} - \omega = 0 \quad \text{Équation 4}$$

Nous divisons la colonne d'eau en deux parties :  $h$  la bathymétrie et  $\eta$ , la variation de la surface libre. La hauteur totale de la colonne d'eau ( $H$ ) est la somme de ces deux précédents. L'intégration de l'équation (4) donne :

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(H u) + \frac{\partial}{\partial y}(H v) = 0 \quad \text{Équation 5}$$

Où  $\bar{u}$  et  $\bar{v}$  sont les vitesses horizontales moyennées sur toute la colonne d'eau.

### 3.1.1 Fermeture de la turbulence

Les termes de turbulence des équations (1 et 2) laissent ouvert le système d'équations. Nous réduisons le système en utilisant des termes moyennés de Reynolds, ce qui permet de fermer le système en utilisant des variables pronostiques du modèle. Ici, les flux turbulents sont donnés en fonction des gradients verticaux de vitesse :

$$\begin{aligned} -(\overline{u'w'}, \overline{v'w'}) &= \nu_t \frac{\partial(u, v)}{\partial z} \\ -(\overline{T'w'}, \overline{S'w'}) &= \Gamma_t \frac{\partial(u, v)}{\partial z} \end{aligned} \quad \text{Équation 6}$$

Où  $\nu$  est le coefficient de viscosité cinématique lié à la turbulence et  $\Gamma$  est le coefficient de diffusivité turbulente. La viscosité turbulente est donnée par la relation :

$$\nu_t = C_k \cdot L \cdot E^{1/2} \quad \text{Équation 7}$$

$C_k$  est une constante,  $L$  est la longueur de mélange et  $E$  est l'énergie cinétique turbulente. La longueur de mélange est un paramètre de la fermeture de la turbulence qui

traduit l'échelle spatiale des tourbillons associés à l'écoulement turbulent. L'énergie cinétique turbulente est définie :

$$E = \frac{1}{2}(u'^2 + v'^2 + w'^2) \quad \text{Équation 8}$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} E = \nu_t \left[ \underbrace{\left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2}_{(1)} \right] + \underbrace{\frac{g}{\rho_0} \nu_t \frac{\partial \rho}{\partial z}}_{(2)} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_t \frac{\partial E}{\partial z} \right)}_{(3)} - \varepsilon + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left( \nu_h \frac{\partial E}{\partial x} \right)}_{(4)} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial y} \left( \nu_h \frac{\partial E}{\partial y} \right)}_{(4)} \quad \text{Équation 9}$$

Dans l'équation de la variation temporelle de l'énergie cinétique turbulente (Eq. 9), on identifie quatre termes. Le premier représente la production d'énergie turbulente par cisaillement, le deuxième représente la flottabilité, le troisième représente la redistribution selon la verticale d'énergie du à la diffusion et le dernier représente la diffusion horizontale. Le terme  $\varepsilon$  représente la dissipation :

$$\varepsilon = \frac{C_\varepsilon \cdot E^{3/2}}{L_\varepsilon} \quad \text{Équation 10}$$

Dans cette expression (Equation 10),  $C_\varepsilon$  est une constante et  $L_\varepsilon$  est la longueur caractéristique de la dissipation. Il reste de déterminer les longueurs  $L$  et  $L_\varepsilon$ . On suppose qu'une particule fluide puisse effectuer un trajet  $L_h$  vers le haut ou alors  $L_b$  vers le bas, si elle convertie tout son énergie cinétique turbulente en énergie potentielle.

$$E(v) = \frac{g}{\rho_0} \int_z^{z+L_h} (\rho(z) - \rho(z')) dz' \quad \text{Équation 11}$$

$$E(v) = \frac{g}{\rho_0} \int_{z-L_b}^z (\rho(z) - \rho(z')) dz'$$

Les longueurs sont alors définies :

$$L = \min(L_h, L_b) \quad \text{Équation 12}$$

$$L_\varepsilon = \sqrt{L_h \cdot L_b}$$

Toutes ces équations (Equation 6-12) constituent la fermeture de la turbulence qui permet de résoudre les équations du mouvement pour le modèle Symphonie.

### 3.1.2 Equations de transport

Les quantités transportées de température (T) et salinité (S) sont données par :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} T = \frac{\partial (-T' w')}{\partial z} + \frac{Q_c}{\rho_o C_p} \frac{\partial I}{\partial z} \quad \text{Equation 13}$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} S = \frac{\partial (-S' w')}{\partial z} \quad \text{Equation 14}$$

Dans l'équation 13,  $Q_c$  est le flux solaire incident et  $C_p$  est le coefficient de chaleur massique.  $I$  est la fraction du flux solaire incident qui atteint la profondeur  $z$ . Les flux turbulents verticaux de température et de salinité sont modélisés par la diffusivité turbulente (Eq 6).

### 3.2 Domaine et grille de modélisation

La zone modélisée s'étend sur 711 km par 303 km recouvrant le golfe du Lion et une partie de la mer Ligure (Figure 1). Ce domaine est tourné de 31° dans le sens trigonométrique par rapport au repère géographique local usuel. Cette zone a été décomposée en mailles carrées de 3 km<sup>2</sup>. La grille de calcul choisie est de type Arakawa-C. Tous les paramètres biologiques ainsi que la température et la salinité sont évalués au centre de la maille. Les composantes horizontales de la vitesse sont calculées sur deux grilles décalées d'une demi maille de grille dans la direction x pour u, et dans la direction y pour v, comme indiquée dans la Figure 2.

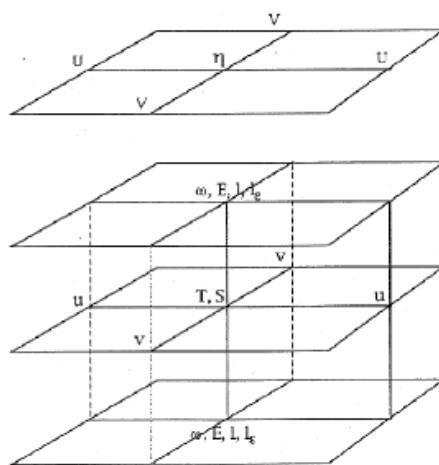


Figure 2: Grille du modèle Symphonie.

Bien que sur l'horizontale un maillage uniforme a été adapté, sur la verticale le maillage choisi utilisait des coordonnées de type sigma. Ce système permet de suivre la bathymétrie et maintenir un nombre de mailles constant (40) sur la verticale. Dans les eaux peu profondes, le rapprochement des niveaux sigma permet d'avoir une résolution très fine pour représenter les processus côtiers.

Un modèle physique est toujours dérivé des équations de Navier-Stokes tandis qu'un modèle d'écologie n'est pas dérivé de lois universelles. Par conséquent, un modèle biologique est très complexe, avec de nombreuses équations pour représenter l'ensemble des processus d'un milieu.

### **3.3 Le modèle biogéochimique Eco3M**

Un modèle biogéochimique couplé à un modèle hydrodynamique constitue un outil précieux pour améliorer la compréhension du fonctionnement des écosystèmes et en particulier les écosystèmes marins, qui sont des milieux particulièrement difficiles à échantillonner. On utilise des formulations mécanistes pour décrire des processus tels que la production primaire ou la prédation qui sont des processus importants dans le dynamique des cycles biogéochimiques. Le modélisateur choisit le nombre d'éléments à prendre en compte. Ces choix se font en trouvant un équilibre entre la complexité du modèle, le temps de calcul, la validité des formulations mécanistes et les connaissances déjà acquises sur le milieu d'étude.

Le code biogéochimique utilisé dans ce travail est le code ECO3M dans sa version adaptée à la Méditerranée nord-ouest (ECO3M-NWMED) et qui a été utilisée préalablement dans la thèse de M. Hermann (Hermann, 2007). Le Tableau 1 présente les variables biologiques et éléments chimiques retenus dans cette version d'Eco3M, ainsi que les types d'organismes de phytoplancton et zooplancton. Cette version prend en compte six groupes fonctionnels de plancton distincts, les bactéries et quatre types de nutriments différents. La matière organique dissoute (MOD) et particulaire (MOP) sont également considérées dans le but d'avoir une représentation complète de la boucle microbienne. Les éléments de l'activité planctonique marine sont représentés par leur concentration en différents éléments chimiques. On représente le carbone, l'azote, le phosphore, le silicium et la chlorophylle provenant du phytoplancton. Au sein du compartiment de zooplancton, nous distinguons trois groupes fonctionnels: le mésozooplancton, le microzooplancton et le nanozooplancton. De même, le compartiment de phytoplancton est divisé en trois sous-groupes: le microphytoplancton, le

nanophytoplancton et le picophytoplancton. Au cours d'une simulation, les organismes, la matière organique et les sels nutritifs sont quantifiés au moyen de leurs concentrations en éléments chimiques.

Tableau 1:Structure de l'écosystème représenté dans le modèle ECO3M-NWMED

compartiment	sous compartiment		mesuré en concentration de:
zooplancton	mészooplancton	copépodes	C
	microzooplancton	grands ciliés flagellés hétérotrophes	C
	nanozooplancton	petits ciliés flagellés bactéritores	C
Phytoplancton	microphytoplancton	diatomées	Chl,C,N,P,Si
	nanophytoplancton	hétérogène: cryptophytes chromophytes chrysophytes flagellés autotrophes	Chl,C,N,P
	picophytoplancton	synechococcus	Chl,C,N,P
Bactéries	Néant		C
matière organique particulaire	particules de grande taille ( $>50\mu\text{m}$ )		Si,C,N,P
	particules de petite taille ( $<50\mu\text{m}$ )		Si,Chl,C,N,P
matière organique dissoute	Néant		C
sels nutritifs	Nitrate		N
	Phosphate		P
	Ammonium		N
	Silicate		Si

L'ensemble des processus biogéochimiques pris en considération est schématisé sur Figure 3 .Les formulations mathématiques de ces processus font l'objet de la section suivante.

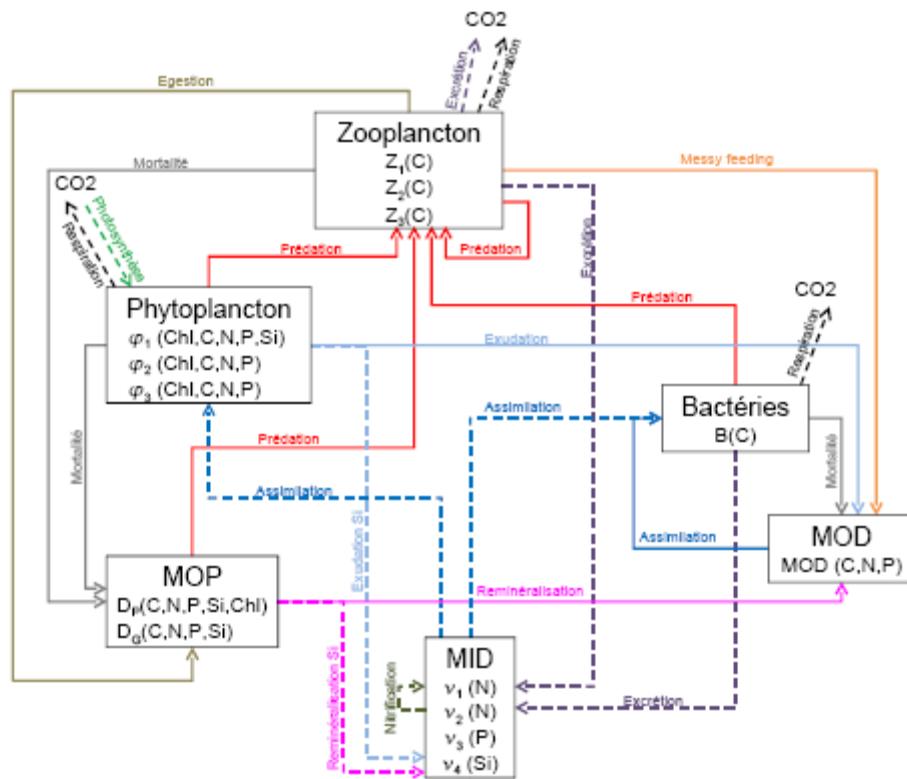


Figure 3: Interactions et processus entre les compartiments d'ECO3M-NWMED. Figure tirée de Hermann (2007)

### 3.3.1 Zooplankton

Le zooplancton exerce une prédation sur le phytoplancton, les bactéries, la matière organique particulaire et aussi sur le zooplancton. Les fonctions biogéochimiques qui caractérisent le modèle planctonique proviennent du modèle d'Anderson et Pondaven (2003). Chaque type de zooplancton a des préférences spécifiques pour certains types de proies. De façon générale, chaque type de zooplancton exerce une prédation sur des organismes plus petits d'un ou deux ordres de taille. Quand un zooplancton mange une proie, une partie est ingérée et une partie est rejetée dans le milieu (*messy feeding*). Une part de ce qu'ingère le zooplancton est rejetée lors de la respiration et l'égestion. Enfin, le zooplancton excrète de la matière inorganique dissoute afin de maintenir ses ratios internes constants. Le dernier processus qui contrôle le compartiment zooplancton est la mortalité (naturelle et par prédation), qui produit de la matière organique particulaire.

Dans les équations qui suivent, on utilisera  $Z$  pour représenter les 3 compartiments de zooplancton,  $\varphi$  pour les trois compartiments de phytoplancton,  $P$  pour la proie et  $X$  pour l'élément chimique. Quand il y a une expression avec un exposant, comme par exemple  $X^Y$ , cela indique la concentration en  $Y$  dans le compartiment  $X$ .

Tableau 2 : Processus des groupes fonctionnels de zooplancton

<i>Equations des groupes fonctionnels de zooplankton</i>	<i>no</i>
$\text{prédatation.zoo}(Z, P, X) = \frac{\gamma \times \varphi_p \times (P^C)^2 \times \left(\frac{P^X}{P^C}\right) \times Z^C}{k_z \times (\sum_p \varphi_p \times P^C) + \sum_p (\varphi_p \times (P^C)^2)}$	1.1
$\text{messy.feed}(Z, P, X) = \sum_p \beta \times \text{prédatation.zoo}(Z, P, X)$	1.2
$\text{egestion.zoo}(Z, P, X) = \sum_p (1 - \epsilon_z)(1 - \beta) \times \text{prédatation.zoo}(Z, P, X)$	1.3
$\text{respiration.zoo}(Z) = k_{resp} \times \sum_p \epsilon_z \times (1 - \beta_p) \times \text{prédatation.zoo}(Z, P, C)$	1.4
$\text{nourriture.zoo}(Z, X) = \sum_p \epsilon_z \times (1 - \beta) \times \text{prédatation.zoo}(Z, P, X)$	1.5
$\text{nourriture.zoo}(Z, C) = \sum_p \epsilon_z \times (1 - \beta)(1 - k_{resp}) \times \text{prédatation.zoo}(Z, P, C)$	
$\text{excrétion.zoo}(Z, X) = \text{nourriture.zoo}(Z, X) \times (1 - (X; C))$	1.6
$\text{excrétion.zoo}(Z, X_2) = \text{nourriture.zoo}(Z, X_2) - \frac{X_2; C}{X_1; C} \times \text{nourriture.zoo}(Z, X_1)$	1.7
$\text{excrétion.zoo}(Z, C) = \text{nourriture.zoo}(Z, C) - \frac{1}{X_1; C} \times \text{nourriture.zoo}(Z, X_1)$	
$\text{mort.zoo}(Z, X) = \tau_{mort} \times (X; C) \times (Z^C)^2$	1.8
$\text{mort.zoo.detritus.grand}(Z, X) = (1 - \delta) \times \text{mort.zoo}(Z, X)$	
$\text{mort.zoo.detritus.petit}(Z, X) = \delta \times \text{mort.zoo}(Z, X)$	

## Prédation

La prédation zooplanctonique dépend de plusieurs paramètres : le taux de prédation du zooplancton,  $\gamma$ , la préférence du zooplancton pour la proie P, et la constante de demi saturation de prédation du zooplancton, k (Equation 1.1) .

## Messy feeding

Une proportion  $\beta$  de la prédation n'est pas assimilée par le zooplancton. Cette partie produit de la matière organique dissoute (Equation 1.2).

## Egestion

L'égestion dépend de l'efficacité d'assimilation,  $\epsilon_g$ . Cette constante, comprise entre 0 et 1, sert à quantifier la part de nourriture qui sert réellement à la croissance. La part qui n'est pas utilisée est égestée sous forme de détritus (Equation 1.3) .

## Respiration

Lors de la respiration, le zooplancton produit du dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ). Cette fonction dépend du coût respiratoire du zooplancton,  $k_{\text{resp}}$  (Equation 1.4).

## Excrétion

L'excrétion est le processus qui permet au zooplancton de maintenir constante sa composition suite à l'assimilation de la nourriture. La partie réellement assimilée par l'organisme est donnée par l'équation 1.5.

- Dans le cas où l'élément limitant est le carbone, l'organisme excrète de l'ammonium et du phosphate afin de retrouver leurs ratios internes. (Equation 1.6)
- Dans le cas où l'élément limitant est l'azote, le zooplancton rejette du phosphate et du carbone. Dans le cas où l'élément limitant est le phosphate, l'organisme rejette de l'ammonium et du  $\text{CO}_2$ . Soit  $X_1$  l'élément limitant et  $X_2$  l'élément (autre que carbone) rejeté. (Equation 1.7)

## Mortalité

Le zooplancton meurt suite à la prédation par les échelons trophiques supérieurs et aussi naturellement. La mort du zooplancton produit des particules organiques de petites et grandes tailles (Equation 1.8). La constante  $\delta$  représente la partie qui se transforme en petites particules et la constante  $r_{\text{mort}}$  représente le taux de mortalité.

### 3.3.2 Phytoplancton

La dynamique du phytoplancton est contrôlée par plusieurs processus. On nomme production primaire brute, exsudation du carbone organique dissous, respiration, absorption des nutriments, synthèse de la chlorophylle et mortalité naturelle. Ces fonctions sont détaillées ci-dessous et proviennent de Baklouti *et al.* (2006).

Dans les équations qui suivent, on utilisera  $P$  pour représenter les 3 compartiments de phytoplancton,  $P$  pour la proie et  $X$  pour l'élément chimique.

Tableau 3 : Processus des groupes fonctionnels de phytoplancton

<i>Equations des groupes fonctionnels de phytoplancton</i>	<i>no</i>
$\text{production.phyto}(\varphi) = a_{chl} \times \Phi_{\max} \times p_\varphi \times E_{PAR}(z) \times f_T \times \varphi^{chl}$	2.1
$f_T(T) = Q10^{\frac{(T-T_1)}{T_2}}$	2.2
$p_\varphi = \frac{1}{1 + (\tau \times \sigma \times E_{PAR}(z)) + (\tau \times \frac{k_d}{k_p} \times (\sigma \times E_{PAR}(z))^2)}$	2.3
$\mu_{\max}(\varphi) = \frac{(Chl:C)}{\varphi^{chl}} \times \text{production.phyto}(\varphi)$	2.4
$\mu(\varphi) = gml(\varphi) \times \mu_{\max}(\varphi)$	2.5
$f_Q(X_L:C) = 1 - \frac{(X_L:C)_{\min}}{(X_L:C)}$	2.6
$f_Q(X_L:C) = \frac{(X_L:C) - (X_L:C)_{\min}}{(X_L:C) - (X_L:C)_{\min} + \beta_X}$	2.7
$f_Q(Si:C) = \frac{(Si:C) - (Si:C)_{\min}}{(Si:C) - (Si:C)_{\min} + \beta_{Si}} \times \frac{(N:C)^{10}}{(N:C)^{10} + 0.1^{10}}$	2.8
$\text{exudation.C}(\varphi) = (1 - gml(\varphi)) \times \text{production.phyto}(\varphi)$	2.9
$\text{respiration.phyto}(\varphi) = k_{resp} \times \text{production.phyto}(\varphi) \times gml(\varphi)$	2.10
$\text{absorption.phyto}(S, \varphi) = \text{production.phyto}(\varphi) \times (X:C)_{\max} \times \left( \frac{S^E}{S^E + K_S} \right)$	2.11
$\text{exudation.phyto}(X, \varphi) = (1 - f_Q(X, \varphi)) \times \text{absorption.phyto}(X, \varphi)$	2.12
$f_Q(X, \varphi) = \left( \frac{(X:C)_{\max} - (X:C)}{(X:C)_{\max} - (X:C)_{\min}} \right)^2$	2.13
$\text{respiration.phyto.sel}(S, \varphi) = r_S \times \text{absorption.phyto}(S, \varphi)$	2.14
$\text{synthèse.chl}(\varphi) = \rho_{chl}(\varphi) \times \text{absorption.phyto}(N, \varphi)$	2.15
$\rho_{chl}(\varphi) = \frac{(Chl:N)_{\max} \times \mu_\varphi}{a_{chl} \times \Phi_{\max} \times E_{PAR}(z) \times (Chl:C)} \times \frac{1 - \frac{(Chl:N)}{(Chl:N)_{\max}}}{1.05 - \frac{(Chl:N)}{(Chl:N)_{\max}}}$	2.16
$\text{mort.phyto}(\varphi, X) = \tau_{mort} \times f_T \times X$	2.17

## Production primaire brute

La fonction de la production primaire brute est donnée par l'équation 2.1. On explique ses termes :

- $a_{chl}$  est le coefficient d'absorption de la chlorophylle
- $\Phi_{max}$  est le rendement quantique maximal pour le phytoplancton
- $f_t$  est une fonction de régulation (Equation 2.2) de la photosynthèse par la température, avec T1, T2, Q10 constants.
- $P_o$  est le pourcentage de photosystèmes II ouverts (Equation 2.3)
- $\tau$  est le temps de renouvellement des photosystèmes de type II
- $\sigma$  est la section efficace des photosystèmes de type II
- $E_{PAR}(z)$  est l'éclairement disponible pour la photosynthèse à une profondeur (z) donnée
- $k_d$  est la constante d'endommagement lié à un éclairement trop fort
- $k_r$  est la constante de réparation, liée au temps de réparation nécessaire après un éclairement trop fort.

Quand on est dans la situation où aucun sel nutritif n'est limitant, on observe le taux de croissance maximale, telle donnée par l'équation 2.4.

### L'exsudation du carbone organique dissous

Quand le phytoplancton fait face à un excédent de carbone par rapport aux autres éléments, il exsude du carbone organique dissous (COD). Nous utilisons une fonction  $gml$  (*growth multi-nutrient limitation*) pour représenter le taux de croissance contrôlé par la disponibilité en sels nutritifs (Equation 2.5).

La fonction  $gml$  utilise les quotas seuil  $(X_L:C)_{max}$  et  $(X_L:C)_{min}$  pour déterminer si il y a croissance et si cette croissance est maximale :

$$\begin{aligned} gml(\varphi) &= 0 && \text{si } (X_L:C) < (X_L:C)_{min} \\ gml(\varphi) &= f_Q(X_L:C) && \text{si } (X_L:C)_{min} \leq (X_L:C) \leq (X_L:C)_{max} \\ gml(\varphi) &= 1 && \text{si } (X_L:C) > (X_L:C)_{max} \end{aligned}$$

Dans ces expressions,  $X_L$  indique l'élément limitant dans la cellule. Il reste à définir la fonction  $f_q$  de quota, qui varie selon le type de phytoplancton et l'élément. Pour le picophytoplancton, la limitation est donnée par l'équation 2.6, pour le nanophytoplancton et microphytoplancton elle est donnée par l'équation 2.7, sauf pour les silicates qui suivent

l'équation 2.8. Puisque l'absorption des silicates dépend de l'azote, la fonction de quota pour le silicium dans le cas du microphytoplancton est différente des autres fonctions.

Avec toutes ces fonctions, nous pouvons construire une expression pour l'exsudation du carbone organique dissous (Equation 2.9)

### **La respiration autotrophe**

La respiration par le phytoplancton est donnée par l'équation 2.10, où  $k_{\text{resp}}$  est le pourcentage de production primaire nette respirée.

### **L'absorption des nutriments**

Pour un sel nutritif S, l'absorption est donnée par l'équation 2.11, où  $S^E$  est la concentration dans le milieu ambiant du sel nutritif S.

### **L'exsudation de matière organique dissoute à la suite de l'absorption des nutriments**

Tout ce qui n'est pas assimilé par l'organisme est rejeté sous forme organique dissoute, sauf le silicate, qui est rejeté directement sous forme inorganique. L'exsudation est faite afin de réguler la composition interne du phytoplancton. La fonction d'exsudation est donnée par l'équation 2.12. La fonction  $f_Q$  est une fonction de quota qui régule l'exsudation selon cette loi qui fait intervenir les rapports maximaux et minimaux de (X :C) (Equation 2.13).

### **La respiration liée à l'absorption de sels nutritifs**

L'énergie nécessaire pour l'absorption des sels nutritifs est donnée par la respiration. Chaque sel nutritif a un coût respiratoire différent (Equation 2.14), où  $r_s$  est le coefficient du coût respiratoire pour le sel nutritif S.

### **La synthèse de la chlorophylle**

La synthèse de la chlorophylle (Equation 2.15) dépend de l'absorption de l'azote et d'une fonction  $\rho$  (Equation 2.16) qui décrit l'évolution du rapport Chl :N. Le facteur de droite est asymptotique et représente le fait que quand le rapport Chl :N se rapproche du rapport maximal, le phytoplancton n'a plus besoin de produire de la chlorophylle.

### **La mortalité naturelle**

La mortalité naturelle représente implicitement la mortalité due aux attaques virales et ce processus produit des particules de petite taille. La fonction de mortalité est énoncée dans l'équation 2.17, où  $\mathbf{f}_{\text{mort}}$  est le taux de mortalité,  $f_t$  est la fonction de la température décrite ci-dessus dans la section production primaire, et  $X$  la concentration de l'élément concerné.

### 3.3.3 Bactéries

Dans le modèle utilisé pour ce travail (Anderson et Pondaven, 2003), les bactéries absorbent la matière organique et inorganique dissoute et ont une composition interne constante. Une composition constante implique que les bactéries excrètent des sels nutritifs et respirent pour rejeter du CO<sub>2</sub>. La mortalité bactérienne produit de la matière organique dissoute.

#### L'absorption et l'excrétion de la matière inorganique dissoute

Les bactéries ont une composition interne qu'elles maintiennent constante grâce aux processus d'absorption, excréption et respiration. L'absorption de nutriments est limitée par une fonction d'absorption maximale (Equation 3.3), où  $\Delta(v)$  est un terme Michaëlien qui traduit la limitation liée à la disponibilité en nutriment  $v$  en fonction de la constante de demi saturation de l'absorption du nutriment  $v$  (équation 3.4).

Les ratios de nourriture assimilée sont donnés par :

$$(X:C)_{\text{nour}} = \frac{\text{absorption.bact.mod}(X)}{\epsilon_{GB} \times \text{absorption.bact.mod}(C)}$$

Les composés exsudés par les bactéries sont fonction de l'élément limitant leur croissance. Nous identifions trois cas :

1. L'élément limitant est le carbone, *i.e.* (N:C)<sub>nour</sub> > (N:C) et (P:C)<sub>nour</sub> > (P:C). Il y a alors une excrétion d'ammonium et de phosphate. (équation 3.5)
2. Il y a un déficit de X<sub>1</sub> dans la nourriture. Il y a aussi un déficit en carbone par rapport à X<sub>2</sub>, *i.e.* (X<sub>1</sub>:C)<sub>nour</sub> ≤ (X<sub>1</sub>:C) et (X<sub>2</sub>:C)<sub>nour</sub> > (X<sub>2</sub>:C)<sub>nour</sub>. Dans ce cas, les bactéries excrètent l'élément X<sub>2</sub> sous forme inorganique dissoute et absorbent l'élément X<sub>1</sub>. Les équations 3.6 décrivent cette situation.
3. Dans ce troisième cas, X<sub>1</sub> et X<sub>2</sub> sont déficitaires par rapport au carbone mais l'élément le plus limitant est X<sub>1</sub>. Les bactéries absorbent du phosphate et de l'ammonium, dans la limite de l'absorption maximale. L'absorption du carbone organique dissous (COD) est réduite. Les équations 3.7 décrivent cette situation.

Tableau 4 : Equations du groupe fonctionnel des bactéries

<i>Equations du groupe fonctionnel des bactéries</i>	<i>no</i>
$\text{absorption.bact.mod}(X) = V_{\max} \times \left( \frac{\text{MOD}^C}{\text{MOD}^C + K_{\text{MOD}^C}} \right) \times \frac{\text{MOD}^X}{\text{MOD}^C} \times B^C$	3.1
$\omega_B = \epsilon_{GB} \times \text{absorption.bact.mod}(C)$	3.2
$\text{absorption.bact.max}(X) = V_{BMAX} \times (X; C) \times \Lambda(v) \times B^C$	3.3
$\Lambda(v) = \frac{v}{v + K_{Bv}}$	3.4
$\text{excrétion.bact}(X) = \text{absorption.bact.mod}(X) - \omega_B \times (X; C)$	3.5
$\text{absorption.bact.mid}(X) = 0$	
	3.6
$\text{absorption.bact.mid}(X_1)$ $= \min[\text{absorption.bact.max}(X_1), \omega_B \times (X_1; C)]$ $- \text{absorption.bact.mod}(X_1)]$	
$\text{excrétion.bact}(X_1) = 0$	
$\text{excrétion.bact}(X_2) = \text{absorption.bact.mod}(X_2) - \omega_B \times (X_2; C)$	
$\text{absorption.bact.mid}(X_2) = 0$	
$\omega_B = \frac{\text{absorption.bact.mod}(X_1) + \text{absorption.bact.mid}(X_1)}{(X_1; C)}$	
$Y = \min \{ \text{absorption.bact.max}(X_2), \omega_B \times (X_1; C) - \text{absorption.bact.mod}(X_1) \}$	3.7
$\text{absorption.bact.mid}(X_2)$ $= \min \{ \text{absorption.bact.max}(X_2), (Y + \text{absorption.bact.mod}(X_1))$ $\times (X_2; X_1) - \text{absorption.bact.mod}(X_2) \}$	
$\text{excrétion.bact}(X_2) = \text{excrétion.bact}(X_1) = 0$	
$\text{absorption.bact.mid}(X_1)$ $= \min \{ Y, (\text{absorption.bact.mid}(X_2) + \text{absorption.bact.mid}(X_2))$ $\times (X_1; X_2) - \text{absorption.bact.mod}(X_1) \}$	
$\text{respiration.bact} = \frac{1 - \epsilon_{GB}}{\epsilon_{GB}} \times \omega_B$	3.8
$\text{mortalité.bact}(X) = \tau_{mort} \times B^C \times (X; C)$	3.9
$\text{reminéralisation}(X, D) = \tau_{remX} \times Q10_{rem}^{\left(\frac{T-T_{ref}}{T_{ref}}\right)} \times D^X$	3.10
$\text{nitrification} = \tau_{nitri} \times Q10_{nitri}^{\left(\frac{T-T_{nitri}}{T_{nitri}}\right)} \times \left(1 - \frac{E_{PAR}(Z)}{E_{PAR}(0)}\right) \times [NH_4^+]$	3.11

## La croissance bactérienne

La croissance bactérienne ( $\omega_B$ ) dépend de l'absorption de carbone organique dissoute (Equation 2.2), où  $\epsilon_{GB}$  est l'efficacité bactérienne est définie comme une constante.

## L'absorption de matière organique dissoute

L'absorption de la matière organique dissoute est donnée par l'équation 2.1, où  $V_{max}$  est le taux de croissance maximale bactérienne,  $K_{MODC}$  est la constante de demi saturation de l'absorption de carbone organique dissoute.

## Respiration bactérienne

La respiration bactérienne est liée à la croissance bactérienne. Elle permet le rejet du CO<sub>2</sub> selon la formule 3.8.

## Mortalité bactérienne

La mortalité des bactéries, qui produit de la MOD, est donnée par la fonction 3.9, où  $r_{mort}$  est le taux de mortalité pour les bactéries. Cette fonction conclut la description fonctionnelle des bactéries. Néanmoins, il existe d'autres processus qui dépendent de l'activité bactérienne qui font l'objet de la section suivante.

### 3.3.4 Autres fonctions liées à l'activité bactérienne

La nitrification et la reminéralisation de la matière organique particulaire sont dues aux activités bactériennes, mais puisque les fonctions ne font pas intervenir les bactéries, on les classe à part. La reminéralisation produit de la matière organique dissoute (pour C,N,P et Chl) et inorganique dissoute (pour Si). La nitrification est le processus qui transforme l'ammonium en nitrate.

## Reminéralisation de la matière organique particulaire

La reminéralisation de la MOP, qui est noté D dans la fonction suivante, est due à l'activité bactérienne. Cela produit de la MOD dans le cas de C, N, P et Chl et de la matière inorganique dissoute (MID) dans le cas du Si. Cette fonction ne fait pas intervenir de façon directe les bactéries, bien que ce processus nécessite leur activité. Dans la fonction 3.10, le deuxième terme est une fonction empirique de régulation par la température, avec  $T_{ref}$  la température de référence,  $Q10_{rem}$  une constante et  $T_{rem,X}$  le taux de reminéralisation.

## Nitrification

Ce processus est la transformation de l'ammonium en nitrate. Cette fonction dépend de la température et de la lumière disponible (équation 3.11). Comme dans la fonction précédente, ici le deuxième terme est une fonction de régulation par la température, avec  $T_{\text{nitr}}$  la température de référence.  $T_{\text{nitr}}$  est le taux maximum de nitrification à 0°C. Ceci termine la description des fonctions biogéochimiques d'Eco3M-NWMED.

### 3.3.5 Fonctions de flux et paramètres du modèle

Les équations du modèle biogéochimique qui décrivent les variations temporelles des variables d'état du modèle se trouvent dans l'annexe 1. Les paramètres sont listés dans l'annexe 2.

## 3.4 Le couplage

Nous avons vu les équations qui régissent chaque modèle, Symphonie et Eco3M-NWMED. Chacun joue un rôle dans l'évolution des concentrations biogéochimiques des différents traceurs. Le modèle Symphonie permet de déplacer les traceurs biologiques dans le champ de vitesse et avec la diffusion turbulente. Le modèle Eco3M-NWMED permet de calculer l'évolution temporelle de ces mêmes quantités. Afin de représenter les variations dues aux processus physiques et aux tendances biologiques, nous faisons appel à l'équation de la conservation :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial(w - w_{\text{sed}})C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_v \frac{\partial C}{\partial z} \right) + \frac{\partial C}{\partial t}_{\text{bio}} \quad \text{Équation 13}$$

Le premier terme est la variation temporelle de la concentration C. Les trois termes suivants représentent l'advection, avec  $w_{\text{sed}}$  la vitesse de chute pour un traceur non dissous. Les deux derniers termes représentent la diffusion et la variation temporelle due aux processus biogéochimiques. L'annexe 1 liste le détail des processus biogéochimiques contribuant à la variation temporelle de chaque traceur biogéochimique.

L'échelle de temps pour les processus physiques est très courte, de l'ordre de quelques secondes. Puisque les processus biogéochimiques ont une échelle de temps de l'ordre de l'heure, le modèle fait appel aux fonctions biogéochimiques toutes les heures. Ce choix logique permet également de gagner en temps de calcul. Sur les machines actuelles les plus puissantes du cluster du COM, une année de simulation requiert environ 48h de calcul.

### 3.4.1 Atténuation de la lumière

L'éclairement est un paramètre essentiel pour l'activité photosynthétique du phytoplancton. Pour quantifier ce paramètre, nous utilisons le PAR (*Photosynthetically Available Radiation*). Le PAR à la surface de l'océan est donné en fonction du flux de radiation solaire net  $I_s$  :

$$E_{PAR}(0) = p_\lambda \times I_s$$

La constante  $p_\lambda$  représente la portion du flux de radiation qui est utilisable par le phytoplancton. En profondeur, nous séparons les ondes en deux groupes :  $s$  pour les longueurs d'ondes courtes et  $l$  pour les longueurs d'ondes longues. Ces deux types de longueurs d'ondes sont absorbées différemment dans le milieu :

$$E_{PAR,l}(z) = 0.5 \times E_{PAR}(0) \times e^{-(\lambda_l + \lambda_{Chl,l}(Chl(z))^{1/l})z} \quad \text{Équation 14}$$

$$E_{PAR,s}(z) = 0.5 \times E_{PAR}(0) \times e^{-(\lambda_s + \lambda_{Chl,s}(Chl(z))^{1/s})z} \quad \text{Équation 15}$$

Où les  $\lambda$ ,  $\lambda_l$  et  $\lambda_s$  sont constantes.

### 3.4.2 Conditions aux limites

A la surface comme au fond, les flux turbulents de la matière sont nuls. Aux embouchures des fleuves, nous prenons une interpolation linéaire de mesures mensuelles et qui proviennent de la banque hydrologique de France (<http://hydro.eaufrance.fr>) des concentrations en nitrate, ammonium, carbone organique dissous et phosphate. Les fleuves pris en compte sont le Rhône, l'Hérault, l'Orb et l'Aude. Aux frontières latérales ouvertes, nous mettons en place une zone tampon. Dans cette zone, il n'y a pas d'advection des traceurs biologiques. Dans les résultats présentés, la zone tampon n'est pas incluse dans les figures.

## 4 Résultats et discussion

### 4.1 Validation du modèle

Avant de pouvoir utiliser le modèle comme un outil diagnostique dans l'étude d'une structure tourbillonnaire, il faut au préalable vérifier sa validité. Ici, nous utilisons plusieurs types de mesures *in situ* disponibles pour l'année de simulation 2001, ainsi que des mesures satellitaires afin de valider le plus complètement possible cette version du modèle couplé.

#### 4.1.1 Détermination du spin-up

Le modèle Eco3M-NWMED est initialisé avec des profils verticaux provenant d'un échantillonnage à la station Dyfamed, ces profils sont appliqués uniformément sur toute la zone d'étude. Afin de déterminer le temps au bout duquel les résultats ne dépendent plus de ces profils initiaux, nous comparons deux simulations: la première utilise une initialisation provenant d'un échantillonnage fait fin 2000 (juste avant le début de la simulation) et la deuxième utilise une initialisation provenant d'un échantillonnage réalisé fin 2004 qui montre une situation contrastée (davantage de nutriments et moins de chlorophylle). La Figure 4 nous montre que le modèle couplé se détache de l'initialisation à partir du 100<sup>e</sup> jour de simulation au site SOMLIT de Banyuls. D'autres séries temporelles des autres stations SomLIT confirment ces mêmes résultats. Nous constatons alors que le temps de spin up du modèle biogéochimique est d'une centaine de jours. Par la suite, nous utiliserons uniquement les sorties du modèle à partir du 100<sup>e</sup> jour, soit à partir du 15 avril 2001.

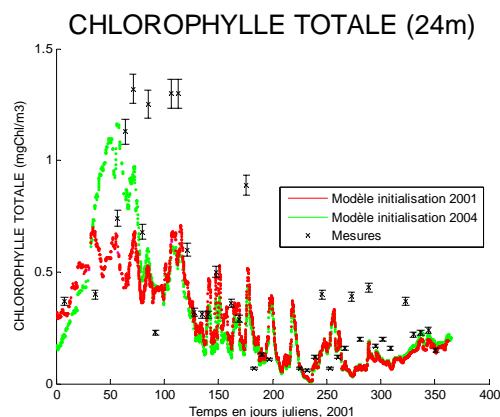


Figure 4: Série temporelle de la concentration en chlorophylle à 24m à la station SomLIT de Banyuls avec 2 profils d'initialisation différents. On considère que la différence entre les deux sorties de modèle est négligeable après le 100<sup>e</sup> jour.

#### 4.1.2 Validation à l'aide d'images satellites SeaWiFS

Une comparaison entre le modèle et des images satellites de la couleur de l'eau permet une validation globale des résultats du modèle en surface. A partir de mesures de la couleur de l'eau fait par le capteur SeaWiFS, on utilise un algorithme pour déduire la concentration en chlorophylle a de la couche de surface. Ici, l'algorithme OC5, (Gohin et al, 2002) a été utilisé car il est le plus adapté aux milieux côtiers riches en matière en suspension. Nous comparons une image de la période printanière, une image de la période du tourbillon

étudié ci-après et une image en automne aux sorties correspondantes du modèle. En annexe 3, l'ensemble des comparaisons disponibles a été ajouté.

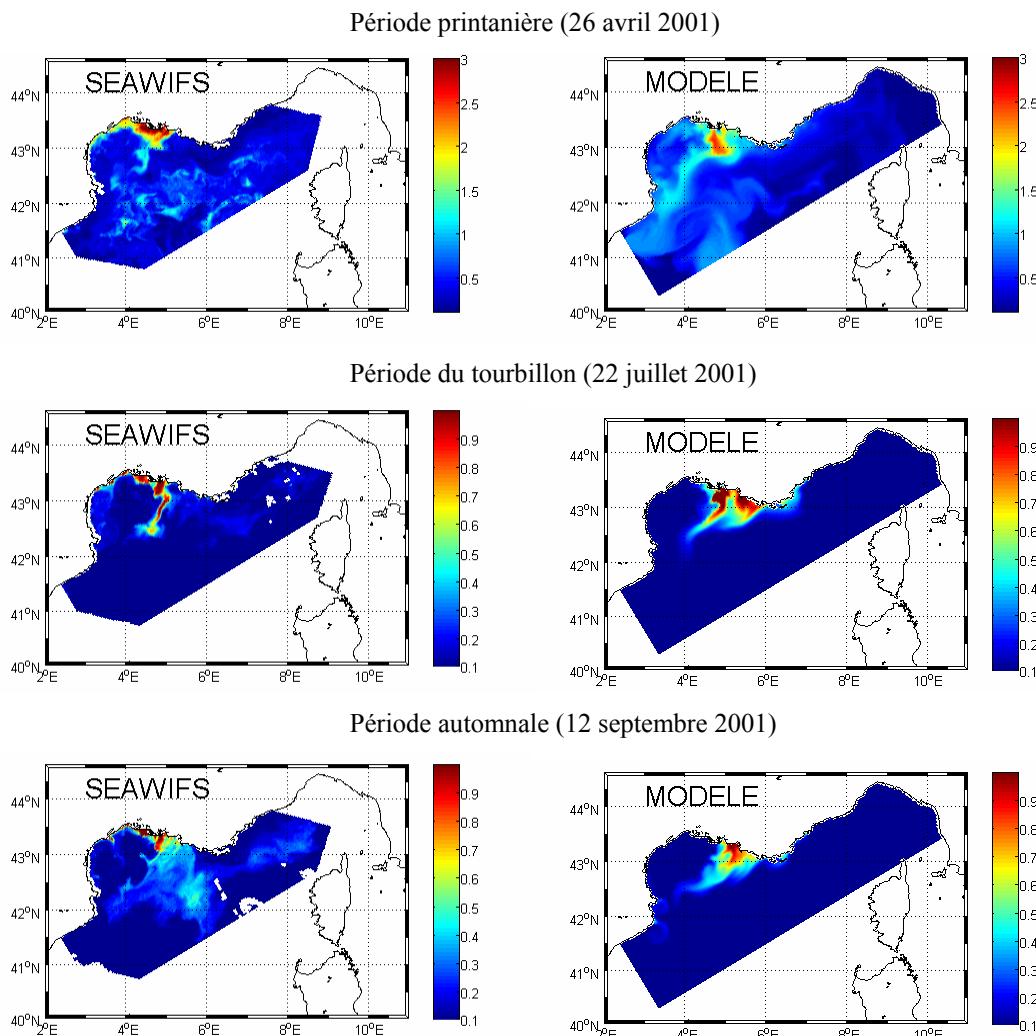


Figure 5: Comparaison entre images satellites traitées avec l'algorithme OC5 et sorties du modèle. La concentration en chlorophylle est exprimée en mg/m<sup>3</sup>.

Sur l'image du printemps, le modèle offre une représentation spatiale et quantitative correcte dans la zone est et sud-est du plateau du golfe du Lion, en revanche, le modèle sous-estime l'augmentation observée sur le pourtour nord et ouest du golfe du Lion. Dans la zone convective au large, le modèle ne retrouve pas les augmentations très localisées de chlorophylle bien que quantitativement, le niveau de chlorophylle au large sur toute la zone d'étude soit du même ordre de grandeur que dans l'image satellitaire. Nous remarquons également une surestimation du modèle le long de la côte Catalane. Pendant la période du tourbillon, nous voyons que la quantité de chlorophylle dans le panache du Rhône est correctement représentée. Le modèle ne retrouve cependant pas les augmentations très localisées à la côte sur le pourtour nord et nord-ouest (provenant probablement d'*upwelling*

côtiers), mais prévoit au contraire une augmentation à l'est du Rhône non observée dans la réalité. On peut noter que le modèle couplé ne représente pas l'efflorescence observée en surface au large et en mer Ligure sur l'image de la période automnale. En revanche, la quantité de chlorophylle prédictive pour le panache du Rhône est proche des mesures et s'étend vers le sud-ouest comme observé.

#### **4.1.3 Validation à l'aide des mesures *in situ* (Campagnes SARHYGOL 2001)**

Les images satellites permettent une validation du modèle seulement en surface tandis que les mesures *in situ* sont indispensables car on peut comparer des résultats en profondeur et analyser des paramètres tels le nitrate et phosphate qui ne sont pas actuellement directement disponibles à partir des images satellites. Les campagnes SARHYGOL (Suivi Automatique Régulier de l'Hydrologie du Golfe du Lion) avaient comme objectif d'acquérir des données courantologiques et hydrologiques sur le golfe du Lion. Ces missions étant de courte durée ( $\leq 48\text{h}$ ), et donc peuvent être considérées comme synoptiques. Nous comparons les mesures prises tout au long du trajet du bateau avec une sortie correspondant à la période de la campagne. Les données biogéochimiques disponibles sur cette campagne sont la chlorophylle totale, le nitrate et le phosphate ainsi que la température.

Sur la Figure 6 nous comparons les mesures prises pendant la campagne Sarhygol 7 (30 avril-2 mai 2001) avec une sortie du modèle du 1<sup>e</sup> mai 2001. Dans la section A, nous voyons une correspondance très correcte entre les mesures et les concentrations en chlorophylle du modèle sur la partie ouest du plateau du golfe du Lion. La concentration en chlorophylle dans le panache du Rhône ne dépasse pas les  $3\text{mg/m}^3$  dans le modèle, tandis que les données contiennent des valeurs supérieures à  $6\text{mg/m}^3$ . On voit tout de même que le gradient de chlorophylle est respecté, malgré ce manque de correspondance quantitative. Dans la section B, les températures dans la sortie du modèle et dans les données sont proches, donnant une validation satisfaisante. Quant aux comparaisons modèles mesures dans le cas du nitrate et du phosphate (sections C et D), les performances du modèle sont plus faibles, surtout dans la partie ouest du golfe du Lion. On retrouve des concentrations quasiment nulles dans le modèle sur cette partie du domaine, ceci n'étant pas en accord avec les données. Au niveau du panache du Rhône, les concentrations en nitrate du modèle ont tendance à se rapprocher des valeurs mesurées et les concentrations en phosphate sont toujours sous-estimées.

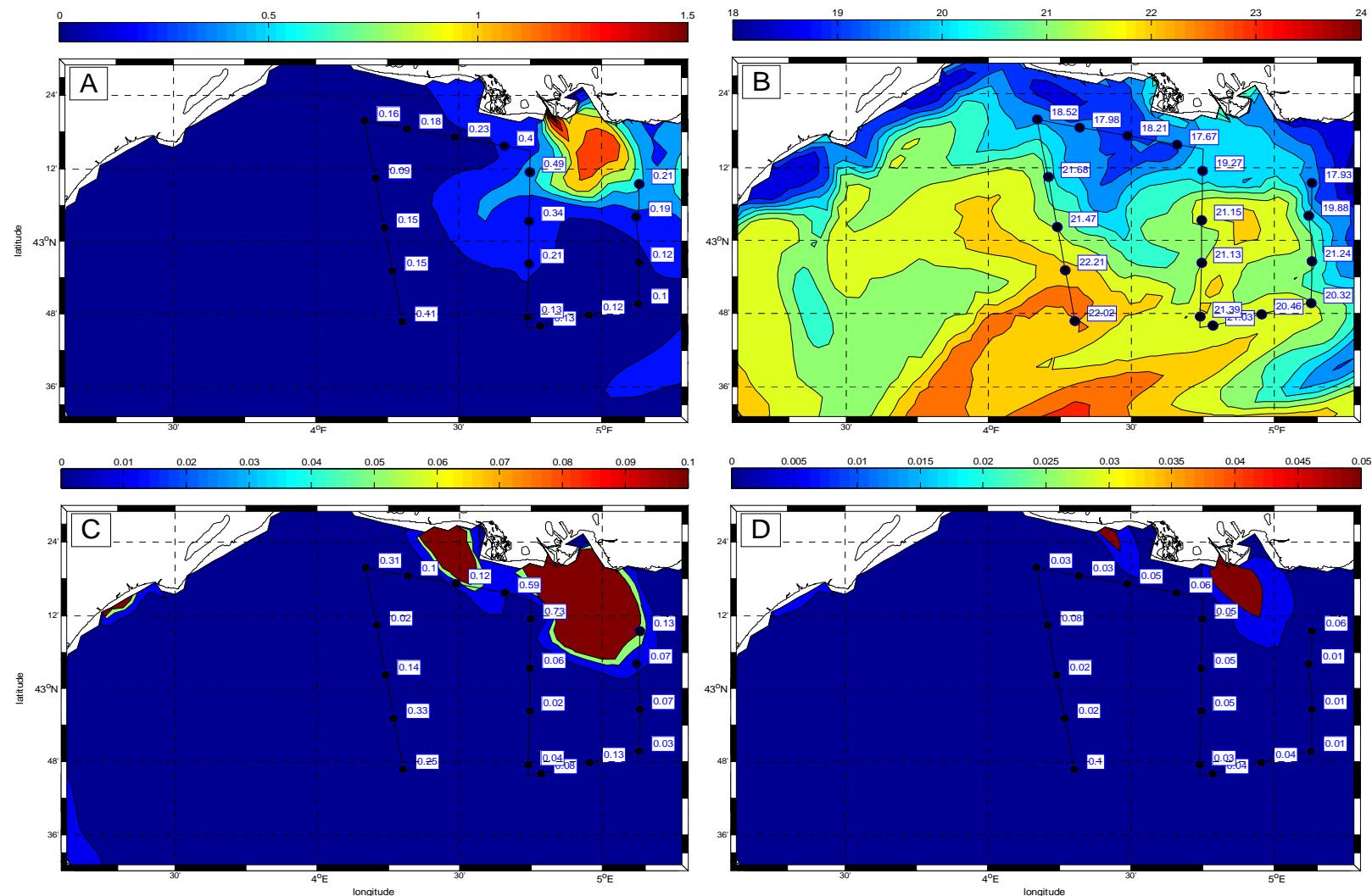


Figure 6: Sarhygol 7 (30 avril -2 mai 2001) : Trajet de la campagne avec données encadrées, superposé à une sortie du modèle le 1<sup>er</sup> mai 2001. A : Chlorophylle (mgChl/m<sup>3</sup>). B : Température (oC). C : Nitrate(mmolN/m<sup>3</sup>). D :Phosphate (mmolP/m<sup>3</sup>)

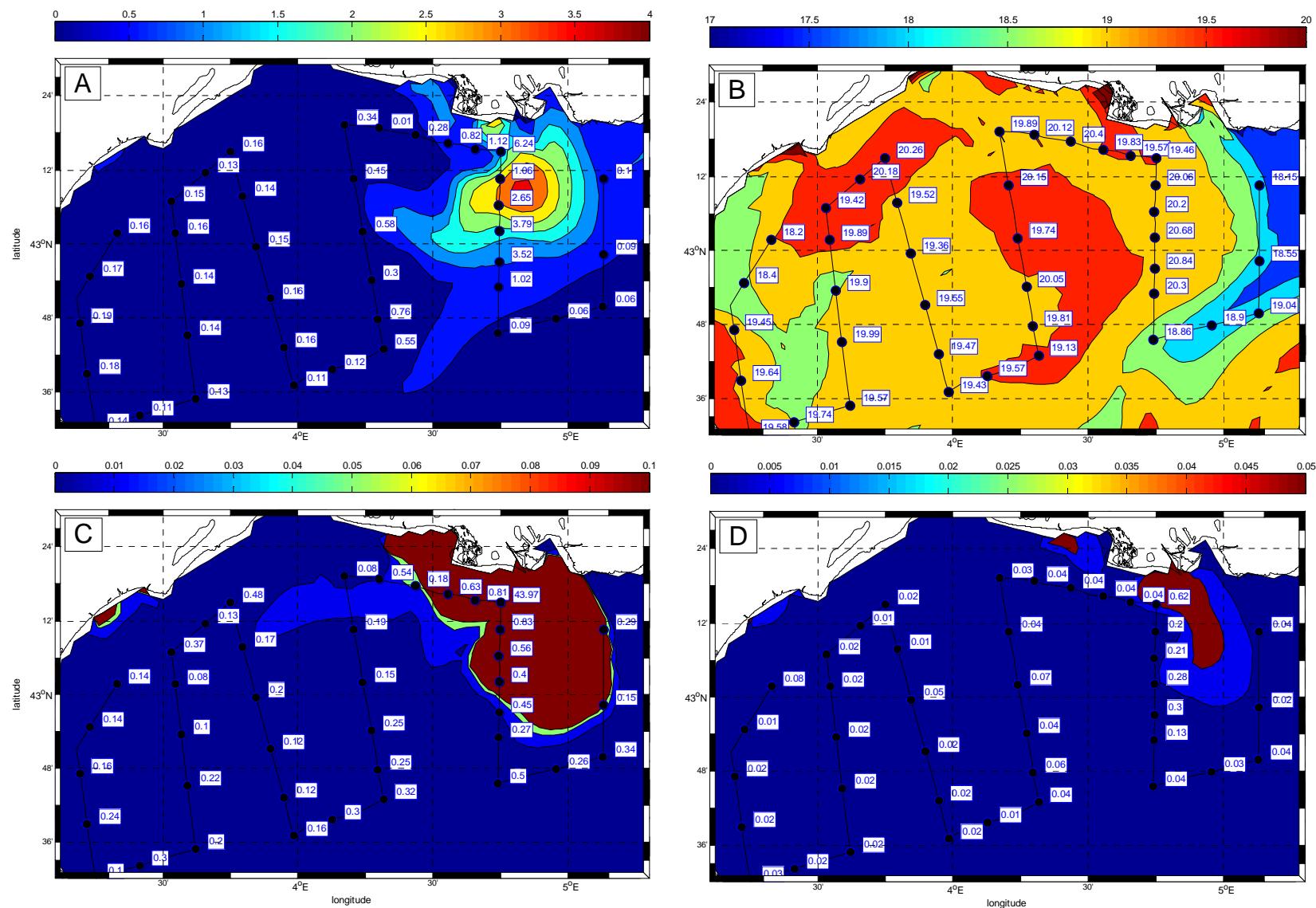


Figure 7: Sarhygol 8 (13-15 juin 2001) : Trajet de la campagne avec données encadrées, superposé à une sortie du modèle le 14 juin 2001. A : Chlorophylle ( $\text{mgChl}/\text{m}^3$ ). B : Température ( $^\circ\text{C}$ ). C : Nitrate( $\text{mmolN}/\text{m}^3$ ). D : Phosphate ( $\text{mmolP}/\text{m}^3$ )

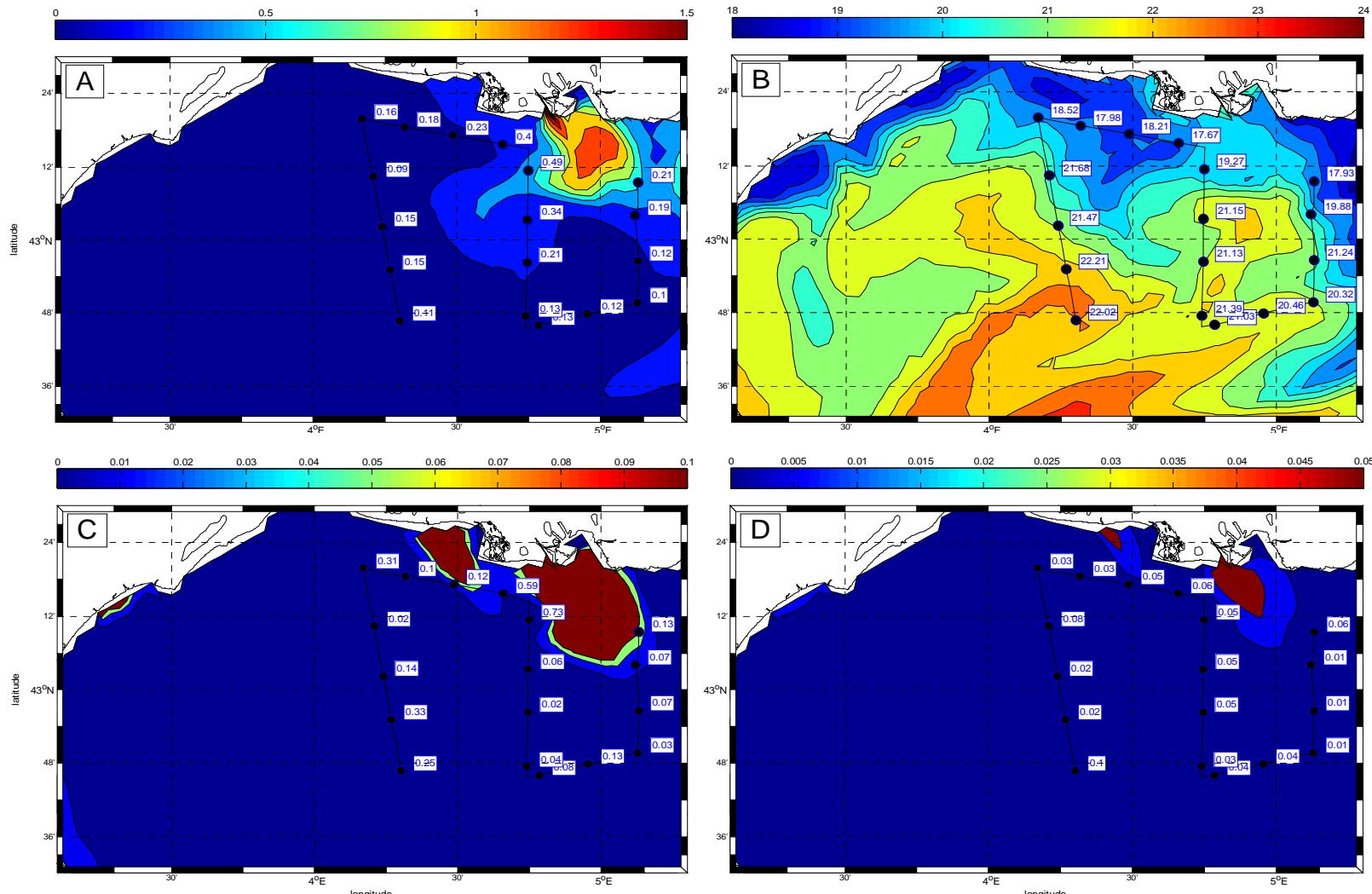


Figure 8: Sarhygol 9 (4-5 septembre 2001). Trajet de la campagne avec données encadrées, superposé à une sortie du modèle le 4 septembre 2001.  
A : Chlorophylle (mgChl/m<sup>3</sup>). B : Température (°C). C : Nitrate(mmolN/m<sup>3</sup>). D : Phosphate (mmolP/m<sup>3</sup>)

Sur la Figure 7 nous comparons les mesures prises pendant la campagne Sarhygol 8 (13-15 juin 2001) avec une sortie du modèle du 14 juin 2001. Il y a une excellente correspondance entre le modèle et les données au niveau de la chlorophylle (section A). La zone ayant un maximum de chlorophylle dans le modèle est cependant moins étendue vers le sud que celle dans les mesures, mais l'ordre de grandeur du maximum est conservée. Le modèle hydrodynamique représente correctement l'eau plus froide provenant de la mer Ligure à l'est. Les ordres de grandeur de la température sont corrects sur toute la zone étudiée. Tout comme pour la comparaison avec la campagne Sarhygol 7, les concentrations en nitrate et en phosphate sont sous-estimées par le modèle sur la partie ouest du plateau du golfe du Lion, cette sous-estimation est moins avérée pour le phosphate d'autant plus que les concentrations sont proches des limites de détection de la technique de mesure.

Sur la Figure 8 nous comparons les mesures prises pendant la campagne Sarhygol 9 (4-5 septembre 2001) avec une sortie du modèle du 4 septembre 2001. Pour la chlorophylle (section A), nous avons une excellente correspondance spatiale et quantitative entre le modèle et les données. La température (section B) montre aussi une très bonne correspondance quantitative et en variabilité spatiale sur toute la zone étudiée; on observe les refroidissements à la côte et dans la partie est retrouvés dans le modèle. Au niveau du panache du Rhône, les concentrations en phosphate (section D) et en nitrate (section C) sont sous-estimées par le modèle. Ces concentrations sont aussi sous-estimées par le modèle en particulier dans les zones hors du panache.

Les comparaisons des sorties du modèle avec les trois campagnes Sarhygol correspondantes démontrent le réalisme de cette version du modèle couplée. Nous trouvons, de manière générale, que la chlorophylle et la température sont extrêmement bien représentées par le modèle et que les sels nutritifs ont tendance à être sous-estimés loin du panache du Rhône, en particulier pour le nitrate.

#### 4.1.4 Validation à l'aide de mesures *in situ* du réseau SomLIT

Les stations SomLIT (Service d'Observation en Milieu LITToral) ont pour objectif d'observer le milieu littoral de la France à long terme par un échantillonnage bimensuel. Des séries de mesures à long terme de ce type permettent de valider sur toute la durée de la simulation les sorties du modèle. Deux de ces stations sont situées dans le golfe du Lion : Marseille et Banyuls. Nous comparons les séries temporelles de température, chlorophylle totale, nitrate, phosphate (Marseille uniquement) et silicate (Marseille uniquement) récoltés au

cours de 2001 avec les sorties du modèle à ces points. On compare à partir du 100<sup>e</sup> jour de 2001, soit environ le 15 avril, afin de négliger l'effet du *spin up* du modèle.

#### 4.1.4.1 Banyuls

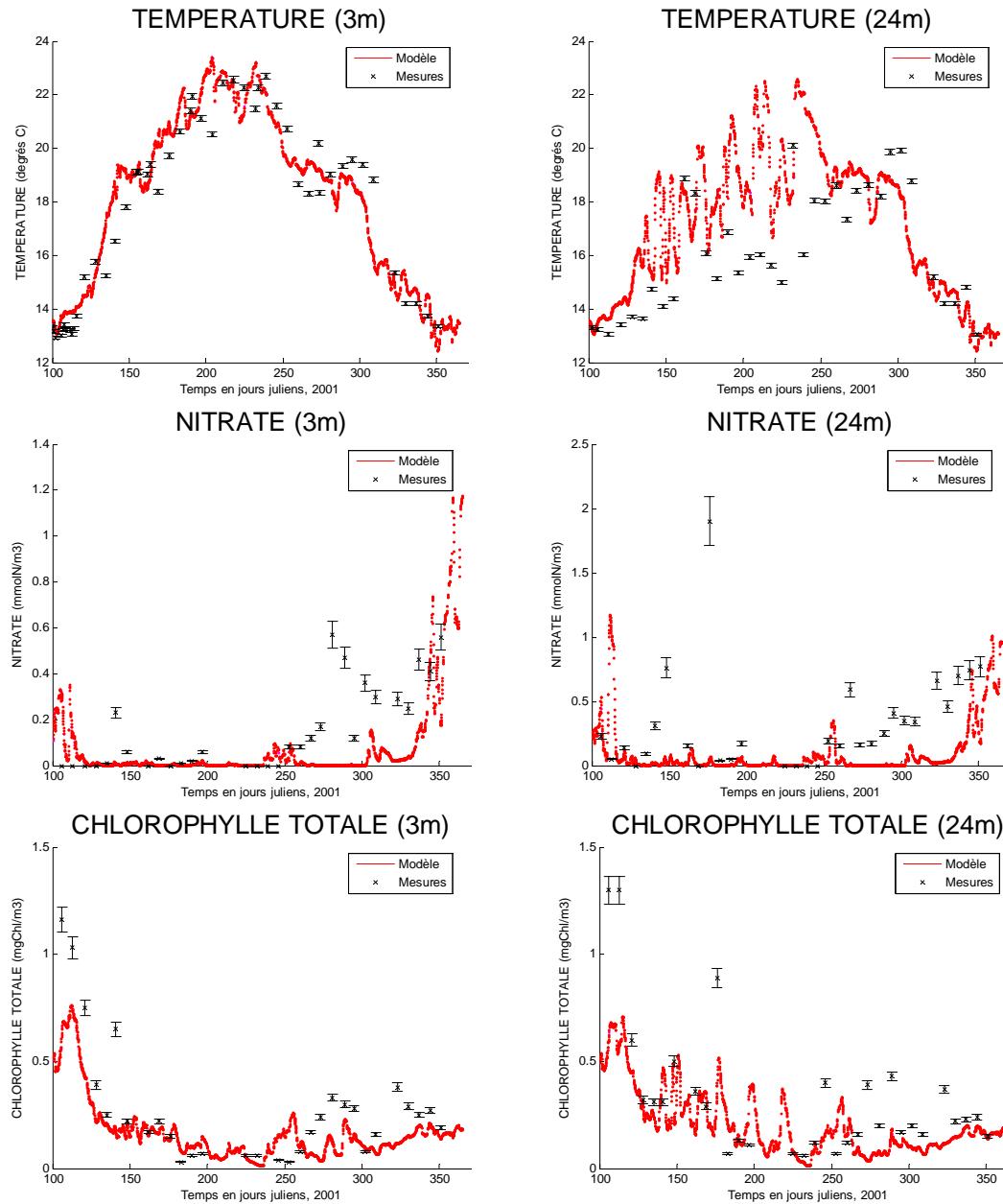


Figure 9 Séries temporelles des mesures de température( $^{\circ}$ C), nitrate (mmol/m<sup>3</sup>) et chlorophylle totale (mg/m<sup>3</sup>) à la station SOMLIT de Banyuls comparée aux sorties du modèle au même point.

Les comparaisons avec la station de Banyuls sont, d'une manière générale, correctes (Figure 9). En surface comme en profondeur, l'ordre de grandeur des mesures est respecté, et de plus, souvent le modèle se place entre les barres d'erreurs (les erreurs prises sont les erreurs maximales acceptées par le programme SOMLIT). La température en surface est très bien représentée par le modèle, tandis qu'à 24 mètres, le modèle présente des températures trop élevées pendant l'été. La dynamique des concentrations en nitrate est correctement

représentée en surface et à 24 mètres à la fin du printemps et au cours de l'été. En revanche, l'augmentation au début de l'automne (du 260<sup>e</sup> au 300<sup>e</sup> jour) observée en surface et au fond n'est pas représentée par le modèle. L'augmentation des concentrations à la fin de l'automne (vers le 330<sup>e</sup> jour) est au contraire simulée par le modèle couplé. L'efflorescence printanière est produite en même temps que celle observée dans les données, mais l'intensité de ce maximum annuel est sous-estimée par le modèle. Le modèle suit les tendances générales sur l'année 2001.

#### 4.1.4.2 Marseille

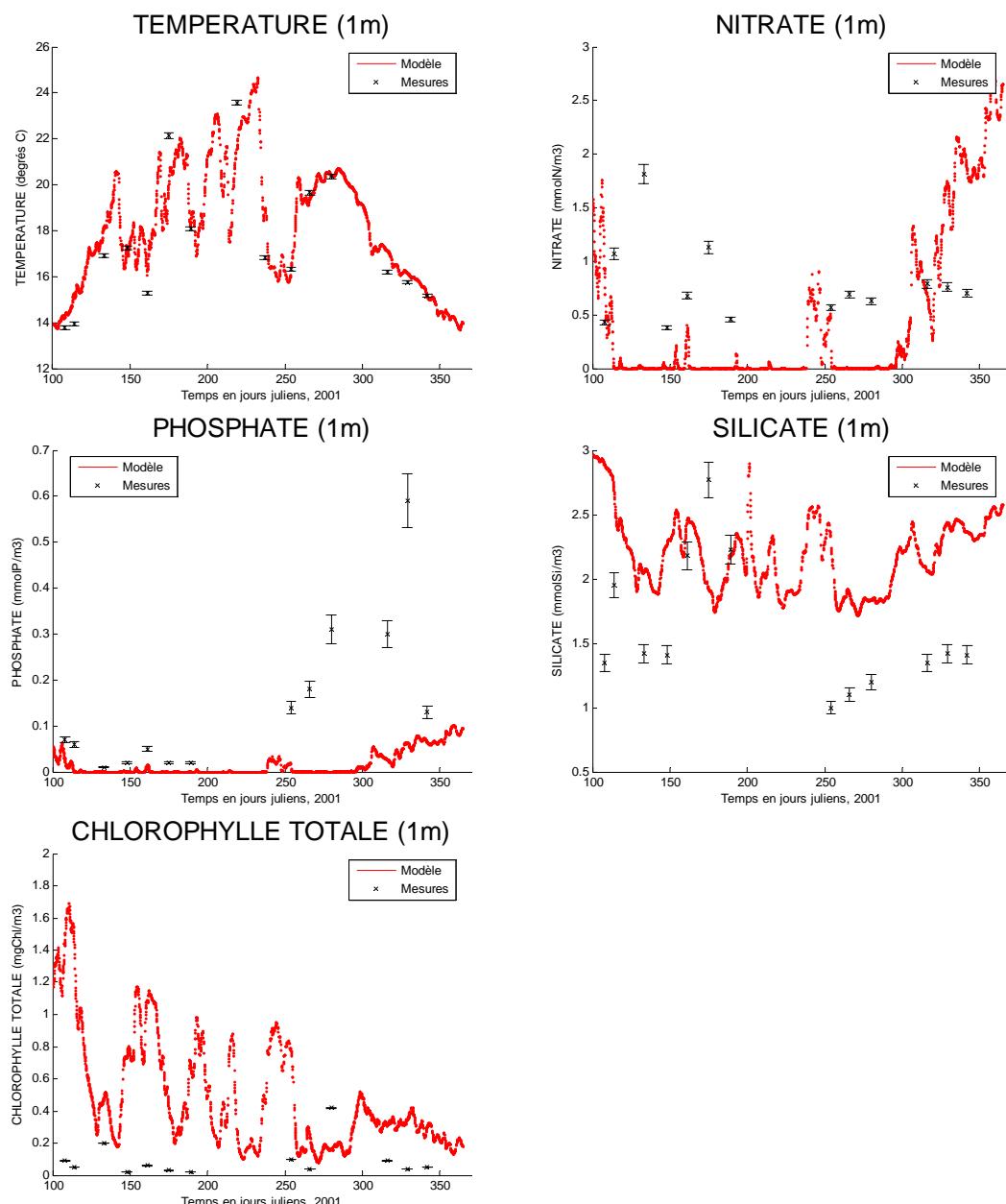


Figure 10:Séries temporelles des mesures de surface (1 m) de température ( $^{\circ}\text{C}$ ), nitrate ( $\text{mmol}/\text{Nm}^3$ ), silicate ( $\text{mmolSi}/\text{m}^3$ ) , phosphate ( $\text{mmolP}/\text{m}^3$ ) et chlorophylle totale ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) à la station SOMLIT de Marseille comparée aux sorties du modèle.

À la station SomLIT de Marseille, la température est très bien représentée par le modèle en intensité et en variation temporelle sur toute la période étudiée (Figure 10). La chlorophylle et les silicates sont surestimés de manière générale par le modèle. Néanmoins, les valeurs prédictives pour la chlorophylle restent très réalistes pour une zone côtière. Le modèle sous-estime la quantité de phosphate toute l'année, et de manière plus extrême en fin d'année. La forte augmentation en phosphate que l'on retrouve dans les données en octobre-novembre pourrait provenir d'un apport allochtone étant donné les très fortes concentrations mesurées. Cependant, cette augmentation n'est pas corrélée à une augmentation correspondante en nitrate et silicate. A cette époque de l'année, les données montrent en effet des concentrations en nutriments très atypiques puisqu'on observe des ratios nitrate:phosphate inférieurs à 2,5 ce qui est très loin des rapports généralement observés en Méditerranée (~20, McGill, 1969). Le modèle présente des concentrations assez fortes en nitrate ( $>2\text{mmol.m}^{-3}$ ) en fin d'année que l'on ne retrouve pas dans les données. De manière générale, les performances du modèle à la station SomLIT de Marseille sont plus faibles que celles mises en évidence pour la station de Banyuls.

Les moindres performances du modèle couplé au point SomLIT à Marseille (Figure 10), pourraient être attribuées l'influence du Rhône. En effet, les forçages en éléments nutritifs provenant des fleuves et en particulier du Rhône sont calculés en utilisant une interpolation linéaire sur des mesures mensuelles, ce qui implique que les variations à haute fréquence des apports fluviaux ne sont pas prises en compte dans la simulation.

Les comparaisons entre cette version du modèle couplé et plusieurs types de mesures étant de façon générale acceptables, nous pouvons continuer avec l'étude d'un tourbillon particulier.

## **4.2 Etude d'un tourbillon de mesoéchelle et caractérisation du réseau trophique planctonique**

### **4.2.1 Localisation des tourbillons**

Un travail précédent (Hu, 2007) avait comme objectif de rechercher des structures tourbillonnaires dans le golfe du Lion à partir des sorties tridimensionnelles du modèle Symphonie. En prenant une coupe horizontale de la vorticité relative, une analyse en ondelettes a été effectuée. Le domaine de cette analyse est centré sur la partie ouest du golfe

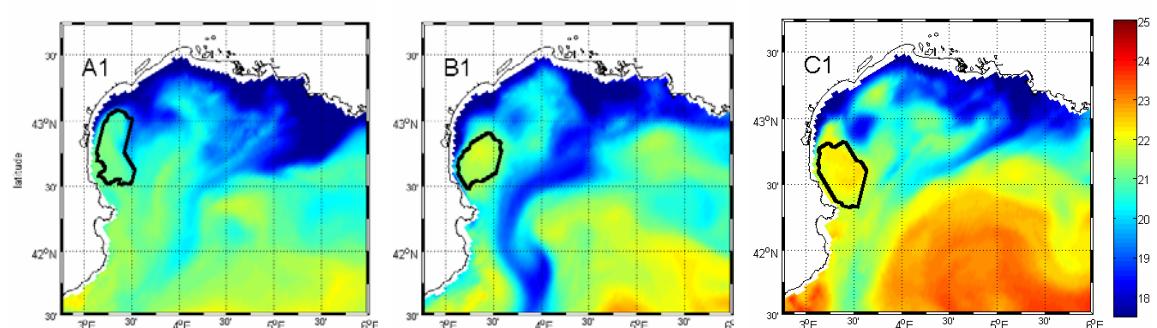
du Lion (Figure 1). La période analysée était de mi-juillet à fin octobre. Pour l'année 2001, 5 tourbillons ont été identifiés, soit trois cycloniques et deux anti-cycloniques. Le Tableau 5 résume les caractéristiques physiques de ces structures. La plus grande stabilité des tourbillons anticycloniques s'explique par la présence du courant Nord qui circule dans le même sens que la partie inférieure d'un tourbillon anticyclonique placé sur ce domaine (Hu, 2007). Les tourbillons cycloniques étaient de plus petite taille et d'une plus courte durée de vie ; ils sont aussi caractérisés par une instabilité spatiale importante. La stabilité et la relative longue durée de vie des tourbillons anti-cycloniques étant des propriétés intéressantes pour une étude biogéochimique, nous avons choisi de travailler sur la structure A1.

Tableau 5:Caractéristiques des tourbillons mises en évidence pour l'année 2001 (Hu, 2007). En gras, le choix retenu pour la présente étude.

Nom	Date d'apparition	Date de disparition	Durée (j)	Vitesse (cm/s)	Diamètre (km)	S	T
C1	1 août	14 août	15	4±2	21±4	37.9	18.1
C2	15 août	29 août	15	12±17	29±15	37.87	20.4
C3	26 septembre	9 octobre	19	9±7	28±6	37.00	19.0
<b>A1</b>	<b>17 juillet</b>	<b>18 août</b>	<b>32</b>	<b>8±9</b>	<b>40±8</b>	<b>37.75</b>	<b>21.0</b>
A2	4 septembre	6 octobre	33	5±6	40±4	37.98	19.7

#### 4.2.2 Etude des propriétés biogéochimiques et du réseau planctonique du tourbillon A1

Dans cette partie nous proposons d'étendre l'étude du tourbillon anticyclonique A1 fait par Hu (2007) à une caractérisation biogéochimique et à une étude du réseau trophique planctonique. Ce tourbillon anticyclonique a été détecté dans la partie ouest du golfe du Lion du 17 juillet au 18 août 2001. Ce tourbillon, nommé A1, a une durée de vie de 32 jours, un diamètre moyen de 40km et se déplace vers le sud au cours de sa vie. Nous allons examiner certaines caractéristiques de ce tourbillon au début, vers le milieu, et à la fin de sa vie (Figure 11).



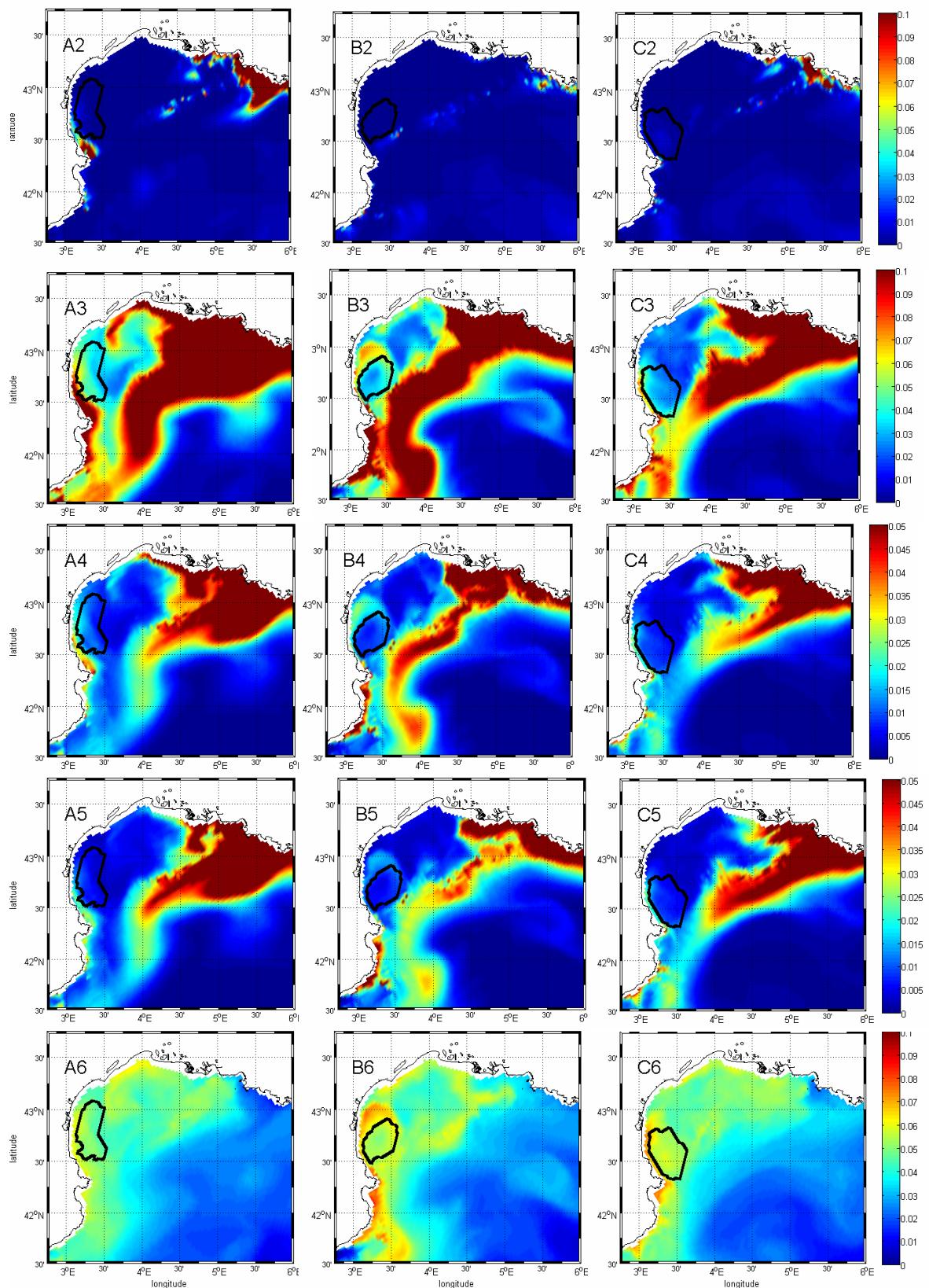


Figure 11: Coupes horizontales à 20 m de profondeur de divers paramètres au début (A: 22 juillet 2001), au milieu (B: 1<sup>e</sup> août 2001) et à la fin (C: 13 août 2001) du tourbillon A1 (contour noir) tel identifié par l'analyse en ondelettes. 1. Température. 2. Nitrate (mmolN/m<sup>3</sup>). 3. Nano phytoplancton (mmolChl/m<sup>3</sup>). 4. Diatomées (mmolChl/m<sup>3</sup>). 5. Synechococcus (mmolChl/m<sup>3</sup>). 6. Bactéries (mmolC/m<sup>3</sup>).

Sur la Figure 11, la structure du tourbillon A1 est confondue avec une signature de température d'environ 22°C très distincte de l'environnement proche. Bien qu'aucun traceur biogéochimique ne soit aussi distinct au centre du tourbillon, il existe des structures qui semblent être liées à la présence de celui-ci. A la date B, nous observons une accumulation de phytoplancton et de bactéries sur le bord du tourbillon, cette accumulation étant maximale sur le bord nord-ouest de la structure. La concentration en phytoplancton, pour les trois groupes de phytoplancton, est minimale au centre du tourbillon anticyclonique par rapport aux bords. Pour chercher à expliquer cet appauvrissement en phytoplancton et en bactéries, nous examinons les concentrations en sels nutritifs aux bords et au sein du tourbillon. Sur la Figure 11 (série 2) les concentrations en nitrate sont minimales dans la zone du tourbillon, et ceci est encore davantage le cas pour les autres sels nutritifs sur toute la période du tourbillon (données non montrées). Cette absence de nutriments au sein du tourbillon explique les concentrations très faibles en plancton observées. Dans la littérature, nous trouvons un exemple d'anticyclone estival en mer Bering qui a aussi présenté un minimum de chlorophylle au centre du tourbillon mais qui présentait des eaux riches en nutriments en dessous et autour de la structure (Mizobata *et al.*, 2002). Il semble alors judicieux de poursuivre une étude en profondeur de l'anticyclone A1 et de voir la variabilité des divers traceurs biogéochimiques modélisés tout au long de sa vie.

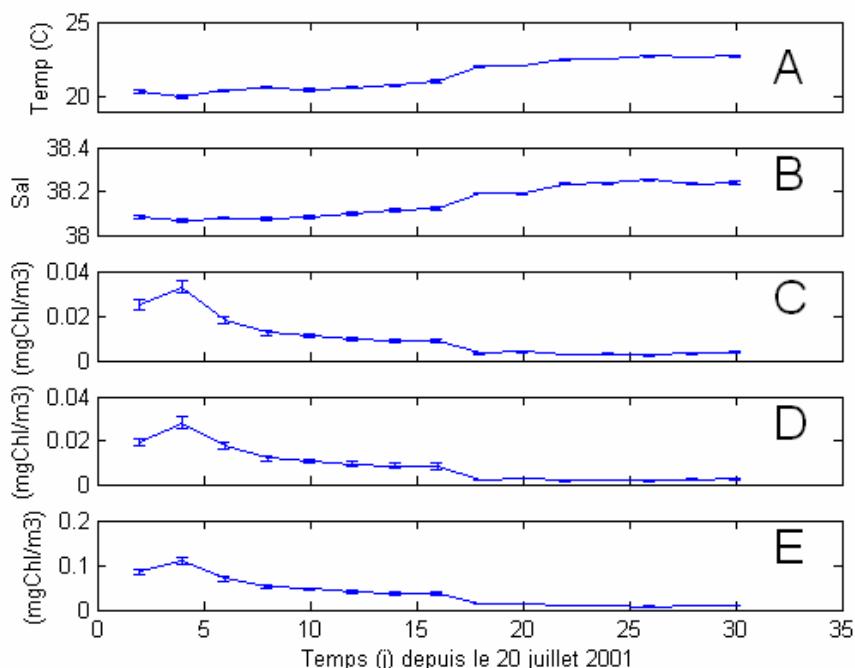


Figure 12: Séries temporelles de paramètres moyennés sur l'aire du tourbillon à -20 mètres, avec pour barre d'erreur l'erreur type sur toute la période: 20 juillet 2001- 18 août 2001. A : température, B : salinité, C : synechococcus, D : diatomées, E : nano phytoplankton

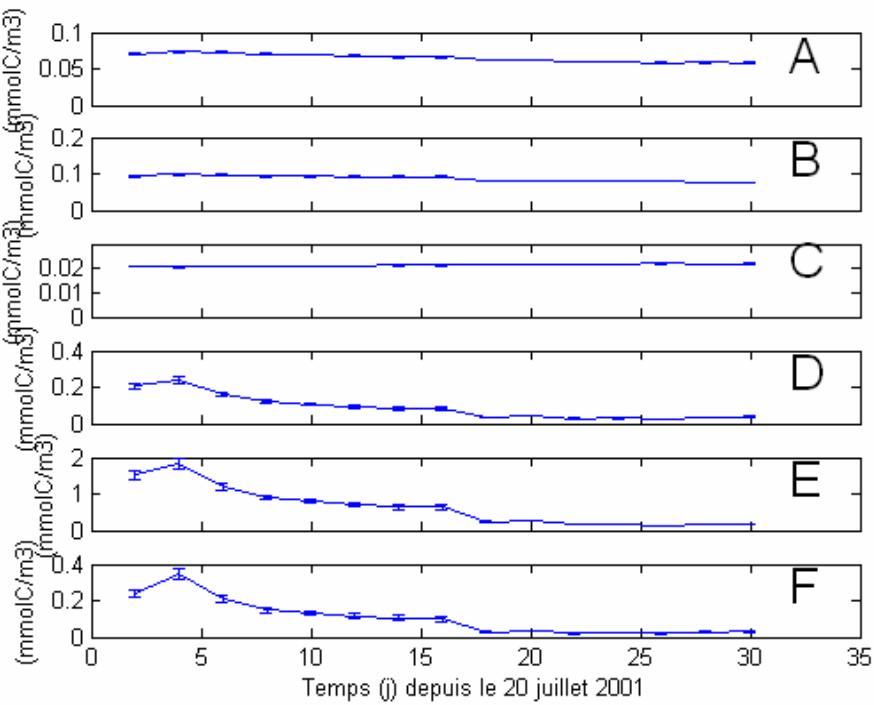


Figure 13: Séries temporelles de la concentration en  $\text{mmolC}/\text{m}^3$  des différents groupes planctoniques moyennés sur l'aire du tourbillon A1 à 20 mètres de profondeur avec pour barre d'erreur l'erreur type pendant toute la période: 20 juillet 2001- 18 août 2001. A: nano zooplancton, B: microzooplancton, C : mesozooplankton, D :synechococcus, E :nano phytoplankton, F : diatomées.

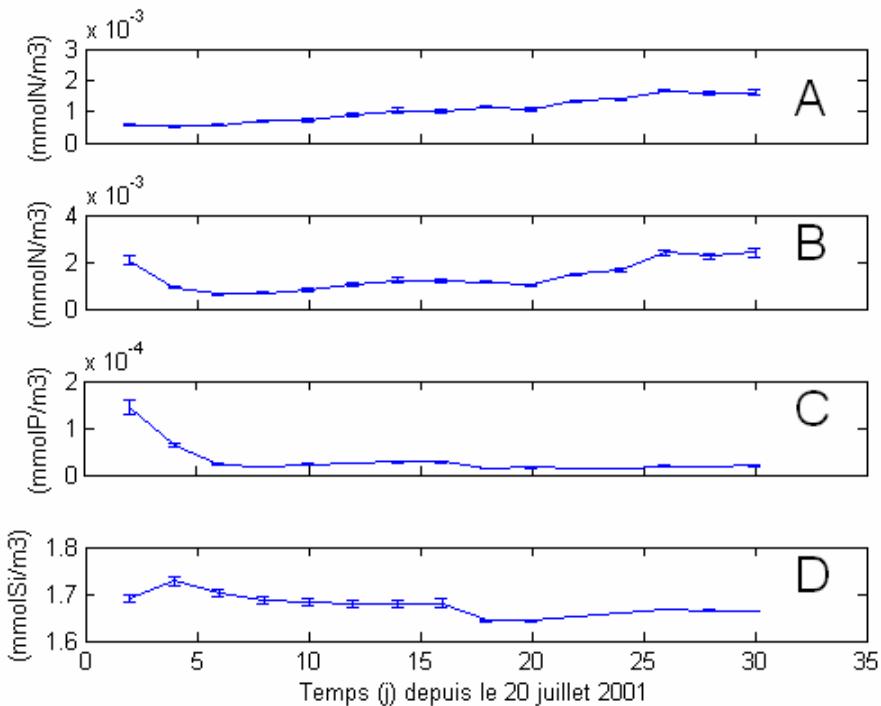


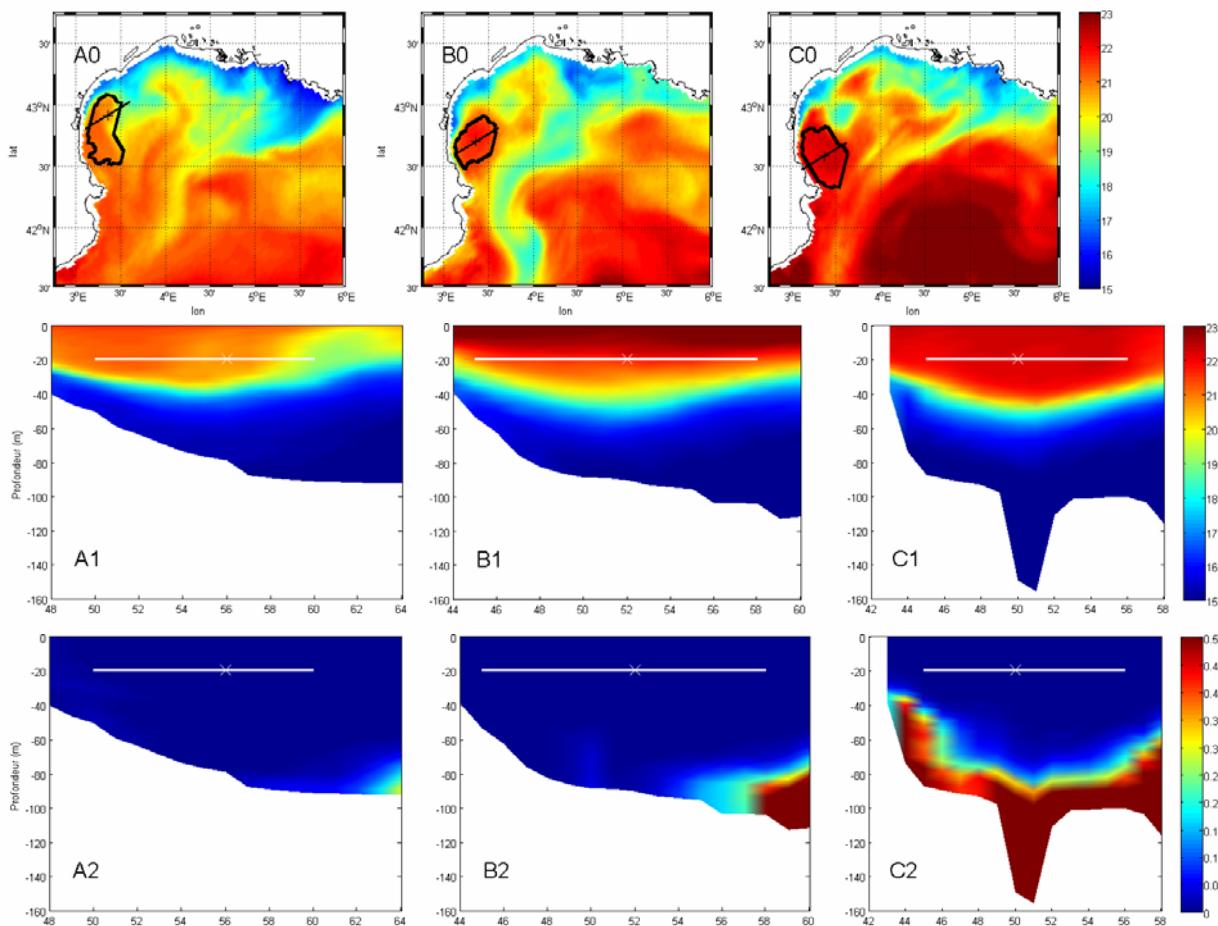
Figure 14:Séries temporelles de la concentration des sels nutritifs moyennés sur l'aire du tourbillon A1 à 20 mètres de profondeur avec pour barre d'erreur l'erreur type pendant toute la période: 20 juillet 2001- 18 août 2001. A : ammonium, B : nitrate, C : phosphate, D : silicate.

Il est aussi intéressant d'examiner la valeur moyenne des quantités biologiques sur la surface du tourbillon. D'une manière générale, sur l'ensemble des figures 12 à 14, on observe une variabilité spatiale très faible (barres d'erreurs proches de zéro) des variables biogéochimiques dans le tourbillon et ceci quelque soit la période considérée. L'évolution de la température, la salinité et les concentrations en chlorophylle des trois classes de phytoplancton sont présentées dans la Figure 12. Les concentrations en chlorophylle des trois groupes de phytoplancton diminuent au cours de la vie du tourbillon A1 tandis que la salinité et la température augmentent. La diminution des concentrations en chlorophylle s'accompagne d'une diminution des concentrations en carbone dans les mêmes groupes de phytoplancton. Ce résultat exclut *a priori* une diminution de la quantité de chlorophylle due à un processus de photoacclimatation mais pourrait s'expliquer en revanche par une prédation zooplanctonique. Cette hypothèse est d'autant plus réaliste que les biomasses en carbone (Figure 13-A,B,C) se maintiennent à des valeurs constantes au cours de la vie du tourbillon.

D'une manière générale, les concentrations en ammonium, nitrate et phosphate (Figure 14) sont très faible (de l'ordre du nanomolaire) et donc très largement inférieures aux limites de détection des techniques de mesures classiques. Lorsque des techniques de mesures adaptées à ces faibles concentrations sont employées, ces techniques donnent des valeurs cohérentes (*e.g.* phosphate 0,2nmol/L Moutin *et al.* 2002) avec celles données par le modèle pour une zone méditerranéenne en période oligotrophe. Les concentrations en silicate données par le modèle couplé corroborent également celles mesurées à proximité en période estivale au site SOFI (Leblanc *et al.* 2003). Les concentrations des différents nutriments évoluent peu au cours de la vie du tourbillon excepté pour le phosphate dont la concentration diminue d'un facteur dix environ sur une vingtaine de jours. Cette évolution suggère que ce sel nutritif est une ressource limitée pour le réseau trophique planctonique et qu'il y a probablement une compétition pour cette ressource entre les différents groupes de plancton. Cette caractéristique liée à la disponibilité du phosphate a déjà été démontrée expérimentalement à plusieurs reprises en Méditerranée nord occidentale (Thingstad and Rassoulzadegan, 1995, 1999; Diaz *et al.*, 2001; Marty *et al.*, 2002).

La structure verticale et l'évolution temporelle du tourbillon A1 sont examinées dans la section suivante. Les coupes verticales de plusieurs traceurs passant par le centre du tourbillon sont présentées dans la Figure 15. Le centre est défini par le minimum de vorticité

sur la surface latérale du tourbillon à 20 mètres de profondeur. L'ensemble des quantités biogéochimiques examinées (Figure 15) montre un approfondissement des isolignes de concentrations et isothermes vers le centre du tourbillon, ce qui est un phénomène typique d'une structure anticyclonique (McGillicuddy *et al*, 1999). L'évolution temporelle des variables biogéochimiques est très marquée au cours de la vie du tourbillon en particulier en profondeur sous la thermocline. En profondeur, l'enrichissement en nutriments est d'abord observé sur le bord est du tourbillon et progresse vers l'ouest probablement en raison du mouvement anticyclonique du tourbillon qui pourrait ramener vers l'ouest puis le nord-ouest une masse d'eau provenant du bord du Courant Nord. En parallèle, on observe une augmentation des concentrations en chlorophylle des trois groupes de phytoplancton et des bactéries mais il difficile de dire si cette augmentation est due à un transport ou bien à une production *in situ*. Sur le bord ouest du tourbillon en fin de vie, le modèle indique une remontée de nutriments à la côte jusqu'à la base de la thermocline. Cette étude sur l'évolution de la structure verticale de l'anticyclone A1 nous montre que ce type de structure permet de changer en quelques jours les caractéristiques trophiques de la zone étudiée.



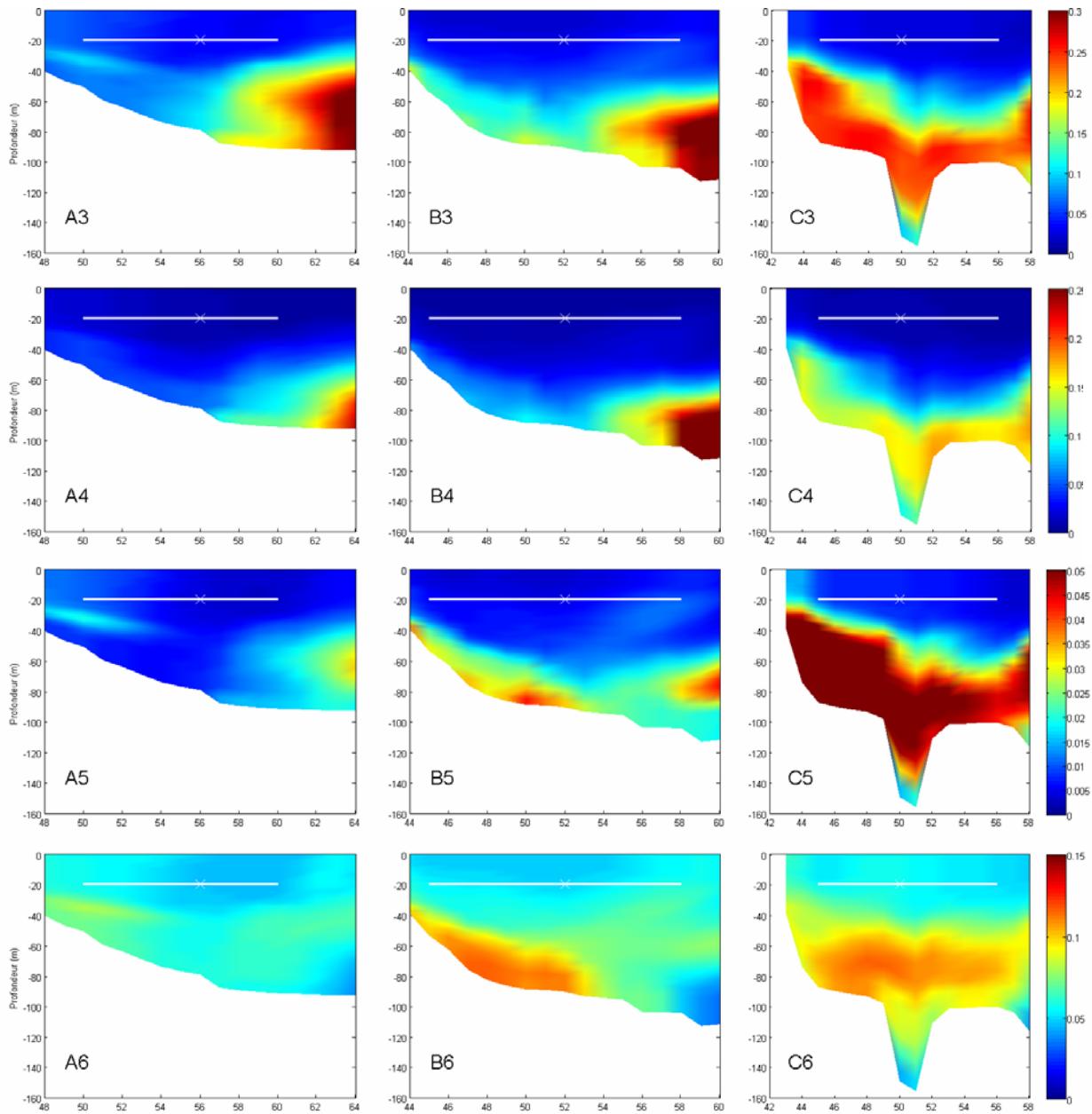


Figure 15: Coupes verticales selon l'axe horizontal du modèle ( $33^{\circ}$  par rapport au repère usuel) passant par le centre du tourbillon, défini par le minimum de vorticité et indiqué par un x au début (A: 22 juillet 2001), au milieu (B: 1<sup>e</sup> août 2001) et à la fin (C: 13 août 2001) du tourbillon A1 (contour noir) tel identifié par l'analyse en ondelettes.0. Localisation de la coupe. 1. Température. 2. Nitrate ( $\text{mmolN/m}^3$ ). 3. Nano phytoplankton ( $\text{mmolChl/m}^3$ ). 4. Diatomées ( $\text{mmolChl/m}^3$ ). 5. Synechococcus ( $\text{mmolChl/m}^3$ ). 6. Bactéries ( $\text{mmolC/m}^3$ ).

## 5 Conclusions

L'objectif de ce stage était d'évaluer l'impact des structures tourbillonnaires de mesoéchelle sur la structuration du réseau trophique planctonique dans le golfe du Lion. L'outil principal de cette étude était un modèle couplé biogéochimie-physique qui employait le code hydrodynamique d'océan côtier Symphonie et le code biogéochimique multi-nutriments multi-groupes fonctionnels ECO3M-NWMED. Une validation de ce modèle couplé a été effectuée en utilisant plusieurs séries de données, notamment les images

satellitales de couleur de l'océan SeaWiFS et des mesures *in situ* des campagnes Sarhygol de 2001 et des stations SomLIT du golfe du Lion. Sur toute la période modélisée (année 2001), les comparaisons entre le modèle couplé et ces différentes types de mesures ont été acceptables, montrant une correspondance correcte notamment en température et chlorophylle totale sur tout le domaine. Cette validation étant faite, nous avons utilisé le modèle couplé en tant qu'outil d'étude diagnostique dans l'analyse d'un tourbillon anticyclonique préalablement identifié par une analyse en ondelettes (Hu, 2007). Ce tourbillon a été sélectionné en particulier pour une étude approfondie de ses propriétés biogéochimiques en raison de sa stabilité et de sa durée de vie (32 jours) relativement longue.

Au cours de la vie du tourbillon, nous avons observé une signature très distincte en température, plus élevée que les eaux environnantes. On observe également un appauvrissement en phytoplancton et en bactéries au centre du tourbillon, et ceci semble dû aux concentrations minimales de sels nutritifs dans le tourbillon. Sur le bord du tourbillon, un enrichissement en nutriments qui progresse avec le mouvement anticyclonique du tourbillon du bord est au bord ouest est observé. En parallèle, on observe une augmentation des concentrations en chlorophylle des trois groupes de phytoplancton et des bactéries en profondeur. Les quantités biogéochimiques examinées montrent un approfondissement des isolignes de concentration au centre du tourbillon, ce qui est un phénomène attendu dans une telle structure. En observant les quantités biogéochimiques moyennées sur la surface du tourbillon, nous remarquons une variabilité spatiale très faible sur toute la durée de vie du tourbillon. Nous trouvons une diminution importante des trois groupes de phytoplancton, que l'on explique par deux processus : la prédation zooplanctonique et une limitation en phosphate qui empêche le développement phytoplanctonique. Cette étude sur l'évolution des traceurs biogéochimiques dans et au voisinage du tourbillon anticyclonique nous montre que la présence d'une telle structure hydrodynamique peut modifier les caractéristiques trophiques de la zone étudiée en quelques jours.

Une suite envisageable à ce travail sera d'étendre l'étude à plusieurs autres tourbillons déjà identifiés par l'analyse en ondelettes, notamment à des tourbillons cycloniques afin de comparer les effets sur le réseau trophique avec ceux des tourbillons anticycloniques. L'étude d'autres structures hydrodynamiques de mesoéchelle tels que les filaments et les fronts permettra de faire des remarques plus générales sur l'impact des processus hydrodynamiques de mesoéchelle sur la structuration du réseau planctonique et de la production primaire. Une quantification de la matière transportée par ces structures amènera une meilleure compréhension des échanges côte-large, qui restent encore mal quantifiés.

## 6 Annexes

### 6.1 Annexe 1 : Fonctions de flux biogéochimiques

#### 6.1.1 Zooplankton

$$\frac{dZ^C}{dt} = \sum_P \text{prédatation.zoo}(Z, P, C) - \text{respiration.zoo}(Z, C) - \text{messy.feed}(Z, C) \\ - \text{égestion.zoo}(Z, C) - \text{excretion.zoo}(Z, C) - \text{mort.zoo}(Z, C) \\ - \sum_{Z'} \text{prédatation.zoo}(Z, Z', C)$$

#### 6.1.2 Phytoplancton

$$\frac{d\varphi^C}{dt} = \text{production.phyto}(\varphi) - \sum_Z \text{prédatation.zoo}(Z, \varphi, C) - \text{exudation.C}(\varphi) \\ - \sum_S \text{respiration.phyto.sel}(S, \varphi) - \text{mort.phyto}(\varphi, C)$$

$$\frac{d\varphi^X}{dt} = \text{absorption.phyto}(X, \varphi) - \sum_Z \text{prédatation.zoo}(Z, \varphi, X) - \text{exudation.phyto}(\varphi, X) \\ - \text{mort.phyto}(\varphi, X)$$

$$\frac{d\varphi^{Chl}}{dt} = \text{synthèse.chloro}(\varphi) - \sum_Z \text{prédatation.zoo}(Z, \varphi, Chl) - \text{mort.phyto}(\varphi, Chl)$$

#### 6.1.3 Bactéries

$$\frac{dB^C}{dt} = - \sum_Z \text{prédatation.zoo}(Z, B, C) + \omega_B - \text{mortalité.bact}(C)$$

#### 6.1.4 Matière organique particulière de petite taille ( $D_p$ )

$$\frac{dD_p^X}{dt} = - \sum_Z \text{prédatation.zoo}(Z, D_p, X) + \sum_Z \text{égestion.zoo}(Z, X) \\ + \sum_Z \text{mort.zoo.detritus.petit}(Z, X) + \sum_\varphi \text{mort.phyto}(\varphi, X) \\ - \text{reminéralisation}(X, D_p)$$

$$\frac{dD_p^{Chl}}{dt} = - \sum_Z \text{prédatation.zoo}(Z, D_p, Chl) + \sum_Z \text{égestion.zoo}(Z, Chl) \\ + \sum_\varphi \text{mort.phyto}(\varphi, Chl) - \text{reminéralisation}(Chl, D_p)$$

$$\frac{dD_P^{st}}{dt} = \alpha \times \sum_Z egestion.zoo(Z, Chl) + \sum_{\varphi} mort.phyto(\varphi, Si) - reminéralisation(Si, D_P)$$

Où X = P,N,C et  $\alpha$  représente la partie de l'égestion zooplanctonique qui est sous forme de petites particules.

### 6.1.5 Matière organique particulière de grande taille ( $D_G$ )

$$\frac{dD_G^X}{dt} = + \sum_Z mort.zoo.detritus.grand(Z, X) - reminéralisation(X, D_G)$$

$$\frac{dD_G^{st}}{dt} = (1 - \alpha) \times \sum_Z egestion.zoo(Z, Chl) - reminéralisation(Si, D_G)$$

### 6.1.6 Matière organique dissoute

$$\begin{aligned} \frac{dMOD^X}{dt} = & + \sum_Z messy.feed(Z, X) \\ & + \sum_{\varphi} exudation(X, \varphi) - absorption.bact.mod(X) + mort.bact(X) \\ & + reminéralisation(X, D_P) + reminéralisation(X, D_G) \end{aligned}$$

### 6.1.7 Sels nutritifs

$$\frac{dNO_3^-}{dt} = nitrification - \sum_{\varphi} absorption.phyto(NO_3^-, \varphi)$$

$$\begin{aligned} \frac{dNH_4^+}{dt} = & -nitrification - \sum_{\varphi} absorption.phyto(NH_4^+, \varphi) + excréition.bact(N) \\ & + \sum_Z excréition.zoo(Z, NH_4^+) - absorption.bact.mid(N) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dPO_4^{3-}}{dt} = & - \sum_{\varphi} absorption.phyto(PO_4^{3-}, \varphi) + excréition.bact(P) \\ & + \sum_Z excréition.zoo(Z, PO_4^{3-}) - absorption.bact.mid(P) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dSi}{dt} = & - \sum_{\varphi} absorption.phyto(Si, \varphi) + \sum_{\varphi} exudation(Si, \varphi) + reminéralisation(Si, D_P) \\ & + reminéralisation(Si, D_G) \end{aligned}$$

## 6.2 Annexe 2 : Paramètres du modèle ECO3M-NWMED

Tableau 6 : Paramètres utilisés dans les équations du groupe fonctionnel du phytoplancton. En gras, les valeurs différentes que la version d'ECO3M utilisée par M Hermann.

Symbol	Définition	Unités	Diatomées	Nanophytoplanton	Picophytoplanton
$a_{chl}$	Coefficient d'absorption spécifique de la chlorophylle	$m^2 \cdot mgChl^{-1}$	$1.2 \cdot 10^{-2}$	$2.1 \cdot 10^{-2}$	$3.8 \cdot 10^{-2}$
$\Phi$	Rendement quantique maximal	$mmolC.J^{-1}$	$3.0 \cdot 10^{-4}$	$2.4 \cdot 10^{-4}$	$1.8 \cdot 10^{-4}$
T	Temps de renouvellement des photosystèmes de type II	s	$3.3 \cdot 10^{-3}$	$2.0 \cdot 10^{-3}$	$1.25 \cdot 10^{-3}$
$\Sigma$	Section efficace des photosystèmes de type II	$m^2.J^{-1}$	9	12	18
$k_d$	Constante d'endommagement des photosystèmes de type II	-	$2.6 \cdot 10^{-8}$	$2.6 \cdot 10^{-8}$	$2.6 \cdot 10^{-8}$
$k_r$	Constante de réparation des photosystèmes de type II	$s^{-1}$	$2.0 \cdot 10^{-4}$	$2.0 \cdot 10^{-4}$	$2.0 \cdot 10^{-4}$
$T_1$	Température 1 dans la fonction de régulation	$^{\circ}C$	20	20	20
$T_2$	Température 2 dans la fonction de régulation	$^{\circ}C$	10	10	10
$Q10_{ppb}$	Constante dans la fonction de régulation	-	2	2	2
B	Constante dans la fonction de quota pour l'azote	-	0.002	0.0072	-
B	Constante dans la fonction de quota pour le phosphore	-	0.0005	0.0002	-
B	Constante dans la fonction de quota pour le silicium	-	0.004	-	-
$k_{resp}$	Coût respiratoire	-	0.2	0.25	0.3
K	Constante de demi-saturation de l'absorption du nitrate	$mmolN.m^{-3}$	1.0	0.3	<b>0.1</b>
K	Constante de demi-saturation de l'absorption de l'ammonium	$mmolN.m^{-3}$	<b>0.07</b>	<b>0.05</b>	<b>0.015</b>
K	Constante de demi-saturation de l'absorption du phosphate	$mmolP.m^{-3}$	0.05	0.015	$5.0 \cdot 10^{-3}$
K	Constante de demi-saturation de l'absorption du silicate	$mmolSi.m^{-3}$	1.2	-	-
Inh	Constante d'inhibition de l'absorption de nitrate par l'ammonium	$mmolN.m^{-3}$	-	0.578	0.578
$k_{inh}$	Constante d'inhibition de l'absorption de nitrate par l'ammonium	-	-	0.82	0.82
$(N:C)_{min}$	Quota min N :C	$molN.molC^{-1}$	0.05	0.072	0.1145
$(N:C)_{max}$	Quota max N :C	$molN.molC^{-1}$	0.2	0.126	0.229
$(P:C)_{min}$	Quota min P :C	$molP.molC^{-1}$	$5.0 \cdot 10^{-3}$	$2.0 \cdot 10^{-3}$	$3.4 \cdot 10^{-3}$
$(P:C)_{max}$	Quota max P :C	$molP.molC^{-1}$	0.02	$5.0 \cdot 10^{-3}$	$6.8 \cdot 10^{-3}$
$(Si:C)_{min}$	Quota min Si :C	$molSi.molC^{-1}$	0.04	-	-
$(Si:C)_{max}$	Quota max Si :C	$molSi.molC^{-1}$	0.136	-	-
$(Chl:N)_{max}$	Quota max Chl :N	$gChl.molN^{-1}$	<b>3.0</b>	2.3	2.3
$r_{NO3}$	Coût respiratoire lié à l'absorption de nitrate	$molC.molN^{-1}$	0.397	0.397	0.397
$r_{NH4}$	Coût respiratoire lié à l'absorption de l'ammonium	$molC.molN^{-1}$	0.198	0.198	0.198
$r_{PO4}$	Coût respiratoire lié à l'absorption de phosphate	$molC.molP^{-1}$	0.155	0.155	0.155
$r_{SI}$	Coût respiratoire lié à l'absorption de silicate	$molC.molSi^{-1}$	0.14	-	-
$\tau_{mort}$	Taux de mortalité	$s^{-1}$	<b><math>7.0 \cdot 10^{-7}</math></b>	<b><math>8.0 \cdot 10^{-7}</math></b>	<b><math>6.5 \cdot 10^{-7}</math></b>

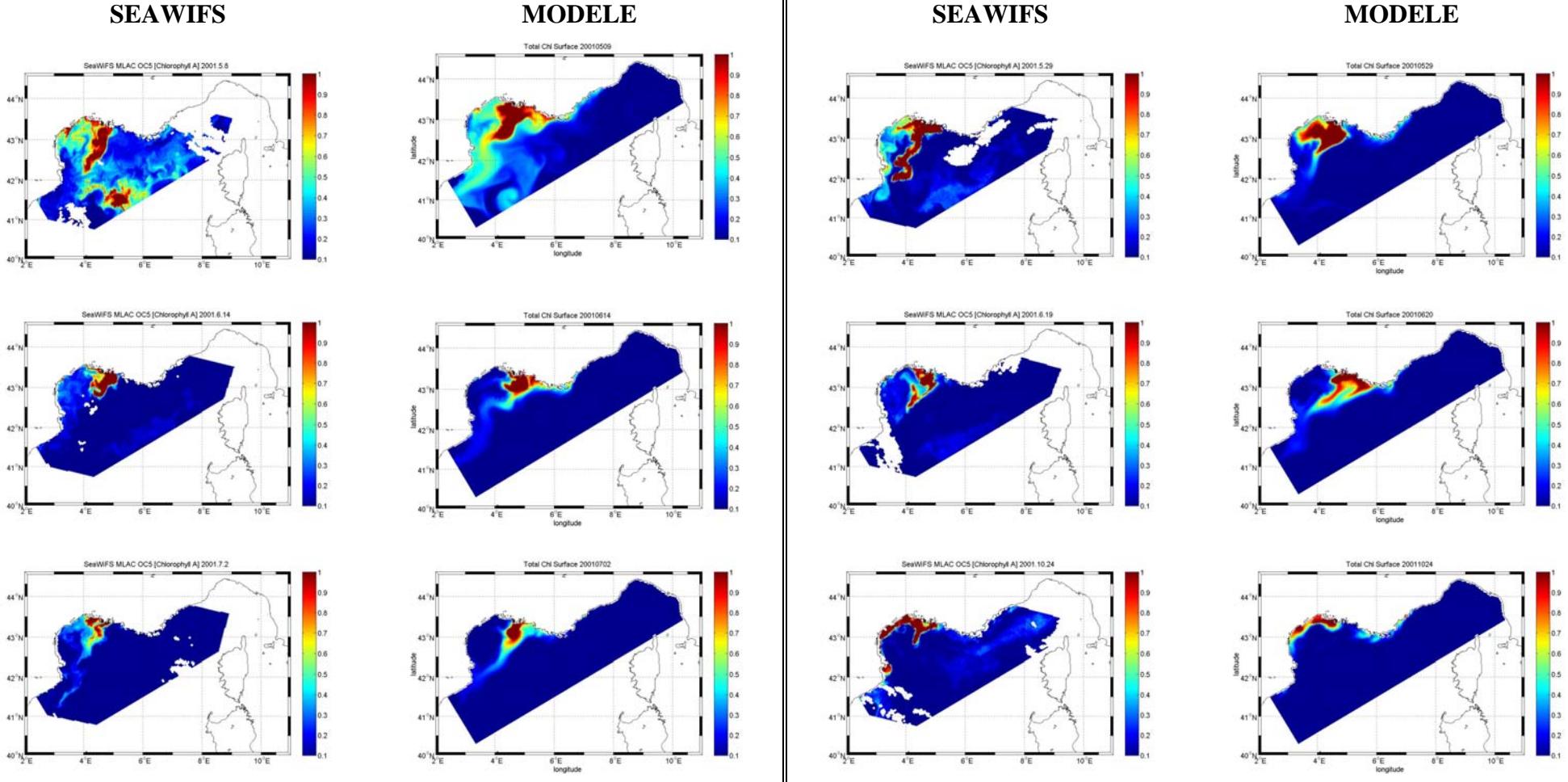
Tableau 7: Paramètres utilisés dans les équations du groupe fonctionnel du zooplancton. En gras, les valeurs différentes que la version d'ECO3M utilisée par M Hermann.

Symbol	Définition	Unités	Mészooplancton	Microzooplancton	Nanozooplancton
$\Gamma$	Taux de prédation	s <sup>-1</sup>	1.5 10 <sup>-5</sup>	<b>3.0 10<sup>-5</sup></b>	4.5 10 <sup>-5</sup>
$\varphi_{dia}$	Préférence pour les diatomées	-	0.45	<b>0.13</b>	0
$\varphi_{nanophy}$	Préférence pour le nanophytoplancton	-	0	0.25	0
$\varphi_{pico}$	Préférence pour le picophytoplancton	-	0	<b>0.20</b>	0.65
$\varphi_{microzoo}$	Préférence pour le microzooplancton	-	0.5	<b>0.03</b>	0
$\varphi_{nanozoo}$	Préférence pour le nanozooplancnon	-	0	0.25	0
$\varphi_b$	Préférence pour les bactéries	-	0	<b>0.13</b>	0.35
$\varphi_{pdet}$	Préférence pour les petits détritus	-	0.05	0.04	0
$\varphi_{gdet}$	Préférence pour les grands détritus	-	0	0	0
K	Constante de demi-saturation de la prédation	mmolC.m <sup>-3</sup>	20	8.5	5
B	Constante de <i>messy feeding</i>	-	0.23	0.23	0.23
$\epsilon$	Efficacité d'assimilation	-	0.6	0.6	0.6
B	Proportion de l'égestion produisant des petits détritus	-	0.25	-	-
$k_{resp}$	Coût respiratoire	-	0.2	0.2	0.2
(N :C)	Quota N :C	molN.molC <sup>-1</sup>	0.18	0.18	0.18
(P :C)	Quota P :C	molP.molC <sup>-1</sup>	0.013	0.013	0.013
$\tau_{mort}$	Taux de mortalité	m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> .mmolC <sup>-1</sup>	3.0 10 <sup>-7</sup>	<b>8.0 10<sup>-7</sup></b>	1.3 10 <sup>-6</sup>
psmopzoo	Proportion de petits détritus produits par la mortalité	-	0.5	1	1

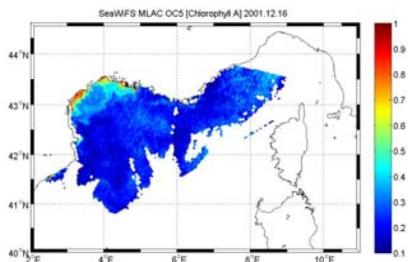
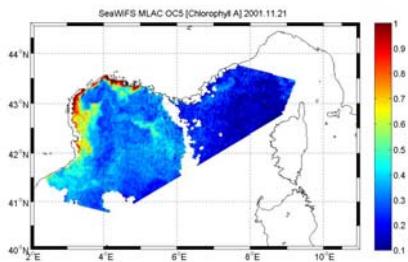
Tableau 8: Paramètres utilisés dans les équations du groupe fonctionnel des bactéries et autres fonctions liées à l'activité bactérienne. En gras, les valeurs différentes que la version d'ECO3M utilisée par M Hermann.

Symbol	Définition	Unités	Valeurs
$V_{max}$	Taux minimal d'absorption de MOD	s <sup>-1</sup>	<b>1.16 10<sup>-5</sup></b>
$K_{MOD}$	Constante de demi-saturation de DOC	mmolC.m <sup>-3</sup>	25
$K_{NH4}$	Constante de demi-saturation de l'absorption de l'ammonium	mmolN.m <sup>-3</sup>	0.2
$K_{PO4}$	Constante de demi-saturation de l'absorption du phosphate	mmolP.m <sup>-3</sup>	0.007
$\epsilon$	Efficacité de croissance		<b>0.17</b>
(N :C)	Quota N :C	molN.molC <sup>-1</sup>	0.232
(P :C)	Quota P :C	molP.molC <sup>-1</sup>	0.022
$\tau_{mort}$	Taux de mortalité	s <sup>-1</sup>	6.9 10 <sup>-7</sup>
$\tau_{rem,C}$	Taux de reminéralisation du carbone	s <sup>-1</sup>	5.0 10 <sup>-7</sup>
$\tau_{rem,N}$	Taux de reminéralisation de l'azote	s <sup>-1</sup>	6.0 10 <sup>-7</sup>
$\tau_{rem,P}$	Taux de reminéralisation du phosphore	s <sup>-1</sup>	7.0 10 <sup>-7</sup>
$\tau_{rem,Si}$	Taux de reminéralisation du silicium	s <sup>-1</sup>	5.78 10 <sup>-8</sup>
$\tau_{rem,Chl}$	Taux de reminéralisation de la chlorophylle	s <sup>-1</sup>	1.16 10 <sup>-6</sup>
$Q10_{nitrif}$	Constante dans la fonction de régulation	-	2
$T_{nitrif}$	Température dans la fonction de régulation	°C	10
$\tau_{nitrif}$	Taux de nitrification	s <sup>-1</sup>	5.91 10 <sup>-7</sup>
$Q10_{rem}$	Constante dans la fonction de regulation	-	2.37
$T_{ref}$	Temperature dans la fonction de regulation	°C	10
$W_{sed,microphy}$	Vitesse de chute du microphytoplancton	m.s <sup>-1</sup>	8.0 10 <sup>-6</sup>
$W_{sed,pdet}$	Vitesse de chute des petits détritus	m.s <sup>-1</sup>	1.157 10 <sup>-5</sup>
$W_{sed,gdet}$	Vitesse de chute des grands détritus	m.s <sup>-1</sup>	2.9 10 <sup>-4</sup>

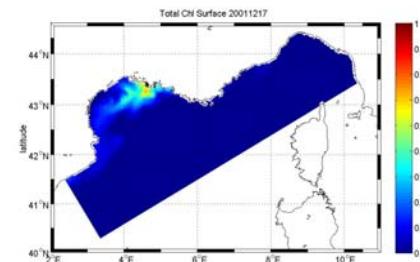
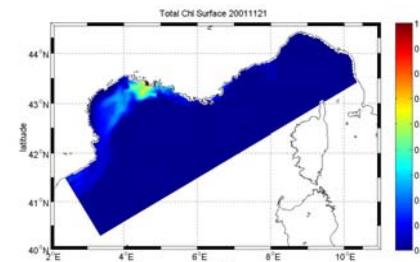
### 6.3 Annexe 3: Comparaisons images SeaWiFS OC5- sortie du modèle sur l'année 2001



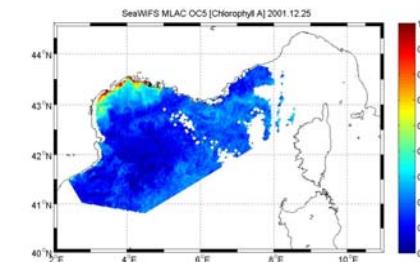
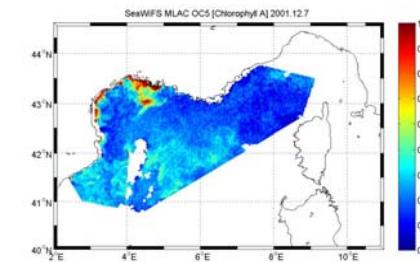
SEAWIFS



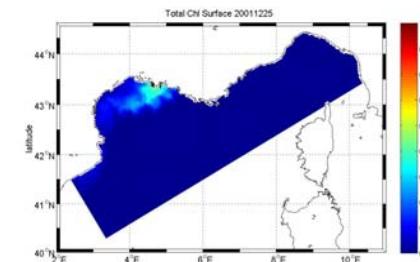
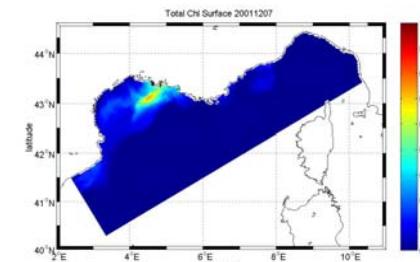
MODELE



SEAWIFS



MODELE



## 7 Bibliographie

Anderson and Pondaven, 2003. T.R. Anderson and P. Pondaven, Non-redfield carbon and nitrogen cycling in the Sargasso Sea: pelagic imbalances and export flux, *Deep-Sea Research I* 50 (2003), pp. 573–591

Baklouti, M., Diaz, F., Pinazo, C., Faure, V., Queguiner, B., 2006. Investigation of mechanistic formulations depicting phytoplankton dynamics for models of marine pelagic ecosystems. *Progress in Oceanography*, 71. 1-33.

Diaz, F., P. Raimbault, B. Boudjellal, N. Garcia, and T. Moutin, 2001. Early spring phosphorus limitation of primary productivity in a NW Mediterranean coastal zone (Gulf of Lions), *E. Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 211, 51–62.

Dufau-Julliand C et al, 2004. Three-dimensional modeling of the Gulf of Lion's hydrodynamics (northwest Mediterranean) during January 1999 (MOOLI3 Experiment) and late winter 1999: Western Mediterranean Intermediate Water's (WIW's) formation and its cascading over the shelf break, *Journal of Geophysical Research*, 109, C11002

Estournel, C., Zervakis, V., Marsaleix, P., Papadopoulos, A., Auclair, F., Perivoliotis, L., Tragou, E., 2005. Dense water formation and cascading in the Gulf of Thermaikos (North Aegean), from observations and modelling. *Continental Shelf Research* 25, 2366-2386.

Gohin, F., Druon, J.N., and Lampert, L. 2002. A five channel chlorophyll concentration algorithm applied to SeaWiFS data processed by SeaDAS in coastal waters. *Intl. J. Rem. Sens.*, 23(8): 1639 - 1661.

Hermann, M. 2007. Formation et devenir des masses d'eau en Méditerranée nord - occidentale. Influence sur l'écosystème pélagique planctonique. Variabilité interannuelle et changement climatique. *Thèse*. Université de la Méditerranée, Aix-Marseille II. 306p.

Hu , Z., 2007. Suivi de structures tourbillonnaires et filamentaires dans le Golfe du Lion, avec la technique des ondelettes. *Rapport de stage M2*. Université de la Méditerranée, Aix-Marseille II. 46p.

Leblanc, K., B. Quéguiner, N. Garcia, P. Rimmelin, and P. Raimbault, 2003. Silicon cycle in the NW Mediterranean Sea : seasonal study of a coastal oligotrophic site, *Oceanologica Acta*, 26, 339–355.

Margat, Jean. 1992. L'Eau dans le bassin méditerranéen: situation et prospective. *Fascicules du Plan Bleu*. 196p.

Marsaleix, P., Auclair, F., Floor, J. W., Herrmann, M. J., Estournel, C., Pairaud, I., Ulises, C., 2008. Energy conservation issues in sigma-coordinate free-surface ocean models. *Ocean Modelling* 20, 61-89.

Martin, J.M. & A. Saliot, 1992. Bilan des apports fluviatiles et atmosphériques d'éléments et composés chimiques en Méditerranée Occidentale. *3ème rencontre de l'Agence Régionale pour l'Environnement Provence-Alpes-Côte d'Azur*, 24–27 septembre 1991: 61–66.

Marty, J., and J. Chiavérini, Seasonal and interannual variations in phytoplankton production at dyfamed time-series station, north-western mediterranean sea, *Deep-Sea Res.*, Part II, 49(11), 2017–2030, 2002.

McGill, D.A., 1969. A budget for dissolved nutrient salts in the Mediterranean Sea. *Cahiers Océanographiques* 21, pp. 543–554

McGillicuddy, D., Johnson, R., Siegel, D.A., Michaels, A.F., Bates, N.R. and Knap, A.H., 1999. Mesoscale variations of biogeochemical properties in the Sargasso Sea. *Journal of Geophysical Research.* 104, pp. 13381–13394

Millot, C. 1990. Gulf of Lions' Hydrodynamics. *Continental Shelf Research* CSHRDZ, Vol. 10, No. 9/11, p 885-894.

Mizobata, K., S. I. Saitoh, A. Shiomoto, T. Miyamura, N. Shiga, K. Imai, M. Toratani, Y. Kajiwara, K. Sasaoka. 2002. Bering Sea cyclonic and anticyclonic eddies observed during summer 2000 and 2001. *Progress In Oceanography, Volume 55, Issues 1-2, October 2002, Pages 65-75.*

Moutin,T., Tron F. Thingstad, France van Wambeke, Dominique Marie, Gerd Slawyk, Patrick Raimbault and Hervé Claustre. 2002. Does Competition for Nanomolar Phosphate Supply Explain the Predominance of the Cyanobacterium Synechococcus? *Limnology and Oceanography*, Vol. 47, No. 5 (Sep., 2002), pp. 1562-1567.

Petrenko, A. A. 2003. Variability of circulation features in the Gulf of Lion NW Mediterranean Sea. Importance of inertial currents. *Oceanologica Acta*, v. 26, iss. 4, p. 323-338.

Thingstad, T., and F. Rassoulzadegan, 1999. Conceptual models for the biogeochemical role of the photic zone microbial food web, with particular reference to the Mediterranean Sea, *Prog. Oceanogr.*, 44, 271–286.

Ulses, C., C. Estournel, P. Puig, X. Durrieu de Madron, and P. Marsaleix, 2008, Dense shelf water cascading in the northwestern Mediterranean during the cold winter 2005. Quantification of the export through the Gulf of Lion and the Catalan margin *Geophysical. Research. Letters* 35, L07610.