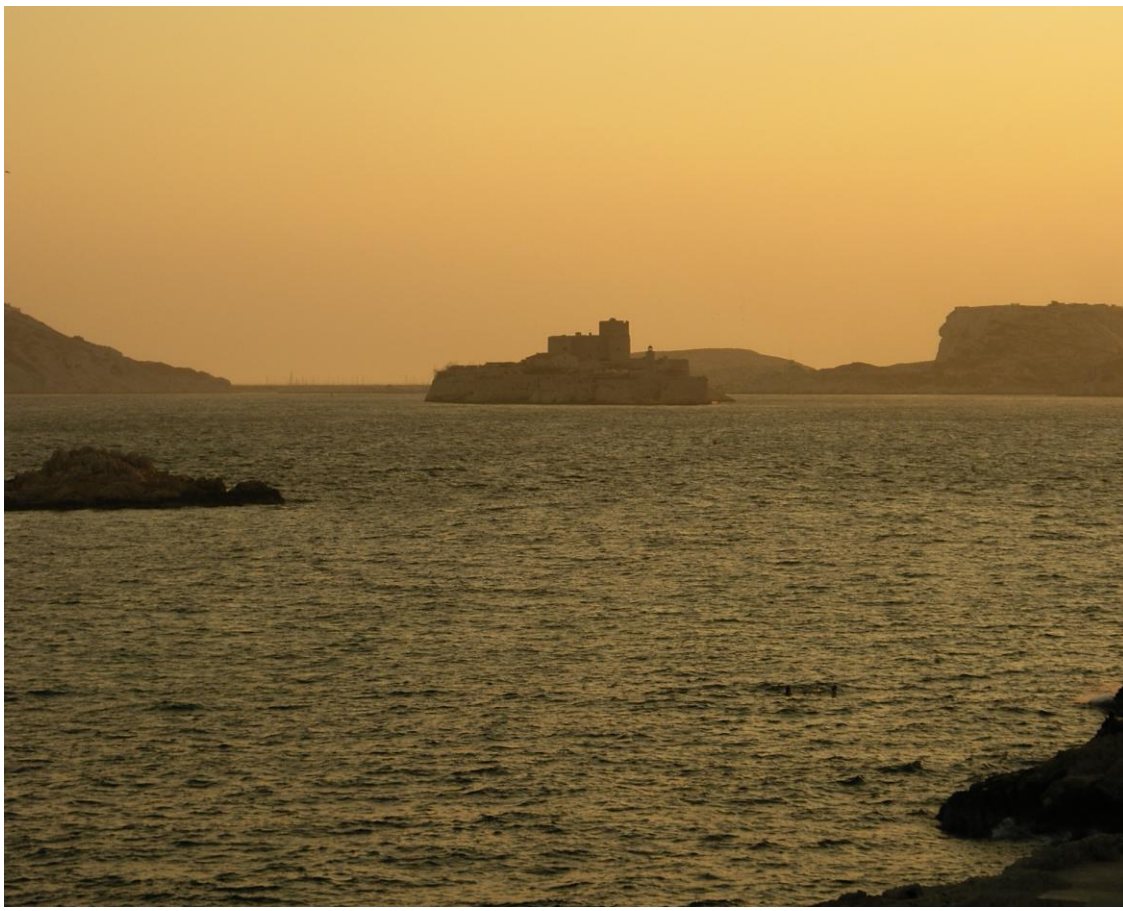
Laboratoire Environnement Ressources Provence Azur Corse

Pinazo C., M. Fraysse, A. Doglioli, V. Faure, I. Pairaud, A. Petrenko, B. Thouvenin, J. Tronczynski, R. Verney, C. Yohia

Juin 2013 – RST.ODE/LER/PAC/13-14

MASSILIA: Modélisation de la baie de MArSeILLe : Influence des apports Anthropiques de la métropole sur l'écosystème marin



MASSILIA:
Modélisation de la baie de MArSeILLe : Influence des apports Anthropiques de la métropole sur l'écosystème marin

Ifremer

juin 2013

Fiche documentaire

Numéro d'identification du rapport : RST.ODE/LER/PAC/13-14 **Diffusion** : libre : ☑ restreinte : ☐ interdite : ☐ **Validé par** : Bruno Andral Adresse électronique : bruno.andral@ifremer.fr	**date de publication :** juin 2013 **nombre de pages :** 136 **bibliographie :** oui **illustration(s) :** oui **langue du rapport :** français
Titre de l'article MASSILIA:Modélisation de la baie de MArSeILLe : Influence des apports Anthropiques de la métropole sur l'écosystème marin	
Contrat n° - Rapport intermédiaire ☐ Rapport définitif ☑	
Auteurs principaux : **C. Pinazo** **M. Fraysse** **A. Doglioli** **V. Faure** **I. Pairaud** **A. Petrenko** **B. Thouvenin** **J. Tronczynski** **R. Verney** **C. Yohia**	**Organisme / Direction / Service, laboratoire** Mediterranean Institute of Oceanography (Marseille) IFREMER/LER/PAC (Toulon)/ M.I.O. (Marseille) Mediterranean Institute of Oceanography (Marseille) Actimar (Aix en Provence) IFREMER/LER/PAC (Toulon) Mediterranean Institute of Oceanography (Marseille) IFREMER/ODE/DYNECO/PHYSED (Brest) IFREMER/DBE/LBCO (Nantes) IFREMER/ODE/DYNECO/PHYSED (Brest) OSU - Institut Pythéas (Marseille)
Encadrement(s) :	
Cadre de la recherche : PNEC EC2CO MASSILIA	
Destinataire :	

Résumé Dans une perspective de développement durable, il est nécessaire d'appuyer les politiques publiques et les modes de gestion, sur des recherches amont permettant de mieux identifier et évaluer l'influence de l'homme sur son environnement. L'étude de l'impact anthropique des grandes métropoles côtières sur le fonctionnement des écosystèmes marins apparaît une priorité pour un développement durable en Méditerranée. Le projet MASSILIA a consisté en l'étude de l'influence de la grande métropole Marseillaise sur l'environnement marin côtier grâce à des approches de modélisation numérique. L'objectif était de mieux comprendre le fonctionnement particulier de cet écosystème soumis à une influence anthropique multiple : émissaire, fleuves côtiers, Rhône en utilisant l'importante base de données disponibles et en l'intégrant dans des outils numériques. Le projet a tenté de comprendre à partir de l'étude de ce cas particulier, l'influence que peut avoir une grande métropole sur l'environnement côtier. Cette étude s'appuie sur les travaux réalisés dans le cadre des projets METROC et GIRAC, tant du point de vue des mesures des apports par les fleuves côtiers et l'émissaire, que de la modélisation.

Abstract In the framework of sustainable development, the anthropogenic impact of large coastal cities on the marine ecosystem is a key issue. This project aimed to improve our knowledge in marine ecosystem response to the anthropogenic supplies (from rivers, sewage outflows and atmosphere) from large cities. In particular, the goal is to underline how the physical forcing decreases or increases the anthropogenic impact on the coastal ecosystem and the assessment of the chemical contaminant (PCB) inputs (from city to sea) and exports (from mid-sea to open sea).

Mots-clés

Apports anthropiques, baie de Marseille, Méditerranée nord-occidentale, modélisation 3D, MARS3D, ECO3M, couplage physique et biogéochimique

Words keys

Anthropogenic supply, Bay of Marseille, North-Western Mediterranean Sea, 3D modelling, MARS3D, ECO3M, physical-biogeochemical coupling

1 INTRODUCTION 7
1.1 CONTEXTE DE L'ETUDE 7
1.2 OBJECTIFS DE L'ETUDE 7
1.3 APPROCHE UTILISEE 8
2 SITE D'ETUDE 9
3 LES MODELES MIS EN PLACE 13
3.1 MODELISATION ATMOSPHERIQUE 14
3.2 COMPARAISON DES MODELISATIONS ATMOSPHERIQUES WRF ET MM5 15
3.3 MODELISATION HYDRODYNAMIQUE 16
3.4 MODELISATION BIOGEOCHIMIQUE ET COUPLAGE 18
3.5 MODELISATION HYDROSEDIMENTAIRE 19
3.6 MODELISATION DES CONTAMINANTS 20
3.7 METHODE DES ONDELETTES 21
4 RESULTATS GLOBAUX DES MODELES 21
4.1 MODELISATION ATMOSPHERIQUE 21
4.2 MODELISATION HYDRODYNAMIQUE 23
4.3 MODELISATION BIOGEOCHIMIQUE COUPLEE 24
4.4 MODELISATION HYDROSEDIMENTAIRE 25
4.5 MODELISATION DES CONTAMINANTS 26
5 RESULTATS PRESENTES PAR EVENEMENT ETUDIE 30
5.1 SITUATIONS DE VENT DE MISTRAL 32
5.1.1 Situation typique de Mistral 25 au 29 septembre 2007 32
5.1.2 Situation extrême de Mistral 9, 10 et 14 Novembre 2007 41
5.2 SITUATIONS DE VENT DE SUD-EST: 54
5.2.1 Situation typique vent de sud-est: 19 au 23 novembre 2007 54
5.2.2 Situation extrême tempête de vent de sud-est: Janvier 2008 64
5.3 SITUATIONS DE VENT D'OUEST 70
5.4 SITUATIONS DE PLUIE 72
5.4.1 Situation typique d'orage de fin d'été: 25 Octobre 2007 72
5.4.2 Situation de pluie d'automne 2008 85
5.5 SITUATIONS D'INTRUSION DU PANACHE DU RHONE 100
5.5.1 Situation typique intrusion du panache vers l'est: 1er Octobre 2007 100
5.5.2 Situation extrême d'intrusion du panache du Rhône vers l'est: Juin 2008 105
6 CONCLUSIONS et PERSPECTIVES 116
6.1 SYNTHESE PAR EVENEMENT 116
6.1.1 Evénements de Mistral 116
6.1.2 Evénements de sud-est 116
6.1.3 Evénements de pluie de fin d'été 116
6.1.4 Evénements d'intrusions des eaux du Rhône 117
6.2 LES REPONSES AUX QUESTIONS POSEES 117
6.3 CONCLUSION GENERALE 121
6.4 PERSPECTIVES 122
7 REFERENCES 123
8 ANNEXE 1 : Mesures de contaminant à SOMLIT 126
9 ANNEXE 2 : Hypothèses et paramètres utilisés dans la modélisation des contaminants (PCB) 130
10 ANNEXE 3 : Valorisation 134

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient tout particulièrement:

- la Communauté Urbaine Marseille Provence Métropole et la SERAM
(Société d'Exploitation du Réseau d'Assainissement de Marseille) pour avoir fourni les débits des rivières urbaines et de la STEP de Marseille;

- l'équipe du réseau National SOMLIT d'observation littorale (INSU 767 CNRS), le programme National MOOSE (Mediterranean Oceanic Observing System on Environment) et le Service d'Observation du Mediterranean Institute of Oceanography (MIO) en particulier P. Raimbault, N. Garcia, V. Lagadec, M. Lafont et M. Fornier, pour avoir fourni les concentrations des apports du Rhône, les apports atmosphériques et les données *in-situ* à la station SOFCOM de la baie de Marseille ainsi que leur aide analytique et sur le terrain;

- l'équipe d'IFREMER, et en particulier Francis Gohin, pour avoir fourni les images satellites couleur de l'eau MERIS et MODIS traitées avec l'algorithme OC5;

- la Compagnie Nationale du Rhône pour les données de débit du fleuve;

- Météo-France pour les données météorologiques.

Les auteurs remercient également pour leur soutien financier:

- L'Agence de l'Eau AERMC;
- la Région PACA et l'IFREMER pour la Bourse de thèse BDO de Marion Fraysse;
- le programme EC2CO PNEC;
- le programme FUI GIRAC;
- le projet FP7 PERSEUS;
- l'entreprise ACRI-ST.

Tous nos remerciements à Pierre Garreau, Cassandre Jany et Cedric Garnier pour les discussions et échanges fructueux.

1. INTRODUCTION

1.1. CONTEXTE DE L'ETUDE

Dans une perspective de développement durable, il est nécessaire d'appuyer les politiques publiques et les modes de gestion, sur des recherches amont permettant de mieux identifier et évaluer l'influence de l'homme sur son environnement. L'étude de l'impact anthropique des grandes métropoles côtières sur le fonctionnement des écosystèmes marins apparaît une priorité pour un développement durable en Méditerranée.

Le projet MASSILIA a consisté en l'étude de l'influence de la grande métropole Marseillaise sur l'environnement marin côtier grâce à des approches de modélisation numérique. L'objectif était de mieux comprendre le fonctionnement particulier de cet écosystème soumis à une influence anthropique multiple : émissaire, fleuves côtiers, Rhône en utilisant l'importante base de données disponibles et en l'intégrant dans des outils numériques. Le projet a tenté de comprendre à partir de l'étude de ce cas particulier, l'influence que peut avoir une grande métropole sur l'environnement côtier. Cette étude s'appuie sur les travaux réalisés dans le cadre des projets METROC et GIRAC, tant du point de vue des mesures des apports par les fleuves côtiers et l'émissaire, que de la modélisation.

1.2. OBJECTIFS DE L'ETUDE

L'objectif général du projet MASSILIA est de comprendre le fonctionnement de l'écosystème de la baie de Marseille soumis à de forts apports anthropiques en sels nutritifs, en matière organique particulaire (MOP), en matière organique dissoute (MOD) et son rôle dans la restitution partielle de la qualité des eaux de cette zone côtière.

Le travail se décline en trois axes d'étude :

(a) Etude de l'impact sur l'écosystème des multiples apports en fonction de leur type (émissaire, fleuves côtiers, Rhône).
Il s'agit de l'étude de l'impact des apports en sels nutritifs, MOP et MOD en fonction de leurs origines très différentes.

(b) Etude du rôle des forçages physiques dans la modulation de ces impacts (vent, stratification, upwelling, tourbillons).
Il s'agit de comprendre comment les processus hydrodynamiques induits par les processus atmosphériques (vent: mélange, upwelling; stratification) vont moduler l'impact des apports.

(c) Etude du rôle de la spéciation d'un congénère PCB sur son cycle biogéochimique.
Il s'agit d'explorer différentes situations d'apports et d'état de l'écosystème pour étudier la dispersion et le transfert vers le large des apports de PCB d'une grande métropole.

En prenant l'exemple de l'écosystème marin soumis à l'influence de la métropole marseillaise, nous tenterons de répondre aux questions suivantes plus générales:

- Quels sont les rôles respectifs des forçages physiques (vent : mélange, stratification, upwelling, tourbillons) et biogéochimiques (apports en sels nutritifs, MOP, MOD) dans les processus de dégradation ou de restauration d'écosystèmes côtiers soumis à de forts apports anthropiques?

- Quel est le rôle des événements physiques extrêmes dont la fréquence augmente avec le changement climatique (crues, tempêtes, orages, vagues de chaleur) dans les modifications majeures des écosystèmes marins ?

- Le milieu côtier méditerranéen, à l'échelle d'une baie comme celle de Marseille, constitue-t-il une zone de transit ou de stockage des contaminants hydrophobes ? Quel est le rôle de la spéciation d'un PCB dans son cycle biogéochimique à l'échelle de la baie de Marseille ?

1.3. APPROCHE UTILISEE

A partir des données satellites, des données météorologiques, des débits du Rhône et de la pluviométrie et des mesures biogéochimiques sur la zone, ont été établies :

- une typologie des forçages physiques et climatologiques sur la zone
- une typologie des forçages biogéochimiques (apports en sels nutritifs et MO)

L'analyse de nouvelles données et la réanalyse de données historiques ont permis de comprendre le fonctionnement du système et ont été utilisées pour la calibration et la validation des différents modèles.

Les modèles permettent de fournir des cartes de distribution d'indicateurs pertinents tels que les champs de courants, la température, la salinité, la turbidité, la chlorophylle_a, les teneurs en sels nutritifs ou en matière organique dissoute et particulaire. Ces cartes de distribution sont établies selon différents scénarios réalistes des conditions de forçages étudiées (régimes de vent : mélange, stratification, upwelling, tourbillons, crues, orages, tempêtes) typiques et extrêmes.

A partir des résultats du modèle hydrodynamique, la méthode d'analyse en ondelettes a permis la détection de tourbillons.

Les modèles, outils diagnostiques d'exploration, ont également permis à partir des simulations de scénarios réalistes de comprendre et de hiérarchiser le rôle des forçages dans le fonctionnement de l'écosystème.

Forçage	Situation typique	Situation extrême
Vent **T° de l'air**	**Mistral (upwelling) : septembre 2007** **Vent de sud-est : novembre 2007** **Vent d'ouest : mars 2008** **Vent faible + forte chaleur (stratification) été 2009 ou 2010**	**Tempête de Mistral (ex : décembre 2004, novembre 2007 - déc. 2007; 1 mois en février-mars 2009)** **Tempête de vent de sud-est (janvier 2008 et décembre 2008)** **Tempête de vent d'ouest (avril 2008)** **Vague de chaleur (ex : été 2003)**
Rhône	**Extension ou Intrusion du panache vers l'est : mai 2008 ou 1er oct. 2007**	**Extension ou intrusion du panache du Rhône à l'est (ex : décembre 2003; juin 2008)**
Pluies	**Orage de fin d'été : octobre 2007 ou octobre-novembre 2008**	**Orage de fin d'été exceptionnel : septembre 2009**

Tableau 1
Evénements typiques et extrêmes durant les dix dernières années.
En rouge, les événements étudiés dans MASSILIA.

Pour répondre aux questions posées, des simulations réalistes ont été effectuées afin d'étudier d'une part des situations typiques (qui arrivent plusieurs fois par an) de la zone et d'autre part des situations extrêmes qui sont survenues ces dernières années (valeurs proches des records observés sur la période 2001-2009). Le choix des périodes s'est fait en étudiant soigneusement les images satellites,

les données météorologiques de vent et de température de l'air, les données de débit du Rhône, de pluviométrie sur l'agglomération etc… Les données de forçages et de paramétrisation pour les modèles et les données de validation ont été recherchées pour ces périodes. Après une étude détaillée des données météorologiques, notamment de l'année 2008, nous avons affiné le choix des événements. Les tempêtes de sud-est de janvier et décembre 2008 considérées comme événements extrêmes, sont même des records d'intensité pour ce vent dans la période 2001-2009. Nous avons donc traité ces questions de recherche à partir de simulations choisies (en rouge) parmi les différentes situations réalistes remarquables de ces dix dernières années (en bleu) (Tableau 1).

2. SITE D'ETUDE

Le plateau continental de la zone d'étude située à l'est du golfe du Lion est soumis aux forçages atmosphériques, du Rhône et de la circulation générale. Cette zone clé, s'étendant entre le Rhône et Marseille (zone nommée dans la suite RHOMA), constitue l'entrée du golfe du Lion pour la circulation générale et a été cependant beaucoup moins étudiée que le golfe dans son ensemble.

La ville de Marseille se situant au sud-est de la France est entourée au nord par des reliefs relativement importants dont les altitudes des premiers sommets sont aux alentours de 600-1000m (Sainte-Victoire 1011m dans le pays d'Aix en Provence, la Sainte-Baume 1042 m, Massif de l'Etoile 779m, le Garlaban 731m) et au sud par la mer Méditerranée (Figure 1).

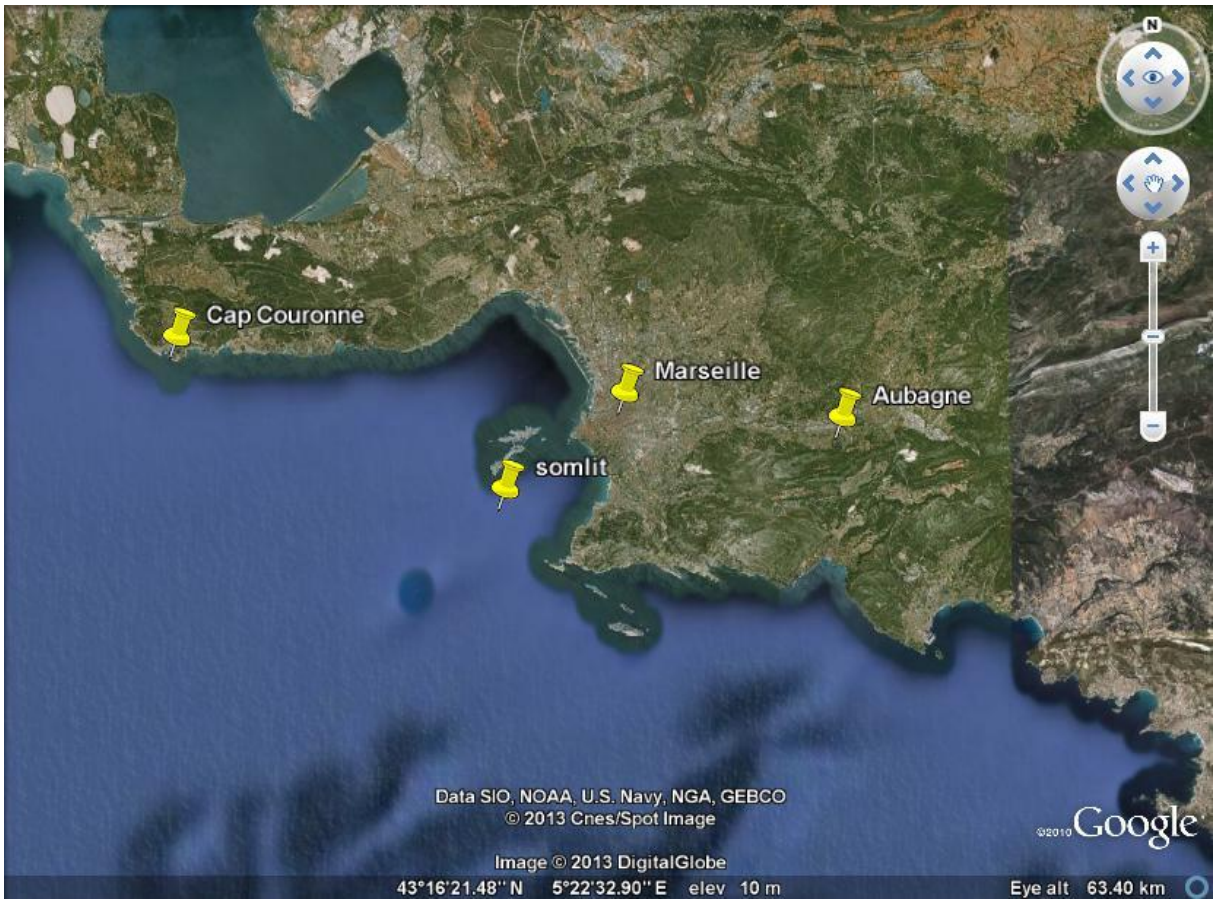


Figure 1 : Vue satellite de la zone d'étude autour de la ville de Marseille

Cela confère à la ville une topographie fortement accidentée qui a favorisé l'imbrication du réseau hydrographique artificialisé et du réseau d'assainissement, dense et complexe. L'agglomération a la particularité d'être traversée par deux cours d'eau. Le premier est le ruisseau des Aygalades au niveau du quartiers des Aygalades, dont il prend le nom (partie nord de la ville) et le second l'Huveaune au niveau des quartiers sud de la ville dont l'affluent de ce dernier est le Jarret, entièrement recouvert dans sa partie urbaine. Ces deux cours d'eau sont en réalité des fleuves malgré des débits relativement faibles.

Dans le cas du projet MASSILIA, on s'intéressera beaucoup à l'Huveaune dont la source se situe dans le massif de la Sainte-Baume. L'Huveaune a une longueur de 49 km et circule entre la Sainte-Baume, le pays d'Aubagne et la ville de Marseille pour la partie basse de la vallée. Ce fleuve, malgré un débit relativement faible, peut connaître des crues assez importantes (comme en janvier 1978) liées à de fortes précipitations. En dehors des crues, les eaux de l'Huveaune et de son affluent le Jarret sont dégrillées au niveau de la station de la Pugette, puis sont détournées vers l'émissaire 2 de la STEP avant d'être rejetées à Cortiou (Figure 2). Jusqu'en 2008, l'effluent en sortie de station d'épuration était rejeté dans l'Emissaire 1, tandis que l'Huveaune était repris après déviation dans l'Emissaire 2. Depuis 2009, la station d'épuration rejette dans l'Emissaire 2 et les eaux traitées se mélangent donc à celle de l'Huveaune avant de rejoindre la mer. Le volume annuel moyen déversé par la station en mer dans la Calanque de Cortiou atteint 100 millions de m^3.

Lors de fortes pluies, les déversements se font dans le milieu marin avec ou sans traitement préalable. Les déversoirs d'orages (DO) permettent de rejeter une partie des effluents dans le milieu naturel sans passer par la station d'épuration lorsque la capacité de cette dernière ne le permet plus, afin d'éviter l'encombrement des conduites et l'inondation de l'agglomération. Il existe plusieurs cours d'eau intermittents qui constituent également des voies d'apport dans le milieu naturel, dont les ruisseaux Pelouque et Bonneveine faisant l'objet d'une instrumentation. Le volume rejeté mesuré de ces ruisseaux est moindre par rapport aux Aygalades ou à l'Huveaune. Une description détaillée des voies d'apports et de l'évaluation des contaminants rejetés est disponible (Jany et al., 2012).

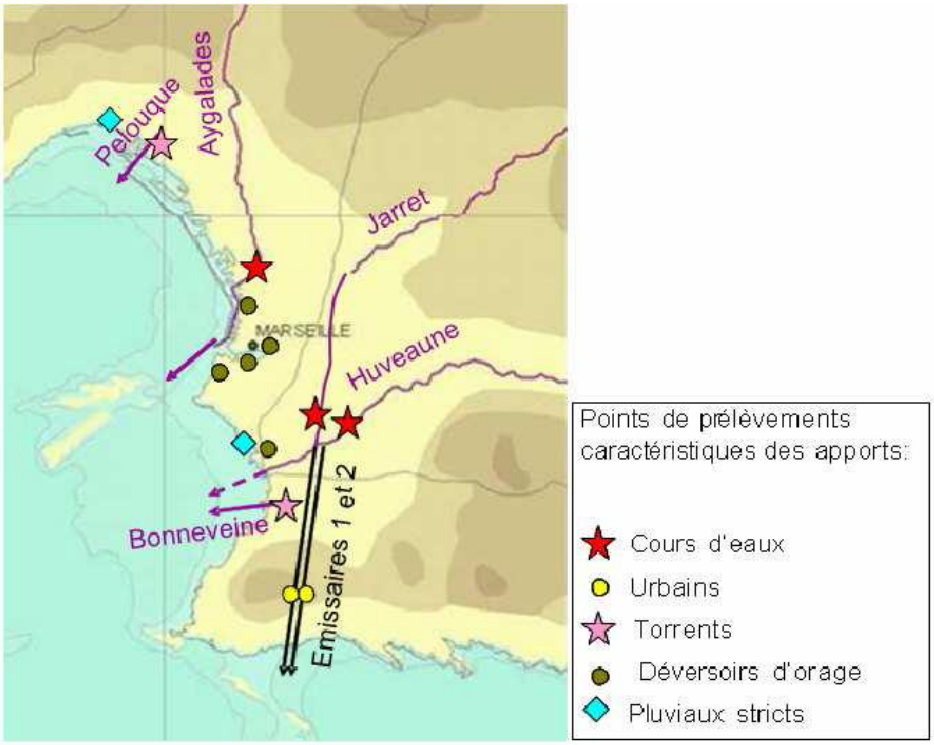


Figure 2 : Carte des eaux rejetées dans la zone de la métropole de Marseille et leur type, correspondant aux prélèvements réalisés dans le cadre du projet METROC (extrait de Jany et al., 2012, Figure 4)

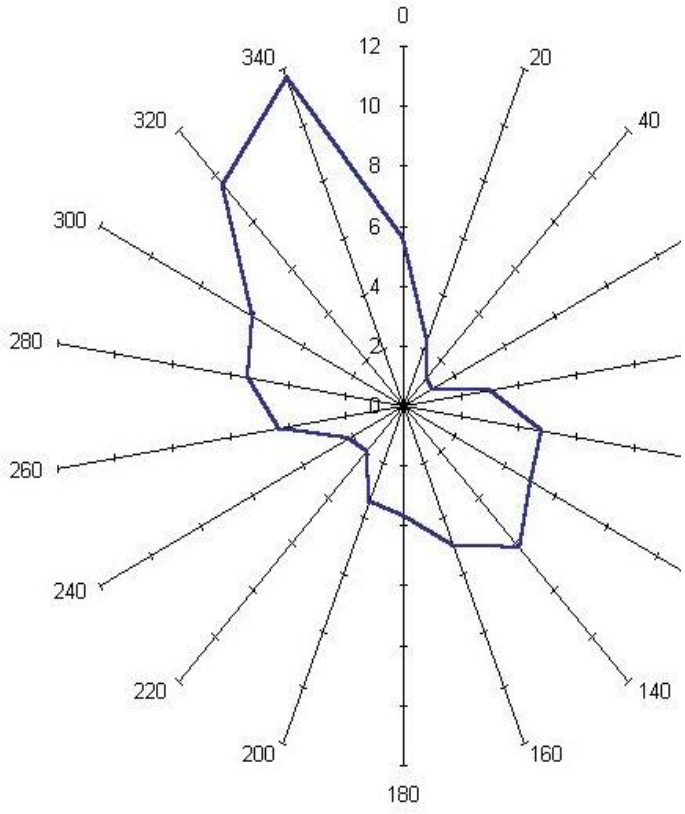


Figure 3 : Rose des vents à Marignane normale climatique 1961-1991

Le climat de Marseille est très variable avec des extrêmes parfois importants, typiques du climat méditerranéen. Les orages de fin d'été sont brutaux et apportent chaque année une très grande quantité d'eau : 80 à 100 mm en quelques heures (avec des extrêmes de 230 mm en 4h, Météo France, Bulletin Climatique sud-est n°9/2000) pour une hauteur annuelle moyenne d'environ 545 mm.
Lors des orages et des fortes pluies, en plus des fleuves qui se déversent naturellement au niveau de leur embouchure, des torrents et des déversoirs d'orages rejettent les eaux issues du ruissellement (Figure 2).

La région est soumise à l'ensemble des régimes de vent comme le montre la rose des vents (Figure 3) mais les vents les plus forts sont les vents de sud à sud-est et le Mistral (vent de nord à nord-ouest relativement froid et sec soufflant essentiellement en rafale).
Ce dernier souffle en moyenne 1 jour sur 3 et peut être violent (cas de la tempête du 27 octobre 2012 avec des rafales à 150km/h sur les îles du Frioul). L'effet du vent est déterminant dans cette région. Les forçages météorologiques ont une influence importante sur les variations de la température de la mer. On peut ainsi noter des zones de refroidissement de plusieurs degrés de la température estivale de surface, dues au processus d'upwelling qui amène les eaux froides du fond vers la surface sous l'action des vents de nord-ouest (Mistral).
Les tourbillons semblent également avoir un rôle clé dans le transport d'eau individualisée en provenance du Rhône, qui peut être advectée vers l'est jusque dans la baie de Marseille. Enfin, comme l'ont souligné Albérola et Millot (2003), des intrusions du Courant Nord (CN) depuis le sud de la zone peuvent survenir et constituer un forçage important de la circulation du plateau en générant une circulation globalement vers l'ouest. Une telle intrusion du CN sur le plateau a été observée en juin 2000 par Petrenko et al. (2005) et en octobre 2007. Une intrusion a aussi été observée à l'aide de l'ADCP de coque du Téthys2 le 21 octobre 2007 par Pairaud et al. (2011).

La Normale climatique à la station météorologique de Marignane pour la période 1960-1990 est la suivante:

Précipitations

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
Moy.	47,2	54	43,7	47,9	42,3	27,8	13,7	29,3	46,7	77,6	58,4	55,8

Tableau 2
Cumul mensuel moyen des précipitations (mm) à la station météorologique de Marignane pour la période 1960-1990

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
>1mm	6,5	6	5,5	5,3	4,9	3,5	1,6	3	3,6	5,8	5,1	6
>5mm	2,7	3,1	2,8	2,7	2,2	1,7	0,9	1,4	2,2	3,3	2,9	2,9
>10mm	1,5	1,7	1,4	1,3	1,3	1	0,4	1	1,4	1,9	2	1,6

Tableau 3
Nombre moyen mensuel de jours avec précipitations à la station météorologique de Marignane pour la période 1960-1990

Vent:

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
>57,6 km/h	10,7	8,2	10,4	11,1	5,8	7	8,5	6,1	6,7	8	8,7	9,1
>100 km/h	1	0,9	1,3	0,9	0	0,3	0,3	0	0,1	0,3	0,8	0,7

Tableau 4
Nombre moyen mensuel de jours avec vent à la station météorologique de Marignane pour la période 1960-1990

La baie de Marseille constitue un écosystème très particulier, puisqu'il oscille entre un niveau de base correspondant à un milieu plutôt oligotrophe où l'on mesure régulièrement des valeurs de chlorophylle_a < 0.1 µg/L (Station SOFCOM du réseau d'Observation SOMLIT, anse des Cuivres à Endoume) et un niveau correspondant à un milieu recevant de multiples apports anthropiques provenant de l'émissaire de Cortiou (urée : 51 µmol/L, NH4 : 34 µmol/L, NO3 : 17 µmol/L, PO4 : 13 µmol/L, moyennes annuelles d'après Arfi et al. (2000)), des fleuves côtiers (Les Aygalades et l'Huveaune) lors d'épisodes pluvieux ainsi que de l'extension ou d'intrusions du panache du Rhône. Ces différents apports conduisent régulièrement à des mesures de chlorophylle_a supérieures à 1 et même 3 µg/L (SOFCOM, anse des cuivres). Les apports en sels nutritifs, MOP et MOD sont donc très différents en fonction de leur origine.

L'influence du Rhône se fait quant à elle sentir jusqu'en baie de Marseille, où des eaux dessalées provenant du fleuve peuvent être retrouvées dans la baie (Para et al., 2010), et cela durant plusieurs jours. Gatti et al., (2006) avaient observé l'extension du panache à un site plus au sud (SOFI/GOLTS)

après une crue en décembre 2003. Sur les années 2007-2008, le modèle indique que le maximum d'occurrence des intrusions a lieu de juin à octobre (Pairaud et al., 2011), avec plus d'une dizaine d'épisodes par an. Le panache du Rhône va constituer les apports biogéochimiques les plus importants et persistants dans le cas d'intrusions du panache dans la baie de Marseille (décalage du panache vers l'est sous l'effet du vent et de tourbillons).
L'émissaire de Cortiou rejette des quantités relativement stables avec un cycle journalier marqué. Le panache de l'émissaire, par faible vent ou par vent de sud-est, entre dans la baie, ainsi que des « bulles » d'eau polluée qui s'individualisent (peut être sous l'effet de tourbillons) et peuvent persister longuement (Arfi et al., 2000). Les fleuves côtiers vont apporter de manière épisodique et saisonnière, des quantités très variables en fonction de la pluviométrie, mais aussi de la durée de la période de sécheresse précédente.

Un contaminant rejeté dans la baie de Marseille se disperse dans le milieu marin au gré des courants; sa spéciation détermine la répartition des flux de ce contaminant vers l'atmosphère, vers le sédiment, vers le large ou vers la chaîne trophique.

3. LES MODELES MIS EN PLACE

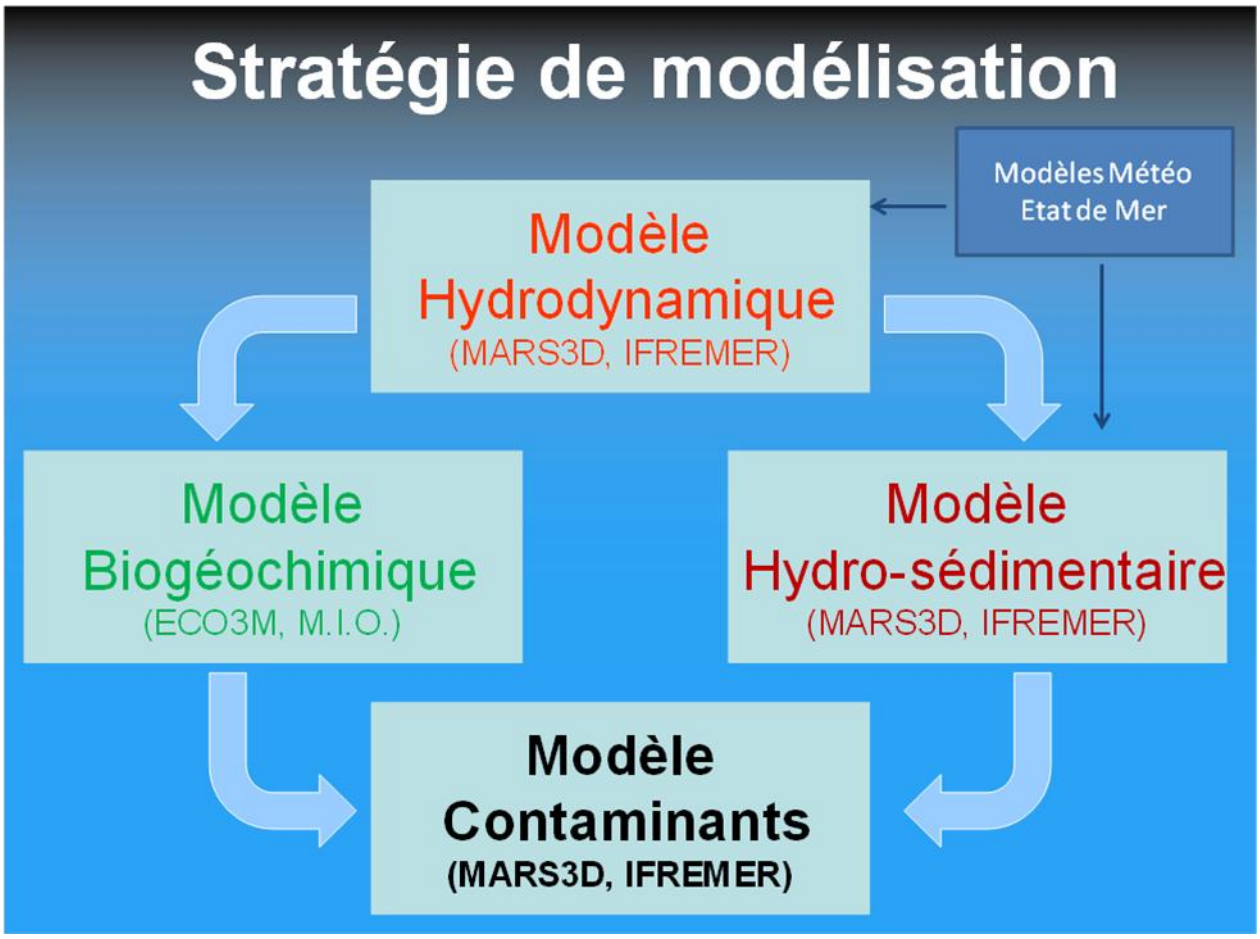


Figure 4 : Couplage des modèles dans le cadre des projets MASSILIA-GIRAC-METROC

Les forçages physiques extrêmes ou non (vent, tempêtes, orages et crues exceptionnels) sont tels dans cette zone qu'il est nécessaire d'utiliser un modèle hydrodynamique pour comprendre leur influence sur le domaine étudié. Ce modèle a été implanté, développé et testé de manière à le calibrer et à le valider sur la zone d'étude. L'importance de l'interface eau-sédiment dans les échanges

particulaires et dissous en zone côtière implique le développement d'un modèle hydrosédimentaire qui permet d'étudier les phénomènes de dispersion et de dépôt des particules fluviatiles et urbaines apportées dans le milieu pendant ces événements, ainsi que les possibles séquences de remise en suspension qui peuvent avoir un impact sur la turbidité de l'eau (action METROC). Le couplage avec un modèle écologique mécaniste a permis de simuler le fonctionnement de l'écosystème soumis aux forçages physiques et anthropiques et en particulier sa réponse aux perturbations anthropiques. Enfin, un modèle de contaminants, utilisant les résultats des modèles précédents a permis également d'explorer la spéciation d'un congénère de PCB en lien avec les variations écologiques du système (teneur en carbone organique particulaire (COP), carbone organique dissous (COD), phytoplancton). Ce système de modélisation mis en place dans le cadre de cette étude est présenté Figure 4.

3.1. MODELISATION ATMOSPHERIQUE

Le modèle WRF a été développé par le National Center for Atmospheric Research (NCAR) le National Centers for Environmental Prediction (NCEP) et le Département de l'armée de l'air US-AIR Force (AFWA) aux Etats-Unis. Il est actuellement utilisé par la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) comme modèle de prévision opérationnel.

Au sein du WRF, deux cœurs dynamiques ont été développés:
-Le ARW (Advanced Research WRF)
-le NMM (Non-Hydrostatic Mesoscale Model).

Le premier cœur ARW a été développé à des fins de recherche avec plusieurs options physiques, une possibilité de paramétrage importante et un système d'assimilation de données.
Le second cœur NMM a été développé dans un but opérationnel afin de pouvoir simuler les écoulements et les phénomènes de méso-échelle tels que les orages unicellulaires ou les ondes topographiques. D'un point de vue informatique, les codes des deux cœurs ont été élaborés afin de s'adapter aux architectures massivement parallèles.

Dans le cadre du projet MASSILIA, nous avons utilisé le cœur NMM.
Nous avons centré le modèle sur la ville de Marseille et il a été configuré sur trois grilles emboitées dont la résolution verticale est de 38 niveaux verticaux. La première grille comporte 60 points selon Ox et 100 points selon Oy. Sa résolution spatiale est de 0.096x0.096 degrés. La seconde grille possède 62 points selon Ox, 110 selon Oy et la résolution est de 0.032x0.032 degrés. Enfin la troisième grille est de 100x200 points et sa résolution est de 0.016x0.016 degrés.
Les champs atmosphériques sont représentés en coordonnées pression, la correspondance altitude-pression en atmosphère standard est la suivante :
1000 hPa =200 m
850 hPa=1450 m
700 hPa=3010 m
500 hPa=5570 m
300 hPa=9160 m.

Par la suite dans le texte, les références aux altitudes se feront en pression. Les variables retenues sont:
-la température (en degrés Celsius) à différentes altitudes.
-le vent (m/s) sur différents niveaux.
-le géopotentiel (en dam décamètre géopotentiel, mais la base est le mètre géopotentiel dont la référence est 1mgp=9,8 J/Kg)

-l'humidité spécifique (rapport entre la masse d'eau dans l'air sec sur la masse d'air humide) a la capacité d'être conservée lors des changements d'altitude et de température tant que la condensation ou l'évaporation n'interviennent pas.
-le tourbillon potentiel (en PVU 1PVU=$10^{-6}m^2.K.s^{-1}.kg^{-1}$) permet à une particule d'air d'avoir une hausse de son tourbillon absolu alors que sa stabilité statique diminue. En d'autres termes, c'est un paramètre conservatif, il permet de suivre l'évolution d'une particule dans le temps mais également de connaître la dynamique d'altitude.
-la CAPE (énergie convective potentiellement disponible exprimée en J/Kg) est l'énergie disponible pour une particule d'air lorsque celle-ci s'élève librement (dépassement du niveau de convection libre).
-la Thetaw : température pseudo-adiabatique potentielle (en degrés Celsius) est un paramètre conservatif. C'est la température qu'aurait une particule d'air humide amenée à saturation par détente adiabatique, puis maintenue saturée et amenée adiabatiquement au niveau de pression 1000hPa.

3.2. COMPARAISON DES MODELISATIONS ATMOSPHERIQUES WRF ET MM5

Le développement d'une configuration Marseillaise du modèle WRF dans cette étude avait pour but d'améliorer la résolution spatio-temporelle du forçage atmosphérique utilisé et ainsi de modéliser plus finement les processus atmosphériques.

La Figure 5 présente la modélisation d'un vent de nord faible pour les deux configurations considérées sur la zone RHOMA: WRF et MM5. MM5 est utilisée pour forcer le modèle hydrodynamique. On note une modification de l'intensité et de la direction des vents pouvant survenir en baie de Marseille et dans la zone des Calanques associée à la prise en compte du relief de façon plus fine dans la configuration WRF. Ces différences sont susceptibles d'engendrer notamment des modifications de l'extension des panaches d'eau douce à la sortie des fleuves et des ruisseaux côtiers.

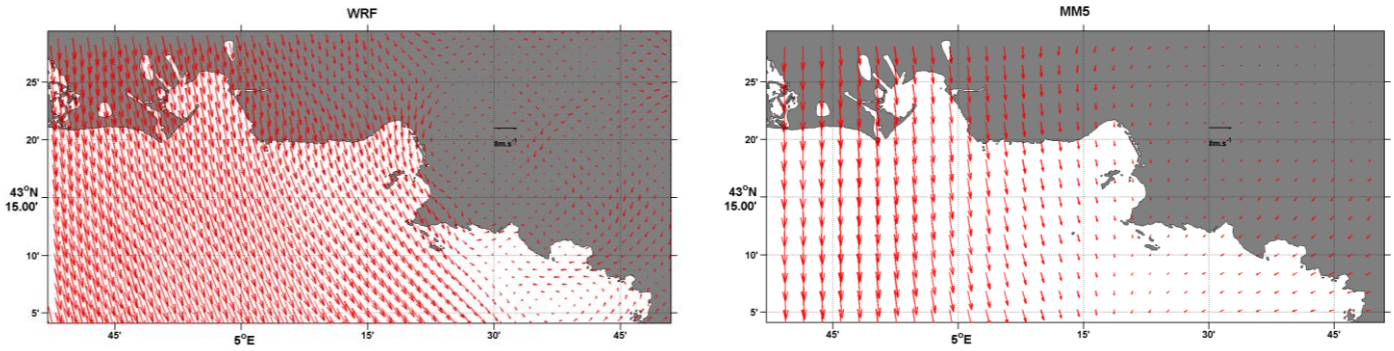


Figure 5 : Vents de nord WRF (à gauche) et MM5 (à droite) modélisés pour le 21 juillet 2007 à 0h.

Dans le cadre du projet GIRAC, les observations des stations Météo-France de Port-De-Bouc et de Marseille-hippodrome ont été utilisées pour valider les vents modélisés par MM5 et la température de l'air servant à forcer le modèle RHOMA (Pairaud et al., 2011). Pour des raisons d'ordre technique, la comparaison de WRF et MM5 aux observations est ici limitée au vent sur la période septembre-novembre 2007 (Figure 6). Elle permet de tirer les premières conclusions quant à la validité des deux forçages de vent sur la période. En effet, les directions principales sont bien reproduites par les deux modèles, avec une tendance à la surestimation des intensités de vent, particulièrement importante pour WRF à Marseille en situation de vents d'est, ainsi que pour MM5 à Marseille en situation de vent de nord. On note également un plus grand étalement directionnel des vents WRF par rapport aux vents MM5, sans toutefois pouvoir conclure qu'un modèle représente mieux les vents que l'autre en ces

deux stations. Dans la suite, il a donc été choisi de garder le forçage du modèle hydrodynamique par MM5, ce qui permet d'assurer la consistance avec le modèle de plus grande emprise MENOR.

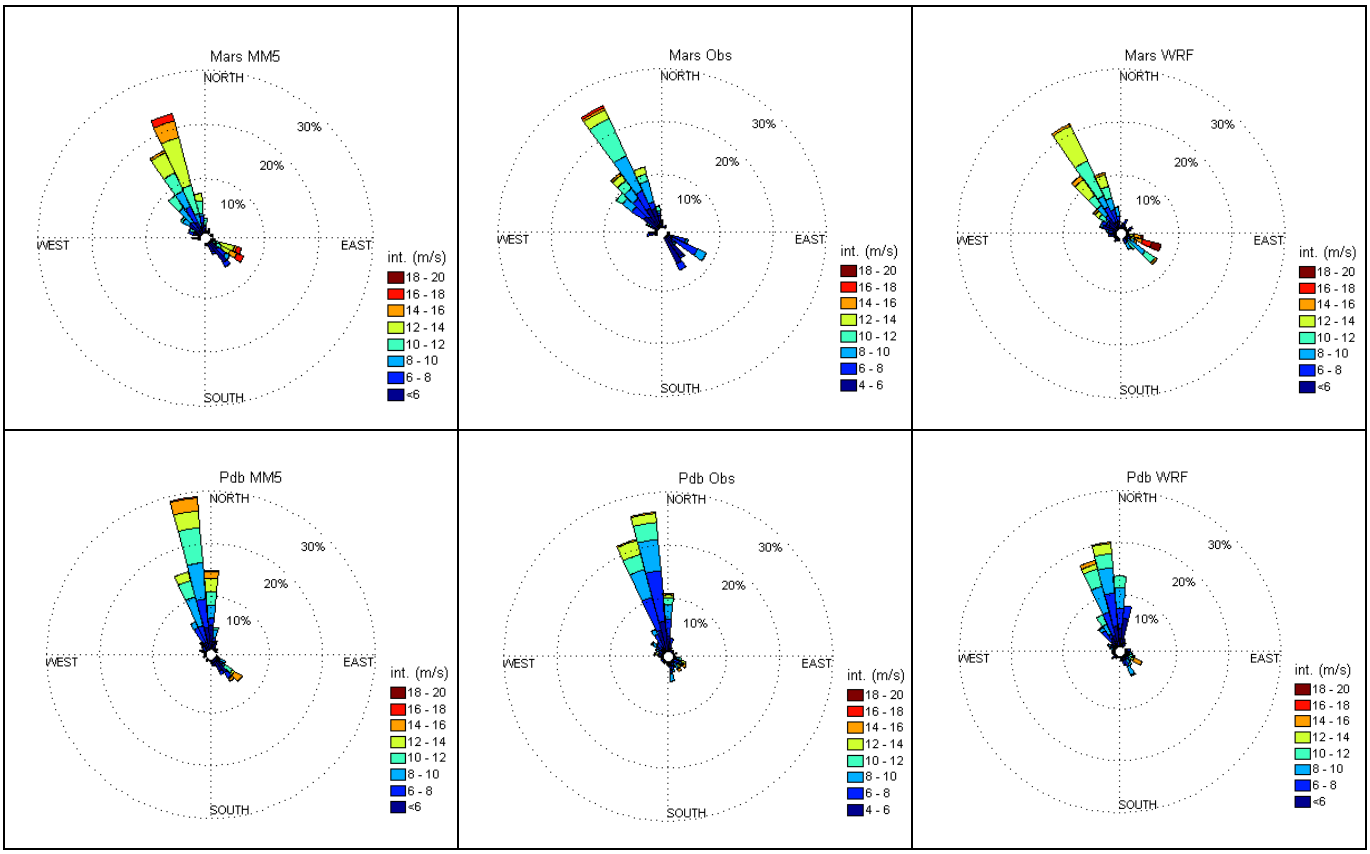


Figure 6 : Roses des vents modélisés et observés à Marseille (en haut) et Port-De-Bouc (en bas), pour MM5 (à gauche), les stations Météo-France (milieu) et WRF (à droite).

3.3. MODELISATION HYDRODYNAMIQUE

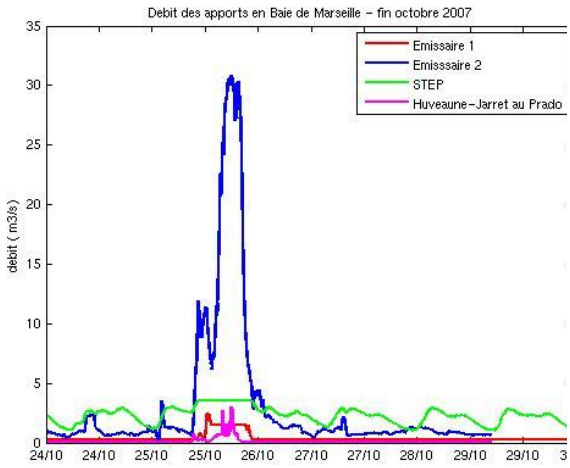
Un modèle hydrodynamique centré sur la baie de Marseille et s'étendant du Rhône au Cap Sicié a été mis en place. Pour cela, la configuration RHOMA (Rhône-Marseille) du modèle MARS3D (3D hydrodynamic Model for Applications at Regional Scale, IFREMER) a été développée de façon à être la plus réaliste possible, avec prise en compte des interactions des processus à différentes échelles. Le modèle a été validé sur différents jeux de données (*in situ* et satellites, pour la température, la salinité et les courants) acquis en 2007-2008. Ce travail est décrit en détails dans une publication (Pairaud et al., 2011). L'amélioration du modèle et la compréhension des processus qui gouvernent la physique de la zone constituent le pré-requis indispensable pour appréhender correctement la modélisation des processus sédimentaires et biogéochimiques qui sont forcés par les mouvements advectifs et le mélange des masses d'eau.

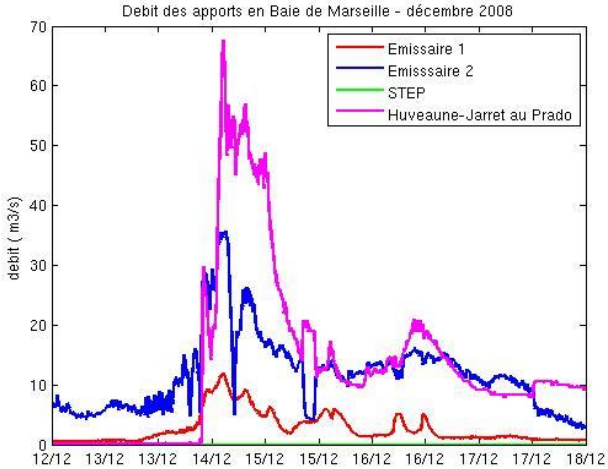
Dans le cadre de cette étude, le modèle tridimensionnel MARS3D est utilisé (Lazure et Dumas, 2008). La configuration RHOMA comprend 503x240 points de calcul sur l'horizontale (grille 'C'), soit une résolution correspondante de 200m, sur 30 niveaux sigma verticaux (avec raffinage de la résolution au fond et en surface). Le pas de temps est fixé à 60s. En plus de l'utilisation d'une bathymétrie réaliste, le modèle est forcé par le Rhône (débits journaliers), l'atmosphère (vent, pluie, flux de chaleur fournis par le modèle MM5) et la circulation générale (par une stratégie d'imbrication dans le modèle opérationnel de plus grande échelle MENOR). Pour les besoins de développement des modèles couplés, une version à 400m de résolution horizontale a également été mise en place et validée sur la période 2007-2008.

Les débits de chaque apport de la ville de Marseille sont définis à partir des données de débits fournis par la Communauté Urbaine Marseille Provence Métropole. Ces débits incluent les déversoirs d'orage et les torrents d'origine pluviale. Les rejets à Cortiou sont divisés en trois parts : la première est une estimation des débits de la STEP (eaux traitées), la seconde correspond aux rejets dans l'émissaire 1 sans les rejets de la STEP (ce sont donc des eaux résiduelles et des eaux bypassées) ; la troisième part correspond aux rejets dans l'émissaire 2 sans la STEP (ce sont les eaux de l'Huveaune, du Jarret avec des eaux bypassées). A titre d'exemple, la Figure 7 montre l'évolution de chaque apport pendant deux épisodes de pluie (24 au 30 octobre 2007 et 12 au 18 décembre 2008). Il faut noter que la totalité des apports par les pluies n'est sans doute pas reproduite car tous les rejets d'eau diffus ne sont pas pris en compte et seuls les débits mesurés sont inclus. D'autre part, certains appareils de mesure sont déconnectés lorsque les débits sont trop importants.
Les apports en nutriments et en contaminant pendant ces pluies sont simulés par le modèle en affectant dans chaque apport des concentrations constantes ou variables dans le temps, issues de mesures ou estimées à partir de données bibliographiques (Jany & Thouvenin, 2012).

(a)

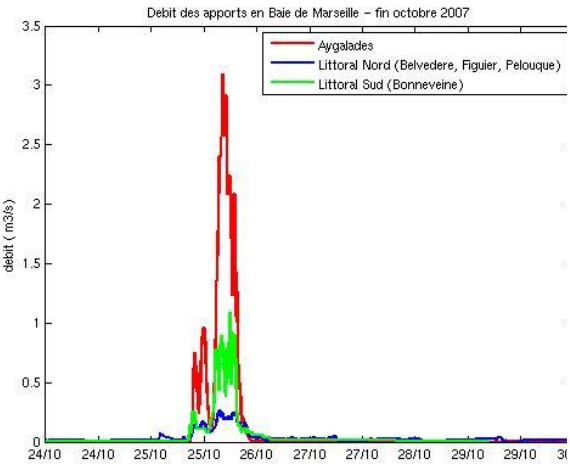
Emissaire 1 : eaux bypassées (trait rouge)
Emissaire 2 : Huveaune, Jarret + eaux bypassées (trait bleu)
STEP : eaux traitées transitant pas la STEP (trait vert)
Huveaune : eaux de l'Huveaune et du Jarret rejetées au Prado (trait rose)

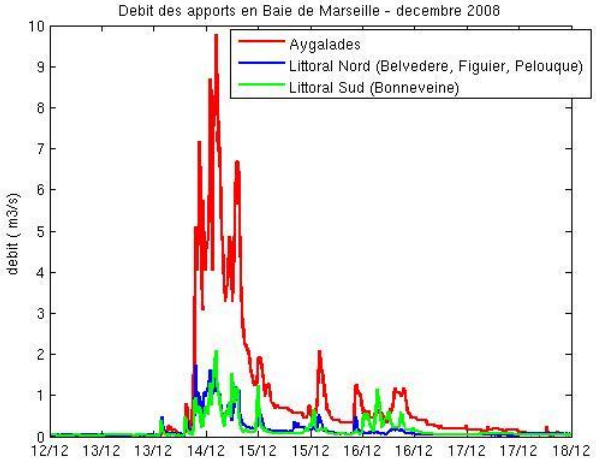




(b)

Aygalades : Ruisseau des Aygalades (trait rouge)
Littoral Nord : ruisseaux et torrents du littoral nord (trait bleu)
Littoral Sud : ruisseaux et torrents du littoral sud (trait vert)





(c)

Déversoirs d'orage : Regroupés en 4 points de rejet

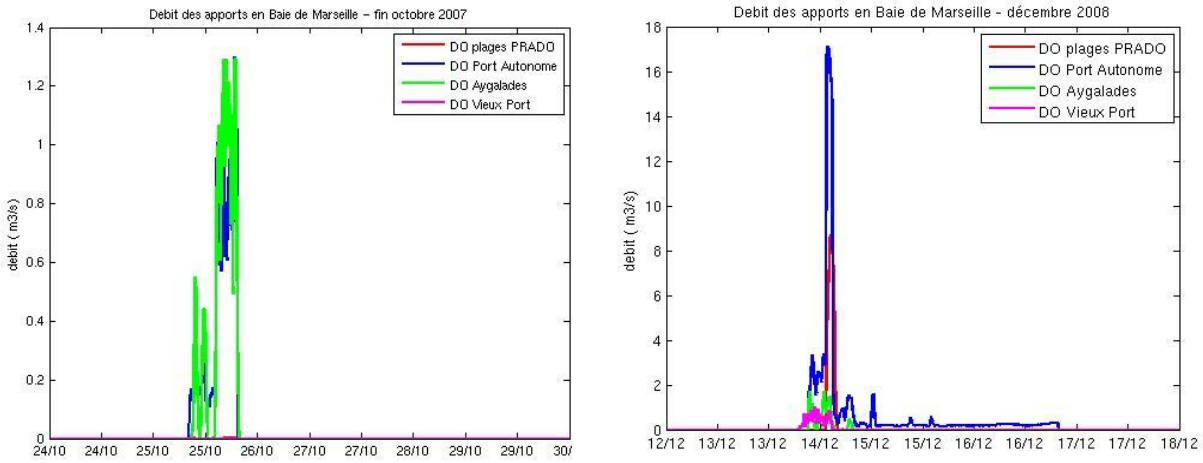


Figure 7 : Données de débit des rejets effectués dans la baie de Marseille pendant la période de les pluies d'octobre 2007 (à gauche) et de décembre 2008 (à droite) : apports de la STEP à Cortiou et apports par l'Huveaune et le Jarret à Cortiou et au Prado (a) ; apports par les ruisseaux (b) ; apports par les déversoirs d'orage (c).

3.4. MODELISATION BIOGEOCHIMIQUE ET COUPLAGE

Le modèle biogéochimique présenté dans Faure et al. (2010a et b), a été ensuite modifié par Marion Fraysse (2010). Tout d'abord, une étude de type chemostat (en 0D) a permis d'introduire une nouvelle paramétrisation, d'ajouter la sensibilité du broutage du zooplancton à la température, et d'inclure le cycle du phosphore. Ce nouveau modèle biogéochimique (ECO3M-MASSILIA) comporte donc 17 variables d'états réparties en 5 compartiments : le phytoplancton, les bactéries, la matière organique dissoute et particulaire ainsi que la matière inorganique dissoute (Figure 8).
Le modèle biogéochimique a été couplé en 3D online avec le modèle hydrodynamique MARS3D, sur la configuration RHOMA 400 m. Une étude a été conduite visant à évaluer les capacités du modèle couplé à reproduire les processus clés et les variations saisonnières de cet écosystème côtier (Fraysse et al.,submitted)

Une attention particulière a dû être apportée aux conditions aux limites sur les frontières ouvertes, qui vont jouer un rôle considérable sur la simulation de notre domaine : en effet, la frontière ouest est très proche de l'embouchure du Rhône, et la frontière sud sera importante lors d'épisodes d'intrusion du courant nord méditerranéen (CN). Le même modèle biogéochimique a donc été déployé sur une configuration plus large couvrant la zone géographique du golfe du Lion, qui est une partie du domaine de grande emprise MENOR (configuration du modèle MARS3D de la méditerranée nord occidentale). Ce modèle couplé du golfe du Lion est forcé aux limites ouvertes par les sorties de simulations interannuelles du modèle opérationnel BFM (Lazzari et al., 2010), développé par OGS (Trieste). Les forçages du modèle biogéochimique sont la température et l'irradiance, le débit et les concentrations du Rhône, les rejets (rivières urbaines, exutoires, …) et les apports atmosphériques secs et humides. Les concentrations biogéochimiques du Rhône sont celles mesurées quotidiennement par le Service d'Observation du COM. Les concentrations biogéochimiques des autres rejets sont soit fournies par la Communauté Urbaine Marseille Provence Métropole/Seram pour les nitrates et l'ammonium, soit estimées à partir de la littérature.

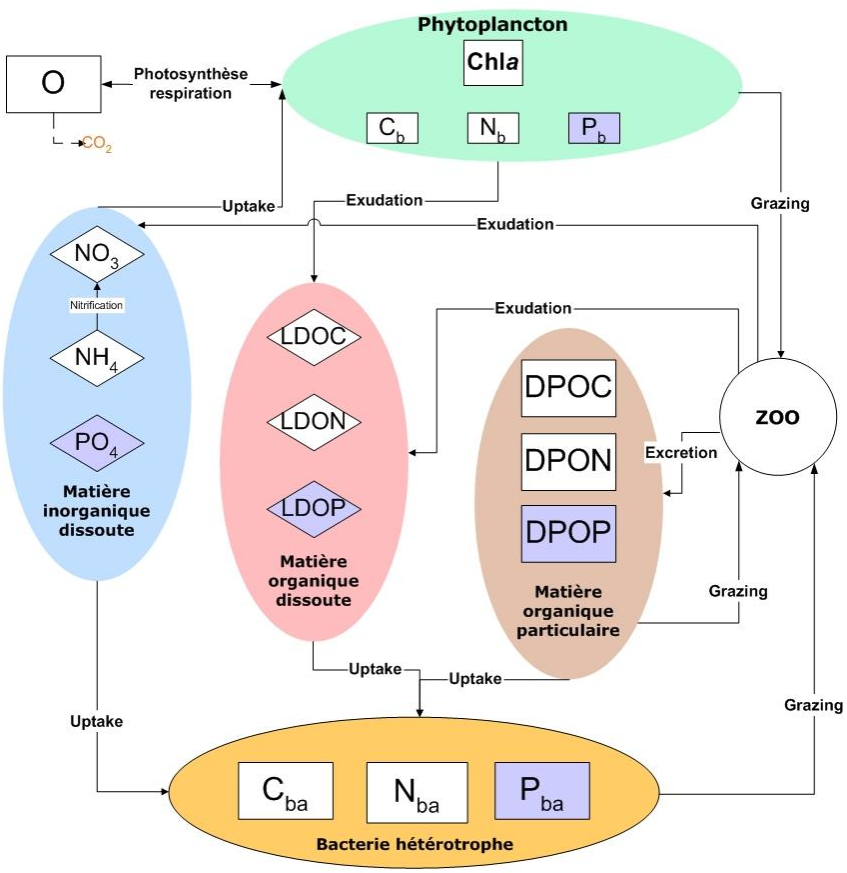


Figure 8 : Schéma conceptuel du modèle biogéochimique

3.5. MODELISATION HYDROSEDIMENTAIRE

Le modèle sédimentaire mis à jour dans la plateforme MARS3D est issu des développements réalisés ces dernières années sur le modèle S*i*AM3D (Le Hir et al., 2001, Waeles et al., 2007, 2008, Dufois, 2008). Ce modèle simule les processus d'érosion dépôt, de consolidation, de floculation des sédiments mixtes vases/sables/graviers. Les sédiments sont ensuite advectés par le modèle hydrodynamique. Le sédiment est décrit en fines couches millimétriques, crées et détruites en fonction des processus d'érosion/dépôt. Le modèle sable/vase a été mis en place sur la zone de la baie de Marseille. En première approximation et pour ne pas pénaliser le temps de calcul, des modifications ont été réalisées pour que le sable ne soit pas transporté dans la colonne d'eau mais reste dans le compartiment sédiment. De plus, les processus de consolidation ne sont pas simulés. Les paramètres d'érosion régissant le comportement des sédiments ont été calibrés à partir de tests d'érodimétrie réalisés sur une quinzaine de carottes prélevées en baie de Marseille et représentatives des différents faciès présents dans la zone d'étude. Les matières en suspension (MES) simulées se divisent en trois catégories : des MES lourdes correspondant au sédiment de fond et aux apports les plus denses, des MES légères représentatives des agrégats organiques et des MES très légères associées à la turbidité rémanente des eaux de surface. Face à l'incertitude de la nature et des flux de MES apportées par les différents tributaires et fleuves côtiers, différents scénarios d'apports en fonction de ces catégories de MES ont été testés et comparés à l'unique jeu de données disponible, permettant ainsi de valider le scénario d'apport le plus vraisemblable actuellement. Face au peu de données sur les processus d'agrégation en baie de Marseille, ce point ne sera pas abordé dans le projet. Le modèle de vague haute résolution non structuré WW3 a été également mis en place sur la zone (www.previmer.org)

permettant ainsi de simuler les états de mers et les remises en suspension associées. Il a été validé à partir des mesures de vagues par ADCP (station FRAME) en 2007 et 2008 (Vousdoukas et al., 2011). Afin de s'affranchir de la couverture sédimentaire issue des observations mais imposée en condition initiale, le modèle hydrosédimentaire tourne avec la couverture sédimentaire calculée après un an de simulation.

Dans les chapitres suivants, des calculs de bilans particulaires et dissous sont réalisés pour différentes zones stratégiques de la baie de Marseille (Figure 9: Rade nord, Rade sud, Cortiou), des points de référence sont également déterminés (Points bleus)).

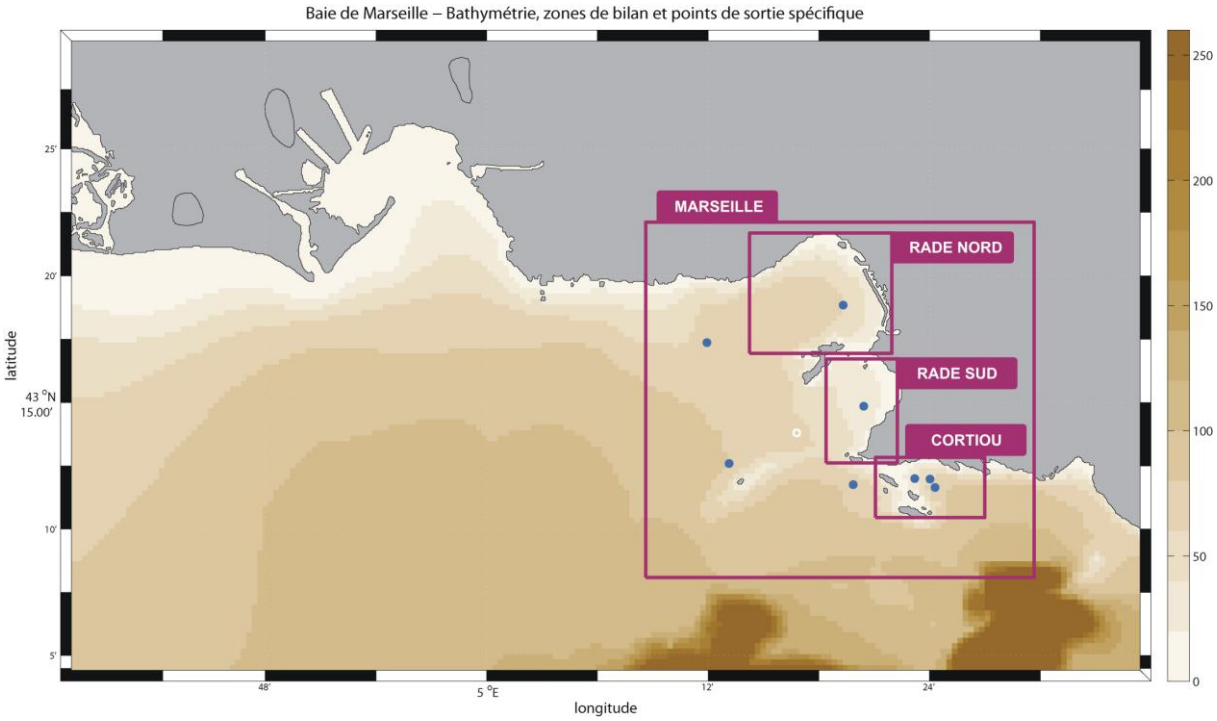


Figure 9 : Emprise du modèle RHOMA, et présentation des zones clés du système pour le calcul des flux globaux : Marseille, Rade nord, Rade sud, et Cortiou.

3.6. MODELISATION DES CONTAMINANTS

La modélisation des PCB dans la baie de Marseille s'appuie sur (i) le modèle MARS3D hydrodynamique et hydrosédimentaire présenté plus haut, (ii) la connaissance des conditions biogéochimiques du milieu, issue du modèle biogéochimique couplé MARS3D-ECO3M-MASSILIA décrit ci-dessus, (iii) une évaluation des concentrations dans les apports (travaux de Ifremer/Protée dans le cadre du projet METROC/GIRAC (Zebracki, 2011, Jany et al, 2012), (iv) la prise en compte par couplage dans le modèle MARS3D des processus qui décrivent la spéciation et la dynamique des PCB, c'est-à-dire leur adsorption-désorption sur les particules, leur volatilisation et leur dégradation, (v) la détermination des PCB et de leur spéciation effectuée sur une station dans la rade de Marseille (méthodologie présentée dans l'Annexe 1). L'estimation des forçages et la formulation des processus dans le modèle reposent sur un certain nombre d'hypothèses et sur le choix d'un jeu de paramètres appropriés. Ceux-ci sont présentés en Annexe 2 ; ils ont été testés et une analyse de sensibilité a été menée dans le cadre du projet METROC. Il n'existe pas suffisamment de mesures pour pouvoir valider les résultats du modèle mais les concentrations en CB153 rencontrées dans la zone ont été comparées aux connaissances disponibles (Harmelin-Vivien et al, 2012).

3.7. METHODE DES ONDELETTES

Afin d'identifier les tourbillons présents dans les sorties des modèles de circulation, il a été utilisée une méthode basée sur la décomposition en ondelettes des champs horizontaux de vorticité relative (Doglioli et al., 2007; paquet WATERS - Wavelet Analysis for Timetracking Eddies in Regional modelS; pour la version Matlab: http://www.com.univ-mrs.fr/~doglioli/waters.htm; pour la version Fortran: http://stockage.univ-brest.fr/~grima/WASSCO).
Le logiciel reçoit en entrée un champs de vitesse 3D à partir duquel il construit un champ de vitesse 2D par interpolation à la profondeur choisie (dans l'étude, celle-ci est fixée à - 20 m). Il calcule alors le champ de vorticité relative, qui est ensuite décomposé en ondelette sur une base choisie automatiquement à l'aide d'un calcul d'entropie. Un seuillage intervient en minimisant la valeur d'entropie. La partie du signal retenue peut enfin être considérée comme représentative des tourbillons présents dans le champs de vorticité. Afin de suivre dans le temps un tourbillon en particulier, un critère de recouvrement entre deux instants successifs est appliqué, ce qui permet d'identifier la durée de vie et la trajectoire du tourbillon.
Pour plus de détails, voir Doglioli et al. (2007), Rubio et al. (2009), Dencausse et al. (2011) et pour une étude comparative entre cette méthode et d'autres méthode automatiques d'identification et suivi de tourbillons voir Souza et al (2011).

4. RESULTATS GLOBAUX DES MODELES

4.1. MODELISATION ATMOSPHERIQUE

Une comparaison entre le modèle WRF-NMM et les observations a été réalisée sur cinq points de mesures en région Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA) sur une période de 5 mois. Les points de mesure ont été choisis de manière à avoir une représentativité spatiale la plus hétérogène possible:
deux points sur le littoral, deux points dans l'intérieur des terres et un point en haute montagne.
Cette approche a permis de vérifier le comportement du modèle sur différentes zones climatiques:
-une zone maritime
-une zone de transition mer/terre
-une zone en terrain complexe.

Nous avons alors travaillé sur deux configurations du modèle WRF. Chaque version a été utilisée en mode imbriqué (nesting).
La première configuration que l'on nommera "version opérationnelle" a deux grilles dont la plus fine présente une résolution horizontale de 3 km et 28 niveaux verticaux.
La seconde configuration (appelée version test) a trois grilles dont la plus fine possède une résolution horizontale de 1,5 km et 38 niveaux verticaux.

Les données d'observations proviennent des METAR (données réalisées pour l'aviation au niveau des aéroports) sauf pour la station des Orres (station personnelle située en montagne).

Sur l'ensemble de la période, le modèle réagit très bien sur les différentes zones et reste assez proche des observations (Tableau 5, Tableau 6, Tableau 7). Pour la température, les résultats du modèle NMM présentent des écarts moyens par rapport aux observations de l'ordre de 0.6 à 2.5 °C.
Toutefois, la différence absolue entre la prévision et l'observation peut atteindre 4 à 5 degrés sur quelques heures notamment en début de journée avant un rééquilibrage du modèle par la suite.
La différence entre les maximums absolus journaliers prévus et observés est environ de 2°C.
Sur le vent, les écarts en vitesse moyenne sont de l'ordre de 1 à 2 m/s .
On note une surestimation des vitesses en montagne et un décalage dans la direction pour les régimes de brise de terre.
Ce biais sur les vents faibles a été mis en évidence par les développeurs du modèle au NCAR sur les régions avec une topographie importante (cas de la région PACA). Dans le cas de la montagne, en

raison des vents faibles surtout liés aux écoulements gravitaires (écoulements de pentes, vitesse inférieure à 4 m/s), la gamme des vitesses prévues est conforme aux vitesses observées.

Station	Moyenne Température obs (° C)	Moyenne température configuration opérationnelle (° C)	Coefficient de corrélation linéaire des Températures obs-opérationnelle	Moyenne température configuration test (° C)	Coefficient de corrélation linéaire des Températures obs-test
Istres	22,8	21,7	0,91	22,4	0,92
Hyères	23,1	20,7	0,62	21,1	0,55
Orange	23,1	22,1	0,92	23,9	0,94
Nice	23,2	20,6	0,68		
Orres	15,2	15,8	0,91		

Tableau 5
Valeurs moyennes et coefficients de corrélation sur l'ensemble des mesures de température par station de mesure.

Station	Moyenne vent obs (m/s)	Moyenne vent configuration opérationnelle (m/s)	Coefficient de corrélation linéaire obs-opérationnelle	Moyenne vent configuration test (m/s)	Coefficient de corrélation linéaire obs-test
Istres	4,8	5,6	0,83	5,6	0,81
Hyères	3,7	4,6	0,59	4,5	0,63
Orange	4,8	5,5	0,84	5,3	0,86
Nice	2,9	2,8	0,38		
Orres	1,1	3,5	0,34		

Tableau 6
Valeurs moyennes et coefficients de corrélation sur l'ensemble des mesures de vent par station de mesure.

Station	Moyenne des écarts absolus de température configuration opérationnelle (° C)	Moyenne des écarts absolus de température configuration de test (° C)	Moyenne des écarts absolus de la vitesse du vent configuration opérationnelle (m/s)	Moyenne des écarts absolus de la vitesse du vent configuration test (m/s)
Istres	1,6	0,9	-0,2	-0,2
Hyères	2,3	3,2	-0,9	-0,6
Orange	0,9	0,4	-0,5	-0,7
Nice	2,5		0,1	
Orres	0,6		-2,4	

Tableau 7
Moyennes des écarts absolus en température et vitesse de vent pour les deux configurations.

4.2. MODELISATION HYDRODYNAMIQUE

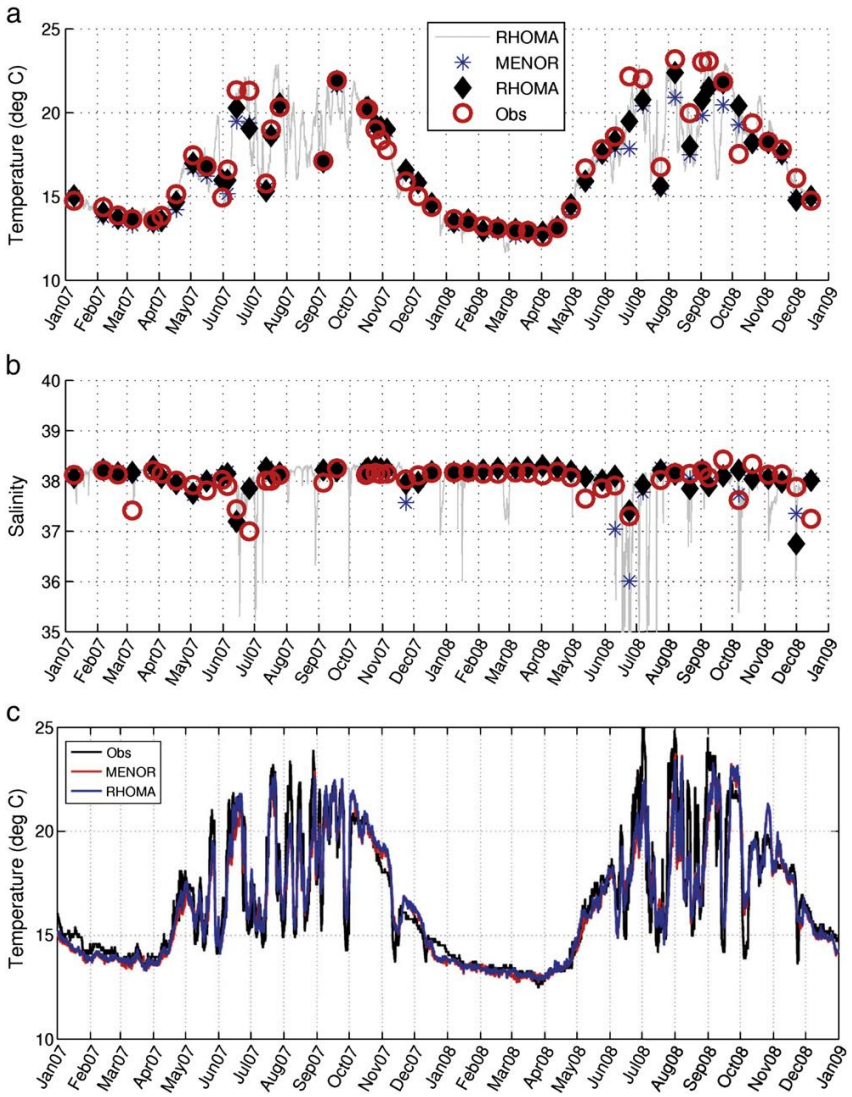


Figure 10 : Comparaisons de la température et la salinité modélisée par MENOR (*) et RHOMA (diamant) à la même date que les observations(O): température de subsurface (a) et salinité (b) à la station SOMLIT (sud-Frioul) à 0.75m de profondeur; c) température à la station sud-Riou à une profondeur de 5m (Source: Pairaud et al. 2011, Journal of Marine Systems, Figure 4).

Le modèle hydrodynamique RHOMA a été validé sur des jeux de données *in situ* (température, salinité, courants) et satellites (SST, couleur de l'eau) acquis en 2007-2008 (Pairaud et al., 2011). La Figure 10 montre des comparaisons des séries temporelles de température et salinité issues de la modélisation et des observations. Cette comparaison permet de mettre en évidence la bonne reproduction des processus majeurs qui gouvernent la dynamique de la baie de Marseille par le modèle à haute résolution RHOMA (alternance d'upwellings refroidissant l'eau et de réchauffements en été, destratification à l'automne puis brassage des eaux en hiver, intrusions d'eaux dessalées en provenance du Rhône dans la baie de Marseille, ...).

D'autres comparaisons aux mesures et une étude statistique des erreurs du modèle (calcul de biais, corrélations, RMS, ...) sont disponibles dans la publication. De manière globale, si les processus sont bien reproduits (corrélations en température supérieures à 0.9 à la station SOMLIT-Frioul par exemple), le modèle tend à sous-estimer les variations extrêmes de température estivales comme les refroidissements associés au processus d'upwelling sous l'action des vents de nord, puis les

réchauffements consécutifs (biais moyen atteignant 0.5°C dans les dix premiers mètres à la station SOMLIT-Frioul).

4.3. MODELISATION BIOGEOCHIMIQUE COUPLEE

Des simulations 3D réalistes de la période du 01/05/2007 au 31/12/2008 ont été réalisées et comparées avec les produits satellites de couleur de l'eau MODIS, MERIS, GLOBCOLOUR, et les données de la station SOFCOM (réseau SOMLIT) (Figure 11, Figure 12 et Figure 13).

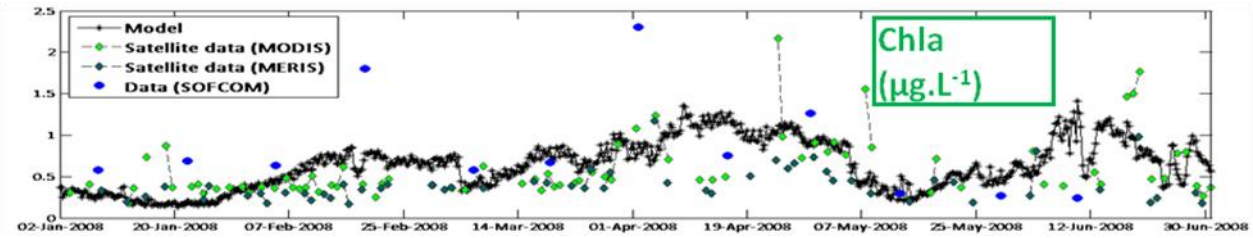


Figure 11 : Comparaison de la chlorophylle_a simulée en surface (noir) le premier semestre 2008 avec les données satellites de couleur de l'eau (MODIS en vert clair, MERIS en vert foncé) et les données mesurée à la station d'observation SOFCOM du réseau SOMLIT (bleu).

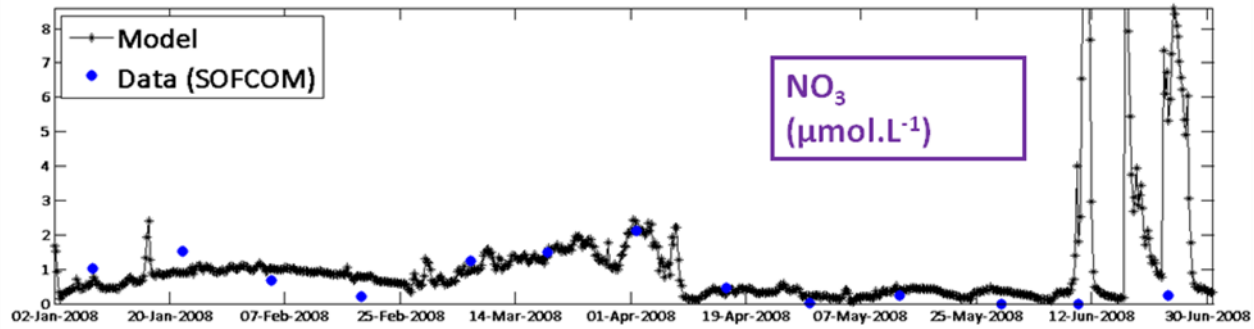


Figure 12 : Comparaison de la concentration en nitrate simulée en surface (noir) le premier semestre 2008 avec les données mesurée à la station d'observation SOFCOM du réseau SOMLIT (bleu).

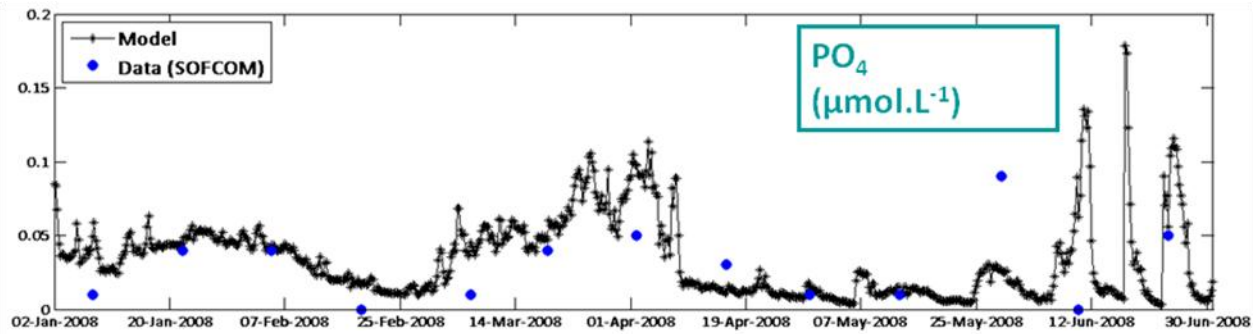
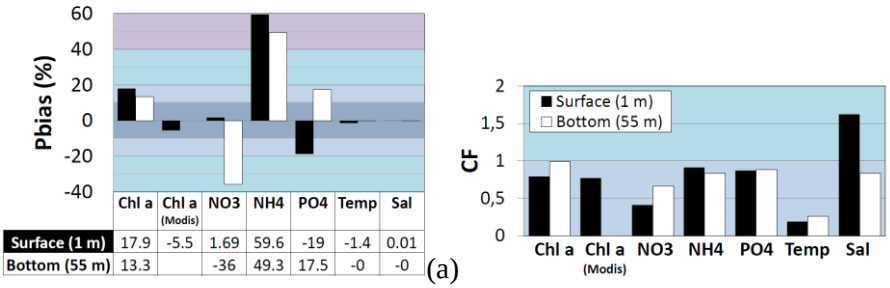


Figure 13 : Comparaison de la concentration en phosphate simulée en surface (noir) le premier semestre 2008 avec les données mesurée à la station d'observation SOFCOM du réseau SOMLIT (bleu).

Des critères statistiques (fonction de coût, biais) ont été utilisés pour évaluer les résultats du modèle selon la méthode utilisée dans Allen et al., (2007) (Tableau 8). La fonction de coût indique que les variables présentées dans le Tableau 8 sont très bien représentées (CF<1) à part la salinité qui est tout

de même bien représentée (CF<2). Le biais indique que la température et la salinité sont représentées quasiment sans sur ou sous-estimation par le modèle couplé. La chlorophylle_a simulée est sous-estimée par le modèle en surface de 17.9% et au fond de 13.3%, alors qu'elle est surestimée par MODIS de 5.5%. Le nitrate est surestimé au fond de 36%, alors que l'ammonium est toujours sous-estimé (59.6% en surface et 49.3% au fond). Le phosphate est surestimé en surface de 19% et sous-estimé au fond de 17.5%.



(a)

	Chl a	Chl a (Modis)	NO3	NH4	PO4	Temp	Sal
Surface (1 m)	17.9	-5.5	1.69	59.6	-19	-1.4	0.01
Bottom (55 m)	13.3		-36	49.3	17.5	-0	-0

(b)

	excellent	very good	good	reasonable	poor	Reference
CF		CF<1	1-2	2-3	>3	Radach and Moll, 2006
|Pbias|	<10	10-20	20-40		>40	Maréchal, 2004

(c)

Tableau 8
Evaluation des résultats du modèle biogéochimique couplé à la station SOFCOM pour le premier semestre 2008. (a) biais, (b) fonction de coût, (c) critères de performance des indicateurs statistiques utilisés.

4.4. MODELISATION HYDROSEDIMENTAIRE

Une simulation couvrant les années 2007 et 2008 (Figure 14) a été réalisée afin d'évaluer la variabilité annuelle des concentrations en matières en suspension dans la zone d'étude, en se focalisant sur 4 stations clés : le point SOMLIT, et trois points en rade nord, Rade sud et à proximité de l'exutoire de Cortiou (Figure 9).

La rade nord et la station SOMLIT, sites plus profonds, présentent le même comportement général et les niveaux de turbidité les plus faibles, que ce soit en surface ou au fond (maxima autour de 20mg/L, excepté en fin d'année 2008). L'intrusion du Rhône en Juin 2008 est cependant bien identifiée avec une signature de surface bien visible (concentration atteinte de l'ordre de 15mg/L). L'influence des événements de tempête est également notée, se traduisant par des concentrations au fond de 10mg/L à 20mg/L. L'occurrence de ces épisodes de turbidité significative reste toutefois ponctuelle dans le temps et peu fréquente (moins d'une dizaine d'événements dépassant 5mg/L sur 2 ans). La station Rade sud, plus proche de la côte et moins profonde, est très sensible aux événements météorologiques, avec une turbidité observée principalement au fond, en lien avec la remise en suspension par les houles. Les concentrations en MES observées sont également significativement plus fortes, avec des concentrations simulées pouvant dépasser 100mg/L. Le point considéré à proximité de l'exutoire de Cortiou révèle lui une toute autre dynamique, avec une influence nette des rejets à l'exutoire sur la turbidité de surface, générant des niveaux de concentration en MES de plusieurs mg/L et atteignant ponctuellement entre 5 et 10mg/L. Les épisodes de fortes pluies sont également associés à des très forts niveaux de turbidité (>20mg/L) comme celui observé fin 2008. Il faut remarquer un changement significatif de la concentration en MES avant et après mai 2008, ce qui est directement lié aux débits liquides imposés en entrée du modèle et issus des mesures mises à disposition par les partenaires.

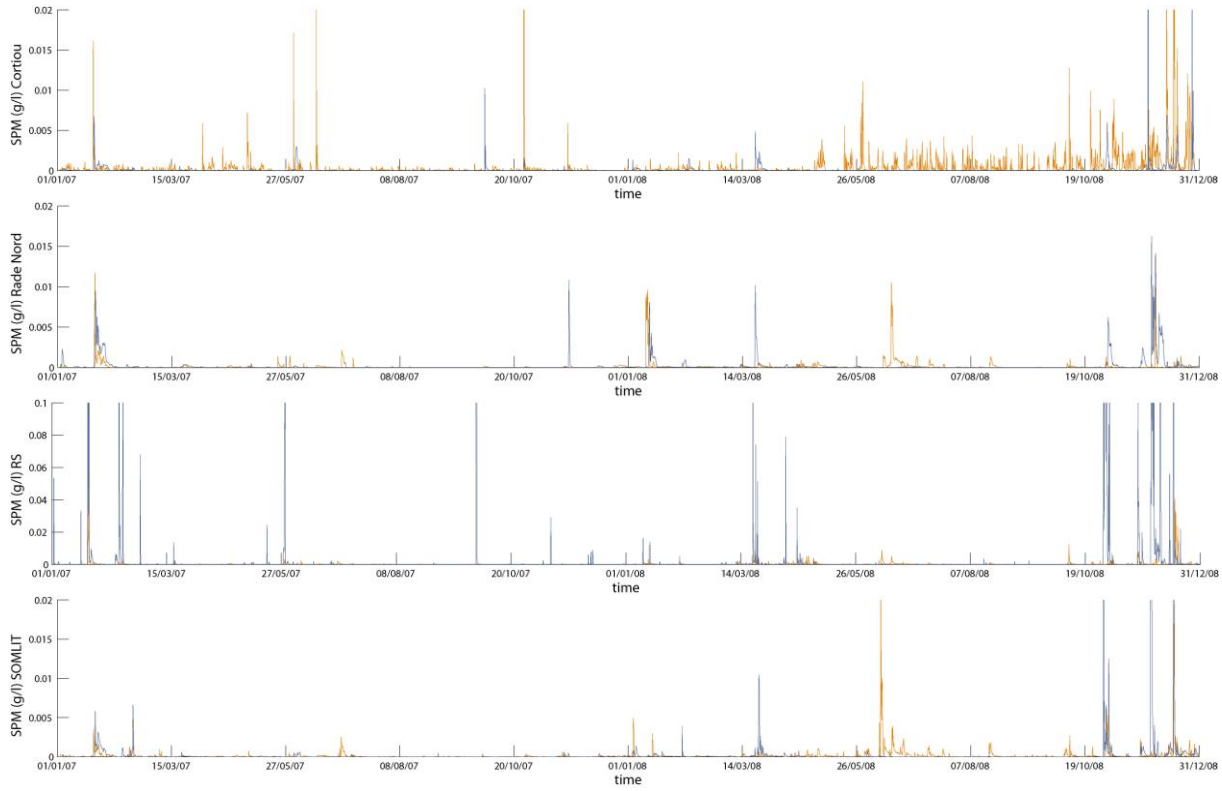


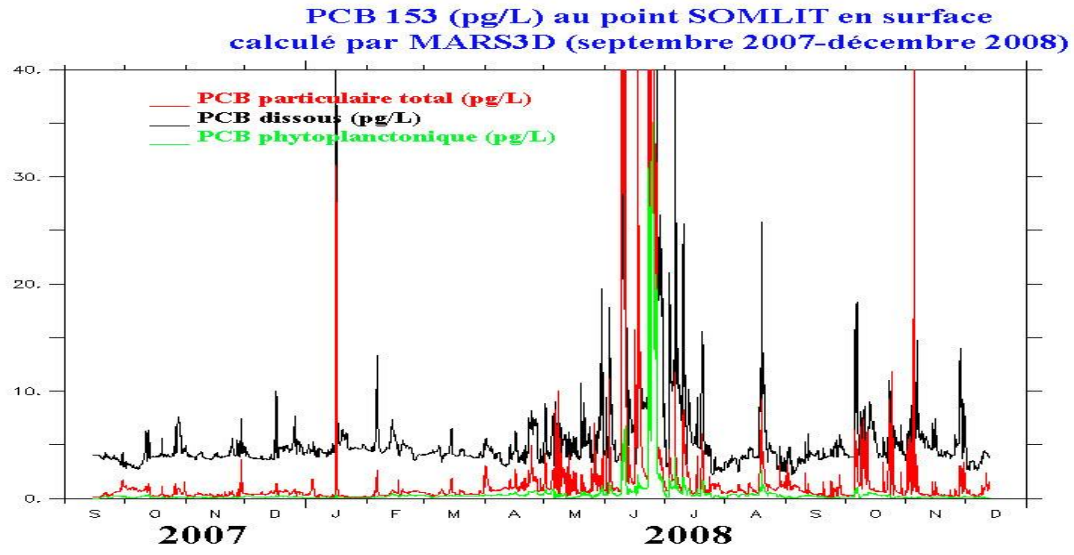
Figure 14 : Variations de la concentration en MES (orange : surface, bleu : fond) en quatre stations clés de la zone d'étude : Cortiou, Rade nord, Rade sud et SOMLIT.

4.5. MODELISATION DES CONTAMINANTS

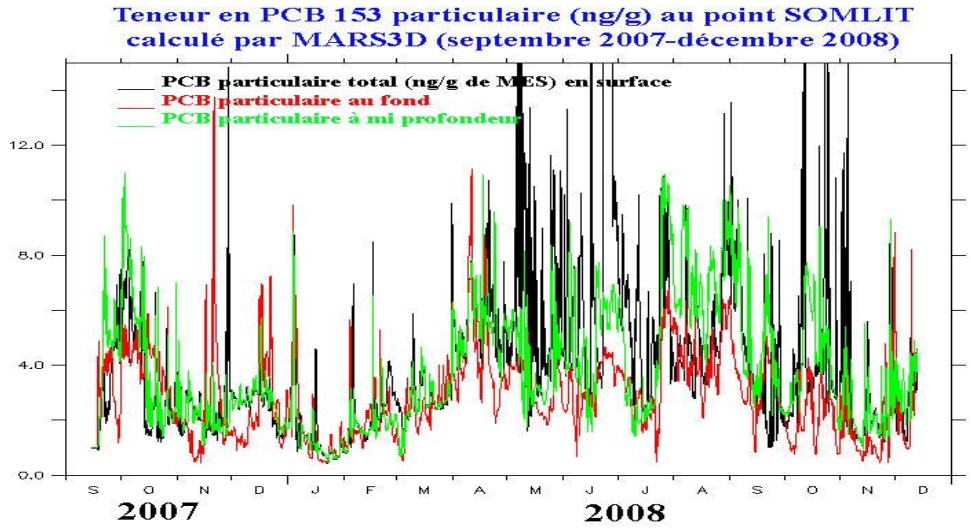
La Figure 15a représente à titre d'exemple la variation des espèces de CB153 calculées par le modèle (en pg/L) au point SOMLIT à Marseille de septembre 2007 à décembre 2008. La concentration en PCB dissous varie autour de 3 à 5 pg/L, avec des pointes à plus de 50 pg/L notamment en juin et juillet 2008 où elle atteint plus de 300 pg/L lors de l'intrusion du Rhône à la fin du mois de juin. La concentration en PCB particulaire total est plus faible; elle varie entre 1 et 4 pg/L en hiver et augmente à d'autres périodes, notamment en été pour atteindre des concentrations entre 2 et 10 pg/L, exceptionnellement jusqu'à plus de 100 pg/L en juin 2008. La teneur en CB153 sur les particules varie en général entre 1 et 12 ng/g (Figure 15b), variable en fonction de la profondeur et selon les situations, mais elle reste toujours du même ordre de grandeur.

L'incertitude sur les paramètres utilisés engendre des incertitudes sur cette spéciation mais les tests de sensibilité ont montré que les ordres de grandeur restaient les mêmes et conformes aux observations (CB153 : 4 pg/L en dissous, 8.8 ng/g teneur particulaire, cf Annexe 1); celles-ci sont en nombre insuffisant et ne permettent pas de préciser la paramétrisation des réactions de partage.

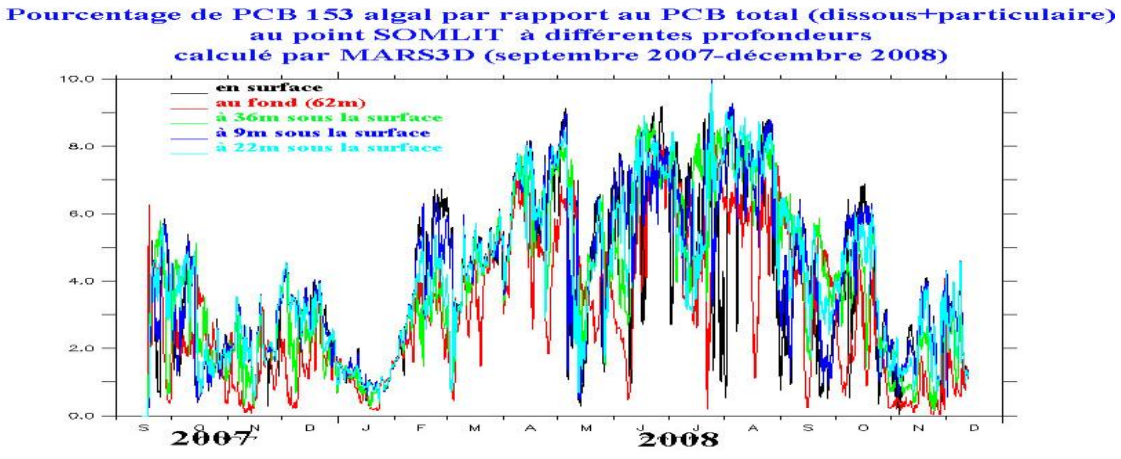
Le CB153 associé au COP algal vivant est de l'ordre de 5 à 20 ng/g (phyto poids sec), correspondant à des concentrations entre 0.1 et 2 pg/L, ce qui correspond à une fraction du PCB total (dissous+particulaire) compris entre 0.2 et 8% (Figure 15c). Cette concentration dépend du coefficient de bioconcentration utilisé et de la concentration en phytoplancton simulée par le modèle MARS-ECO3M (Figure 11).


PCB 153 (pg/L) au point SOMLIT en surface
calculé par MARS3D (septembre 2007-décembre 2008)
PCB particulaire total (pg/L)
PCB dissous (pg/L)
PCB phytoplanctonique (pg/L)
40.
30.
20.
10.
0.
S O N D J F M A M J J A S O N D
2007
2008

(a


Teneur en PCB 153 particulaire (ng/g) au point SOMLIT
calculé par MARS3D (septembre 2007-décembre 2008)
PCB particulaire total (ng/g de MES) en surface
PCB particulaire au fond
PCB particulaire à mi profondeur
12.0
8.0
4.0
0.0
S O N D J F M A M J J A S O N D
2007
2008

(b)


Pourcentage de PCB 153 algal par rapport au PCB total (dissous+particulaire)
au point SOMLIT à différentes profondeurs
calculé par MARS3D (septembre 2007-décembre 2008)
en surface
au fond (62m)
à 36m sous la surface
à 9m sous la surface
à 22m sous la surface
10.0
8.0
6.0
4.0
2.0
0.0
S O N D J F M A M J J A S O N D
2007
2008

(c)

Figure 15 : Variation des espèces de CB153 en pg/L: PCB dissous (en noir), PCB particulaire (en rouge), PCB phytoplanctonique (en vert) calculées par le modèle au point SOMLIT à Marseille de septembre 2007 à décembre 2008

Les tests de sensibilité qui ont été menés en faisant varier les paramètres décrits dans l'Annexe 2 montrent que, logiquement, les résultats dépendent de la concentration totale introduite dans le milieu (sensibilité aux conditions aux limites, sensibilité aux épisodes d'érosion, et localement sensibilité aux apports de Marseille). La spéciation du PCB dépend des coefficients de partage choisis, notamment par rapport aux particules très légères et légères qui dominent au large. Dans le champ proche des rejets, le coefficient de partage par rapport aux MES lourdes joue un rôle important, ainsi que les cinétiques de désorption, qui vont induire une accumulation plus ou moins importante des particules contaminées dans les zones proches de la côte. Le PCB dissous et le PCB associé aux particules légères et très légères se dispersent en majorité au large et sort de la rade de Marseille au bout de quelques jours. Les modifications des conditions biogéochimiques au cours du temps qui sont responsables d'une augmentation des particules organiques détritiques ou d'une production de phytoplancton entraînent des variations dans les concentrations en PCB particulaire, mais il ne semble pas qu'il y ait des spécificités marquantes dans la rade de Marseille par rapport à une zone élargie.

Les résultats présentés plus loin correspondent aux situations typiques et extrêmes rencontrées dans la rade de Marseille; ils sont décrits à partir des indicateurs suivants :

- les concentrations en CB153 dissous total dans l'eau (espèce dissoute libre plus espèce dissoute associée à la matière organique dissoute); seules les valeurs maximales rencontrées en surface seront tracées pour visualiser les zones impactées pendant l'événement.
- les concentrations en CB153 particulaire total (somme de toutes les espèces particulaires associées aux différents types de matières en suspension détritiques et vivantes). Ces dernières sont exprimées soit en concentrations volumétriques (exprimées par litre d'eau), soit en teneurs dans les particules en suspension (exprimées par gramme de particules présentes dans l'eau). Les valeurs maximales rencontrées en surface seront visualisées, ainsi que les valeurs moyennes en surface et au fond.
- L'évolution relative des masses de CB153 présentes dans la colonne d'eau et entrant ou sortant de chaque zone par les différents processus de transfert pendant la période étudiée; ces variations à partir du début de la période, sont examinées dans chaque zone décrite sur la Figure 9. Elles permettent de déterminer l'origine des variations du stock total de contaminant dans la zone en visualisant les entrées/sorties par les limites, par les apports des rejets, par les épisodes d'érosion et de dépôt, par les apports atmosphériques (dépôt sec plus pluie), par les transferts dus à la volatilisation. Ces masses transférées sont représentées cumulées en fonction du temps : une pente positive correspond donc à un apport à la colonne d'eau - une pente négative correspond à une sortie, et une pente nulle signifie qu'il n'y a ni entrée, ni sortie à ce moment là. La quantité totale transférée pendant la période se lit à la fin de la période ; une valeur positive correspond à un apport résiduel pendant la période et une valeur négative à une sortie.

Pour exemple, la Figure 16 montre, à l'échelle annuelle, l'influence des différents processus sur le stock de CB153 total dans la masse d'eau des quatre zones étudiées (rade nord, rade sud, zone de Cortiou et baie de Marseille). A cette échelle annuelle, il est clair que le processus le plus important est celui des apports par la ville de Marseille (trait rouge) mais il est largement compensé par la sortie de ces rejets vers le large (trait rose). De ce fait, les variations du stock de PCB dans l'eau sont très faibles par rapport aux apports et peu visibles sur la Figure 16 (trait bleu marine). Certaines fluctuations plus importantes sont reliées aux apports par le large (intrusion du Rhône) et d'autres aux

épisodes d'érosion, notamment et surtout dans les rades sud et nord. Une part de PCB apporté se volatilise et une autre fraction se dépose localement; globalement le bilan des érosions/dépôts au bout de plus de 15 mois (trait vert clair) est négatif, montrant un dépôt résiduel plus ou moins important selon les zones. L'apport atmosphérique (dépôt sec et dépôt par la pluie) semble négligeable. Ces résultats dépendent des hypothèses posées en préambule et notamment des concentrations choisies pour déterminer les flux du Rhône et les flux de chaque rejet à Marseille. Les flux d'érosion et de dépôt dépendent du paramétrage choisi et des conditions initiales. La comparaison des flux induits par chaque processus est donc à prendre avec beaucoup de précaution, même si les ordres de grandeur sont respectés. Ils seront décrits plus précisément pour chaque événement choisi, typique et extrême.

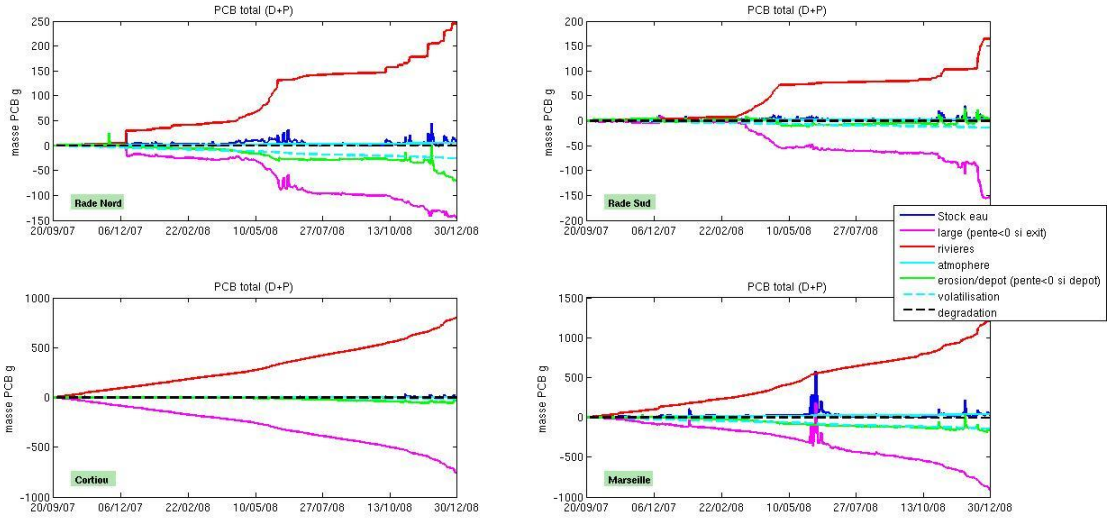


Figure 16 : Variation des stocks de CB153 total dans la colonne d'eau fin 2007 et 2008 dans chaque zone (décrite sur la Figure 9), associée aux variations de concentrations dus à chaque processus : « large » : entrée/sortie aux limites ; « rivières » : apports à la côte ; « atmosphère » : dépôts secs et pluie ; « érosion/dépôt » ; « volatilisation » et « dégradation ». (si pente >0 = variation positive de la concentration= apport de contaminant, inversement si pente <0 = perte de contaminant).

5. RESULTATS PRESENTES PAR EVENEMENT ETUDIE

VENT DE MISTRAL

5.1. SITUATIONS DE VENT DE MISTRAL

5.1.1. Situation typique de Mistral (upwelling): 25 au 29 septembre 2007

a) Données Météo France, station de l'Hippodrome de Marseille

Le mois de septembre 2007 se caractérise par trois coups de Mistral, d'intensité croissante et l'événement du 25 au 27 juillet qui atteint une vitesse de 13 m/s constitue un événement typique.

25/09/2007	12,3	320
26/09/2007	13,2	320
27/09/2007	13	320
28/09/2007	13,2	300

Tableau 9
Date, intensité du vent (m/s) et direction (°)

b) Simulation atmosphérique

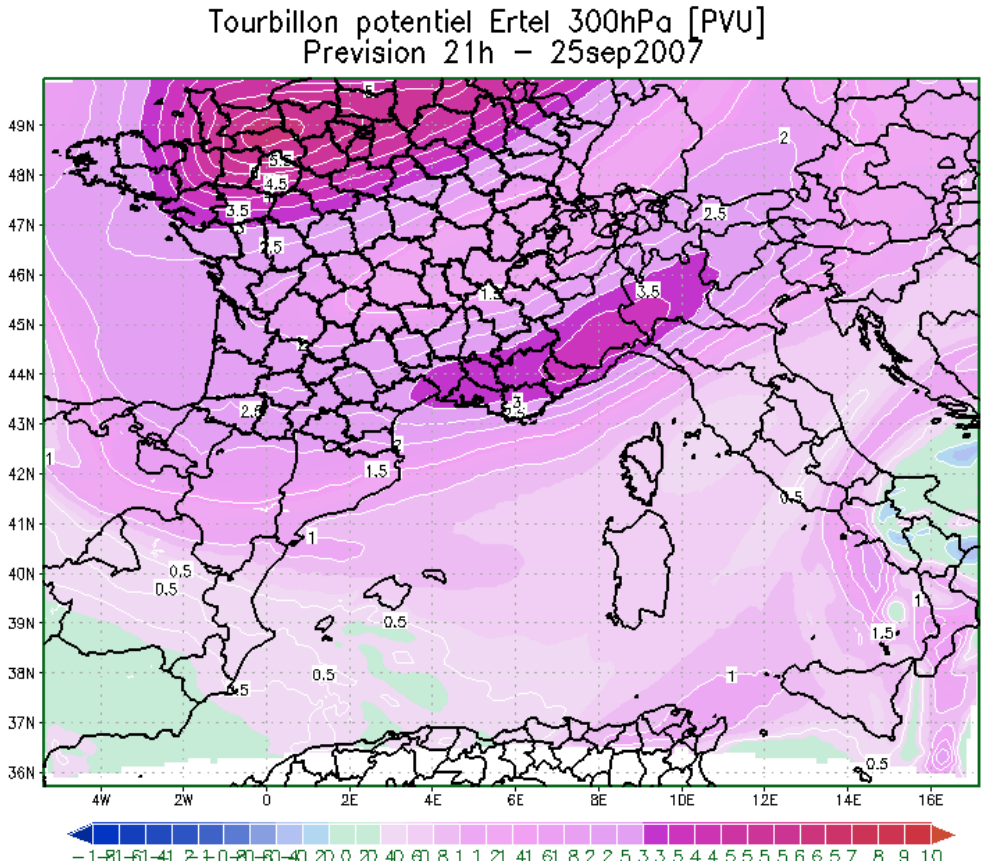


Figure 17 : Tourbillon potentiel (PVU=unité de tourbillon potentiel équivalent à 10-6 m 2 . K .s- 1 .kg – 1) à 300 hPa prévu pour le 25 septembre 2007 à 21h

Un épisode de mistral modéré est généré par la formation d'une dépression vers 850hPa sous le relief alpin. En raison du gradient de pression peu important, le mistral reste modéré.

En début de journée du 25 septembre, circulation sur le sud du Pays d'un petit noyau de vorticité potentielle sur la 300hPa dans un flux de nord-ouest. Il vient s'isoler sur les Alpes Maritimes dans la nuit du 25 au 26 septembre (Figure 17). En amont de ce noyau de tourbillon potentiel, une anomalie de tropopause plus prononcée se déplace en journée du 26 septembre sur l'ensemble de la France et concerne le sud-est en milieu de journée. Le pays va rester sous l'influence de ce tourbillon potentiel jusqu'au 28 septembre ou celui-ci bascule sur un axe est-ouest. Sous le premier noyau de vorticité potentielle, en basse couche, se développe un minimum (zone de basse pression) sur les côtes Varoises générant alors un mistral fort sur l'ouest de PACA avec des rafales de l'ordre de 30/35m/s (Figure 18).

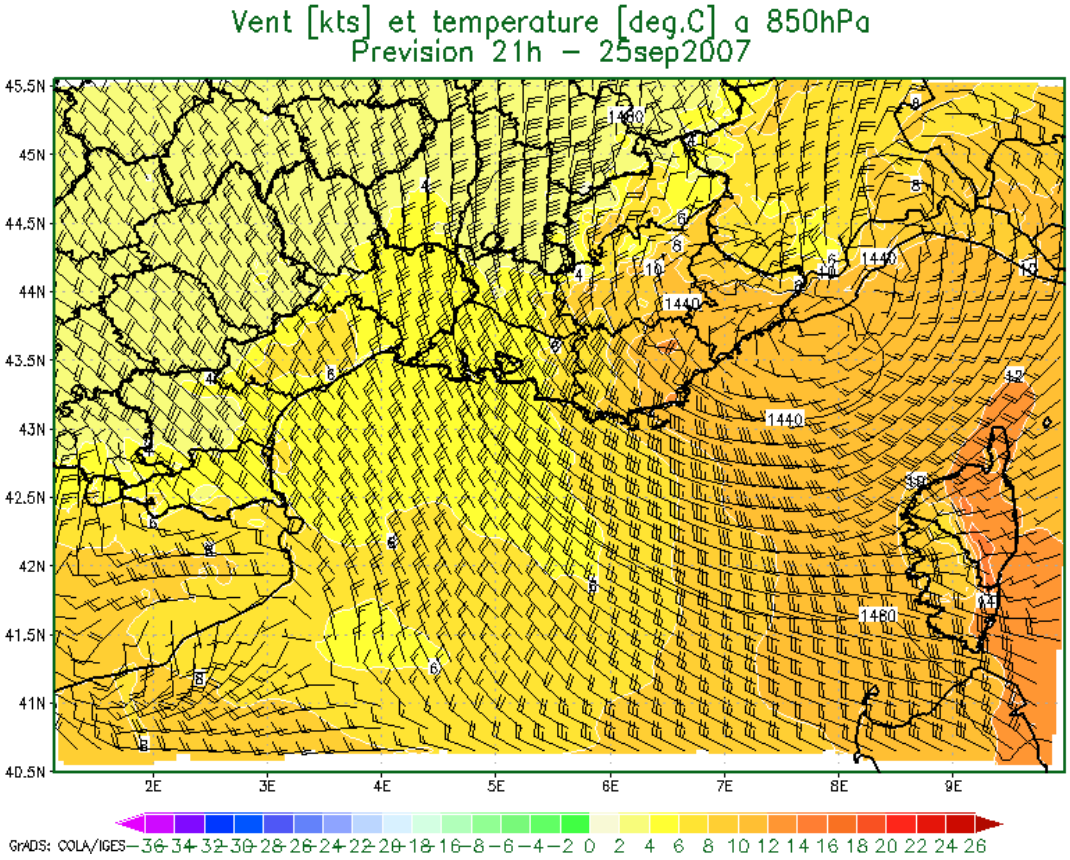


Figure 18 : Vents (nds) et température (°C plage de couleur) à 850hPa le 25 septembre 2007 à 21h

Le déplacement du cut-off vers l'est va favoriser la progression du Mistral jusqu'au secteur de Saint-Tropez. Ce n'est qu'en soirée du 26 septembre, avec le comblement du minimum de surface que le Mistral faiblit. Mais le vent reste de composante nord et des oscillations du champ d'isohypses sur la surface 850hPa contribue à un nouveau renforcement du Mistral en journée du 27 septembre jusqu'en deuxième partie de nuit du 27 au 28 septembre. Puis le vent bascule au secteur ouest sur le littoral des Bouches du Rhône après le comblement de la perturbation sur la plaine du Pô (Figure 19).

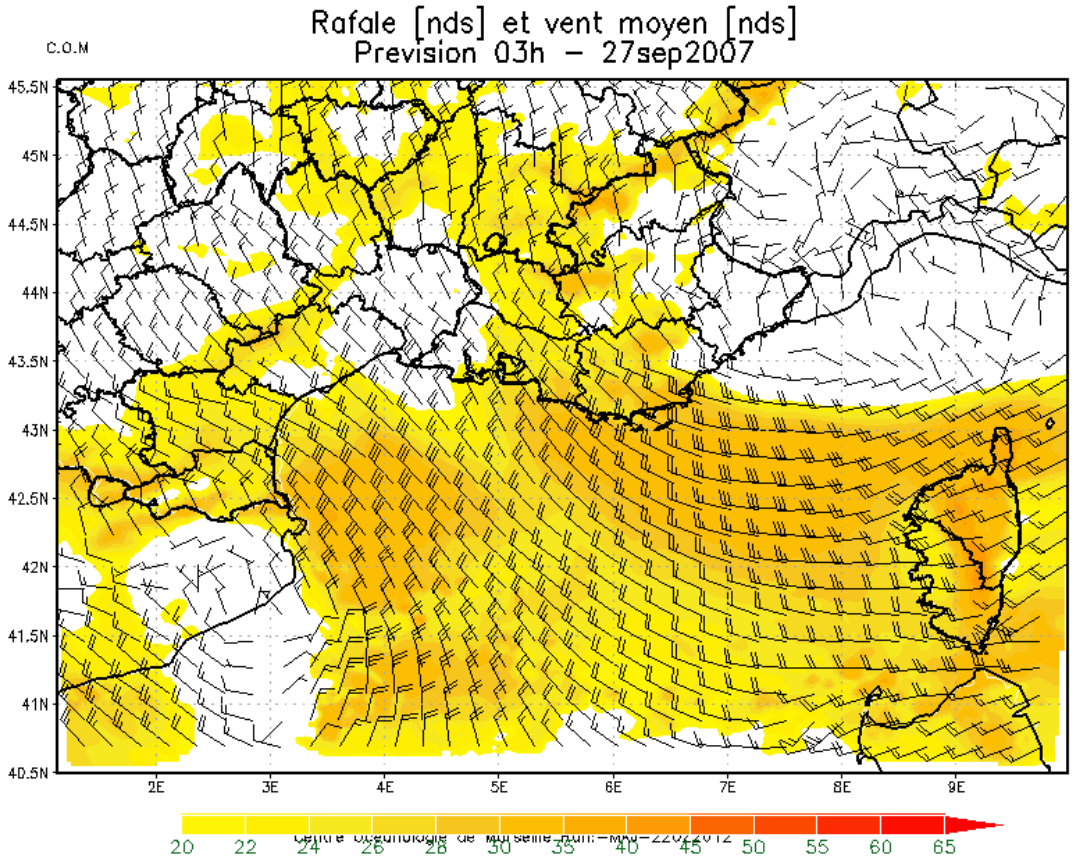


Figure 19 : Rafale (nds plage de couleur) et vent moyen (nds) à 10m le 27 septembre 2007 à 03h

c) Situation hydrodynamique (MARS3D-RHOMA):

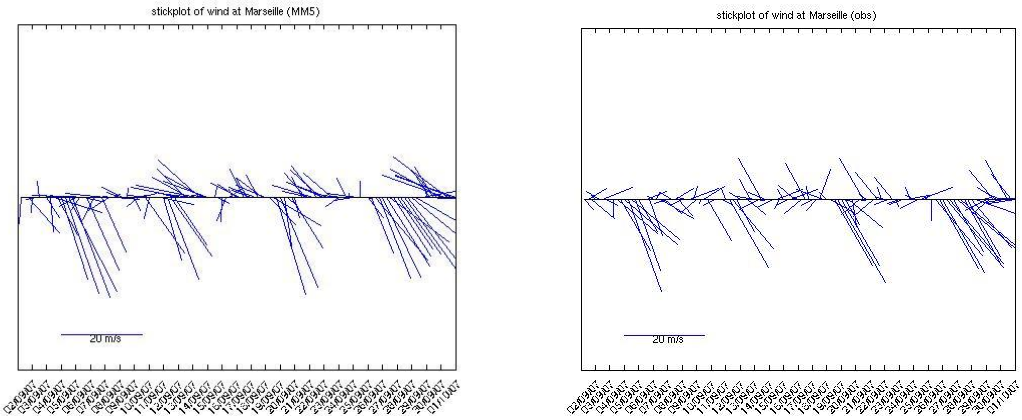
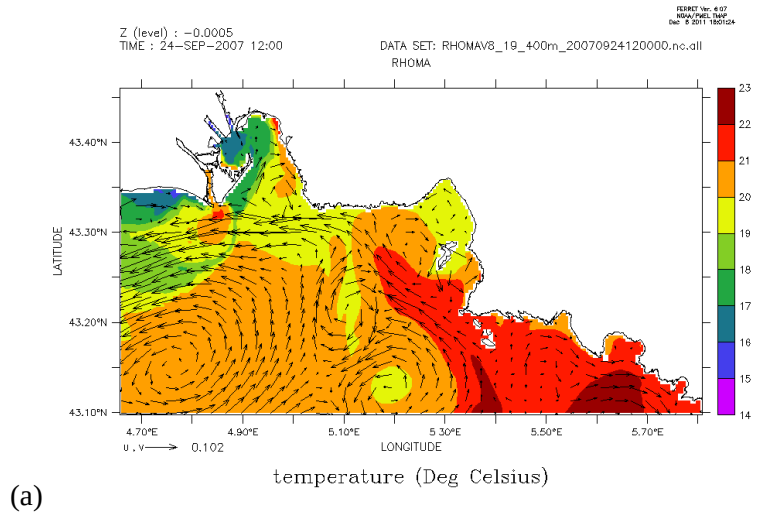
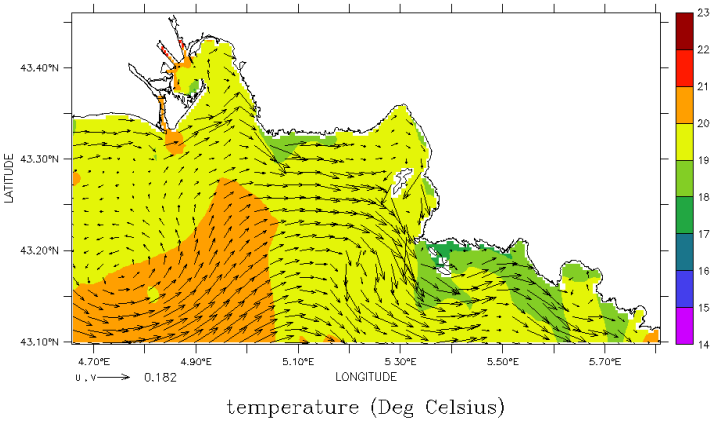


Figure 20 : Représentation du vent modélisé par MM5 (à gauche) et des mesures de Météo France (à droite) effectuées à la Station Hippodrome de Marseille en septembre 2007.

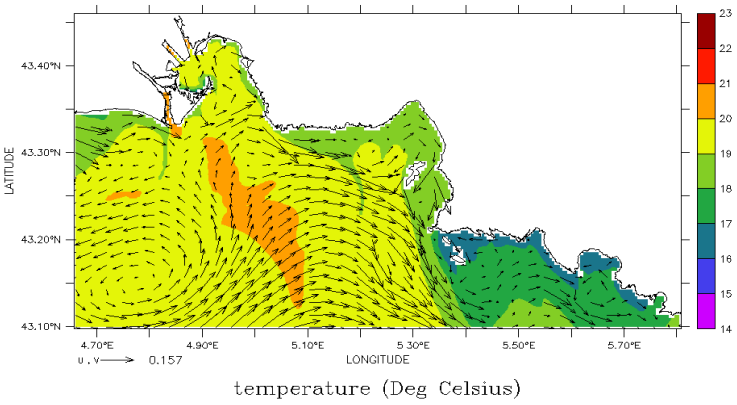
Cette situation typique est relativement bien reproduite par le modèle atmosphérique MM5 qui force MARS3D-RHOMA (Figure 20).



(a)



(b)



(c)

Figure 21 : Température de surface (en °C) et courants (en m/s) modélisés le 24 (a), le 26 (b) et le 27 (c) septembre 2007 à 12 heures.

Le vent est de direction sud-est le 24/09/2007, les eaux chaudes du sud rentrent dans la baie de Marseille (Figure 21a), puis le vent tourne ensuite au Mistral. Le temps de réponse est de 12h environ entre le début du coup de vent et le début du refroidissement de la température de surface bien visible le 26/09/2007 (Figure 21b). L'upwelling induit un refroidissement beaucoup plus important dans les Calanques (4°C) qu'à la côte bleue (2-3°C). Les températures descendent à 16 °C dans les Calanques et 18°C à la Côte Bleue le 27/09/2007 (Figure 21c). Ces différences de baisse de température pourraient s'expliquer par une différence de vitesse verticale et de profondeur de remonté d'eau.

d) Situation biogéochimique (ECO3M-MASSILIA)

La différence Côte Bleue/Calanques est également remarquable sur la Figure 22a où la quantité de nitrate remontée en surface est beaucoup plus importante dans les Calanques (près de 2 µmol/L) qu'à la Côte Bleue (1 µmol/L). Les concentrations en nitrate étant de plus en plus fortes en profondeur, cette différence de concentration suggère des remontées d'eaux par les upwellings issues de profondeurs distinctes. Cette différence nutritive induit une réponse du phytoplancton également différente avec une poussée à la Côte Bleue à l'endroit même de la remonté d'eau riche en sels nutritifs que l'on ne retrouve pas dans les Calanques, où la poussée semble être située autour de la zone de remonté d'eau (Figure 22b).

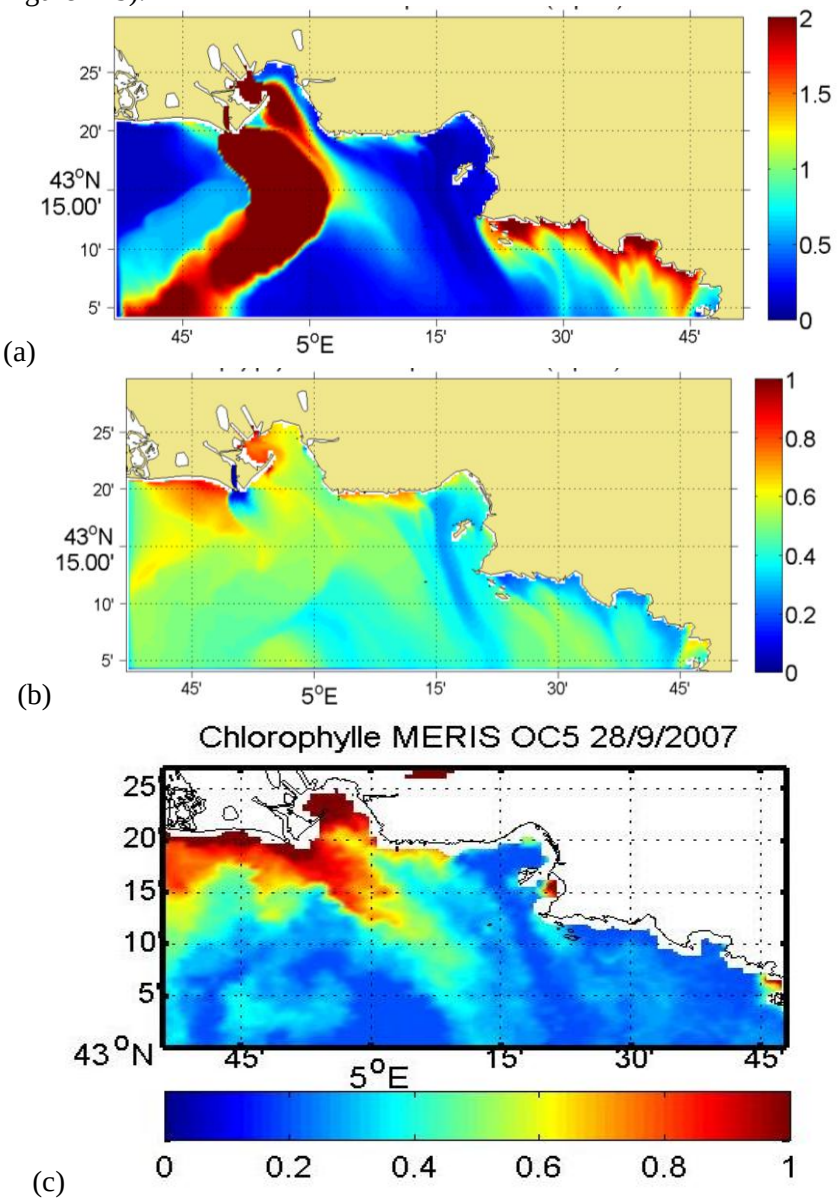


Figure 22 : Nitrates (a) (en µmol/L) et Chlorophylle_a (b) (en µg/L) de surface modélisés le 28 septembre 2007 à 12 heures et Chlorophylle_a (c) (µg/L) calculée grâce à l'algorithme OC5 à partir de l'image MERIS du 28/09/2007.

e) Situation hydrosédimentaire

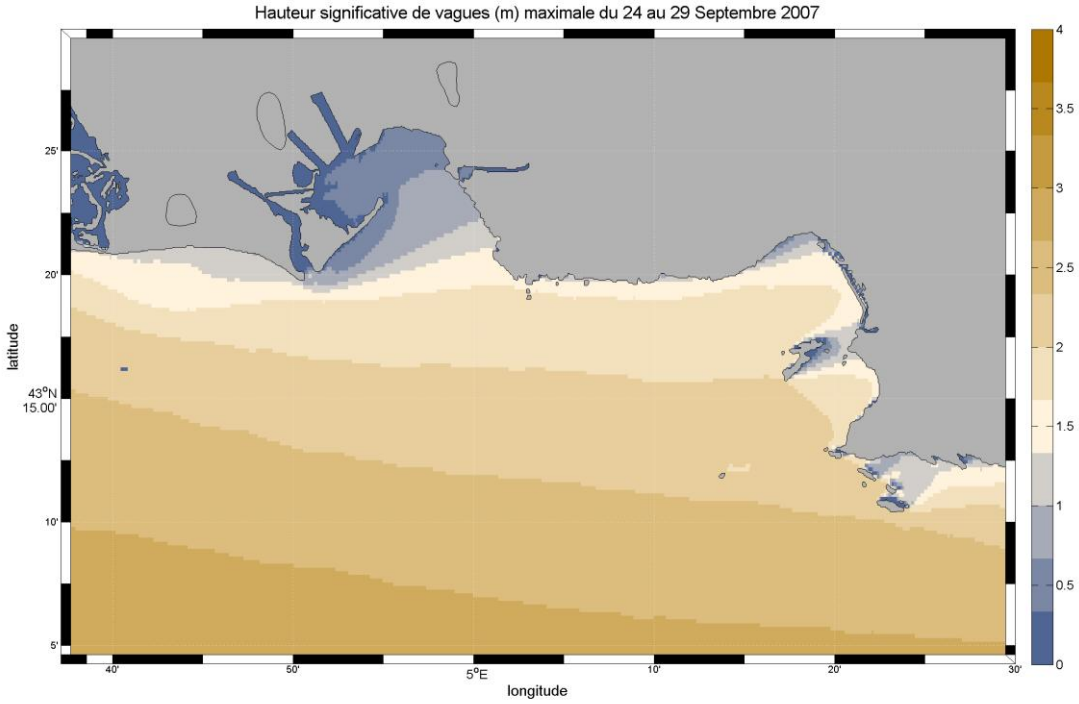


Figure 23 : Distribution spatiale de la hauteur significative des vagues maximales entre le 24 et le 29 septembre 2007

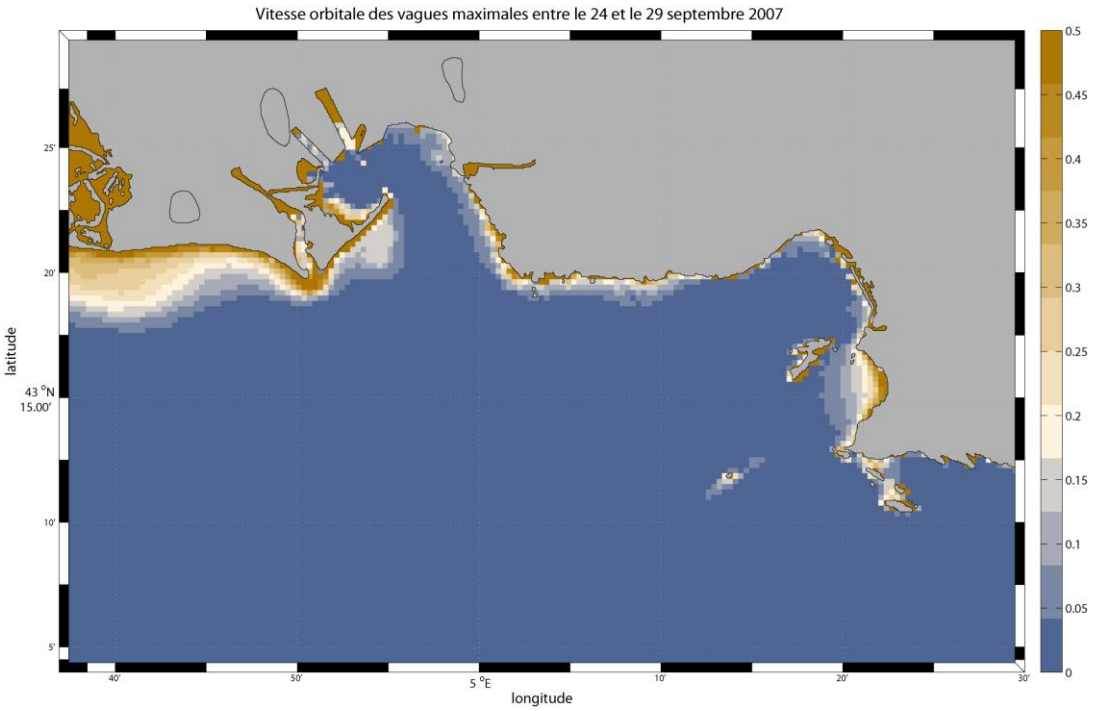


Figure 24 : Distribution spatiale de la vitesse orbitale des vagues maximales entre le 24 et le 29 septembre 2007

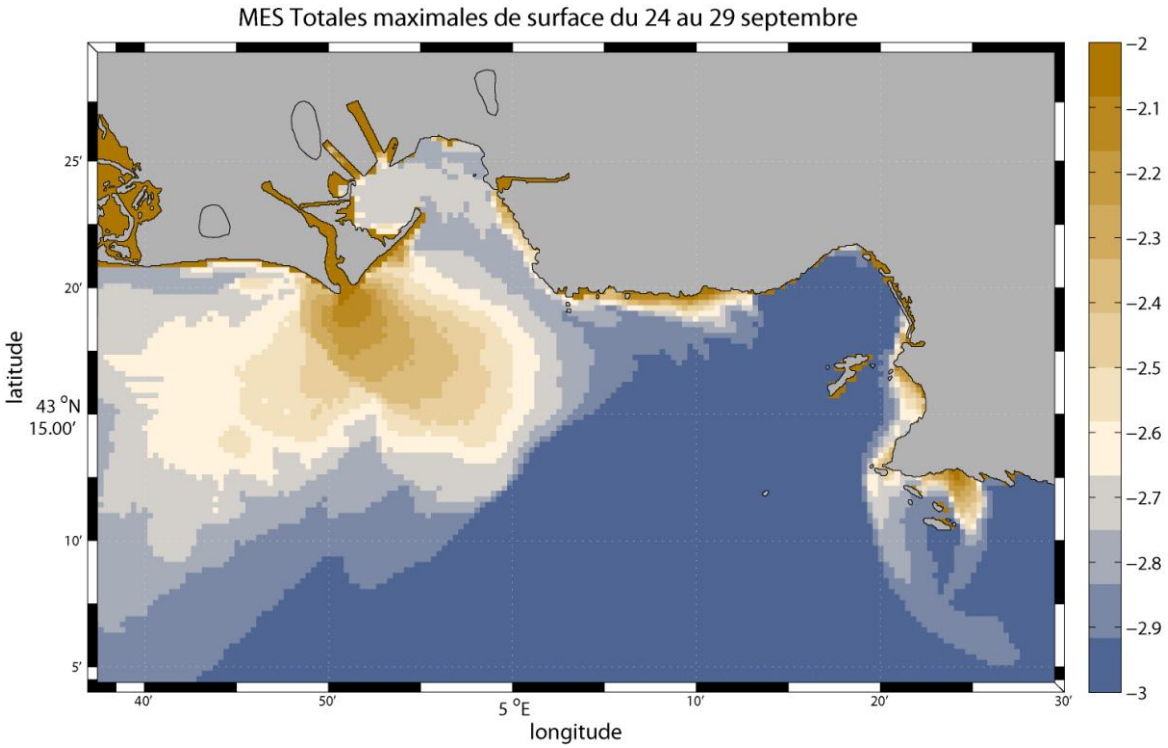


Figure 25 : Distribution spatiale des concentrations en MES de surface maximales entre le 24 et le 29 septembre 2007 (échelle de couleur logarithmique, -2 : 10mg/L, -3 : 1mg/L)

Durant cette période de Mistral modéré, les vagues impactent uniquement la rade sud (Figure 24), induisant une érosion de cette zone et un transfert des MES vers le sud. Le panache de Cortiou est bien visible, avec des concentration supérieures à 5mg/L loin de l'émissaire, et un panache dirigé vers le sud sous l'effet du courant de surface. Une concentration de MES en surface significative est également observée le long de la côte bleue, sans être apparemment être corrélée à un effet des vagues (Figure 25).

f) Situation de la contamination en CB153

Les situations de Mistral induisent donc une circulation nord-sud qui provoque une dispersion rapide des contaminants de la côte vers le large. Les panaches de surface sont dirigés vers le sud et longent la côte dans les rades sud et nord (Figure 26). Les concentrations en surface dans le panache de Cortiou sont du même ordre de grandeur que dans le panache du Rhône mais beaucoup plus localisées. Les concentrations dissoutes sont du même ordre de grandeur que les concentrations particulaires, mais elles sont plus faibles dans les panaches turbides et plus fortes au large que les concentrations particulaires. Les teneurs en CB153 sur les particules (ng/g) sont liées aux apports et aux remises en suspension des sédiments à la côte ; on observe notamment des teneurs assez fortes au fond près de la côte. (Figure 27). La variation des stocks et des flux (Figure 28) montre en effet plusieurs remises en suspension successives en rade sud, mais aussi en rade nord entre le 26 et le 28 septembre. Le PCB remis en suspension se redépose en partie dans les mêmes zones; l'autre partie étant emportée dans la colonne d'eau vers le sud (Figure 29).

(a) Dissous en surface (pg/L)

(b) Particulaire en surface (pg/L)

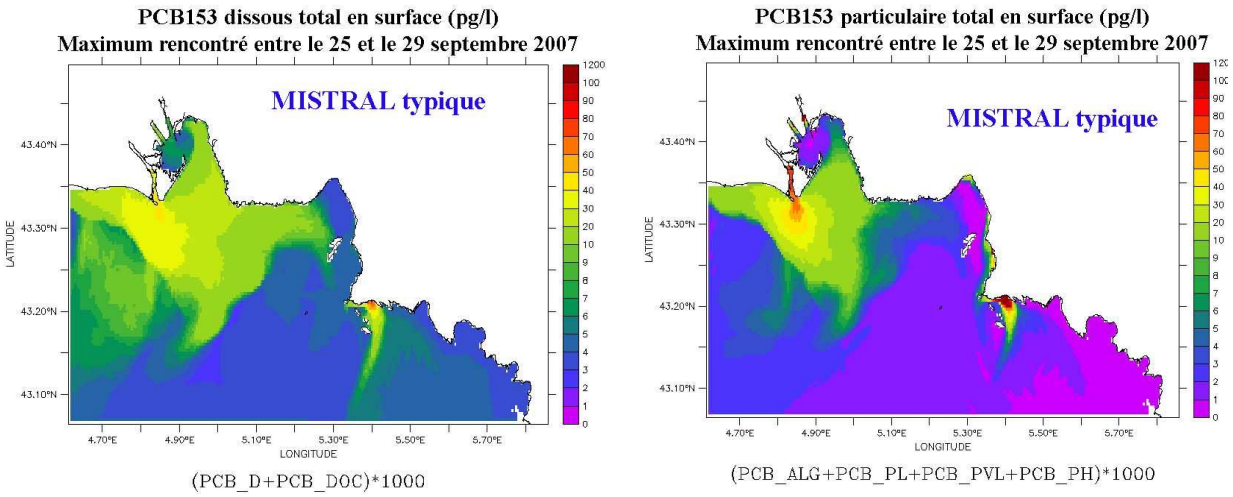


Figure 26 : Concentrations maximales en surface (pg/L) entre le 25 et le 29 septembre 2007.

(a) Particulaire en surface (ng/g)

(b) Particulaire au fond (ng/g)

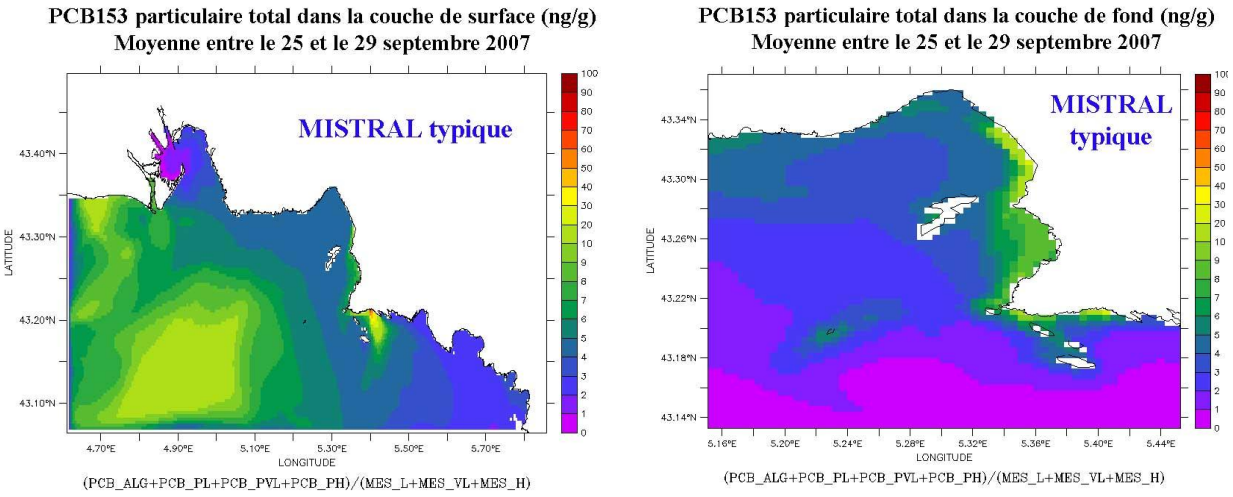


Figure 27 : Teneurs moyennes de CB153 particulaires (ng/g) rencontrées au fond et en surface entre le 25 et le 29 septembre 2007.

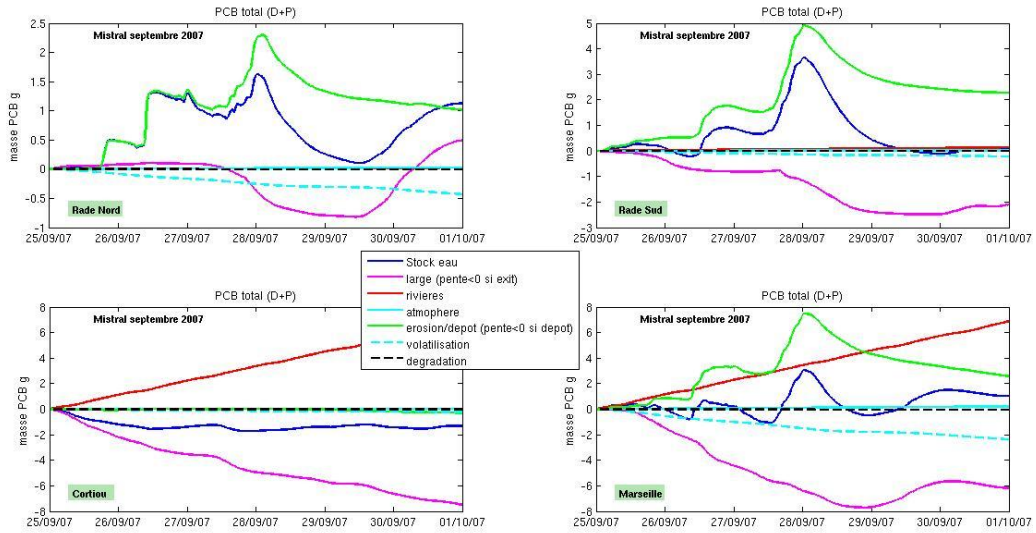


Figure 28 : Variation des stocks de CB153 total dans la colonne d'eau pendant la période et dans chaque zone (décrite sur la Figure 9), associée aux variations de concentrations dues à chaque processus : « large » : entrée/sortie aux limites ; « rivières » : apports à la côte ; « atmosphère » : dépôts secs et pluie ; « érosion/dépôt » ; « volatilisation » et « dégradation ». (si pente >0 = variation positive de la concentration= apport de contaminant, inversement si pente <0 = perte de contaminant).

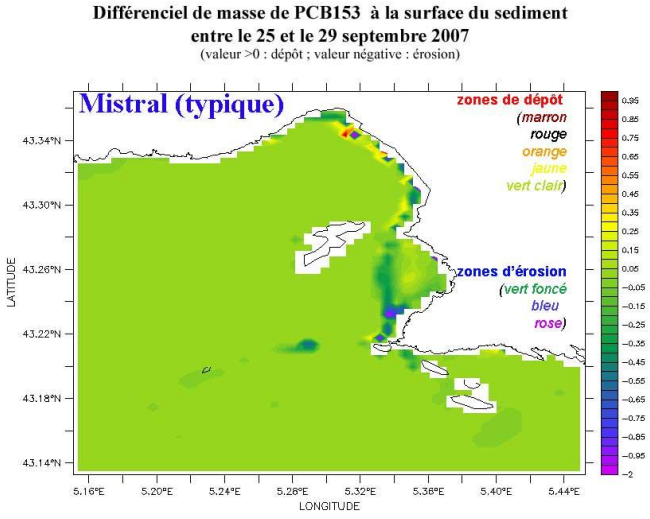


Figure 29 : Zones de dépôt/érosion après l'événement de Mistral typique de septembre 2007

5.1.2. Situation extrême de Mistral 9, 10 et 14 Novembre 2007

a) Données Météo France, station de l'Hippodrome de Marseille

Date	Vitesse	Direction
03/11/2007	3,1	290
04/11/2007	4,3	290
06/11/2007	15,6	330
07/11/2007	11,2	350
08/11/2007	9,1	320
09/11/2007	15,7	330
10/11/2007	17,4	330
11/11/2007	13,4	330
12/11/2007	14,9	330
13/11/2007	8,7	320
14/11/2007	14,7	320
15/11/2007	11,8	350
16/11/2007	7,4	320
17/11/2007	4,4	310
24/11/2007	4,1	330
25/11/2007	6,3	340
26/11/2007	6,3	330
27/11/2007	3,4	310
29/11/2007	7,8	340
30/11/2007	10,7	330
01/12/2007	5,1	290
02/12/2007	8,3	330
03/12/2007	13,5	320
04/12/2007	14,4	330
05/12/2007	5	340
06/12/2007	12,8	330
07/12/2007	13,4	290
08/12/2007	14,2	320
09/12/2007	13,4	300
10/12/2007	14,3	300
11/12/2007	12,2	340
12/12/2007	6,9	320
13/12/2007	3,1	290
14/12/2007	6,5	310
16/12/2007	4,3	320

Tableau 10
Date, intensité du vent (m/s) et direction (°)

Le mois de novembre 2007 se caractérise par un vent de Mistral >3 m/s quasiment tous les jours du 3 novembre jusqu'au 16 décembre inclus, avec pour seul intermède le coup de sud-est autour du 20 novembre (voir situation typique de SE de Novembre 2007) (Tableau 10). Plusieurs valeurs fortes sont enregistrées pendant cette période (Tableau 10), qui peuvent être considérées comme extrêmes même si elles ne constituent pas des records pour les mois de novembre et décembre habituellement soumis à un fort Mistral (depuis l'année 2001 inclue: 19.0 m/s record de vent moyen maximum quotidien pour novembre en 2001; 21.9 m/s record pour décembre en 2004).

b) Simulation atmosphérique

Le 9 novembre 2007, circulation d'une anomalie de tropopause très marquée (maximum de vorticité potentielle à 300hPa) sur l'Europe du nord. Elle circule d'ouest en est en s'isolant sur l'Europe centrale en journée du 10 novembre (Figure 30).

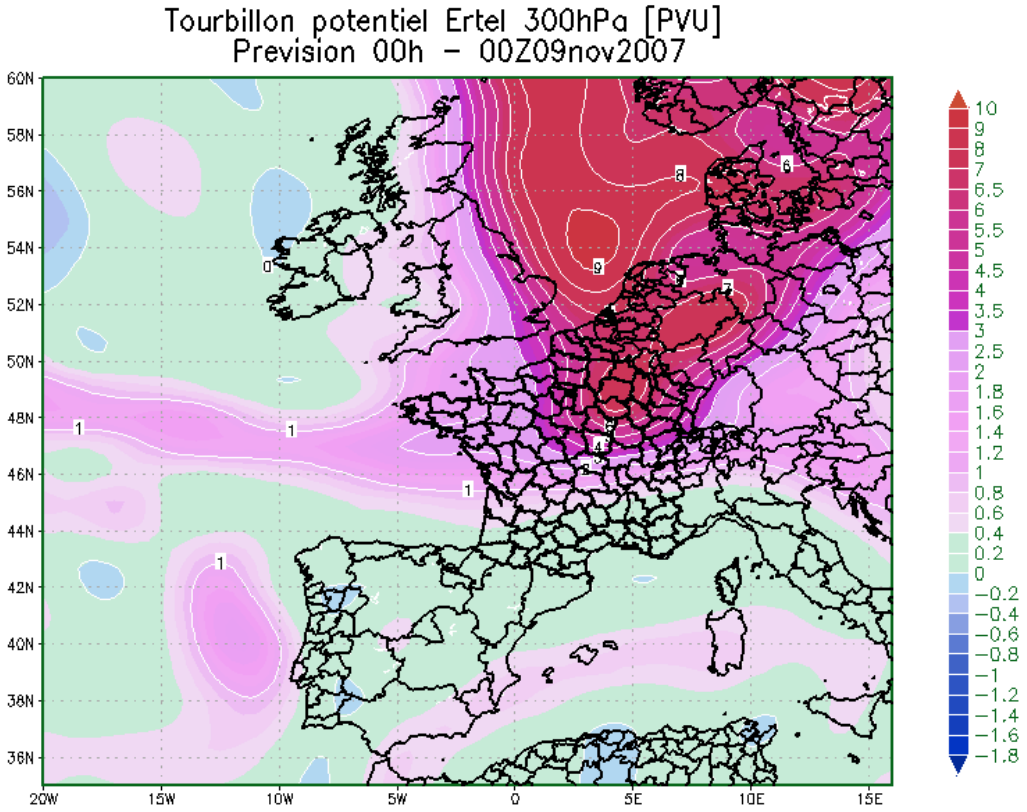


Figure 30 : Tourbillon potentiel (PVU=unité de tourbillon potentiel équivalent à 1 rad.m ^{2} . K .kg $^{-1}$ .s $^{-1}$) à 300hPa le 09 novembre 2007 à 00h

Sur la bordure ouest de cette anomalie, flux de nord-ouest assez rapide sur un axe Ecosse-Sardaigne. Tandis que sur le proche atlantique développement d'une dorsale évoluant sur la France en journée du 10 novembre (Figure 31).

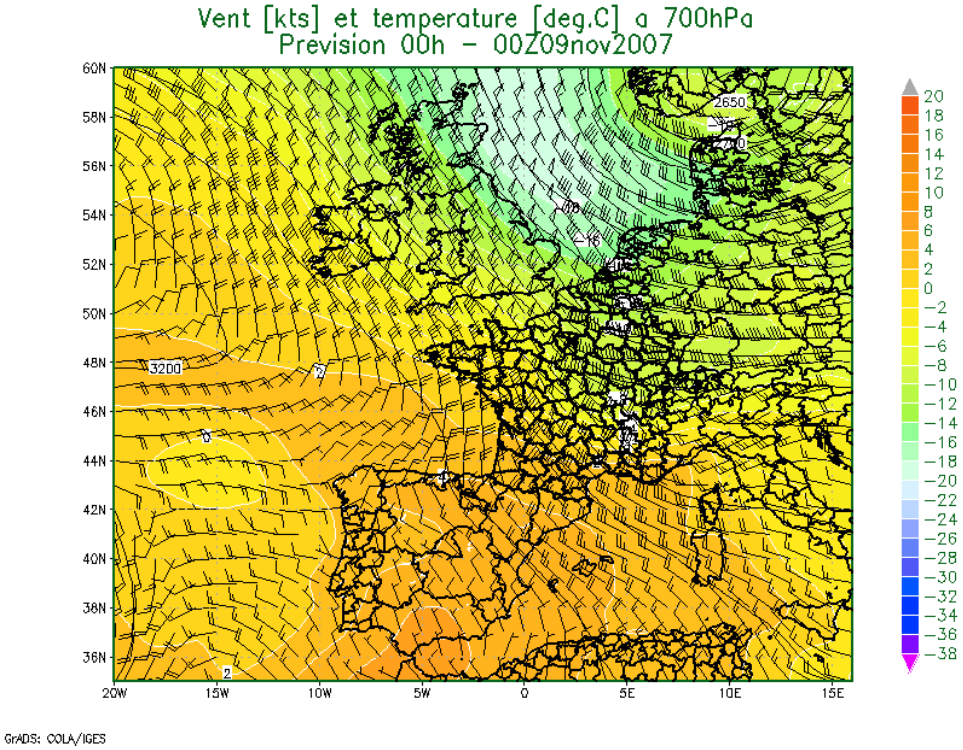


Figure 31 : Vents (nds) et température (°C plage de couleur) à 700hPa le 9 novembre 2007 à 00h

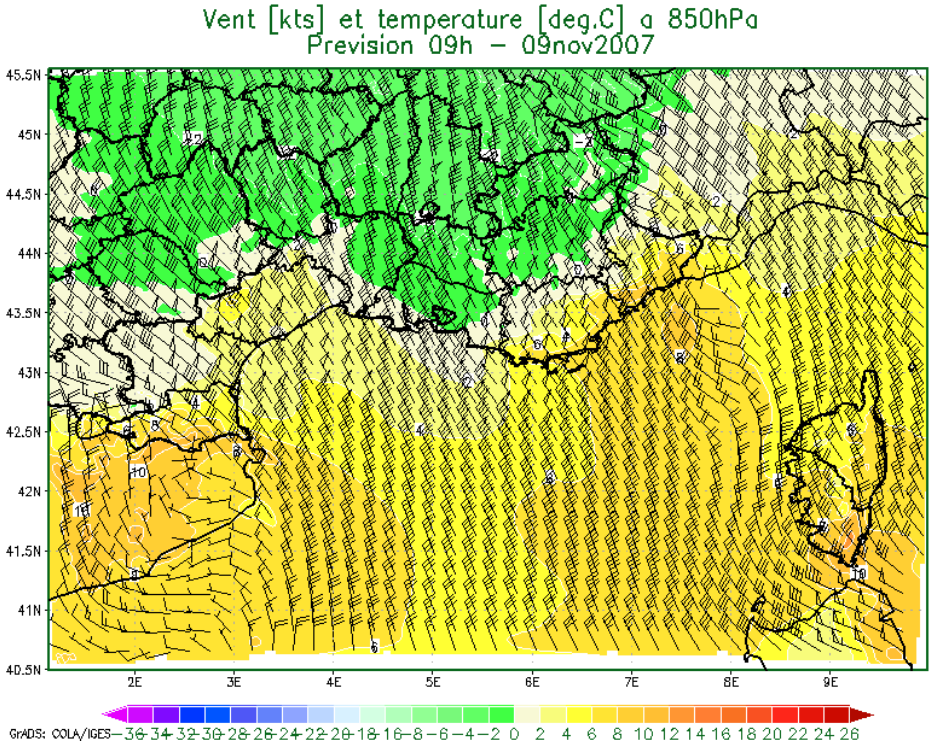


Figure 32 : Vents (nds) et température (deg.C plage de couleur) à 850hPa le 09 novembre 2007 à 09h

Sur la région PACA, en liaison avec le flux de nord-ouest d'altitude, le 9 novembre au matin, le gradient des isohypses à 850hPa étant plus marqué sur l'est des Bouches du Rhône, les Alpes de Hautes Provence et le Var génère une zone de vent fort (Figure 32).

C'est sous ce jet de basse couche que le Mistral souffle fort, cela concerne l'est des Bouches du Rhône et les côtes varoises. Ensuite en cours d'après-midi, le vent faiblit en basse couche et c'est en deuxième partie de nuit du 9 au 10 novembre qu'un minimum relatif se développe près de la côte d'azur et évolue vers l'ouest (Figure 33).

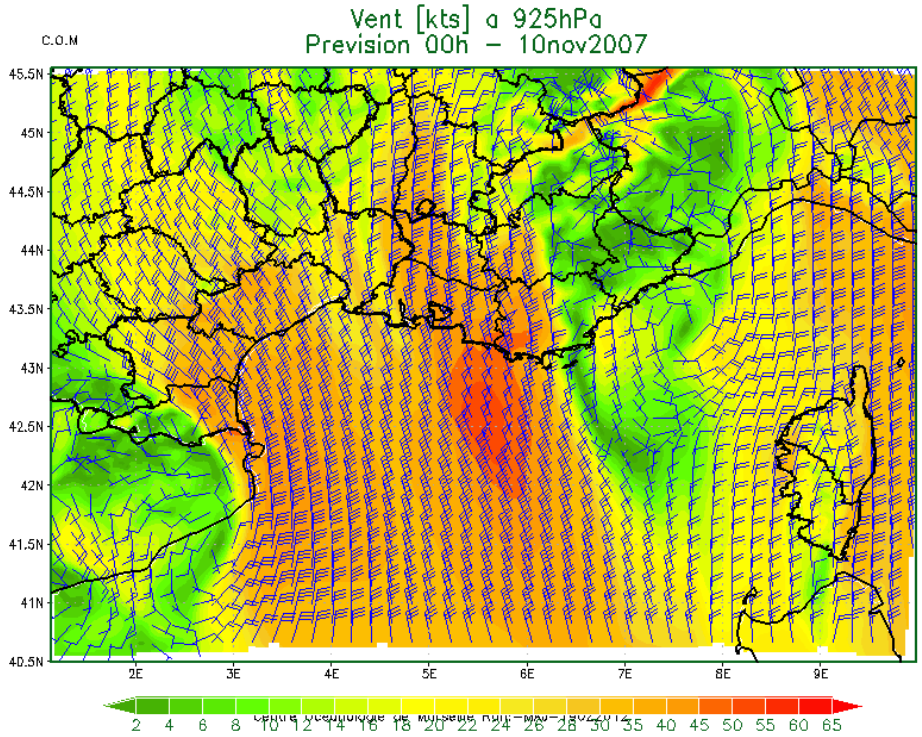


Figure 33 : Vents (nds) à 925hPa le 10 novembre 2007 à 00h

Le jet de basse couche évolue alors le long des côtes provençales en cours de nuit pour se positionner sur le secteur de Marseille. Le Mistral souffle fort en journée du 10 novembre puis s'étend à l'ouest du Var en début de soirée.

c) Situation hydrodynamique (MARS3D-RHOMA)

Les vents contraignent fortement la circulation et l'hydrologie sur le plateau à l'est du golfe du Lion.
La baisse de température liée aux épisodes d'upwellings de l'automne 2007 a été enregistrée par des thermographes dans le cadre du programme MEDCHANGE à l'ile du Riou (Figure 34), station qui fait partie du réseau TMedNet (http://www.t-mednet.org). Les upwellings favorisent le mélange des eaux à l'automne.

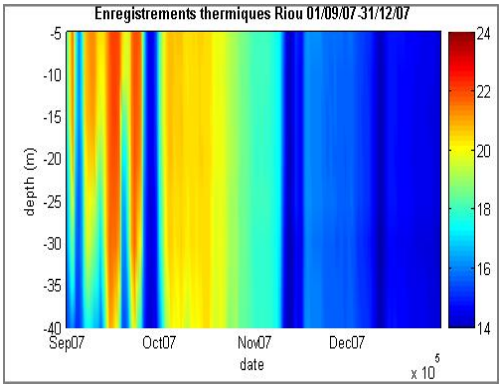
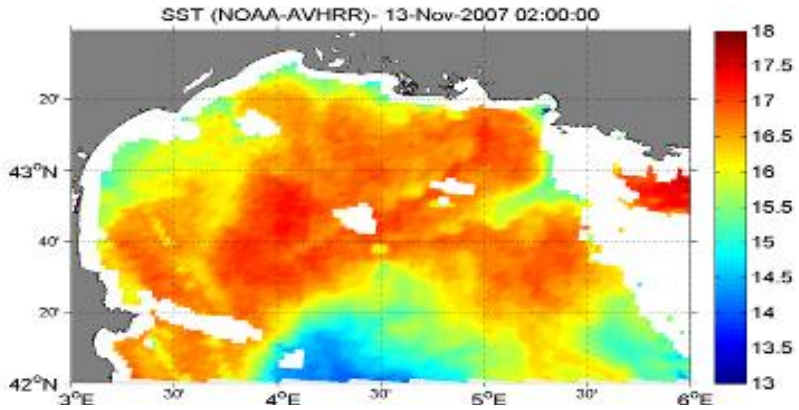


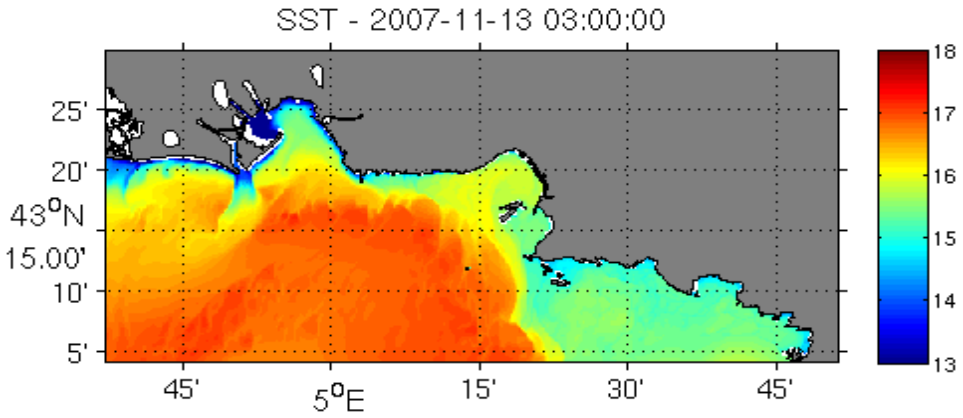
Figure 34 : Observations de température (N. Bensoussan, comm. Perso.) à la station de l'ile du Riou (43.17N,5.38E) de septembre à décembre 2007.

Le refroidissement des eaux en surface pour l'upwelling du 13 novembre 2007 est représenté sur la Figure 35 et sur la Figure 36. La comparaison des températures modélisées par la configuration RHOMA et observées par satellite (Figure 35) indique un bon accord pour la localisation des zones impactées à l'est du golfe du Lion: la côte bleue, la baie de Marseille et surtout le Calanques. Le refroidissement atteint 4 degrés en quelques heures au niveau de l'ile de Riou (Figure 36).

a)



b)



(c)

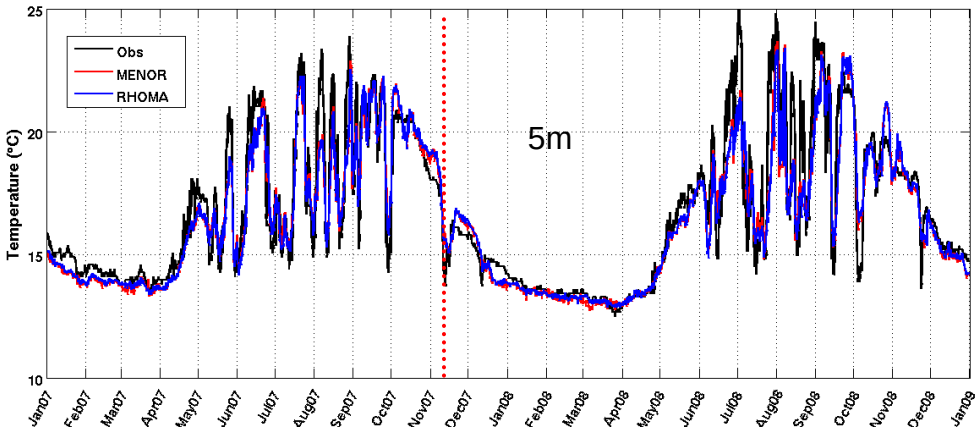


Figure 35 : Température de surface (en °C) le 13 novembre 2007: a) observée par satellite (SST NOA-AVHRR) sur le golfe du Lion, b) modélisée à l'aide de la configuration RHOMA, c) .

d) Situation biogéochimique (ECO3M-MASSILIA)

De mi-novembre à fin décembre 2007, lors de la période de Mistral, les températures sont homogènes et froides sur toute la colonne d'eau. C'est la période hivernale décrite par Conan (1996) et qui est caractérisée par un fort mélange et donc une homogénéité de la colonne d'eau. Les concentrations en nitrate sont élevées (supérieures à 1 µmol.L^{-1}) de la surface jusqu'au fond, cependant les concentrations en chlorophylle_a sont basses (Figure 36).

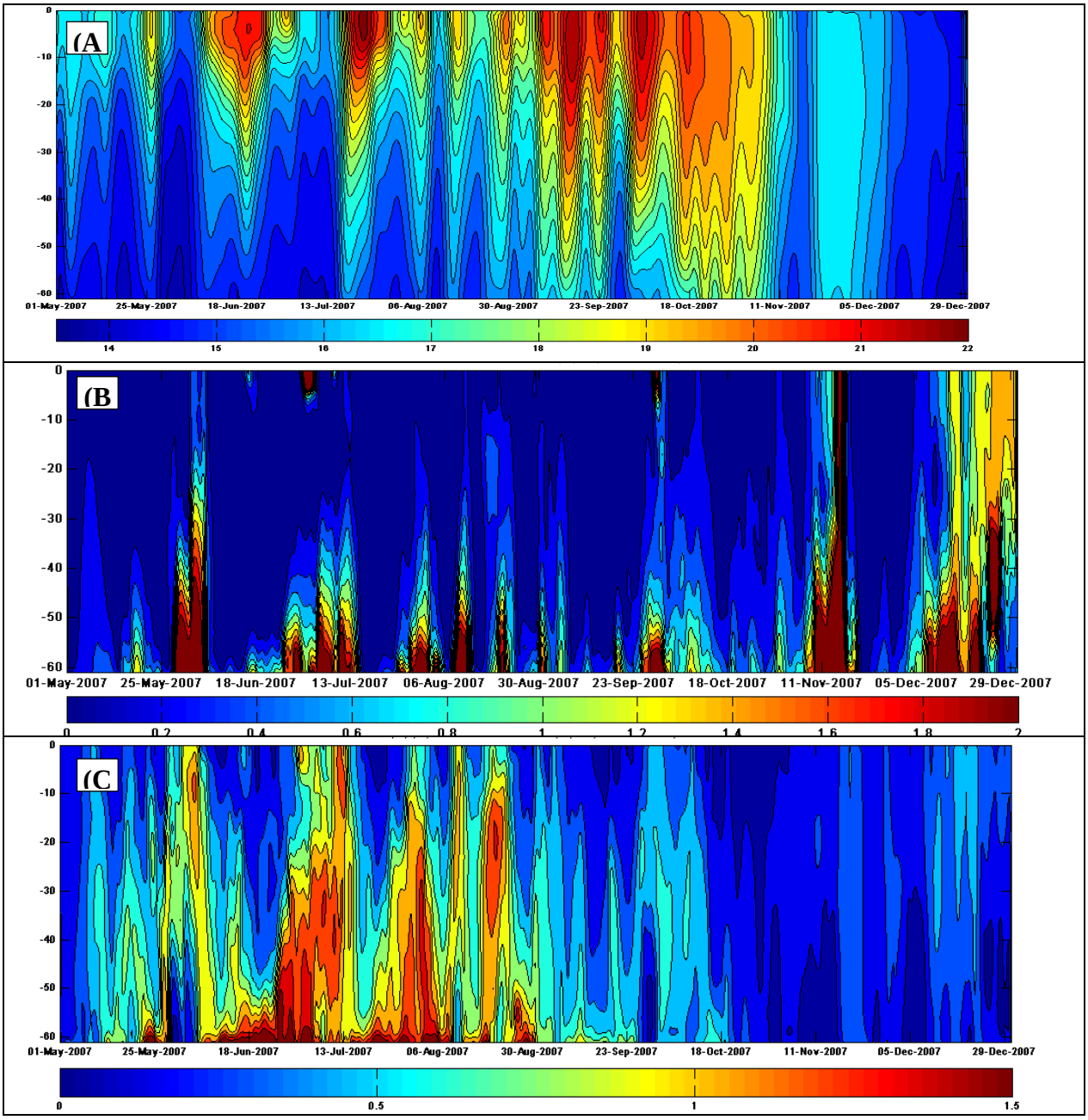
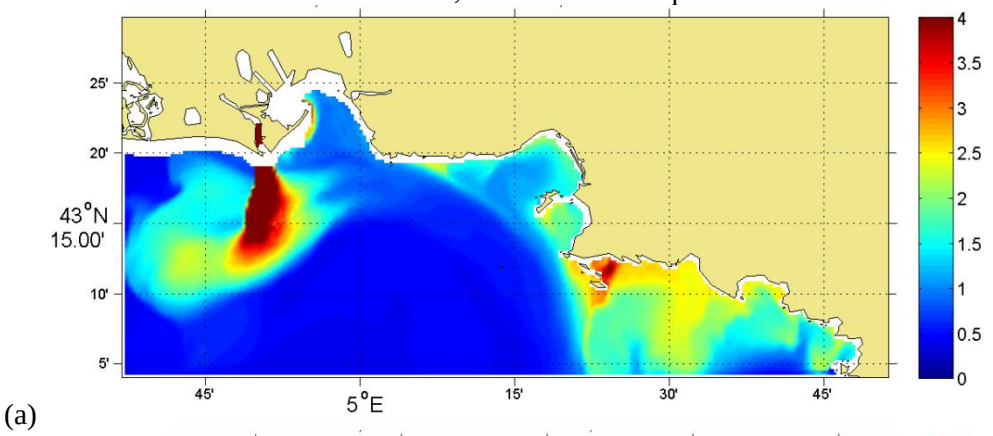


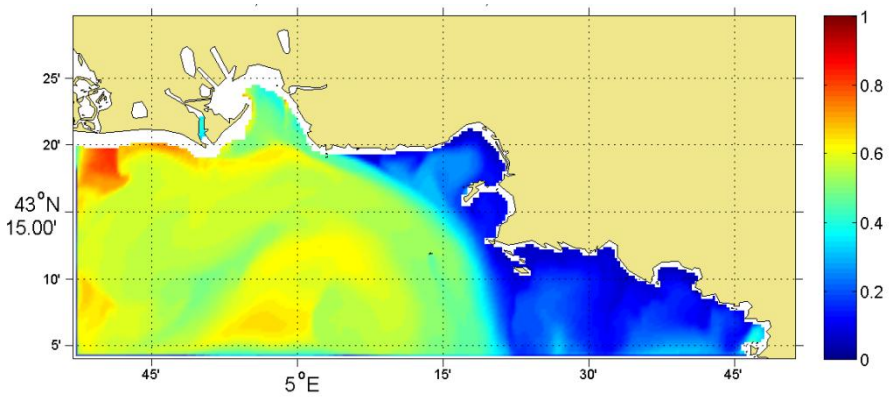
Figure 36 : Température (en °C) (A) , concentrations en nitrates (en µmol.L^{-1}) (B) et en chl.a (en µg.L^{-1}) (C) simulés, de la surface jusqu'au fond (60 m) à la station SOMLLIT du 01/05/07 au 31/12/07. Les résultats de la simulation sont filtrés sur 2 jours (soit 7 valeurs) avec un filtre de Hanning.

La différence côte bleue/calanques est également remarquable sur la Figure 37 où la quantité de nitrates remontés en surface est beaucoup plus importante dans les calanques (4 µmol/L) qu'à la côte bleue (2 µmol/L), ce qui suggère à nouveau une profondeur d'origine différente. Cette tendance déjà observée pour un événement typique de Mistral est ici accentuée car les concentrations en nitrate en surface sont bien plus importantes (environ le double) dans le cas d'un événement extrême. Ceci indique que les eaux remontent d'une profondeur encore plus importante que dans le cas d'un Mistral typique. Cette différence induit une réponse du phytoplancton (Figure 37) également différente dans le cas de cet événement extrême qui se produit en novembre, un mois et demi plus tard que le précédent (dans des conditions plus proches de l'hiver, avec des concentrations de chlorophylle_a

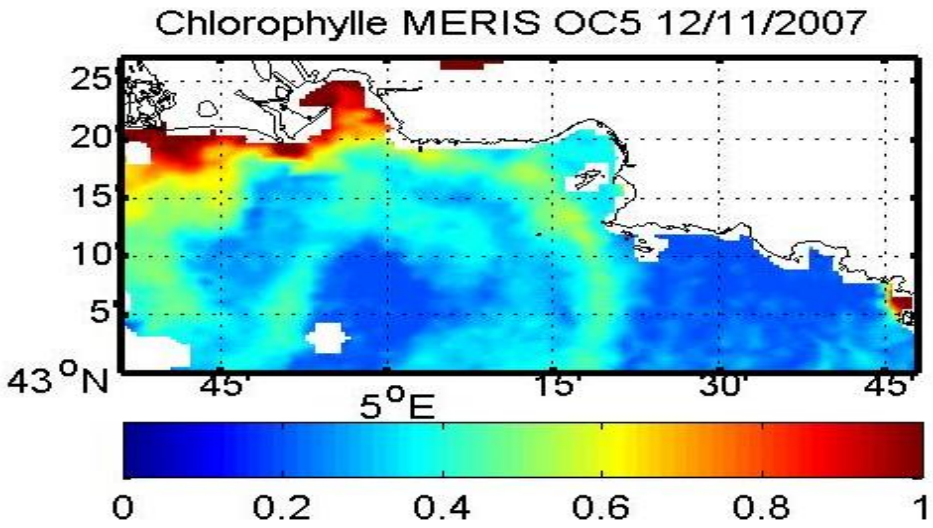
beaucoup plus faibles comme le montre la Figure 36). Il n'y a pas de poussée à la côte bleue à l'endroit même de la remonté d'eau riche en sels nutritifs, ni dans les calanques d'ailleurs.



(a)



(b)



(c)

Figure 37 : Nitrates (a) (en µmol/L) et Chlorophylle_a (b) (en µg/L) de surface modélisés le 12 novembre 2007 à 12 heures et Chlorophylle_a (c) (µg/L) calculée grâce à l'algorithme OC5 à partir de l'image MERIS du 12/11/2007.

La poussée semble être située dans une zone frontale à la limite de la zone de remonté d'eau. Elle se confond avec un filament généré par le front entre les eaux de l'upwelling et les eaux de surface environnantes, filament également bien visible sur l'image de couleur de l'eau du même jour (Figure 37c). A noter qu'une poussée dans la partie plus au sud est sans doute liée à une mauvaise représentation des concentrations à la frontière ouverte sud.

e) Situation hydrosédimentaire

Lors des évènements de Mistral, la baie de Marseille se trouve majoritairement protégée de l'influence des vagues, le fetch étant alors limité (Figure 38). Seule la Rade sud est impactée par les vagues (Figure 39 et Figure 40). Cette situation induit une érosion significative en rade sud, un mélange intense (concentrations maximales de surfaces de l'ordre de 8mg/L) et un transfert des sédiments, majoritairement des MES lourdes, vers le sud, forcé par le courant de surface généré par le Mistral, tandis qu'une faible part du sédiment se trouve redistribué en rade sud (Figure 41). De même, le panache de l'émissaire de Cortiou est dirigé vers le large. Il est cependant peu développé (quelques mg/L au droit de l'émissaire), car rapidement dilué et sans évènement majeur de pluie concomitant.

Cet export vers le large est clairement visible via le calcul des bilans particulaires : une majorité des sédiments érodés (rade sud, Figure 43) sont exportés hors de la zone (Figure 42).

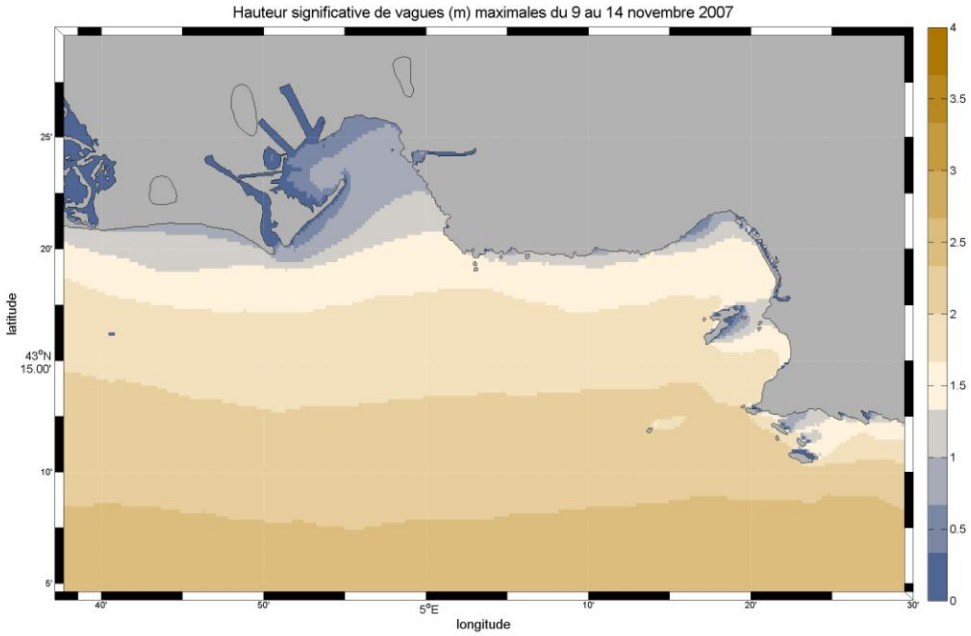


Figure 38 : Hauteur significative des vagues (m) du 9 au 14 novembre 2007

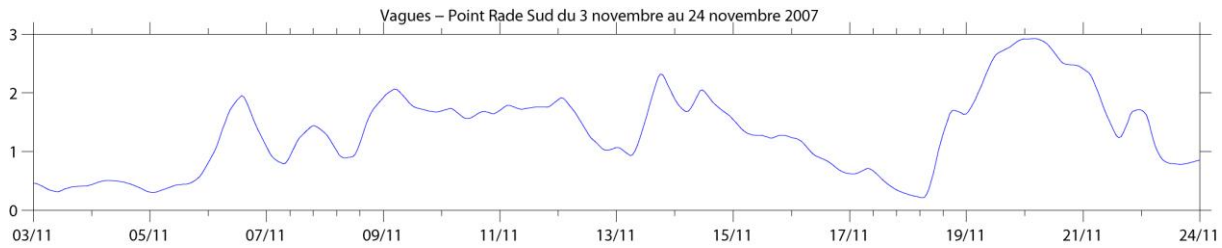


Figure 39 : Hauteur significative des vagues au point de référence Rade sud du 3 au 24 novembre

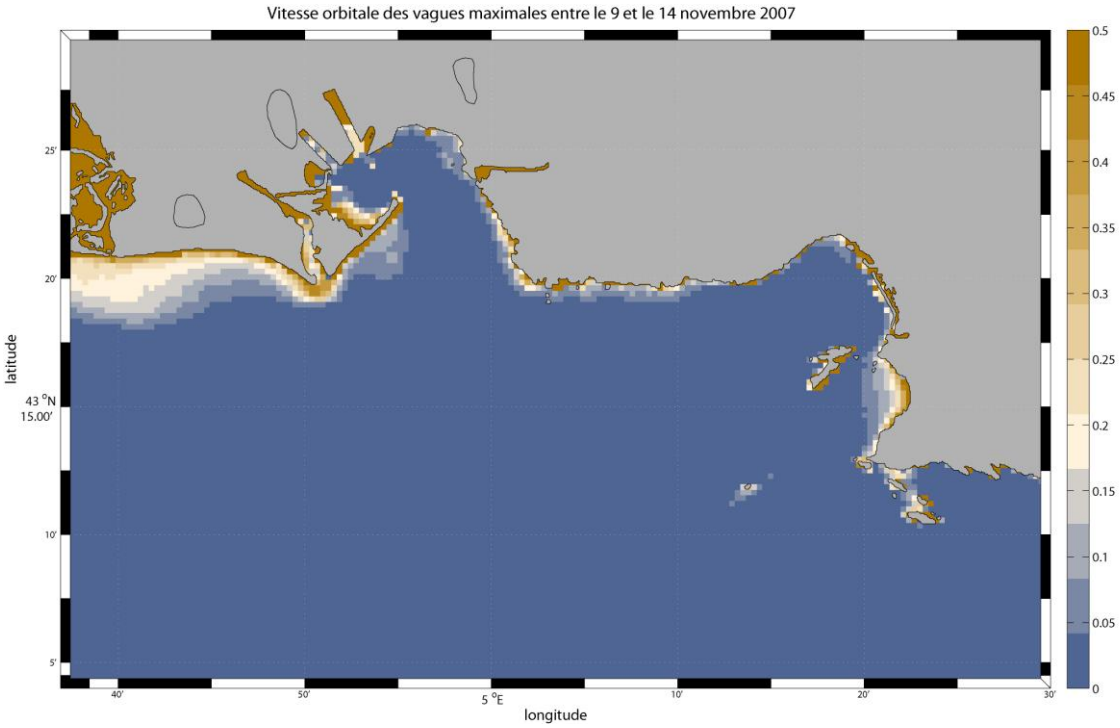


Figure 40 : Vitesse orbitale des vagues (m/s) du 9 au 14 novembre 2007

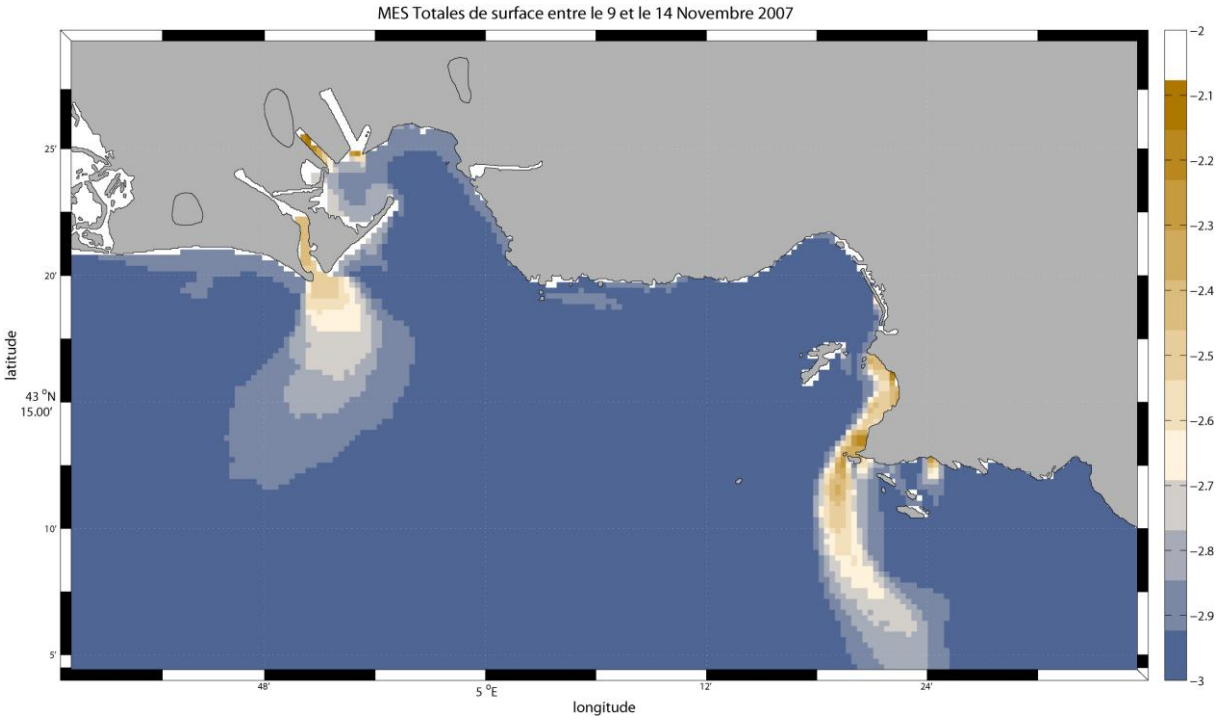


Figure 41 : Distribution des MES totales de surface entre le 9 et le 14 novembre 2007 (en g/L, échelle logarithmique)

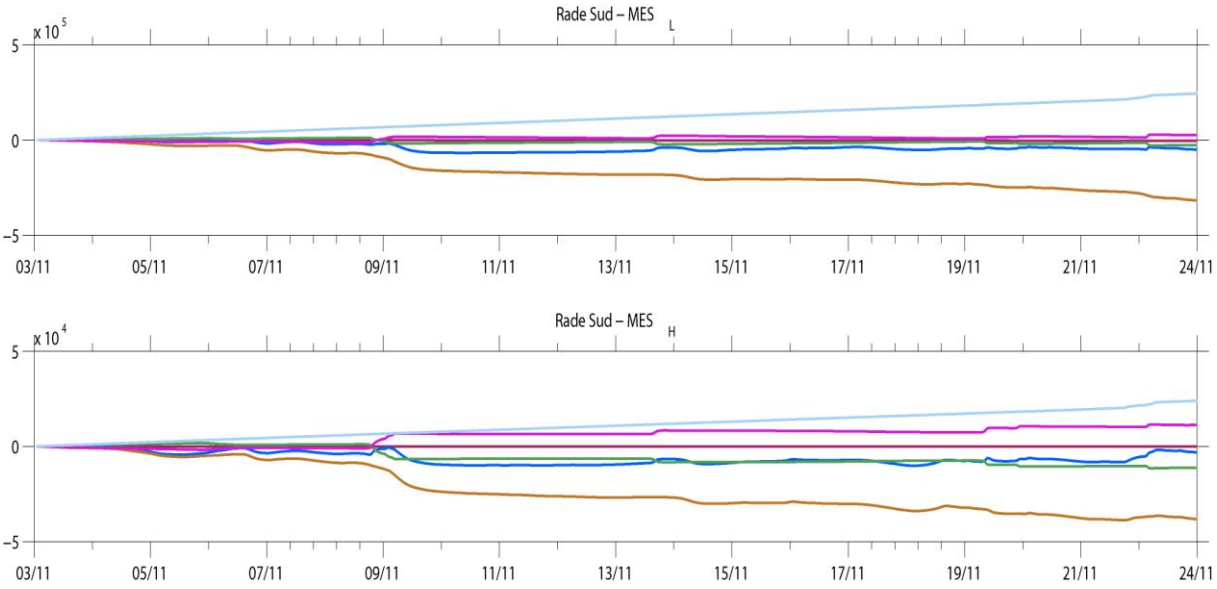


Figure 42 : Bilan sédimentaire cumulé de la zone Rade sud du 3 au 24 Novembre 2007 pour la MES_L (légère) en haut et MES_H (lourde) en bas. Bilan global (rouge), Masse dans l'eau (bleu foncé), Masse dans le sédiment (Vert), Flux aux limites (sortant si négatif) (marron), Flux à l'interface eau/sédiment (dépôt si négatif) (rose), Flux en provenance des apports (bleu clair)

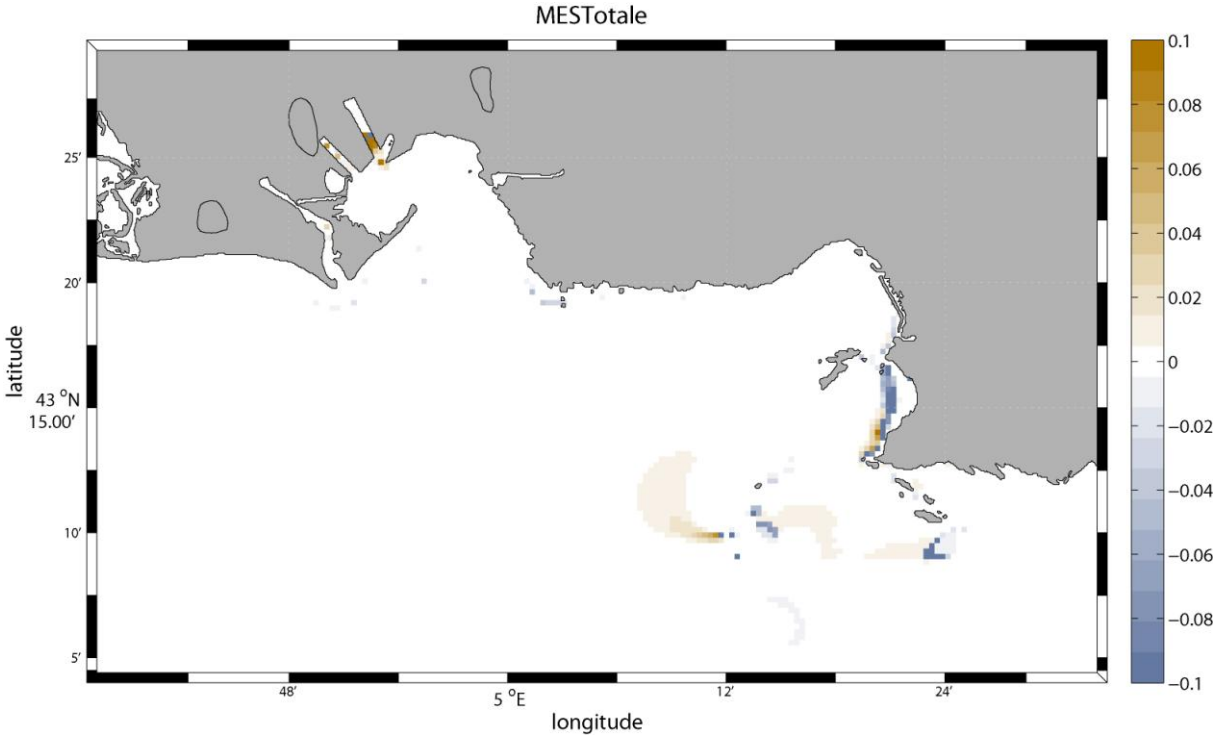


Figure 43 : Dépôt (en beige) /érosion (en bleu) de sédiment fin (kg/m2) entre le 9 et le 14 Novembre 2007.

f) Situation de la contamination en CB153

La situation de novembre 2007 est assez semblable à celle de septembre 2007, mais les remises en suspension de PCB le 9 novembre en rade nord et sud (plus marquées en rade sud) sont moins fortes

que dans la situation typique (Figure 44); les concentrations sont en moyenne plus faibles (Figure 45 et Figure 46), liées notamment à une diminution des apports par rapport à la situation de septembre. Comme dans la situation typique, la zone de Cortiou n'est pas soumise à des érosions et le processus majeur reste l'apport de Cortiou qui se disperse rapidement. L'essentiel des apports, qu'ils soient d'origine côtière ou d'origine sédimentaire, est exporté vers le large (Figure 46); il y a très peu de dépôt. Une part non négligeable se volatilise, mais ce processus est sans doute surévalué. Le stock total de CB153 diminue pendant l'événement dans toutes les zones (Figure 46).

(a) Dissous en surface (pg/L)

(b) : Particulaire en surface (pg/L)

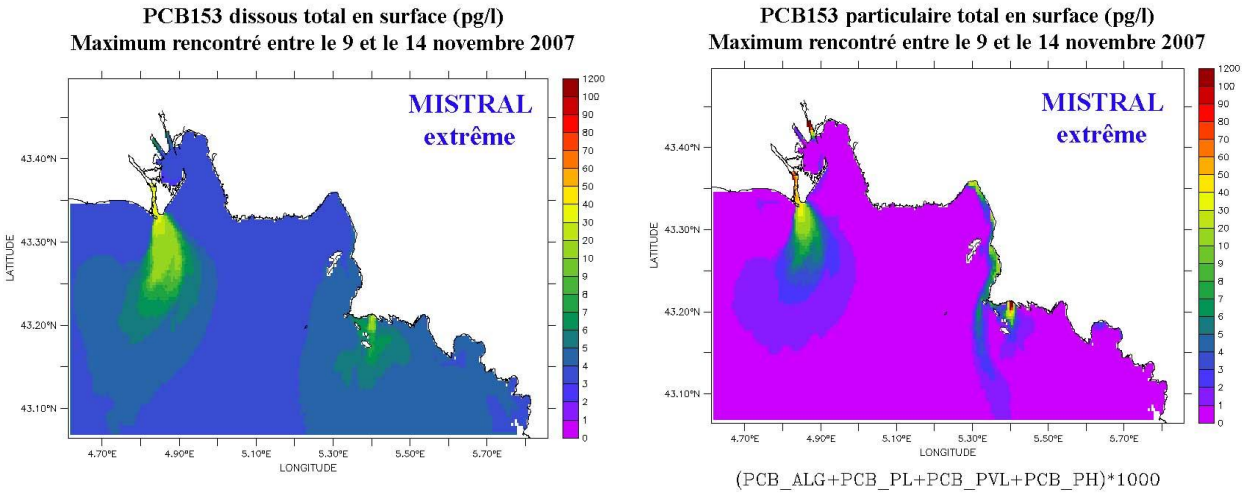
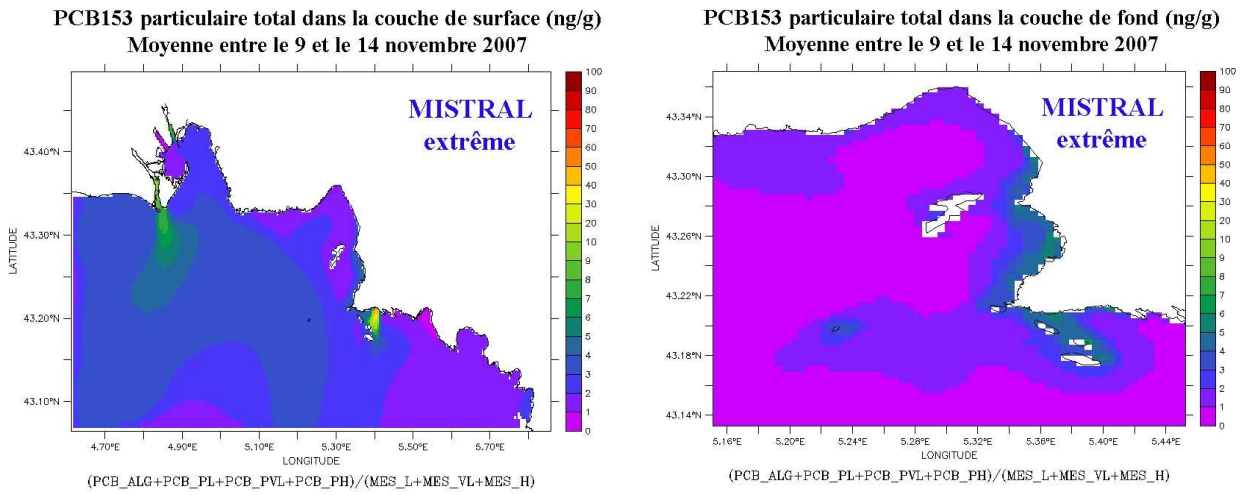


Figure 44 : Concentrations maximales en surface (pg/L) entre le 9 et le 14 novembre 2007

(a) : Particulaire en surface (ng/g)

(b) : Particulaire au fond (ng/g)



.

Figure 45 : Teneurs moyennes de CB153 particulaires (ng/g) rencontrées au fond et en surface entre le 9 et le 14 novembre 2007

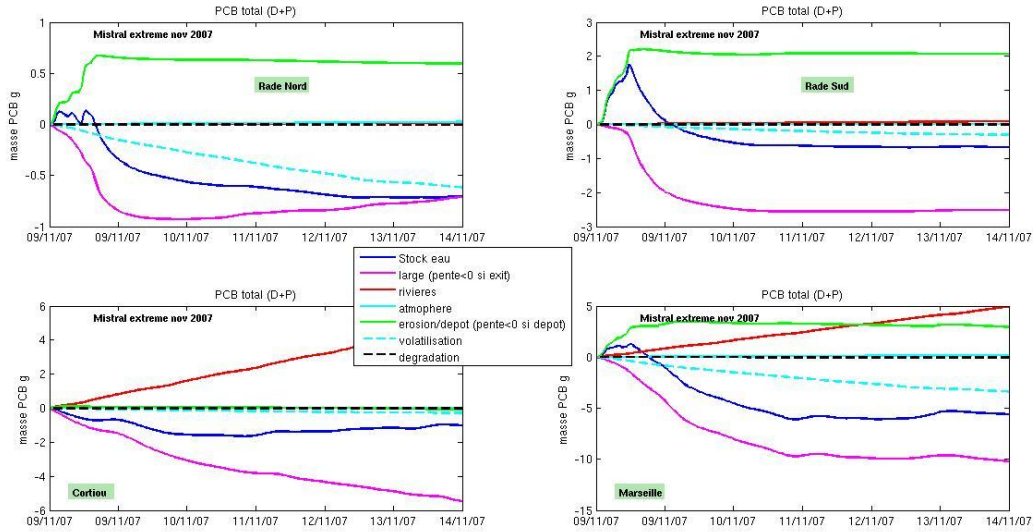


Figure 46 : Variation des stocks de CB153 total dans la colonne d'eau pendant la période et dans chaque zone (décrite sur la Figure 9), associée aux variations de concentrations dues à chaque processus « large » : entrée/sortie aux limites ; « rivières » : apports à la côte ; « atmosphère » : dépôts secs et pluie ; « érosion/dépôt » ; « volatilisation » et « dégradation ». (si pente >0 = variation positive de la concentration= apport de contaminant, inversement si pente <0 = perte de contaminant)

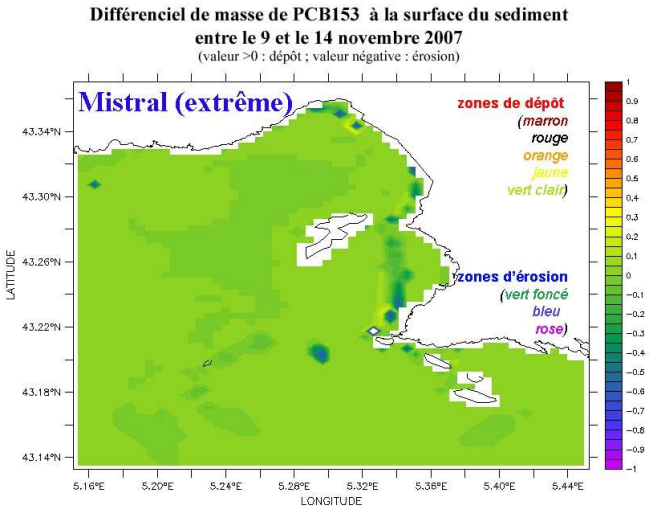


Figure 47 : Zones de dépôt et d'érosion après l'événement de Mistral extrême

VENT DE SUD-EST

5.2. SITUATIONS DE VENT DE SUD-EST:

5.2.1. Situation typique vent de sud-est: 19 au 23 novembre 2007

a) Données Météo France, station de l'Hippodrome de Marseille

D'après les données Météo France, un coup de vent d'est a lieu du 19 au 23 novembre 2007, avec un maximum journalier atteint le 20 novembre 2007 avec 11.1 m/s (Depuis l'année 2001 inclue, le record pour le mois de novembre est de 11.6 m/s atteint en 2008 et le maximum pour le vent de sud-est est 14.1 m/s atteint en janvier et en décembre 2008; NB: l'année 2008 semble avoir été propice aux records de sud-est).

b) Simulation atmosphérique

Une anomalie de vorticité potentielle (PV) circule sur l'Atlantique nord en journée du 18 novembre, et pénètre sur l'Angleterre et la France en milieu de matinée du 19 novembre. Cette anomalie de tropopause se matérialise dans les couches inférieures par une goutte froide centrée sur le sud de l'Irlande Figure 48 et Figure 49).

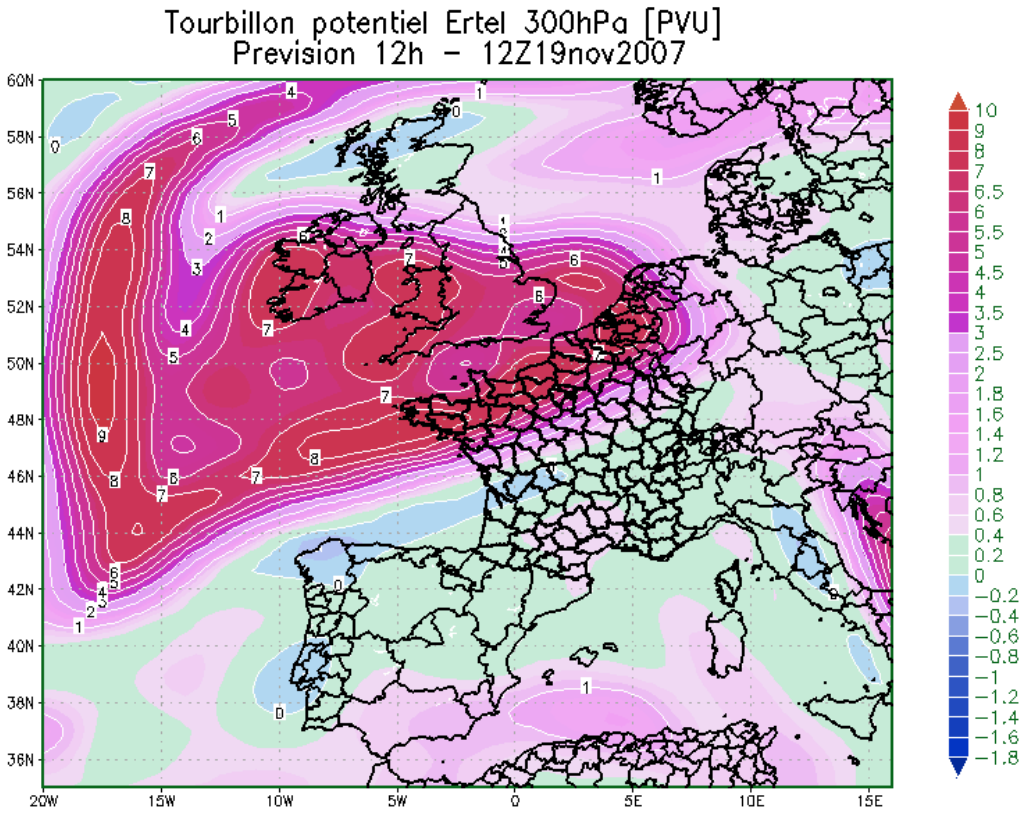


Figure 48 : Vorticité potentielle (PVU=unité de vorticité potentielle équivalent à 1 rad.m ^{2} . K .kg $^{-1}$ .s $^{-1}$) à 300hPa le 19 novembre 2007 à 12h

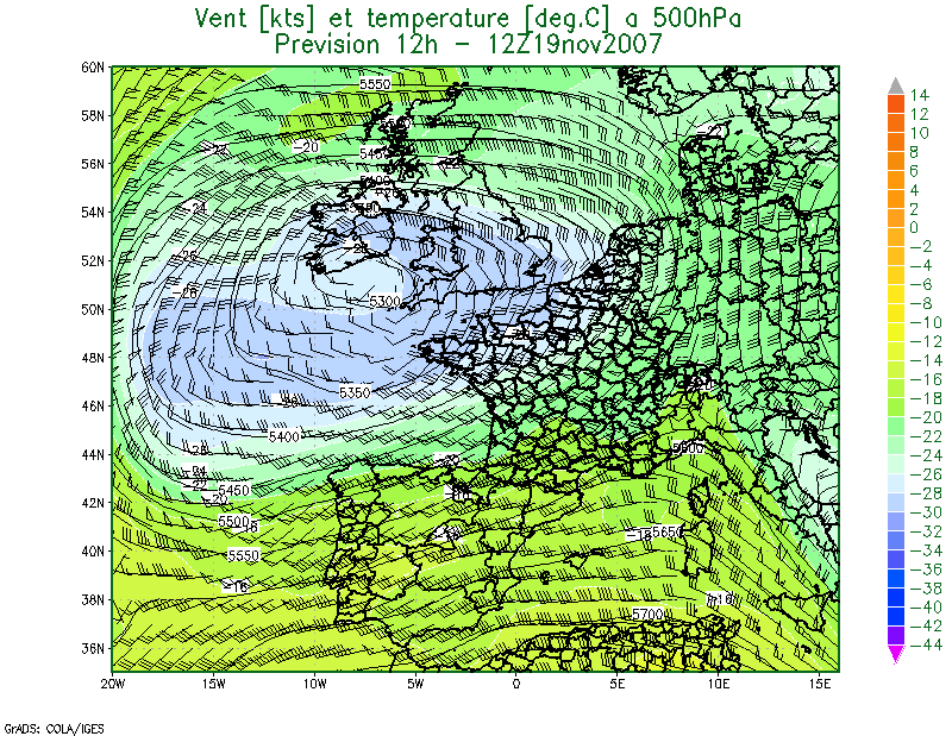


Figure 49 : Vents (nds) et température (°C plage de couleur) à 500hPa le 19 novembre 2007 à 12h

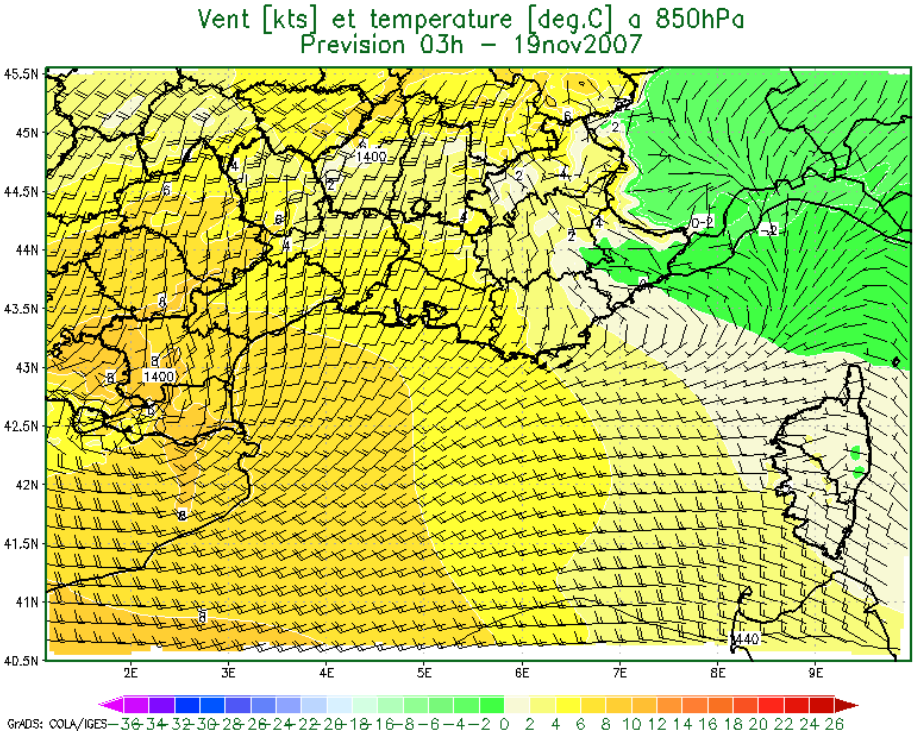


Figure 50 : Vents (nds) et température (°C plage de couleur) à 850hPa le 19 novembre 2007 à 03h

Dans la partie sud de cette goutte froide, le vent s'oriente sud-ouest sur un axe Espagne-sud-est de la France. Toutefois l'advection d'humidité reste limitée sur la partie nord du pays et le bassin méditerranéen est sous un air relativement sec. Cette zone étant alors dans la phase avant de l'axe du talweg, le flux s'oriente en basse couche au sud-est en début de journée (Figure 50). En cours de journée, la zone barocline chaude se développe sur les Bouches du Rhône et le Var contribuant à

renforcer le vent le long de cette anomalie chaude. En surface le vent de sud-est souffle modérément et atteint 30/35nds le long des côtes provençales (Figure 51).

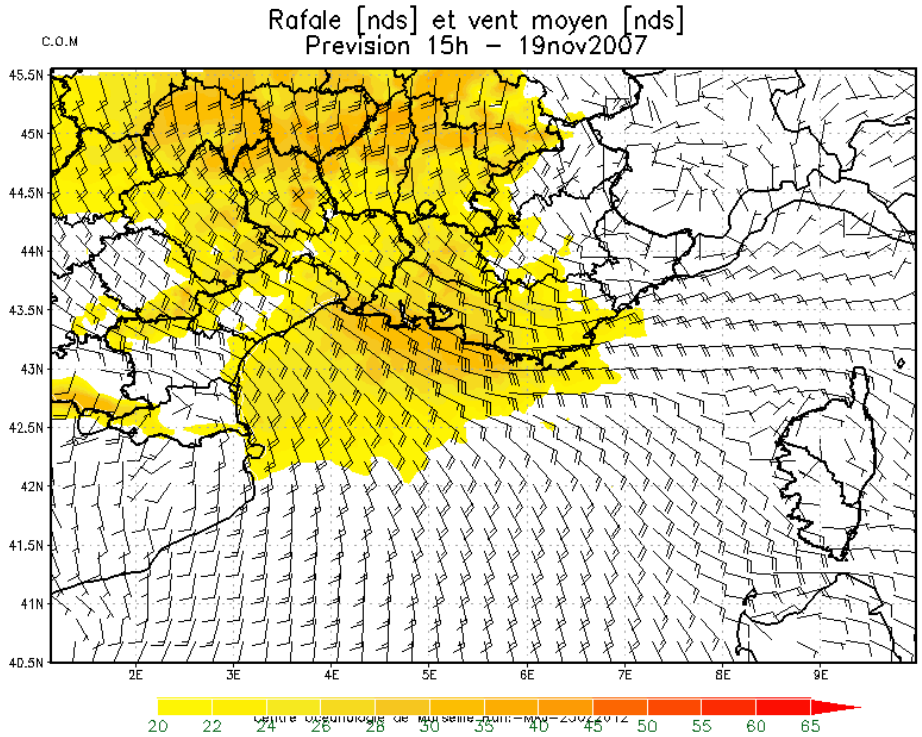


Figure 51 : Vents (nds) et rafale (nds plage de couleur) à 10m le 19 novembre 2007 à 15h

Avec le déplacement du minimum Espagnol sur le golfe du Lion, le vent de sud-est se renforce et le jet de basse couche s'établit sur les Bouches du Rhône (Figure 52). Des pluies commencent à se développer sur la région PACA et s'intensifient en cours de nuit du 19 au 20 novembre.

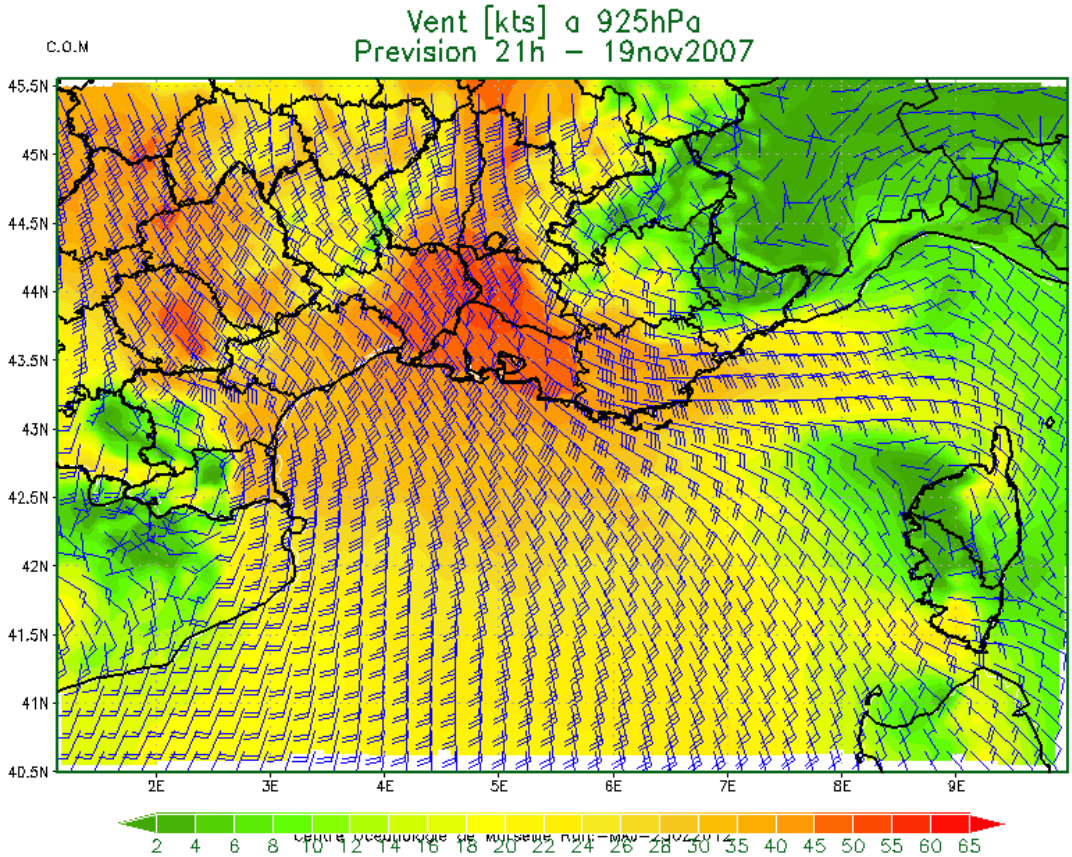


Figure 52 : Vents (nds) à 925hPa le 19 novembre 2007 à 21h

c) Situation hydrodynamique et biogéochimique

Du fait de l'orientation est/ouest du trait de côte aux environs de Marseille, les vents de sud-est poussent les eaux plus chaudes du large en direction de la côte (Figure 53).

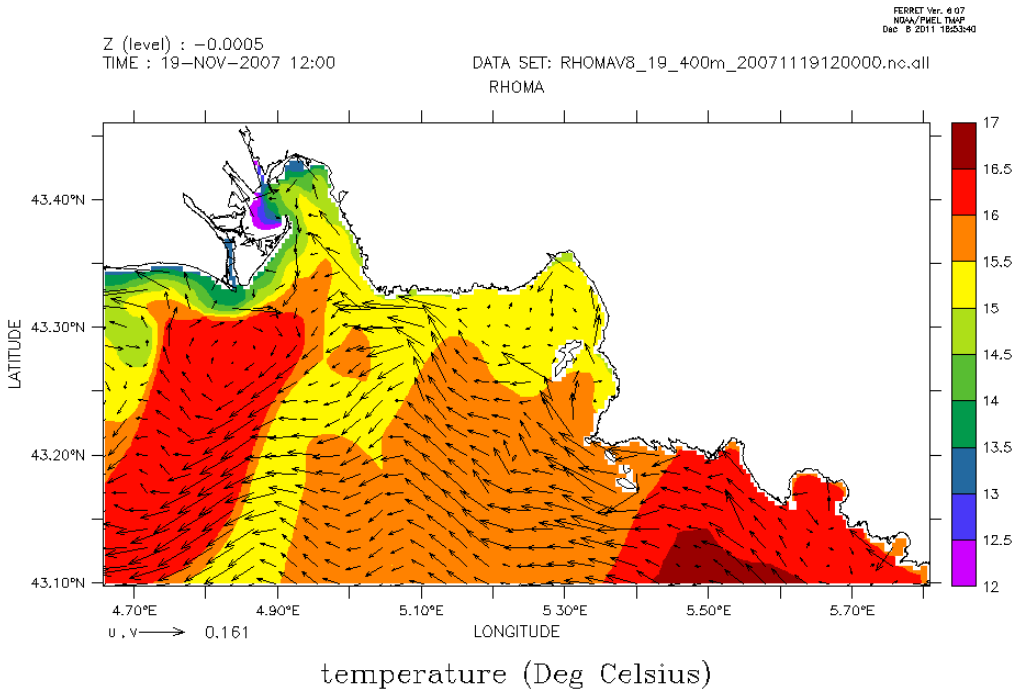


Figure 53 : Température et courants de surface simulés pour le 19 novembre 2007 à 12h.

Il y a donc une accumulation d'eau le long de la côte qui induit un phénomène de downwelling (plongée des eaux de surface) (voir Figure 54 en coupe de la côte bleue vers le large). Le 23 novembre 2007, à la fin de l'épisode de vent, on observe sur les profils verticaux à la station SOFCOM de très faibles variations de température, de salinité, de fluorescence/chlorophylle_a dans le modèle comme dans les données *in-situ*. La colonne d'eau semble homogène. L'intensité de l'évènement permet donc aux eaux de surface en provenance du large d'atteindre le fond (environ 100 m).

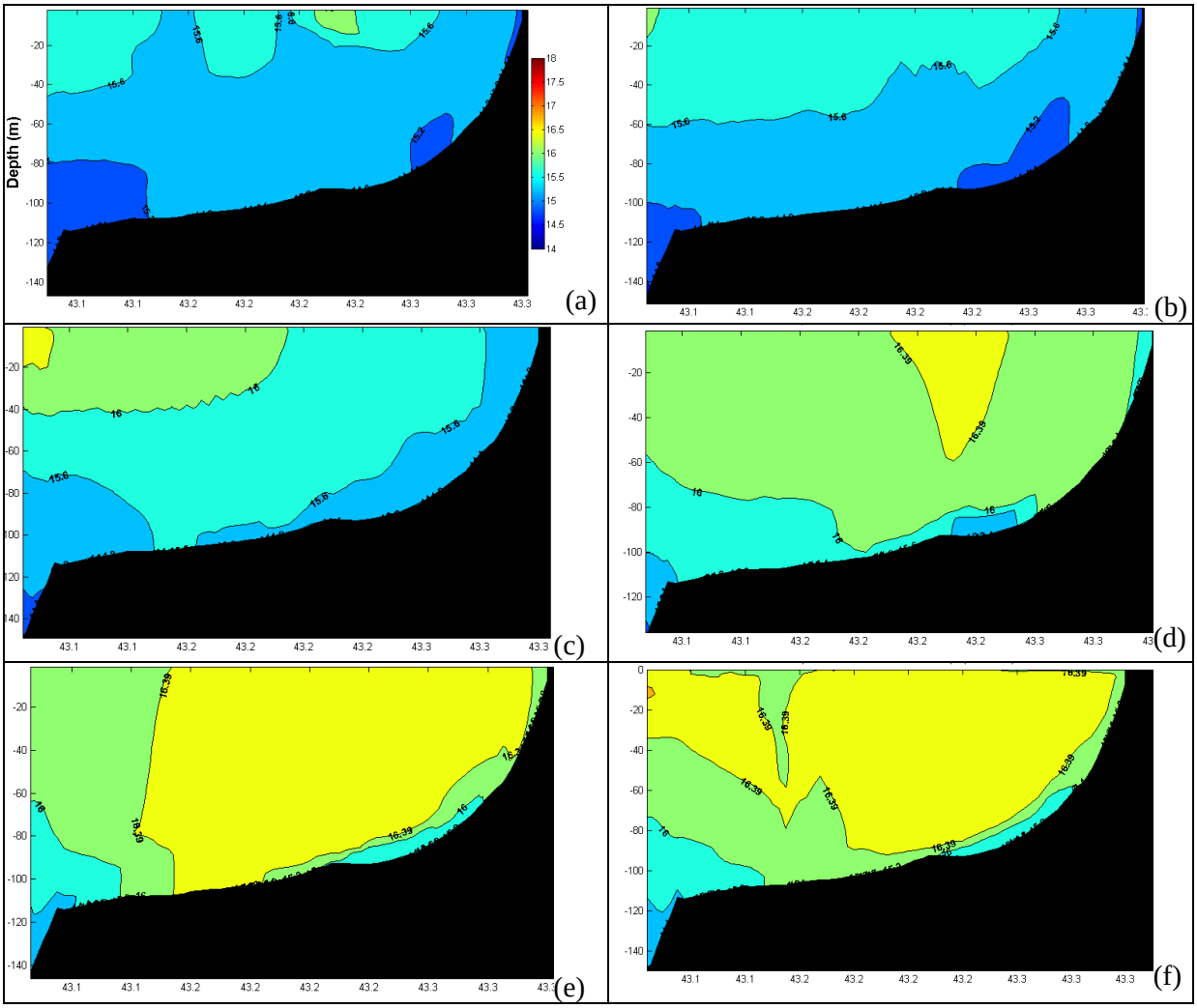


Figure 54 : Coupes de Température (°C) du 18 au 23 novembre 2007 calculés par RHOMA 400m à la longitude de la côte bleue.

Le phénomène de downwelling est aussi observé sur les cartes de concentration en nitrates (Figure 55). Le 18 novembre (avant le vent d'est), la zone côtière autour de Marseille est relativement riche en nitrate avec des concentrations entre 1 et 1.5 µmol/L (Figure 55a et c). En revanche, on remarque la présence d'eaux de surface pauvres en nitrates au large de Marseille. Sur les coupes verticales l'arrive en surface d'eaux pauvres qui progressent en direction de la cote et plongent au cours de l'évènement (Figure 55d, e, f et g). A la fin de l'épisode, la colonne d'eau présente des concentrations faibles et homogènes en nitrates de l'ordre de 0.5–0.6 µmol/L, ce qui correspond aux concentrations en nitrates des eaux présentes en surface et au large au début de cet évènement. A cette période de l'année, les eaux de surface au large de Marseille étant plus chaudes et plus oligotrophes (pauvre en nitrate), on remarque un réchauffement en température et un appauvrissement en sels nutritifs et chlorophylle_a de la colonne d'eau sous l'action du downwelling induit par les vents de sud-est.

D'un point de vue général, les eaux de surface au large de Marseille sont la majorité du temps plus pauvres que les eaux côtières, les phénomènes typiques de vents de sud-est semblent donc induire un appauvrissement de la colonne d'eau (environ 0 -100 m) dans la zone côtière de Marseille.

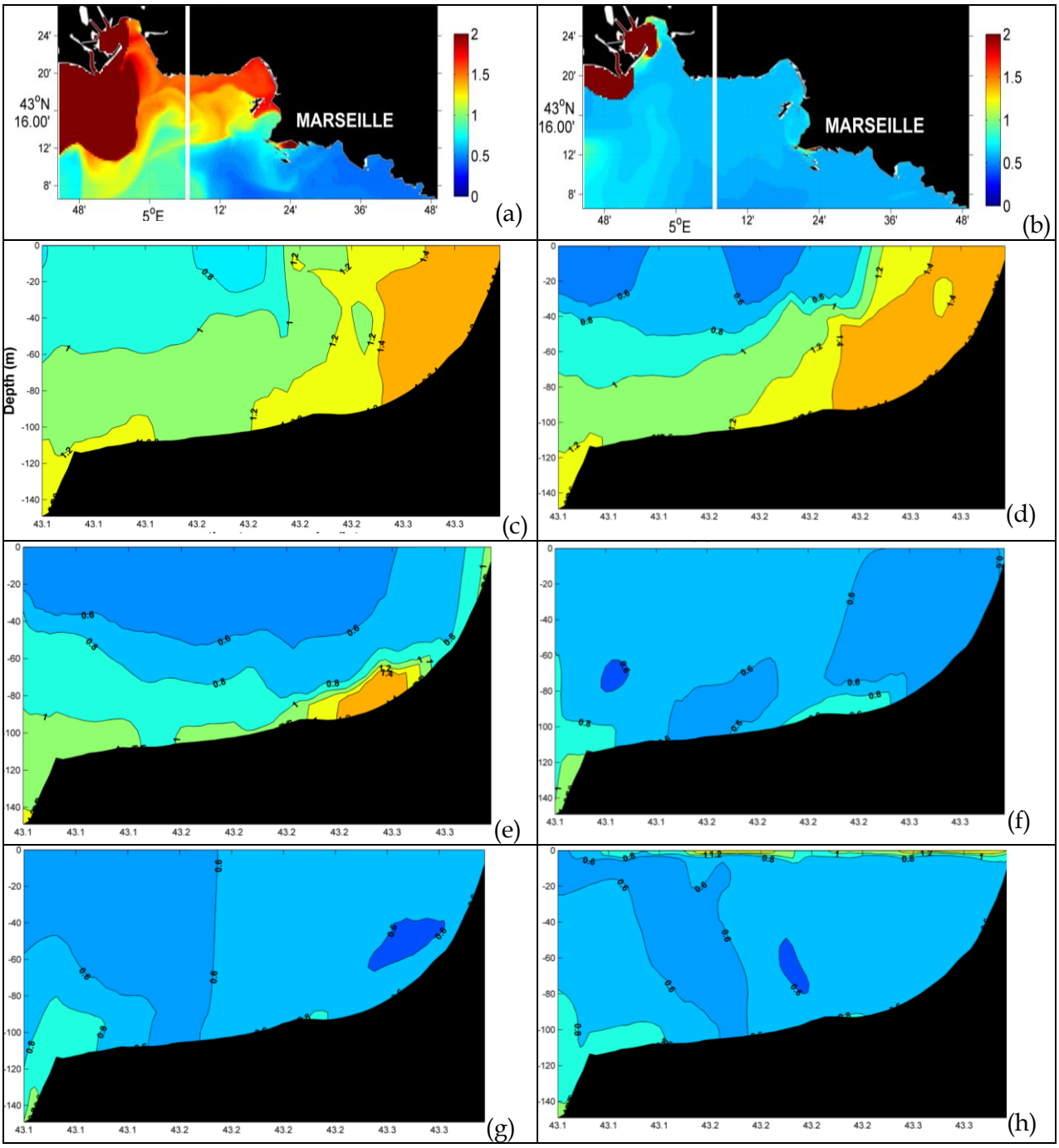


Figure 55 : Carte de surface de nitrate (en µmol/L) le 18 novembre 2007 (a) et le 22 novembre 2007 (b). Coupe verticale de nitrate selon la longitude 5.1°E le 18 novembre (c), le 19 novembre (d), le 20 novembre (e), le 21 novembre (f), le 22 novembre (g) et le 23 novembre (h).

d) Situation hydrosédimentaire

Par situation de vent de sud-est, les rades nord et sud sont protégées de l'influence des vagues, contrairement à la zone des calanques (HS>2m), autour des îles, bien entendu le prodelta du Rhône (HS>3m) et une partie de la côte bleue (Figure 56).

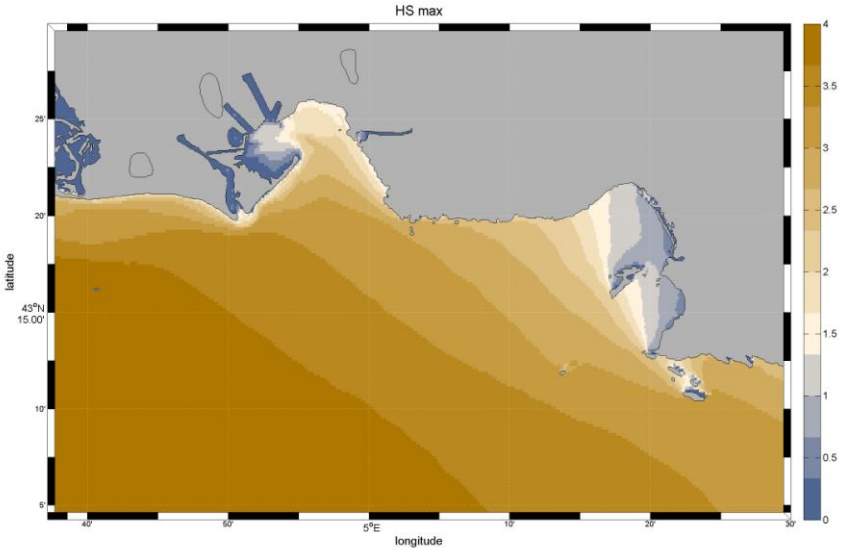


Figure 56 : Hauteur significative (m) maximale des vagues entre le 18 et le 23 Novembre

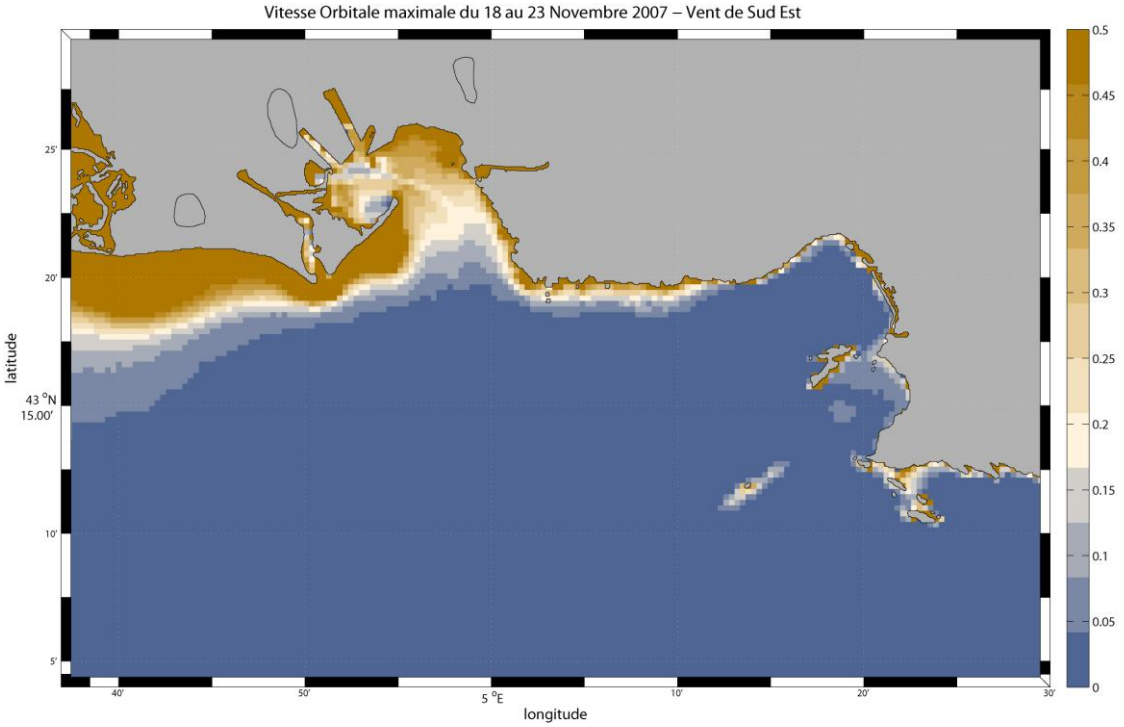


Figure 57 : Vitesse orbitale (m/s) maximale des vagues entre le 18 et le 23 Novembre

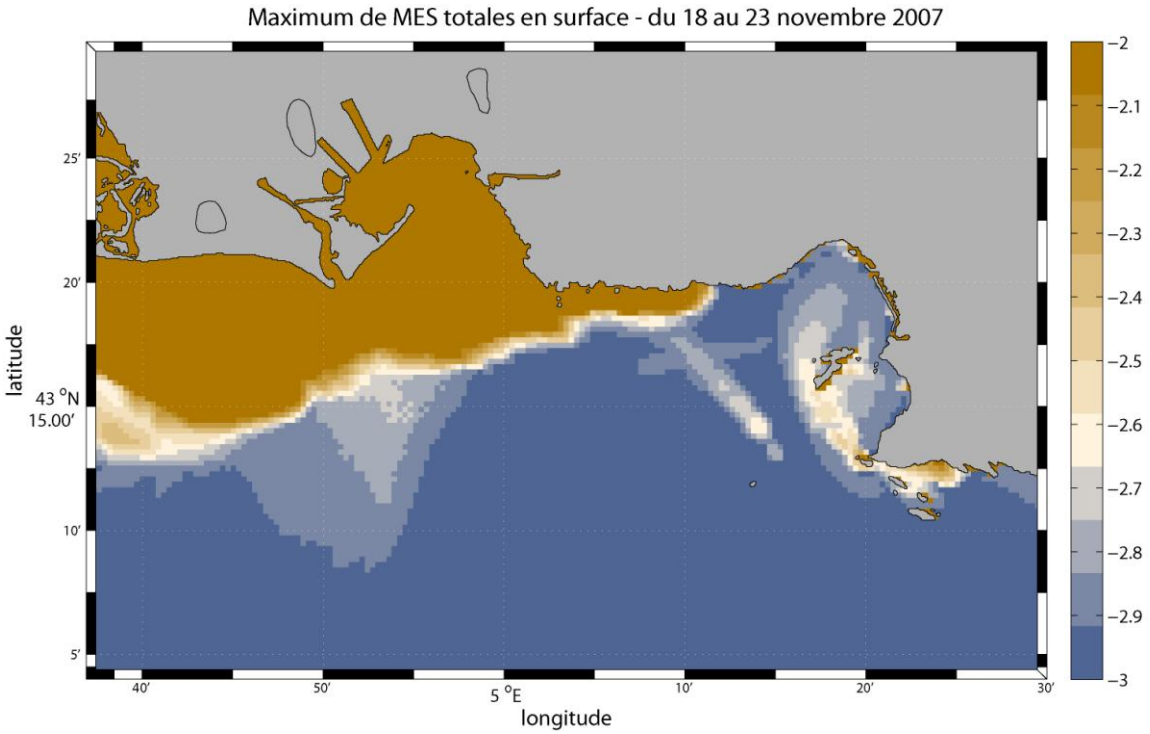


Figure 58 : Concentration maximale de MES totale en surface (g/L, échelle logarithmique: -2 : 10mg/L, -3 : 1mg/L) entre le 18 et le 23 Novembre

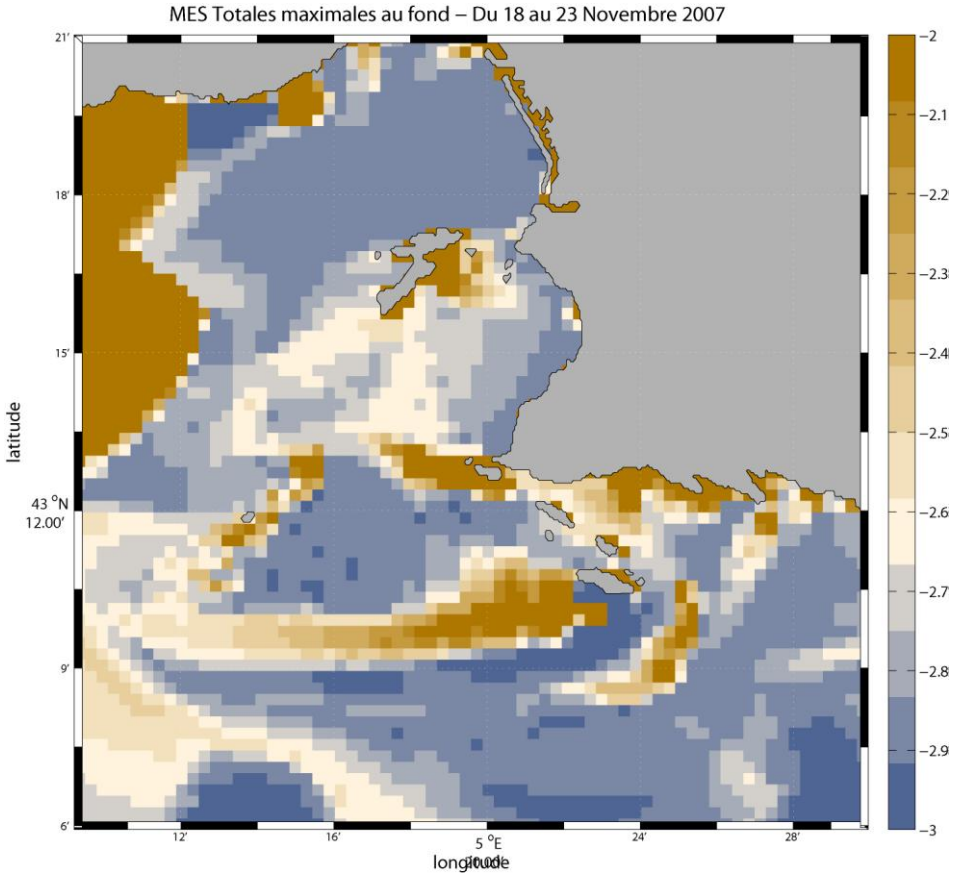


Figure 59 : Concentration maximale de MES totale au fond (g/L, échelle logarithmique: -2 : 10mg/L, -3 : 1mg/L) entre le 18 et le 23 Novembre : zoom sur la zone de Marseille

En terme de dynamique sédimentaire, l'effet des vagues est surtout quantifié par l'agitation sur le fond, via la vitesse orbitale des vagues. Cet effet est d'autant plus important que les vagues sont fortes et la profondeur faible. Dans ce cas, les zones les plus sensibles aux vents de sud-est restent la frange côtière du prodelta du Rhône et la bande côtière autour des calanques et du plateau des chèvres (vitesses orbitales >0.5m/s) (Figure 57). Outre une forte érosion au niveau du prodelta, les vagues induisent une érosion et une forte remise en suspension près de la côte au niveau de Cortiou (Figure 58 et Figure 59), au niveau de l'ile Riou et de moindre importance au niveau du Planier (concentration maximale en surface supérieure à 10mg/L, au fond supérieure à 100mg/L).

Du fait des courants nord-ouest induits par le vent, les MES apportées par les tributaires ou remises en suspension sont principalement dirigées vers l'ouest et les rades nord et sud, protégées des vagues, où elles sédimentent. Les sédiments érodés au niveau de Cortiou se redéposent également partiellement plus bas sur la pente, où l'action des vagues est plus faible. Cependant cette zone reste globalement en érosion sur la période étudiée (Figure 60).

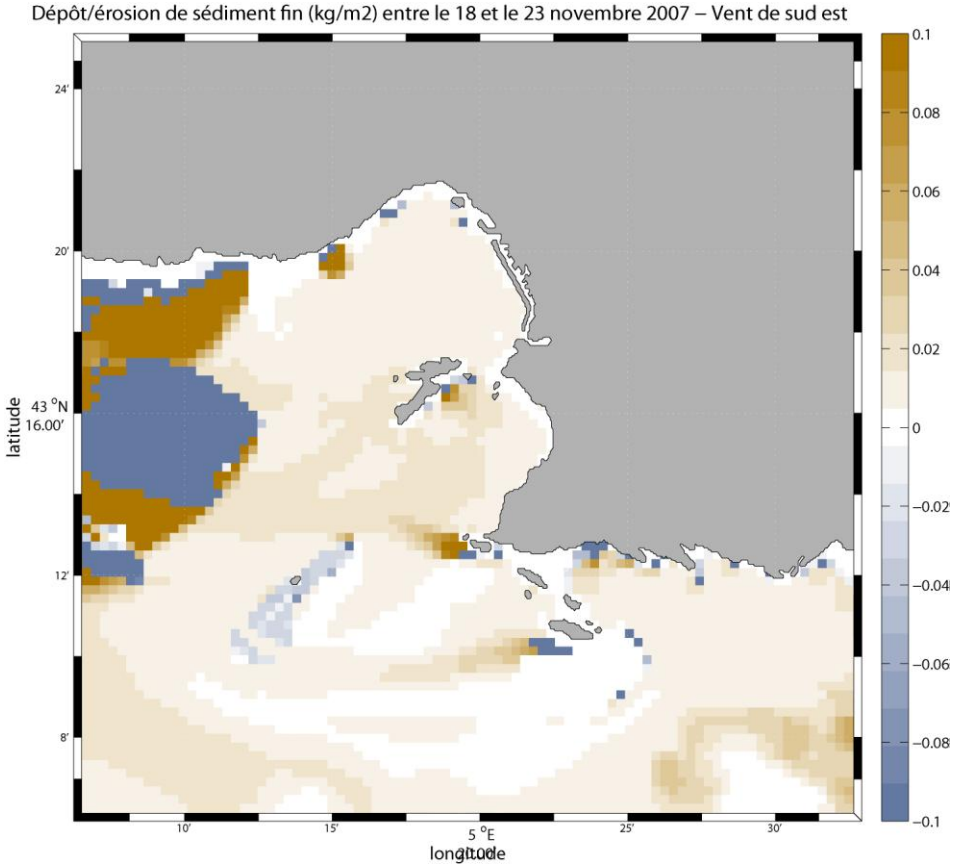


Figure 60 : Dépôt/érosion de sédiments fins entre le 18 et le 23 Novembre

e) Situation de la contamination en CB153

La situation de Vent de sud-est induit une circulation dans la rade de Marseille qui ramène les rejets vers les rades sud et nord (Figure 61 et Figure 62) notamment le rejet de Cortiou. Au fond, on observe de fortes concentrations autour du rejet de Cortiou (Figure 62), dues à des remises en suspension dans la zone autour du 20-21 novembre. Les érosions en rade sud et nord sont faibles et le matériel érodé se redépose dans les jours qui suivent dans les mêmes zones. L'évolution du stock de CB153 est surtout régi par les entrées/sorties aux limites (Figure 63) et reste faible. Une petite partie du CB153 arrivant de Cortiou se redépose, l'essentiel est exporté de la rade. On observe également des érosions dans la partie ouest de la rade qui s'exportent vers le large.

(a) Dissous en surface (pg/L) (b) Particulaire en surface (pg/L)

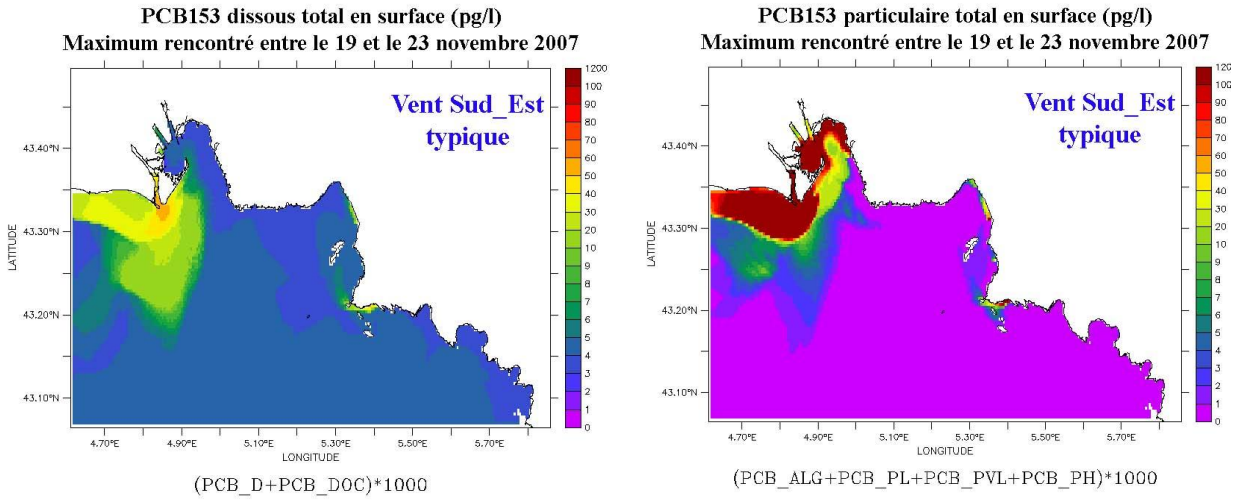


Figure 61 : Concentrations maximales rencontrées en surface (pg/L) entre le 19 et le 23 novembre 2007

(a) Particulaire en surface (ng/g) (b) Particulaire au fond (ng/g)

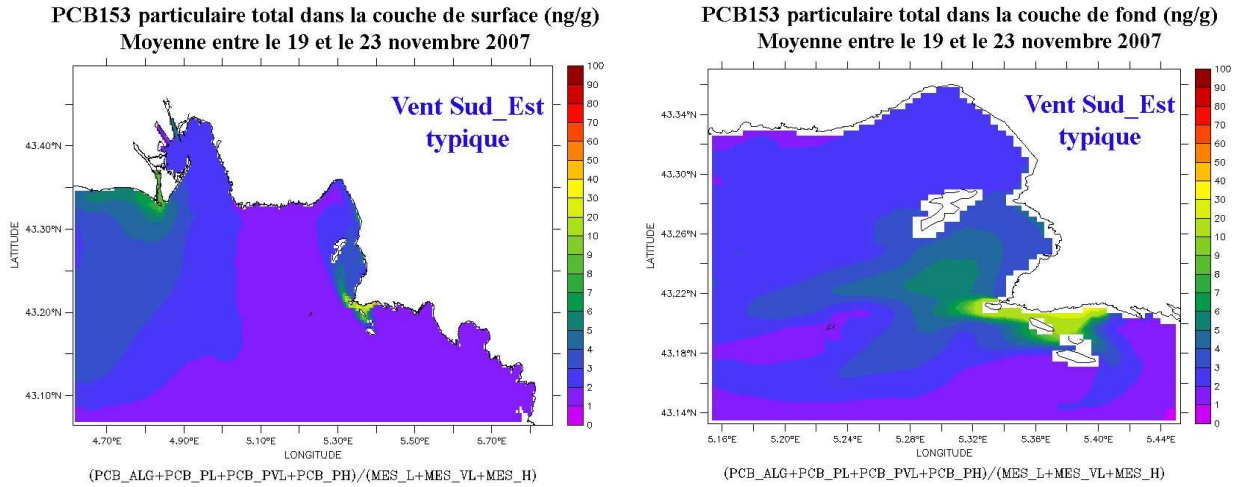


Figure 62 : Teneurs moyennes de CB153 particulaires (ng/g) rencontrées au fond et en surface entre le 19 et le 23 novembre 2007

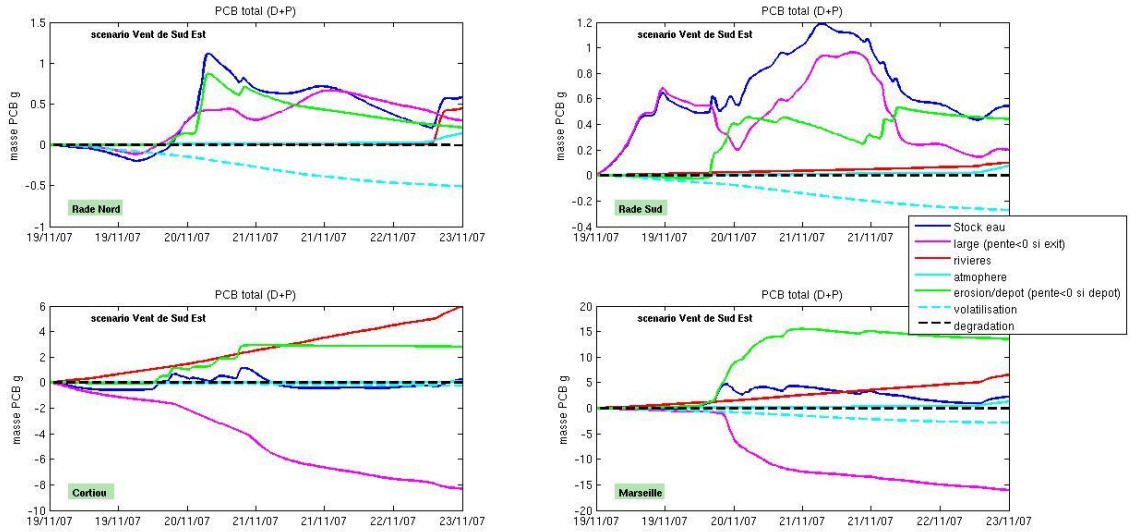


Figure 63 : Variation des stocks de CB153 total dans la colonne d'eau pendant la période et dans chaque zone (décrite sur la Figure 9), associée aux variations de concentrations dues à chaque processus « large » : entrée/sortie aux limites ; « rivières » : apports à la côte ; « atmosphère » : dépôts secs et pluie ; « érosion/dépôt » ; « volatilisation » et « dégradation ». (si pente >0 = variation positive de la concentration= apport de contaminant, inversement si pente <0 = perte de contaminant)

5.2.2. Situation extrême tempête de vent de sud-est: Janvier 2008

Remarque: c'est cette situation extrême qui est choisie car le forçage MM5 représente très mal celle de décembre 2008 alors que le modèle WRF haute résolution arrive bien à la décrire.

a) Données Météo France, station de l'Hippodrome de Marseille

D'après les données Météo France, un coup d'est a lieu du 2 au 5 janvier 2008, avec un maximum journalier atteint le 3 janvier 2008 avec 14.1 m/s en moyenne journalière. Depuis l'année 2001 inclue, le record pour le mois de janvier est de 14.1 m/s atteint en 2008 et le maximum pour le vent de sud-est tous mois confondus est également de 14.1 m/s atteint en janvier et en décembre 2008.

b) Simulation atmosphérique

On remarque la présence de deux perturbations, l'une sur la péninsule ibérique et la seconde dans le golfe de Gênes.

Sur la partie est de la région PACA, on remarque l'advection d'une masse d'air froid tandis que sur le golfe du Lion, de l'air chaud et humide remonte de méditerranée jusqu'au Bouches du Rhône (Figure 64).

La perturbation des Baléares progresse vers l'est en cours de journée du 3 janvier contribuant à augmenter le gradient de température en basse couche sur les Bouches du Rhône.

Il se développe alors sur la zone barocline un jet à 925hPa très fort atteignant 70nds (Figure 65).

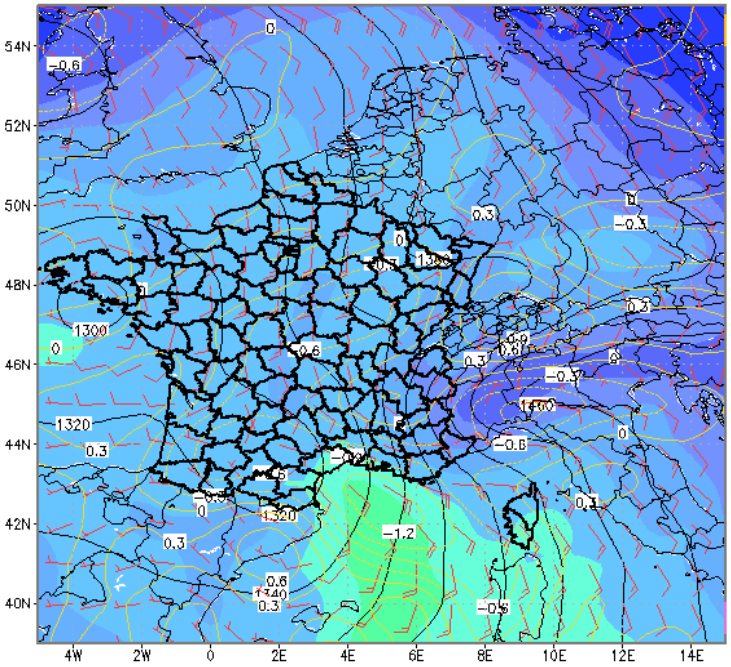


Figure 64 : Thetaw 850hPa (°C plage de couleur) Vent 900hPa (nds vecteurs rouges) Vitesse verticale 700hPa (Pa/s contours jaunes) HGT 850hPa (dam contours noirs) le 03 janvier 2008 12h.

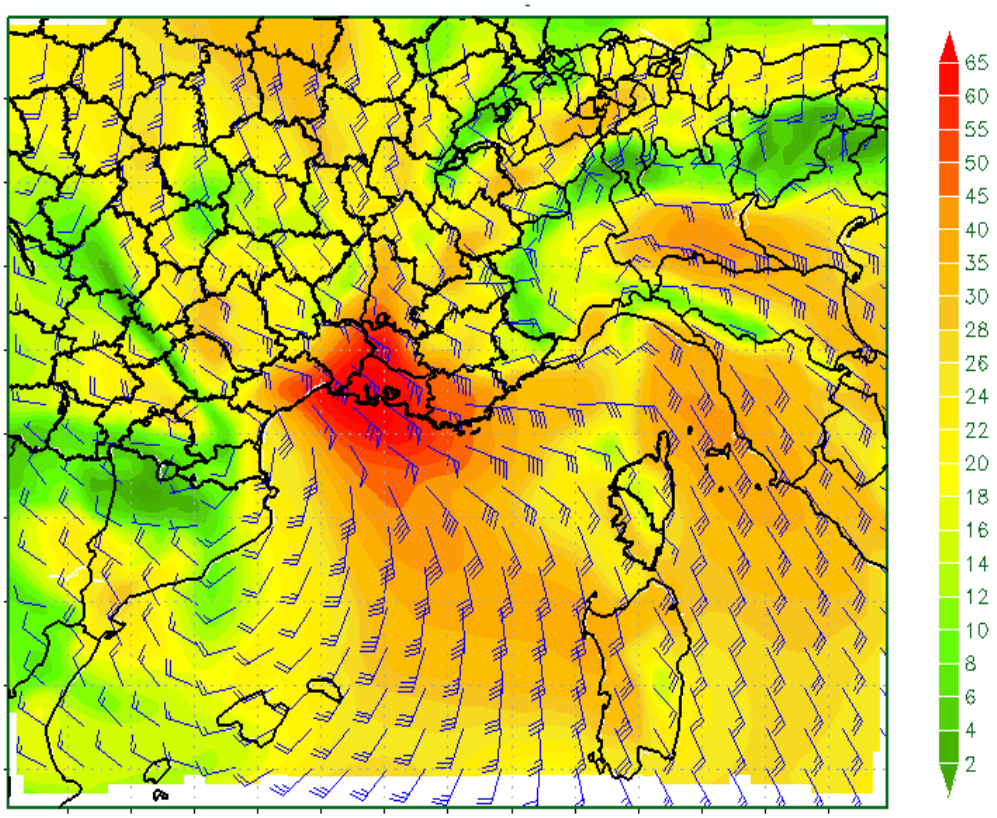


Figure 65 : Vent 925hPa (nds) le 04 janvier 2008 00h.

La zone de vent fort sur les Bouches du Rhône matérialise la confluence du vent et la convergence des masses d'air. Ainsi en surface le vent atteint 45nds (Figure 66).

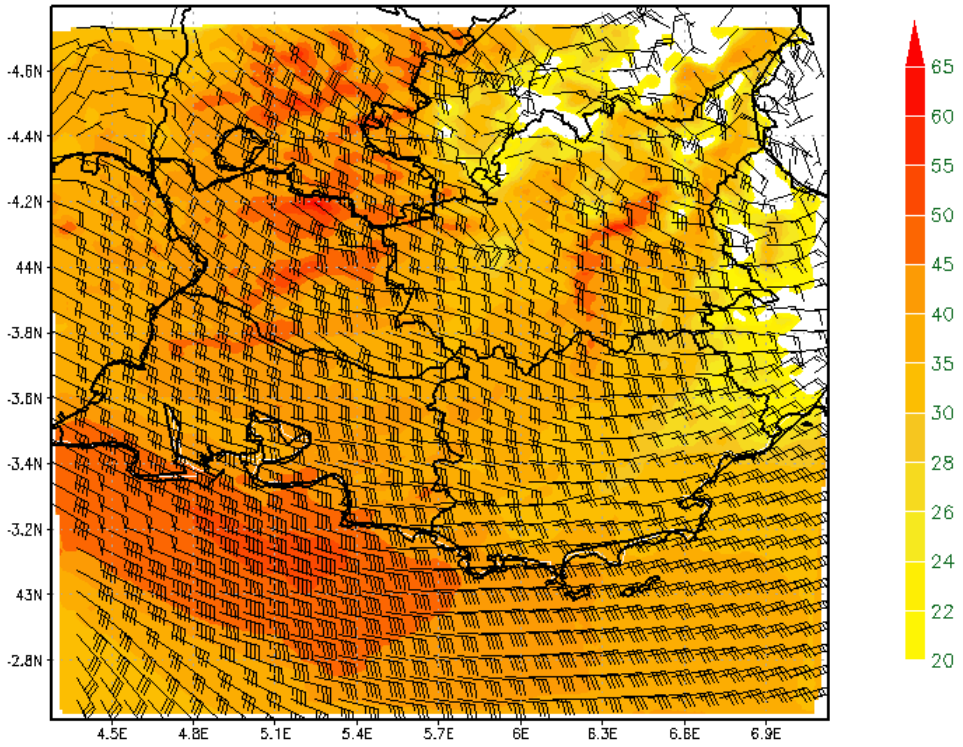


Figure 66 : vent 10 m et rafale 10 m (nds) le 04 janvier 2008

c) Situation hydrodynamique (MARS3D-RHOMA)

Un vent de sud-est a soufflé les 5 premiers jours du mois de janvier en 2008, avec une intensité qui dépasse parfois les 30 m/s pour le vent modélisé par MM5 le 3 janvier. Les courants sont alors dirigés vers le nord ouest en surface (Figure 67 et Figure 68) faisant rentrer de l'eau du large de la même température sur le plateau (Figure 68). Sous l'action du vent, le panache est repoussé vers le nord-ouest et plaqué à la côte (Figure 67).

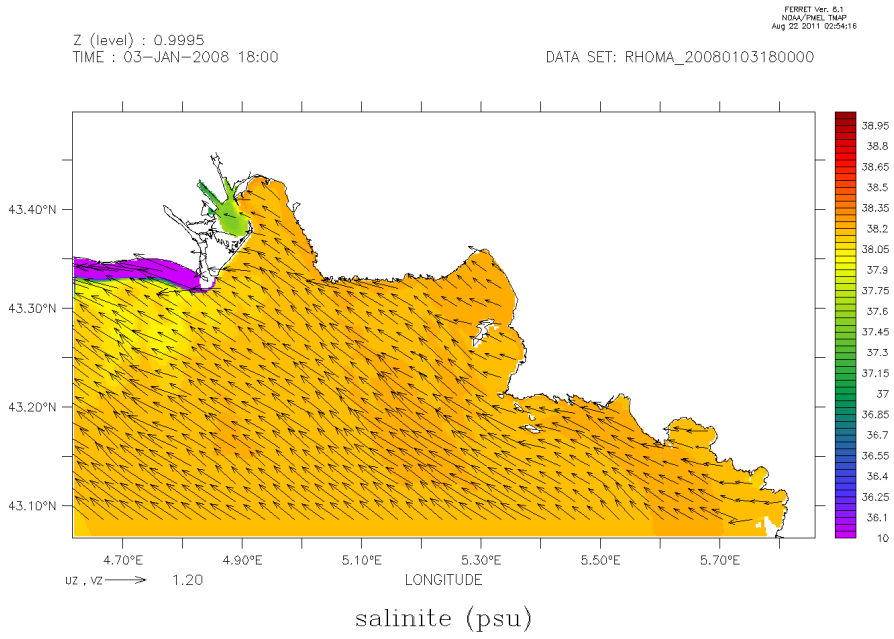


Figure 67 : Courants et salinité modélisés en surface le 3 janvier 2008 à 18h.

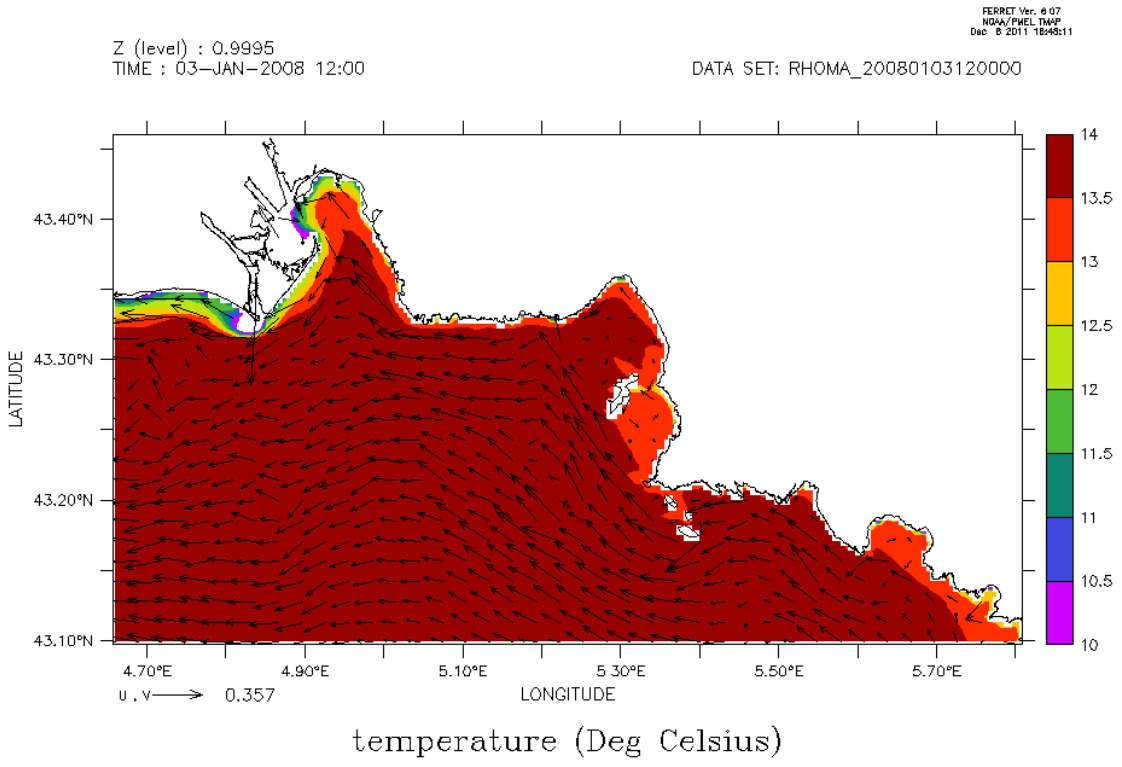


Figure 68 : Température et courants moyens modélisés le 3 janvier 2008 à 18h.

d) Situation biogéochimique (ECO3M-MASSILIA)

On remarque les mêmes tendances que dans la situation typique de vent de sud-est de novembre 2007, les eaux du large sont poussées vers la côte et induisent un downwelling. En fait, une situation typique de sud-est semble suffire pour que la zone côtière soit impactée sur toute la colonne d'eau (de 0 à 100 m) par les eaux du large dans la baie de Marseille. Il en est de même dans ce cas extrême. Le 2 janvier, la colonne d'eau est relativement homogène en température grâce au mélange hivernal avec une valeur d'environ 14.5 °C. Les eaux de surface du large ont une température de 13.5°C environ. Dès le 4 janvier 2008, on observe une colonne d'eau homogène qui possède les caractéristiques des eaux de surface du large en température et en nitrate (Figure 69).

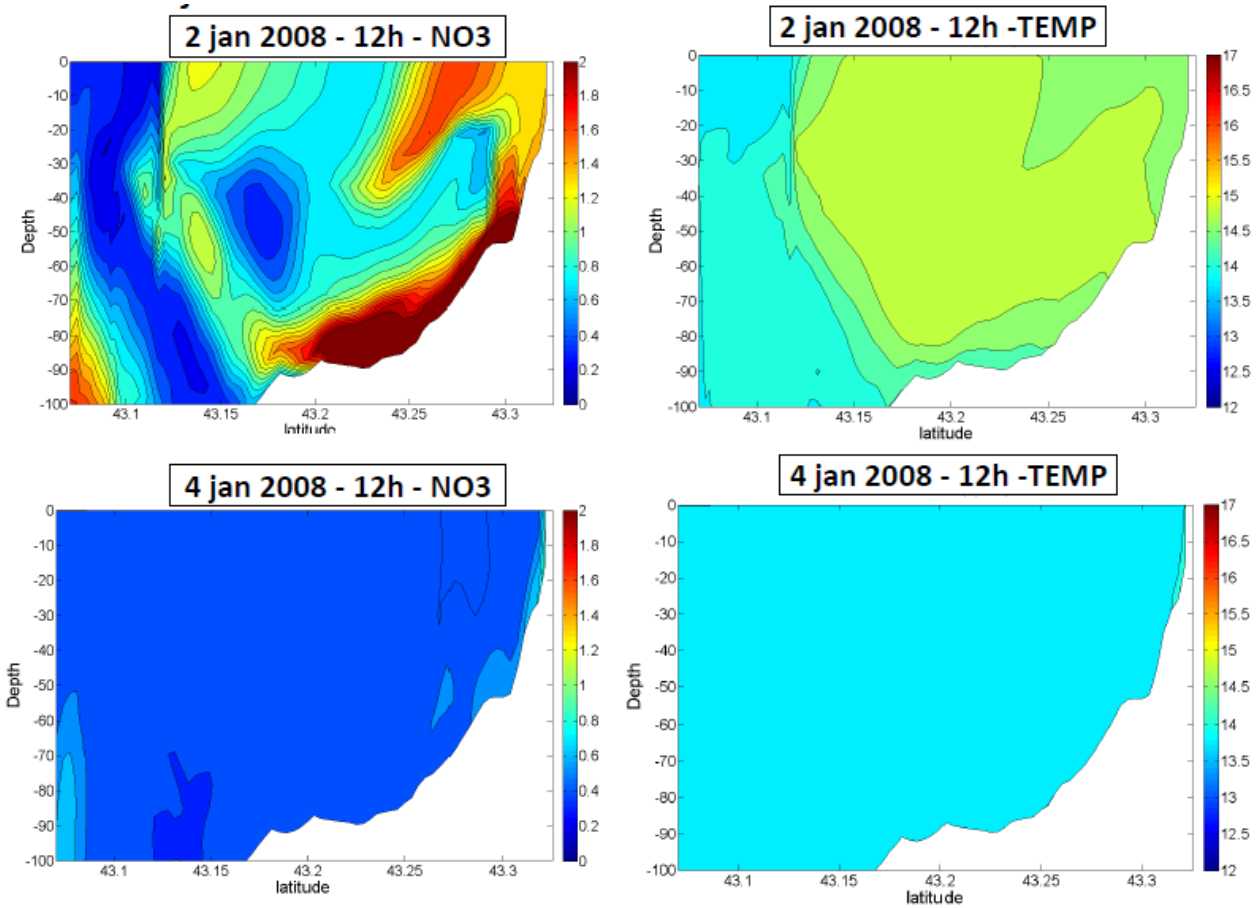
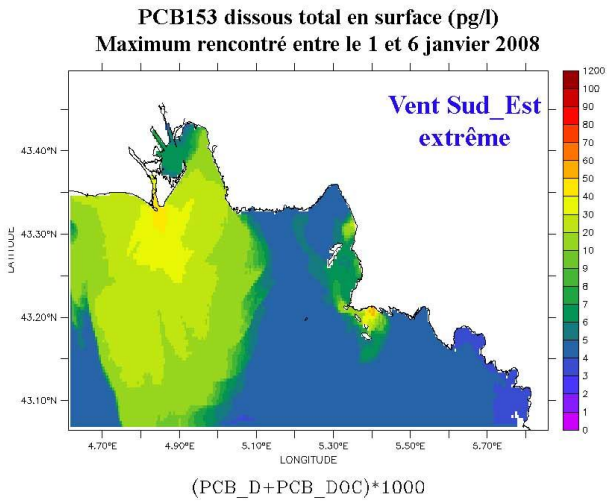


Figure 69 : Coupes de Nitrate (en µmol/L) et de Température (en °C) du 2 et 4 janvier 2008 calculées par RHOMA 400m à la latitude de la côte bleue.

e) Situation de la contamination en CB153

Cette situation extrême de vent de sud-est en janvier 2008 est associée à des apports plus importants, notamment en rade nord. Les concentrations sont donc plus fortes globalement, d'autant plus qu'on observe également des remises en suspension plus significatives en rades nord et sud (Figure 70, Figure 71 et Figure 72). Cependant le même scénario se reproduit avec une circulation dans la rade de Marseille qui ramène le rejet de Cortiou vers les rades sud et nord. Au fond, on retrouve les plus fortes concentrations autour du rejet de Cortiou, sans dépôt dans cette zone. Le PCB remis en suspension en rades sud et nord se redépose en grande partie surtout dans la rade sud.

(a) Dissous en surface (pg/L)



(b) Particulaire en surface (pg/L)

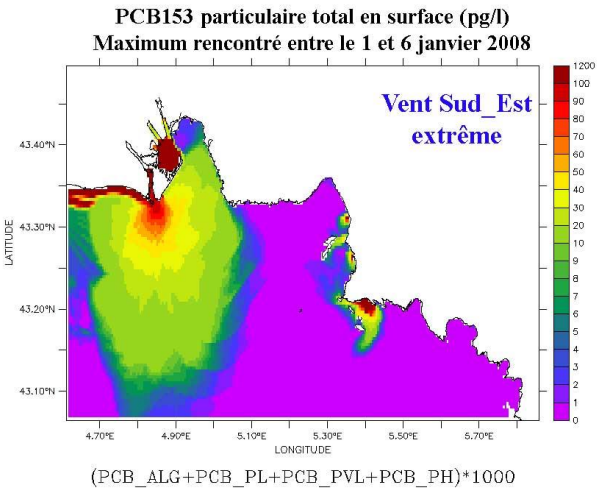
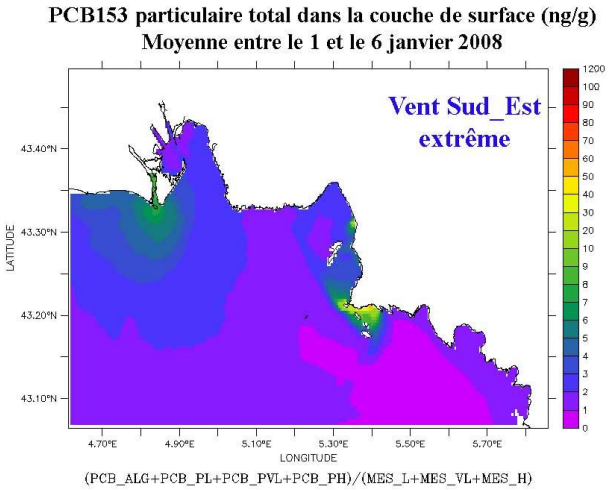


Figure 70 : Concentrations maximales rencontrées en surface (pg/L) entre le 1 et le 6 janvier 2008

(a) Particulaire en surface (ng/g)



(b) Particulaire au fond (ng/g)

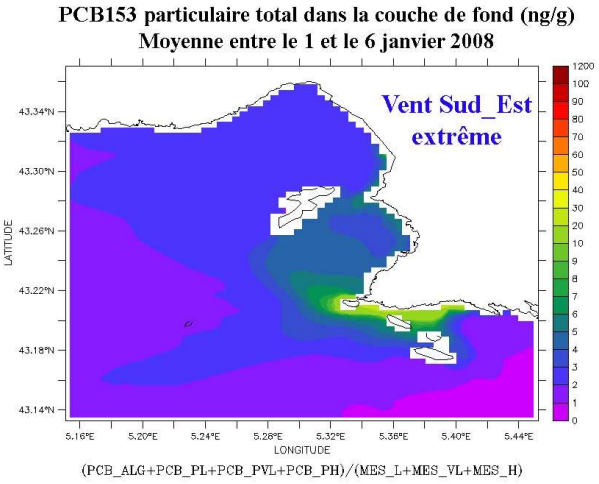


Figure 71 : Teneurs moyennes de CB153 particulaires (ng/g) rencontrées au fond et en surface entre 1 et le 6 janvier 2008

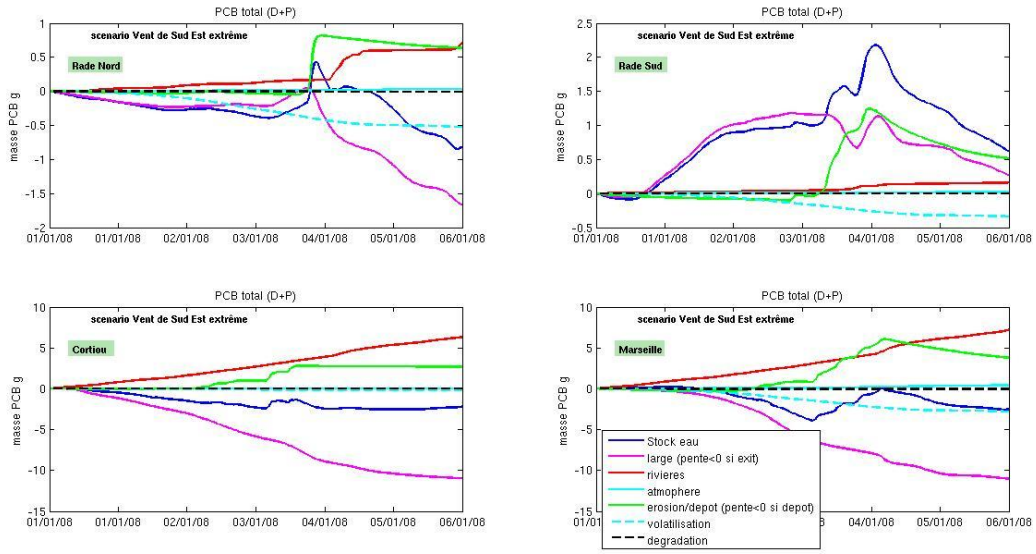


Figure 72 : Variation des stocks de CB153 total dans la colonne d'eau pendant la période et dans chaque zone (décrite sur la Figure 9), associée aux variations de concentrations dues à chaque processus « large » : entrée/sortie aux limites ; « rivières » : apports à la côte ; « atmosphère » : dépôts secs et pluie ; « érosion/dépôt » ; « volatilisation » et « dégradation ». (si pente >0 = variation positive de la concentration= apport de contaminant, inversement si pente <0 = perte de contaminant

5.3. SITUATIONS DE VENT D'OUEST

Les situations d'ouest ont été repérées dans les données météo à partir des records d'intensité, mais sont trop mal représentées pour le moment par le forçage MM5. En effet, lorsque l'on sélectionne les événements de vent d'ouest à partir de l'intensité, les dates retenues correspondent en fait à des épisodes de Mistral où pendant une journée il y a eu un peu de vent d'ouest. Ce ne sont pas les événements que nous voulions étudier à l'origine, qui sont plutôt des périodes où le vent reste d'ouest pendant plusieurs jours. Il faudrait recommencer l'étude des données météo et sélectionner des épisodes de vent d'ouest qui ont duré dans le temps, ce qui n'a pas pu être effectué durant la période du programme MASSILIA.

PLUIE

5.4. SITUATIONS DE PLUIE

5.4.1. Situation typique d'orage de fin d'été: 25 Octobre 2007

a) Données Météo France, station de l'Observatoire de Marseille

Il y a un orage le 20 août 2007. Puis, aucune pluie de plus de 5mm/jour jusqu'au 25 octobre 2007 où 53 mm sont enregistrés à la station Observatoire de Météo France. Nous avons noté une pluie forte toute la nuit du 25/10/2007. Malheureusement, comme c'est souvent le cas, il n'y a pas d'image satellite exploitable avant le 27/10/2007.

Sur l'image MERIS FRS pleine résolution à 300m, qui permet de voir même les zones proches de la côte, l'effet de la pluie dans la baie de Marseille et au niveau de Cortiou est bien visible (Figure 73). Cette image traitée avec l'algorithme algal2 a tendance à surestimer un peu la chlorophylle_a.

Sur les images MERIS et MODIS à 1 km (Figure 74) traitées par Francis Gohin (Ifremer, comm. pers.) avec l'algorithme OC5, il est possible de voir 2 jours après la pluie une augmentation de la couleur de l'eau dans les fonds de baies nord et sud sur les zooms de gauche, même s'il n'est pas possible de voir jusqu'à la côte.

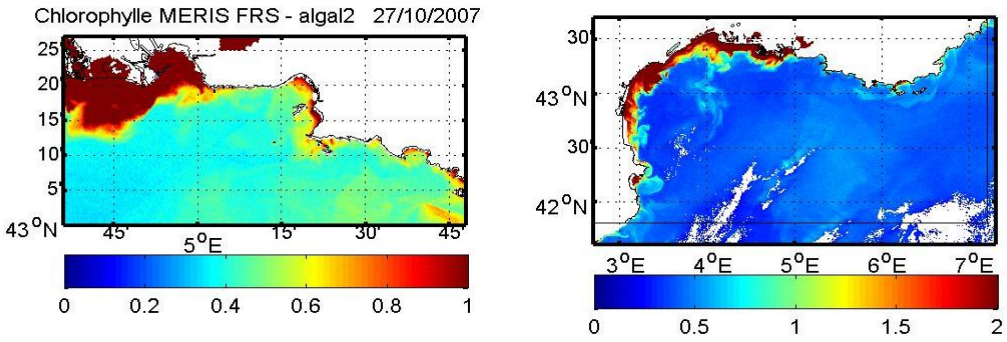


Figure 73 : Concentrations de Chlorophylle_a (en µg/L) issues des images de couleur de l'eau MERIS Full Resolution à 300 m traitée avec algal2 pour le 27 octobre 2007

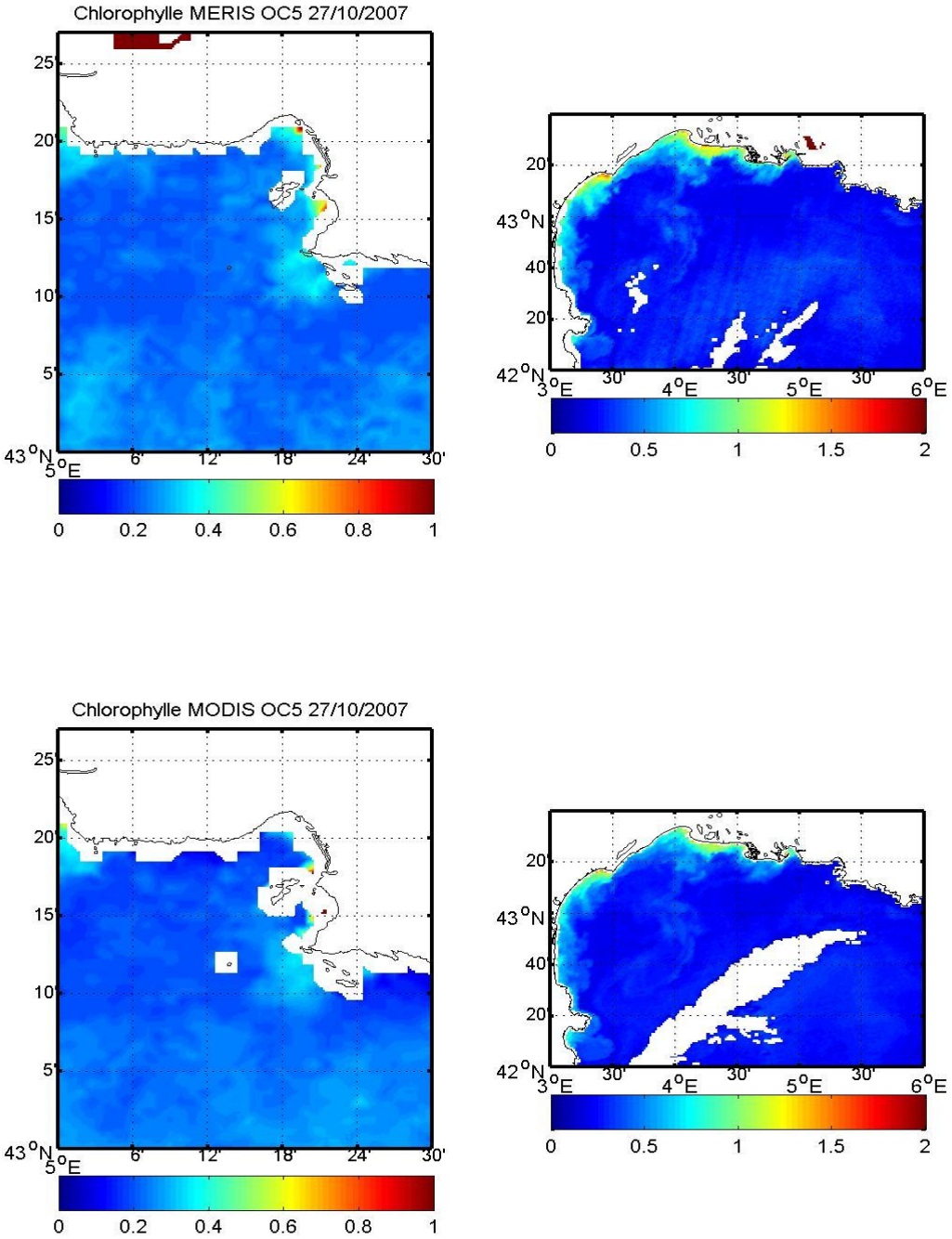


Figure 74 : Concentrations de Chlorophylle_a (en µg/L) issues des images de couleur de l'eau à 1 km MERIS (haut) et MODIS (bas) traitées par OC5 pour le 27 octobre 2007

b) Simulation atmosphérique

Une perturbation circule d'est en ouest à partir du 24 octobre sur le sud du pays. Elle traverse la région en cours de journée du 24 octobre et s'isole sur l'Espagne le 26. Cette perturbation est matérialisée par une anomalie froide vers 500hPa avec un noyau à -25/-27 °C (Figure 75). On retrouve une ondulation dans le champ des isohypses le 24 octobre à 850hPa au niveau des îles Baléares. Le flux est alors

orienté est à nord-est le long des côtes provençales ou se développe le jet de basse couche à proximité des côtes varoises, il atteint 50-55nds en fin de journée du 25 octobre (Figure 76).

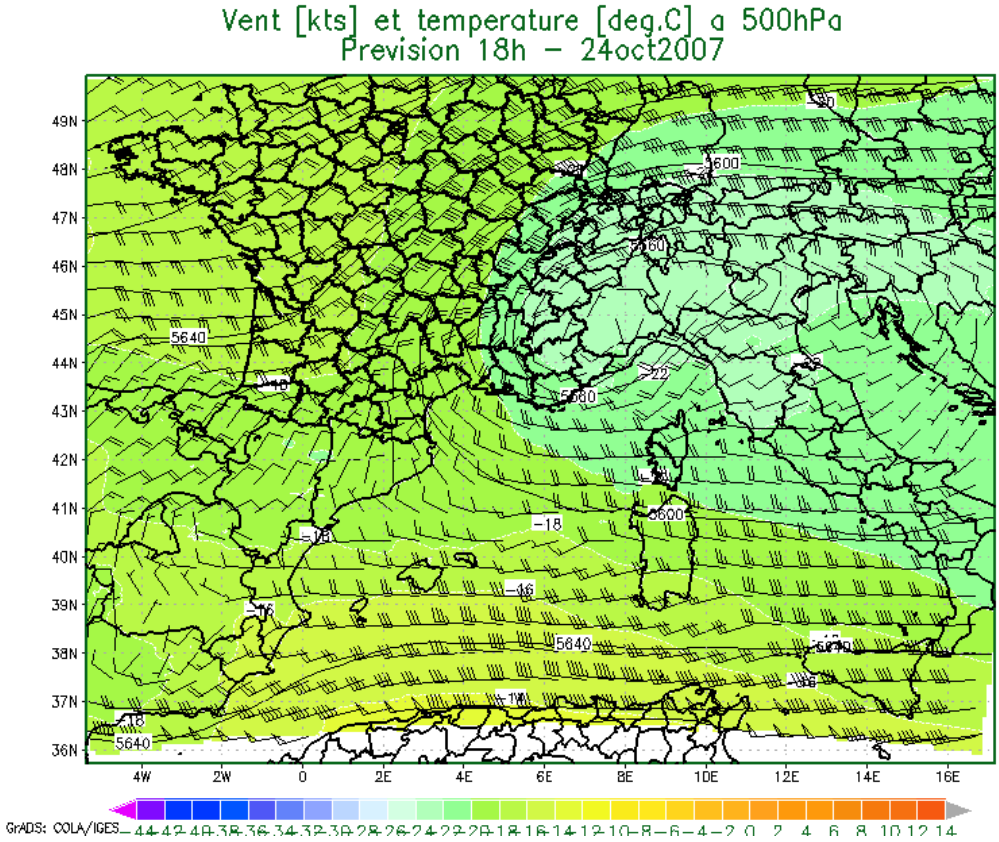


Figure 75 : Vents (nds) et température (deg.C plage de couleur) à 500hPa le 24 octobre 2007 à 18h

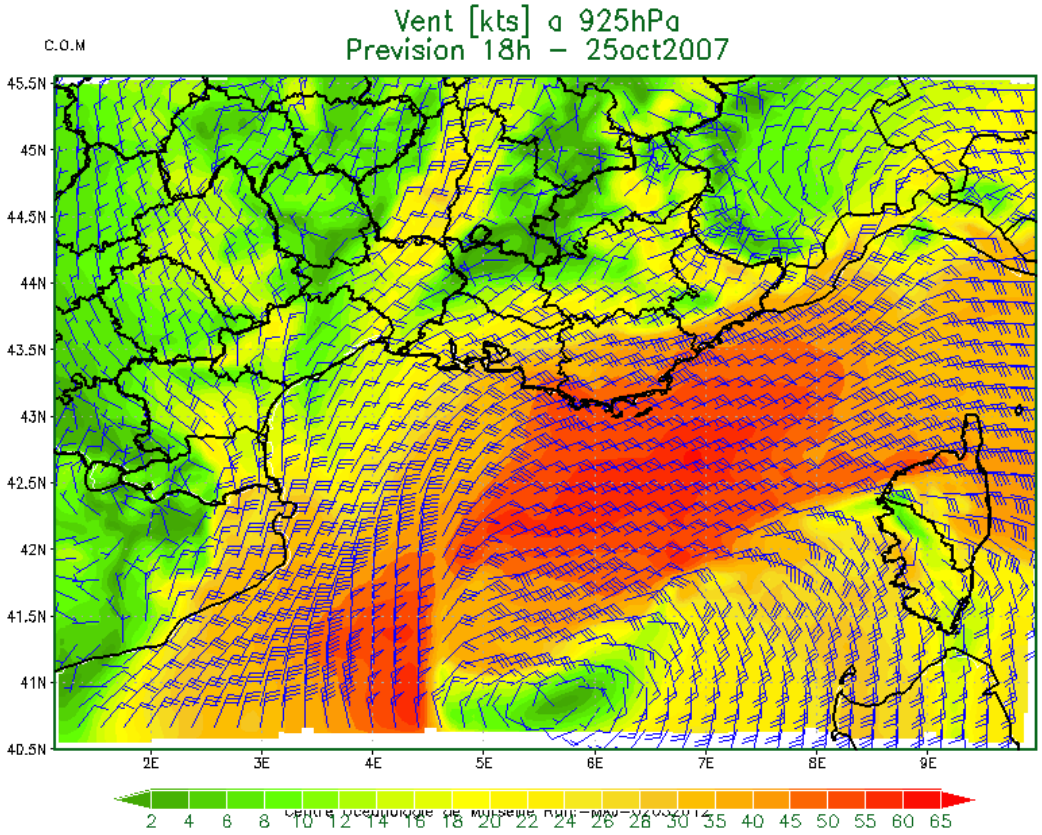


Figure 76 : Vents (nds) à 925hPa le 25 octobre 2007 à 18h

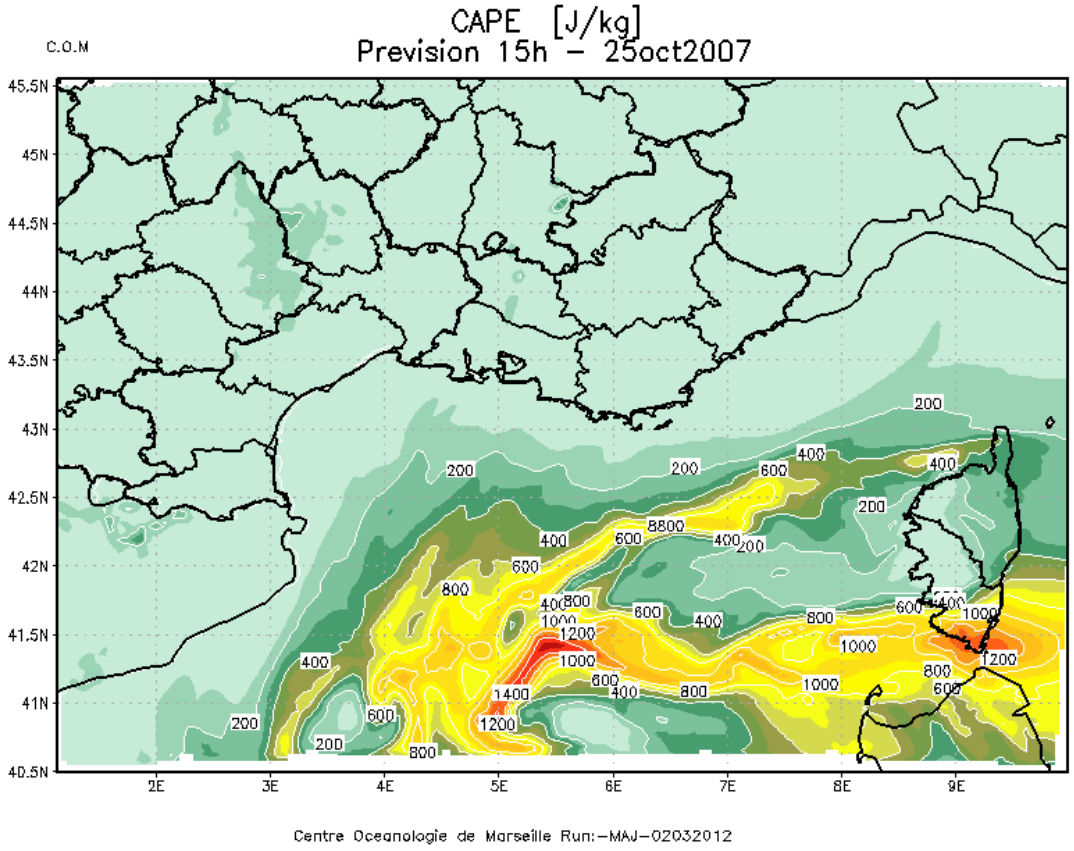


Figure 77 : CAPE (énergie convective potentiellement disponible) (J/Kg) le 25 octobre 2007 à 15h

Dans un premier temps, un temps humide s'installe sur le Var et les Bouches du Rhône et des averses se produisent dans la nuit du 24 au 25 octobre. Lors du creusement de la perturbation, la masse d'air se déstabilise en mer dans le front chaud de la perturbation (Tpw 12/14°C) (Figure 77)

L'activité orageuse sur ce secteur est renforcée par une humidification à 850hPa progressant vers les Bouches du Rhône et le Var. Les pluies ou averses sont plus nombreuses en journée du 25 octobre. Ce n'est que la nuit suivante, du 25 au 26 octobre, quand la perturbation méditerranéenne prend une direction nord en se rapprochant des côtes de la PACA que les pluies deviennent plus importantes (Figure 78). Les précipitations balaient le département des Bouches du Rhône d'est en ouest avec une activité plus marquée près du littoral. Elles commencent à se calmer à la mi-journée avant de quitter la région en fin d'après-midi du 26 octobre.

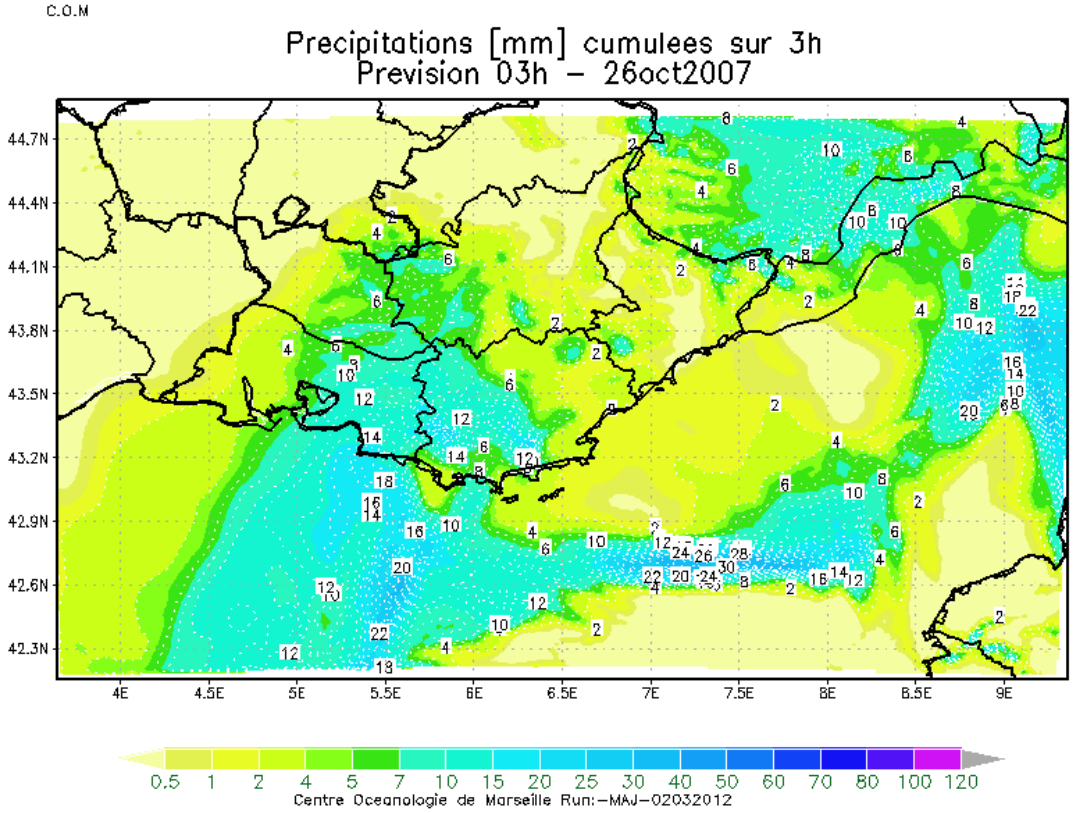


Figure 78 : Précipitations cumulées sur 3h (mm) le 26 octobre 2007 à 03h

c) Situation hydrodynamique (MARS3D-RHOMA) et biogéochimique (ECO3M-MASSILIA)

La pluie influençant la couche de surface a peu d'effet sur l'hydrodynamisme. Par contre, une forte augmentation des débits des rivières urbaines se produit lors de cet évènement (Figure 7). Les rejets en nitrates sont bien visibles (Figure 79). Les plus importants sont localisés près de Cortiou, et d'autres au niveau du Port Autonome (Aygalades) et de certains déversoirs d'orage. Ceci correspond bien aux débits mesurés en différents points pendant l'événement (Figure 7).
L' augmentation de chlorophylle_a (relativement faible) associée à ces apports de nitrate est en accord avec l'image MERIS 1 km OC5 du 27 octobre 2007 (Figure 80). Ce résultat suggère que dans le milieu le phytoplancton pourrait être limité par un autre élément que l'azote, peut être le phosphore ou certains contaminants. Il se peut également que la faible poussée en automne soit liée à la saison (manque de lumière) car des apports du même ordre de grandeur au printemps induisent des poussées phytoplanctoniques simulées beaucoup plus importante.

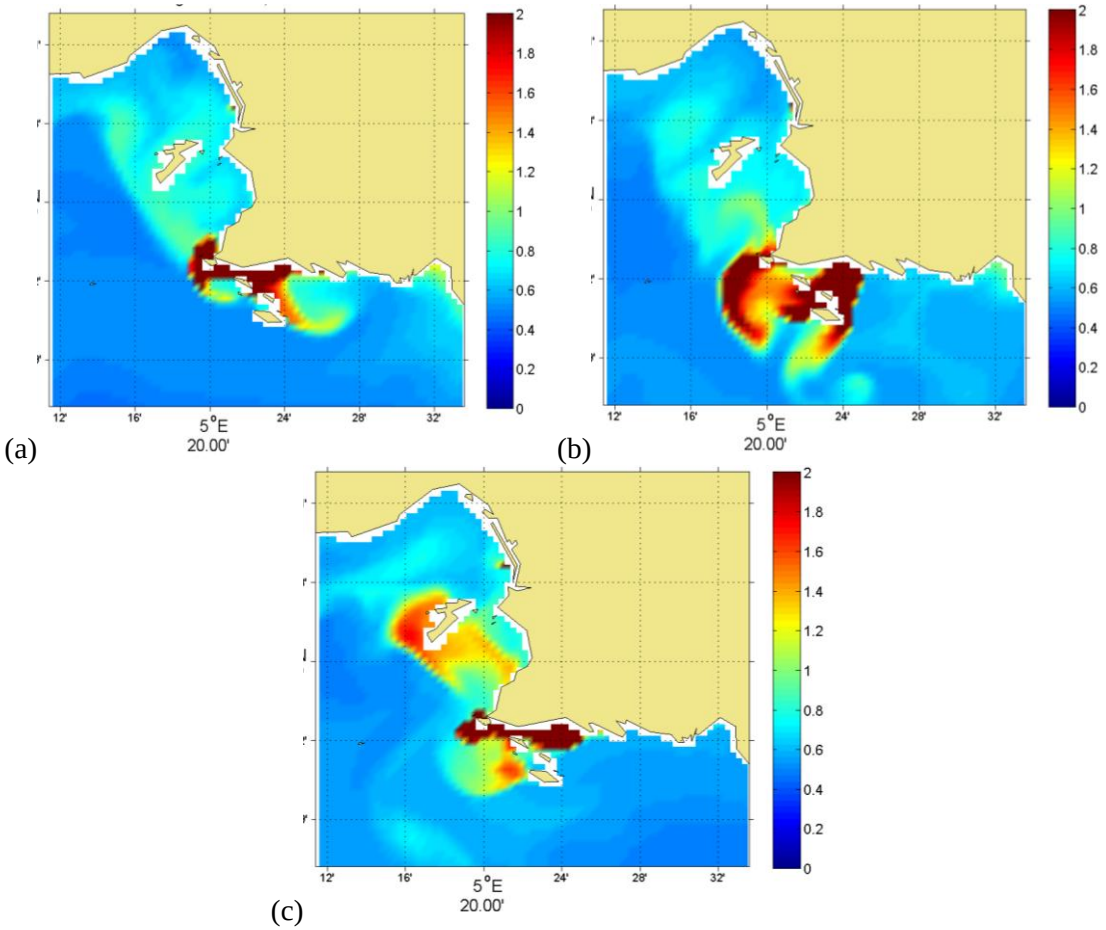


Figure 79 : Concentrations de nitrate (µmol/L) de surface simulées les 25 (a), 26 (b) et 27(c) octobre 2007 après la pluie.

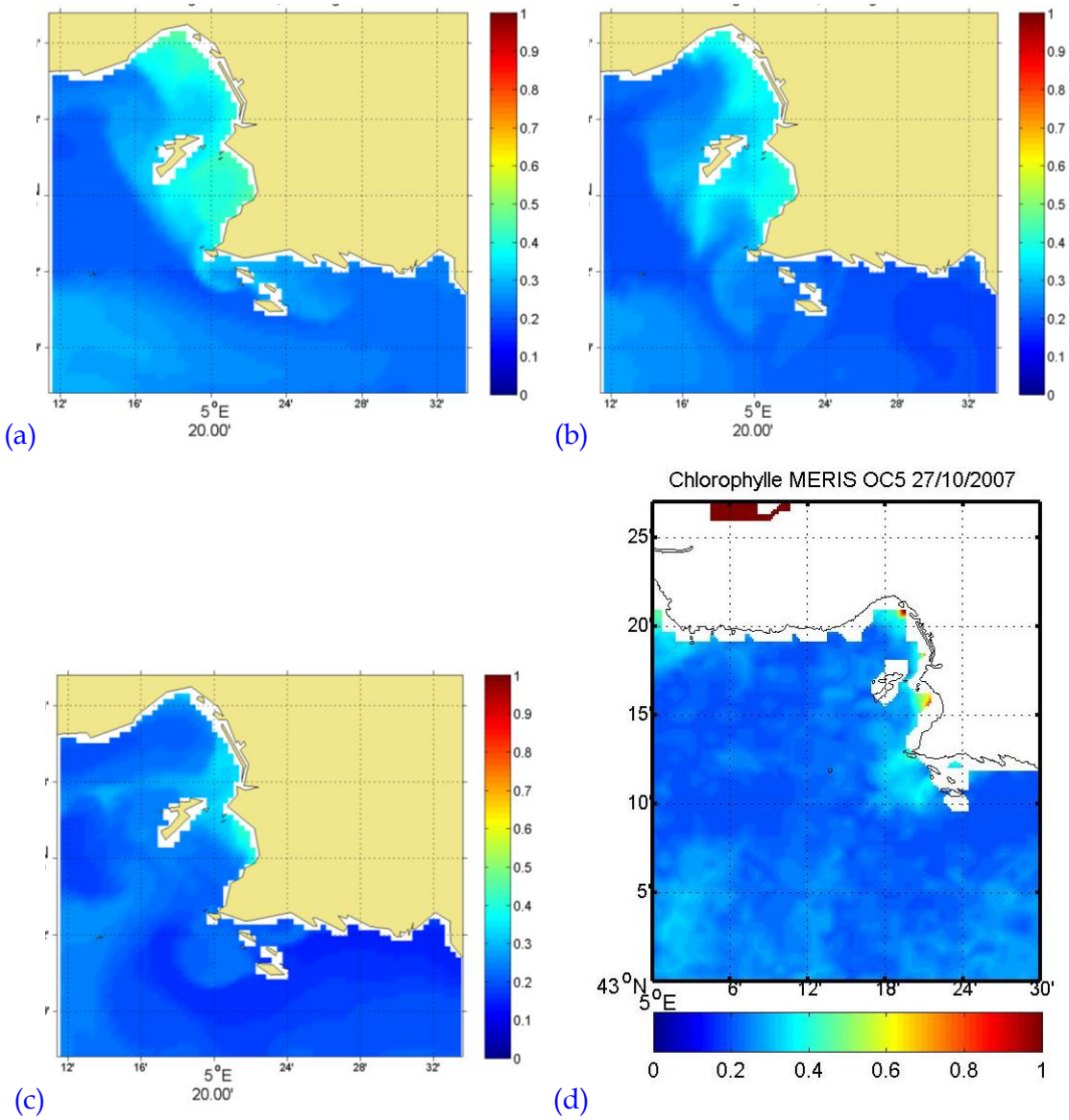


Figure 80 : Concentrations de chlorophylle_a (µg/L) de surface simulées les 25 (a), 26 (b) et 27(c) octobre 2007 après la pluie, comparées aux concentrations de Chlorophylle_a (en µg/L) issues de l'image MERIS OC5 du 27 octobre (d).

d) Situation hydrosédimentaire

L'évènement de pluie du 25-26 octobre 2007 est concomitant avec l'arrivée d'un épisode de houle court dans la durée mais intense, avec une action forte au niveau de la zone de Cortiou, le 26 octobre le matin (Figure 81). Cet épisode induit une érosion très près des côtes, les MES érodées étant principalement redéposées plus bas sur la pente, dans la même zone. La fin de cet épisode impacte également la rade sud, mais plus tard dans la nuit du 26 au 27 octobre, et induit de même une érosion très près de la côte, et une sédimentation très rapide. L'épisode de pluie induit un panache bien visible en surface, avec au plus fort du rejet des concentrations à proximité du rejet supérieures à 50mg/L (Figure 82 et Figure 83). Ce panache, orienté sud-ouest le 26 octobre à minuit, passe sud à midi, permettant un étalement du panache caractérisé par des concentrations en MES significatives (>20mg/L) au delà de l'Ile Riou. Ce panache se dilue rapidement, avec un transfert des MES vers l'ouest (Figure 84). Des concentrations fortes près de Cortiou et dans une moindre mesure en rade sud

sont observées, mais du fait de l'épisode de houle il est difficile de dissocier la part de sédiment remise en suspension et la part de MES apportées par l'épisode de pluie (Figure 84).

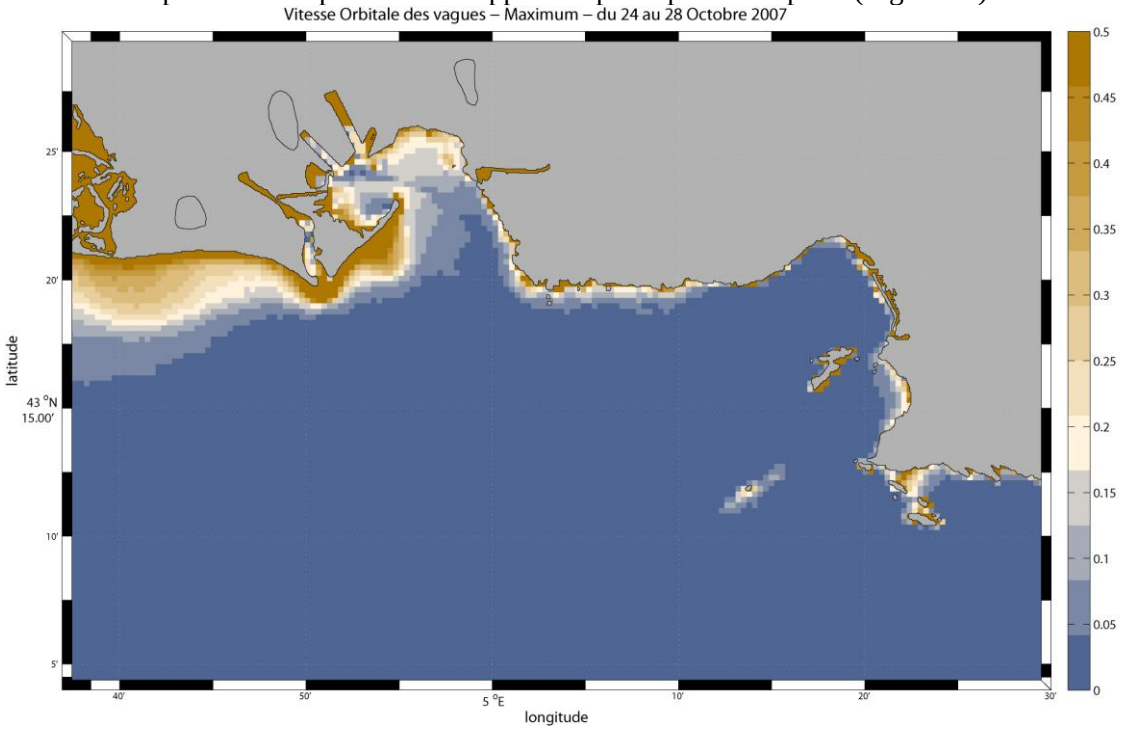


Figure 81 : Distribution spatiale de la vitesse orbitale (m/s) des vagues au fond, valeurs maximales entre le 24 et le 29 Octobre 2007

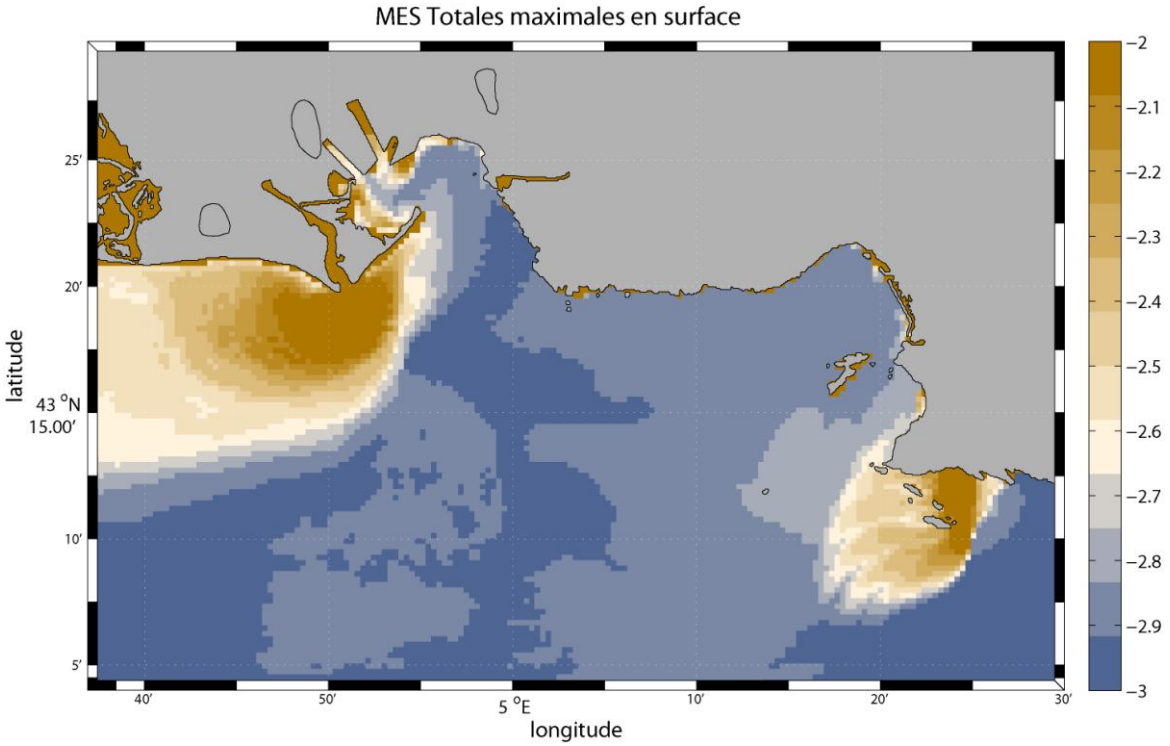


Figure 82 : Distribution spatiale de surface de la concentration maximale de sédiments fins entre le 24 et le 29 Octobre 2007(g/L, échelle logarithmique : -2 : 10mg/L, -3 : 1mg/L)

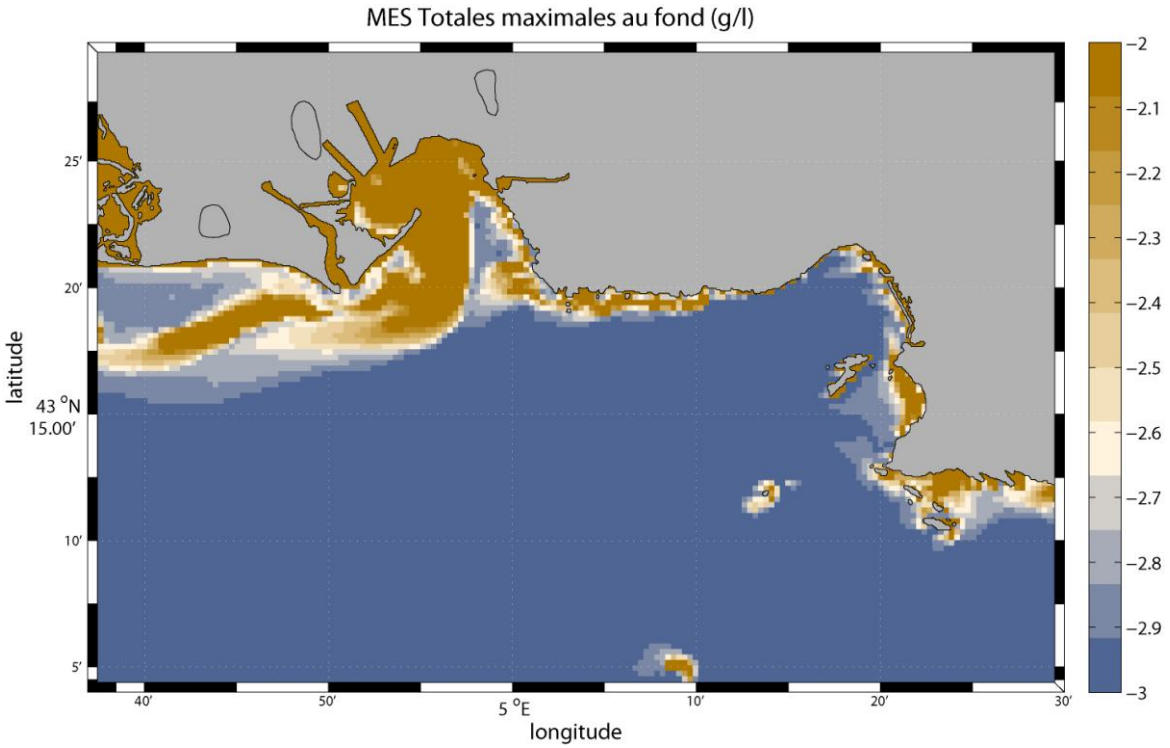


Figure 83 : Distribution spatiale de fond de la concentration maximale de sédiments fins entre le 24 et le 29 Octobre 2007(g/L, échelle logarithmique : -2 : 10mg/L, -3 : 1mg/L)

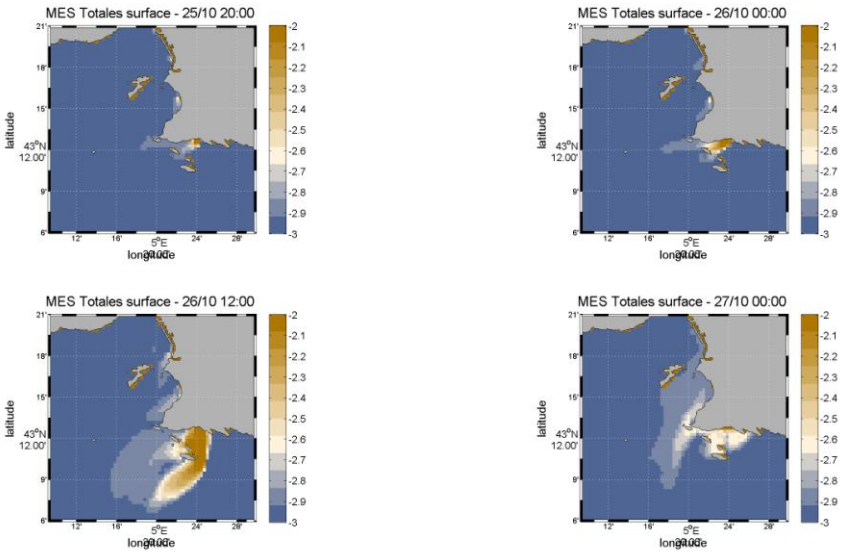


Figure 84 : Distribution spatiale de surface des concentrations en sédiment fin entre le 25 octobre et le 27 octobre 2007 (g/L, échelle logarithmique : -2 : 10mg/L, -3 : 1mg/L)

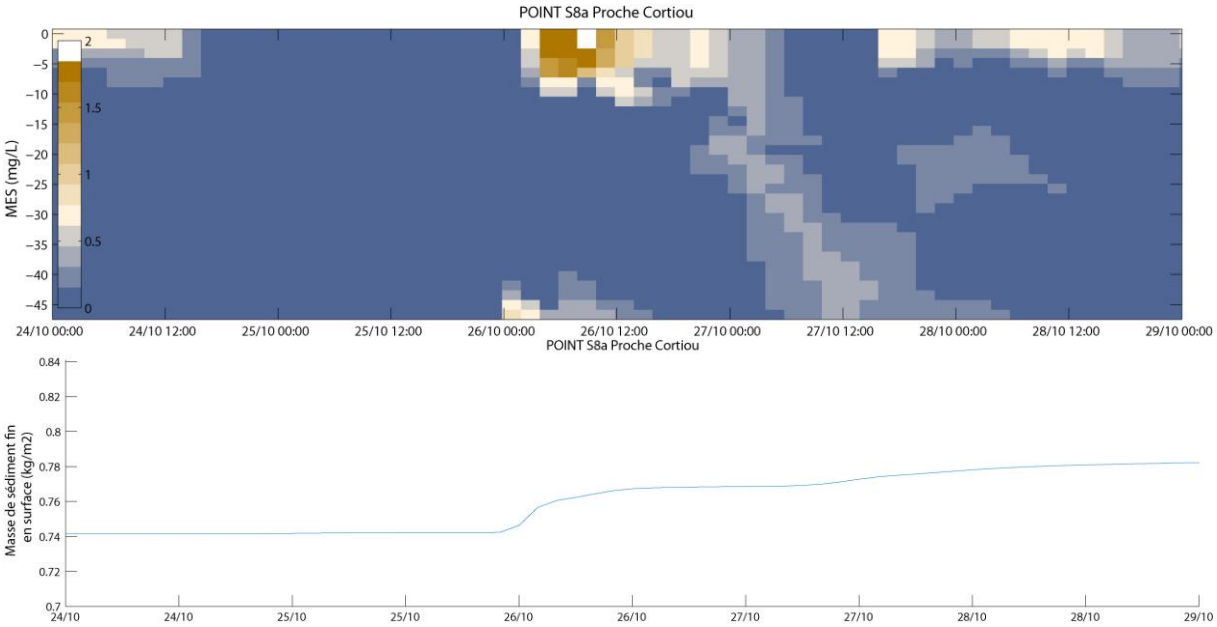


Figure 85 : Dynamique des MES dans la colonne d'eau (haut - (mg/L, échelle logarithmique : 1: 10mg/L, 2 : 100mg/L)) et dans le sédiment (bas) au point de référence S8a situé le plus proche de l'émissaire de Cortiou entre le 24 et le 29 Novembre 2007

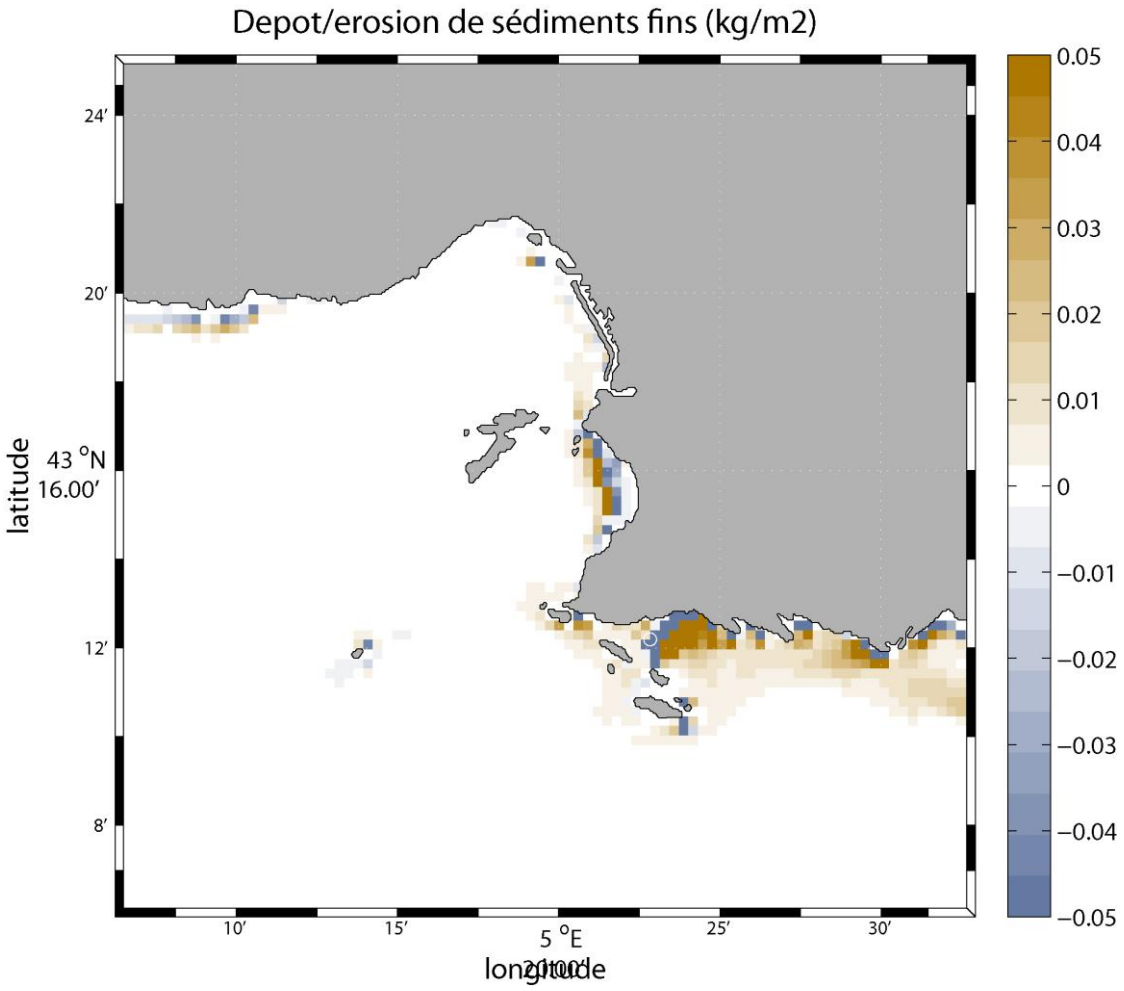


Figure 86 : Dépôt/érosion de sédiments fins entre le 24 et le 29 Novembre 2007 (kg/m2)

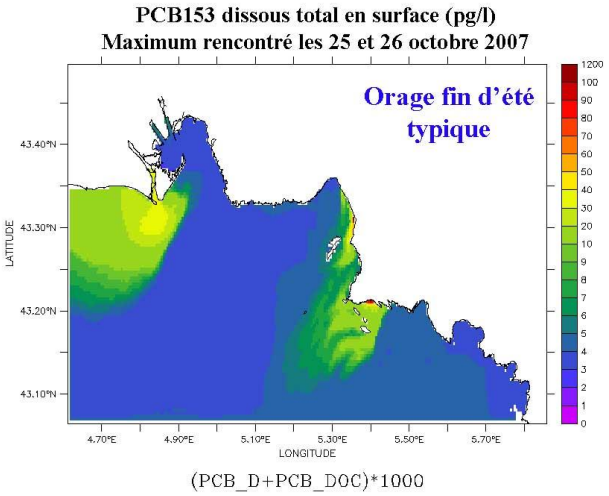
Plus précisément, la Figure 85 permet d'analyser la dynamique du panache, au droit de l'émissaire. Le 26 octobre à minuit, l'évènement de houle implique une érosion plus haut sur la pente, et les sédiments érodés sont advectés vers le point d'observation, impliquant un dépôt bien marqué. L'évènement de pluie se structure en deux étapes : les MES lourdes, apportées par la pluie d'orage, sédimentent au droit de l'émissaire et contribuent à l'accrétion de la zone (Figure 85 et Figure 86). Les MES plus légères constituent le panache de surface (d'une profondeur de 5 à 10m sous la surface), qui va migrer au gré des courants de surface.

e) Situation de la contamination en CB153

La situation du 25 octobre 2007 avec un événement de pluie dans l'après midi provoque une arrivée de contaminant dans la zone et un panache de Cortiou plus concentré et étendu qu'en étiage (Figure 87, Figure 88) ; sa durée de vie est courte (maximum le 26 octobre toute la matinée). Des rejets en rade nord sont également visibles (Figure 87, Figure 88). Au fond, on observe de fortes concentrations le long de la côte (Figure 89), dues en grande partie aux apports avec un peu d'érosion en rade sud et un épisode de remise en suspension dans la zone de Cortiou quelques heures avant la pluie mais qui se redépose dans la journée. L'essentiel de la masse rejetée à Cortiou se dépose dans la zone proche mais le modèle simule tout d'abord une érosion à la côte dans la nuit du 25 au 26 octobre, puis des dépôts progressifs un peu plus au large (Figure 90 et Figure 91). En rade sud, le modèle simule une érosion le 26 octobre après midi qui se redépose dans la même zone. Le bilan final en fin de journée le 27 octobre montre un dépôt résiduel (courbes vertes sur la Figure 90 : valeur négative en fin de période) dans toutes les zones ce qui signifie qu'une partie des apports a sédimenté localement. Au niveau de la rade de Marseille, l'apport par les rivières, notamment au niveau de Cortiou, induit une augmentation importante du stock de PCB dans l'eau qui ne s'est pas évacué en fin de période.

Les conditions biogéochimiques (en terme d'enrichissement des particules en matière organique) ne sont pas beaucoup modifiées par les apports; elles n'impactent donc pas la spéciation du PCB, qui reste surtout régie par la quantité de particules en suspension. Cet événement de pluie n'a induit qu'une faible poussée phytoplanctonique (Figure 80) même si les apports de nitrate étaient conséquent (Figure 79). Ce résultat suggère que le phytoplancton peut être limité dans sa croissance par les phosphates.

(a) : Dissous en surface (pg/L)



(b): Particulaire en surface (pg/L)

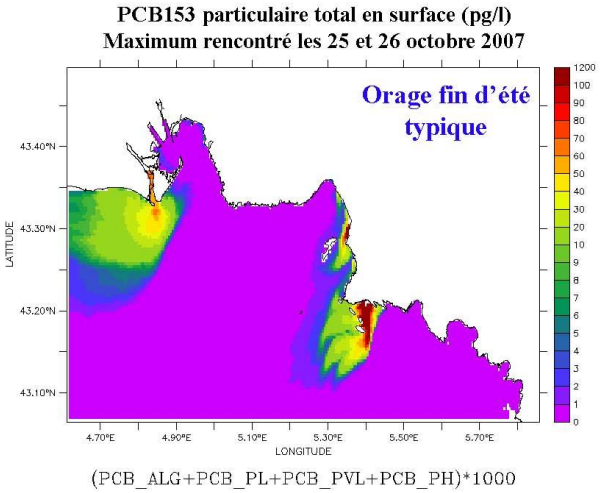


Figure 87 : Concentrations maximales rencontrées en surface (pg/L) entre le 25 et 27 octobre 2007

(a) Dissous en surface (pg/L)

(b) Particulaire en surface (pg/L)

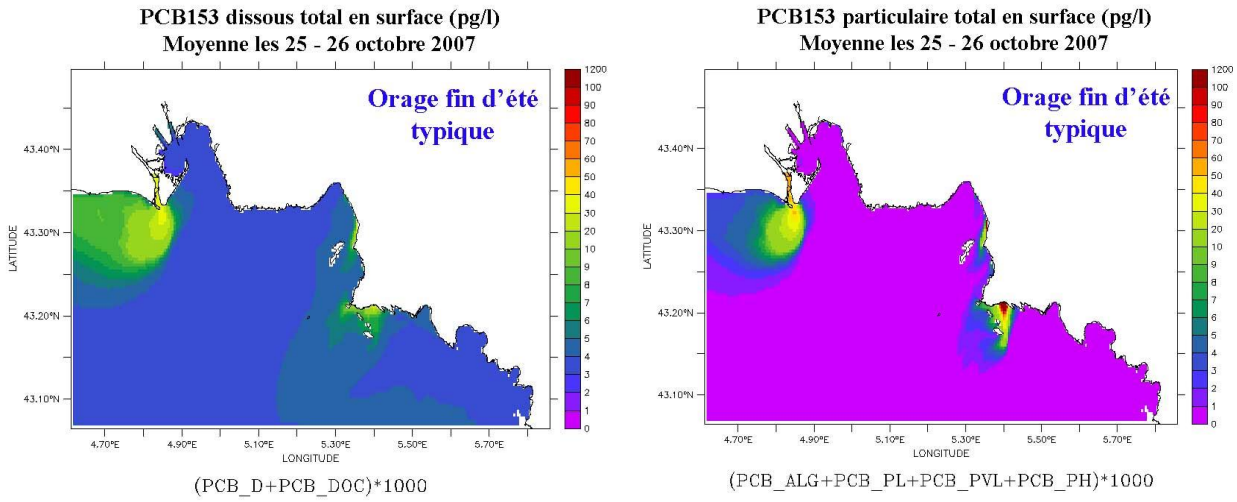


Figure 88 : Concentrations moyennes rencontrées en surface (pg/L) entre le 25 et 27 octobre 2007

Particulaire en surface (ng/g)

Particulaire au fond (ng/g)

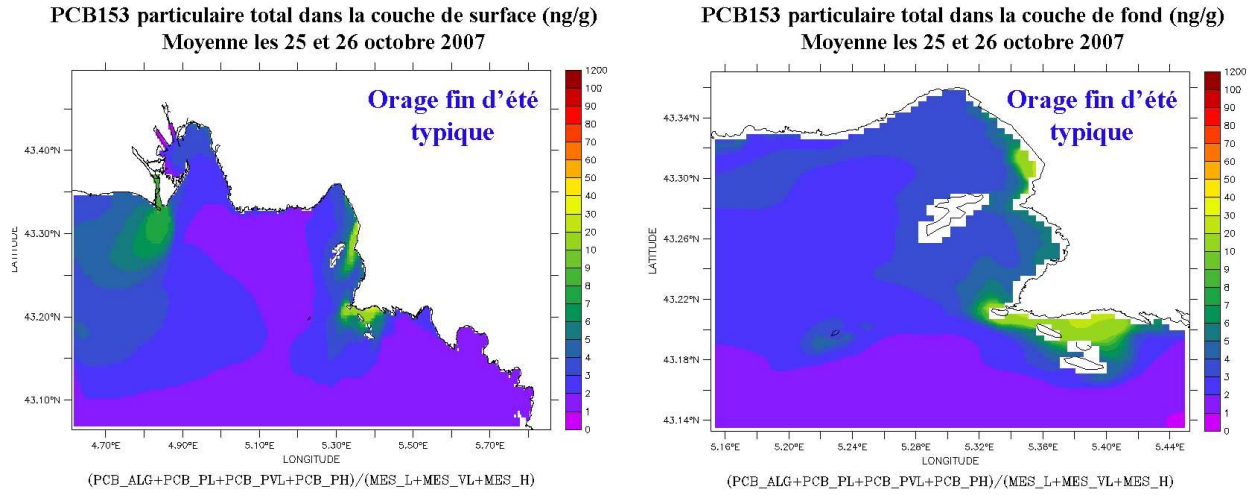


Figure 89 : Teneurs moyennes de CB153 particulaires (ng/g) rencontrées au fond et en surface entre 25 et 27 octobre 2007

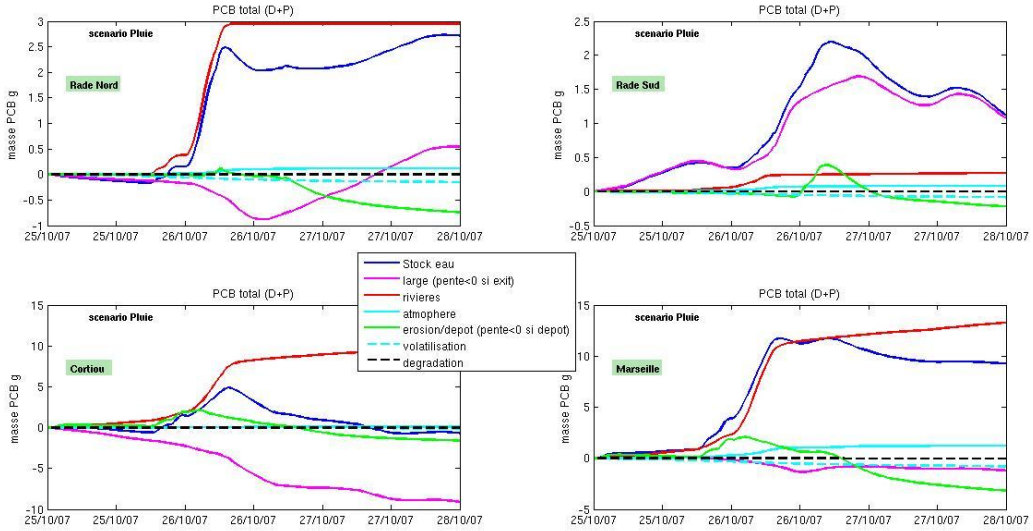


Figure 90 : Variation des stocks de CB153 total dans la colonne d'eau pendant la période et dans chaque zone (décrite sur la Figure 9), associée aux variations de concentrations dues à chaque processus « large » : entrée/sortie aux limites ; « rivières » : apports à la côte ; « atmosphère » : dépôts secs et pluie ; « érosion/dépôt » ; « volatilisation » et « dégradation ». (si pente >0 = variation positive de la concentration= apport de contaminant, inversement si pente <0 = perte de contaminant

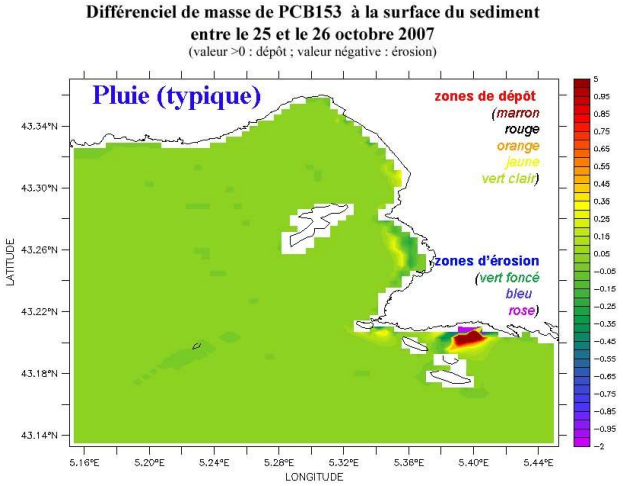


Figure 91 : Zones de dépôt et d'érosion après l'événement de pluie typique du 25 octobre 2007

5.4.2. Situation de pluie d'automne 2008

a) Données Météo France, station de l'Observatoire de Marseille

Depuis les nombreuses pluies du mois de juin 2008, plus une goutte d'eau jusqu'en septembre enregistrée à l'Observatoire (dans mes notes: pluie le 19 et 20 juillet et de faibles pluies dans la nuit du 11 au 12 septembre <5mm). En septembre, les pluies restent toujours très faibles. Le premier orage de fin d'été arrive enfin les 7 et 8 octobre 2008, mais les apports ne sont que de l'ordre de 20 mm/j/m². Des pluies supérieures à 30 mm/j/m² apparaissent ensuite fin octobre début novembre 2008. Ces pluies ne sont pas bien reproduites dans les modèles, par contre l'événement de mi-décembre peut être étudié.

Date	mm/m²/j
20080918	6
20080926	5
20081007	19,8
20081008	21
20081022	31,8
20081028	31,4
20081102	36,8
20081103	10
20081104	34
20081123	8
20081127	14,2
20081129	9,4
20081209	36,6
20081213	7,2
20081214	59
20081215	14,6

Tableau 11
Date des pluies >5 mm et quantité de pluie mm par jour et par m²

b) Simulation atmosphérique

Une perturbation circule sur l'Atlantique nord s'étendant de l'Islande jusqu'au sud des îles Britanniques en première partie de nuit de vendredi 12 décembre (Figure 92).

Celle-ci aborde le golfe de Gascogne et l'Espagne en fin de nuit de vendredi à samedi.
Lors de son parcours vers l'est, une perturbation secondaire se développe dans sa partie sud dans la nuit de samedi à dimanche 14 sur la péninsule ibérique.
A l'avant de celle-ci, le flux d'ouest faible ondule faiblement sur le bassin occidental mediterrannéen puis progressivement s'oriente sud .
La perturbation espagnole va se creuser rapidement en deuxième partie de nuit sur ce secteur.
La cyclogénèse se trouve renforcée par un gradient de température important entre l'air postérieur et amont de la perturbation. De l'air encore à 10 °C circule en mer (Figure 93) tandis que la masse d'air est aux alentours de 4/6 °C sur le reste du pays.

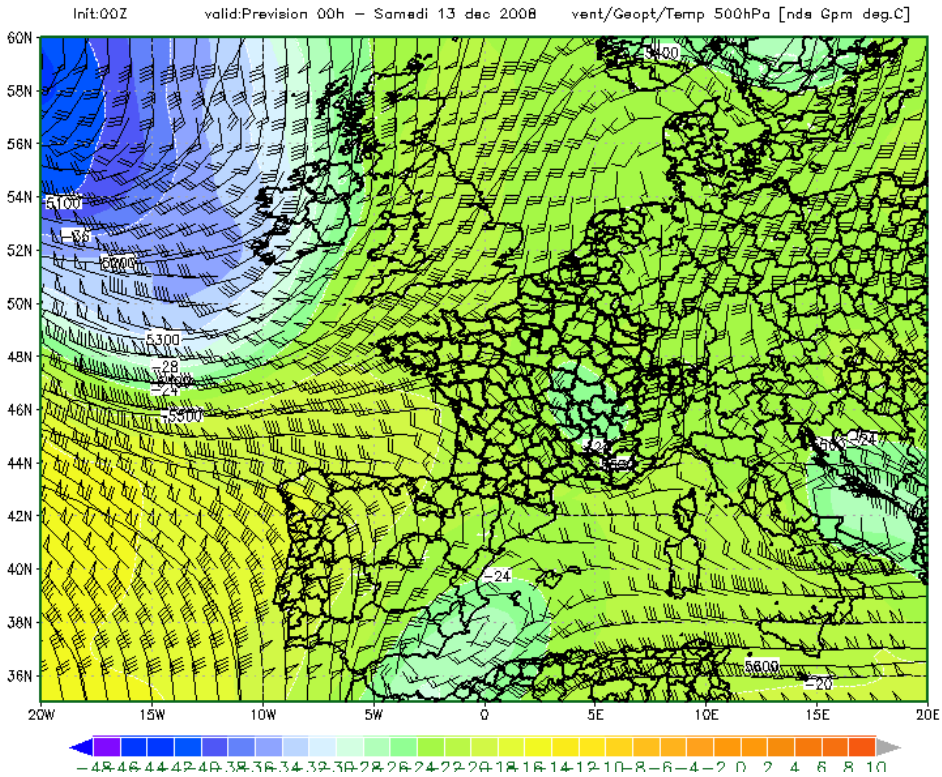


Figure 92 : Vent (nds) Geopotentiel (dam) et température (deg.C) 500hPa le 13 décembre 00h

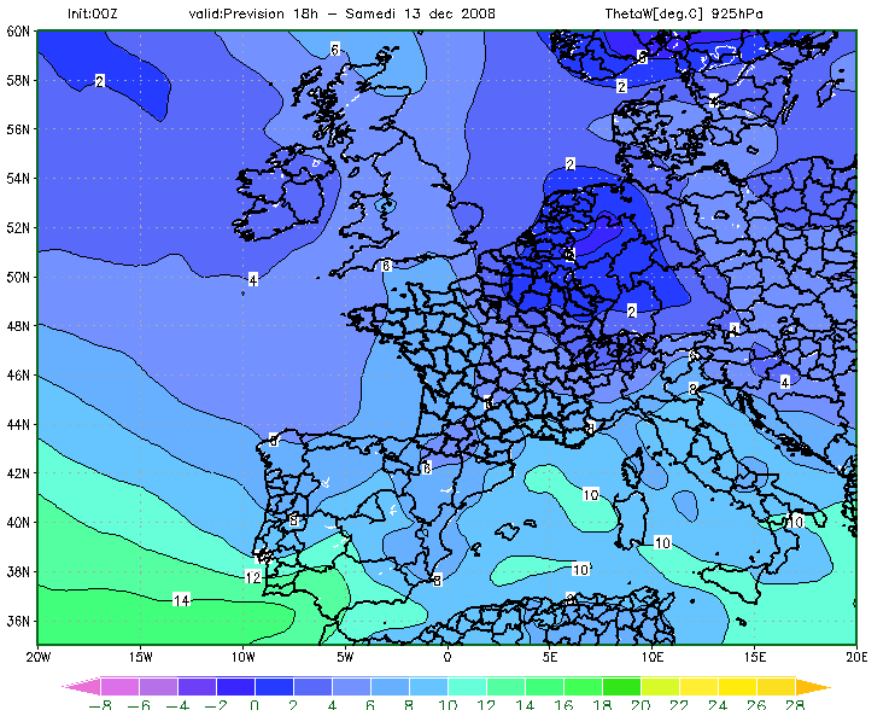


Figure 93 : Température pseudo-adiabatique potentielle (°C) 925hPa le 13 décembre 2008 18h.

En début de journée de dimanche, l'axe de la perturbation se positionne dans le golfe du Lion provoquant un basculement du vent en basse couche au secteur sud contribuant à advecter sur les bouches du Rhône de l'air humide .
Sous l'axe du flux se développe des noyaux de vitesses verticales en mer et sur le département (Figure 94). Ces noyaux deviennent plus intenses sur les premiers reliefs provençaux.

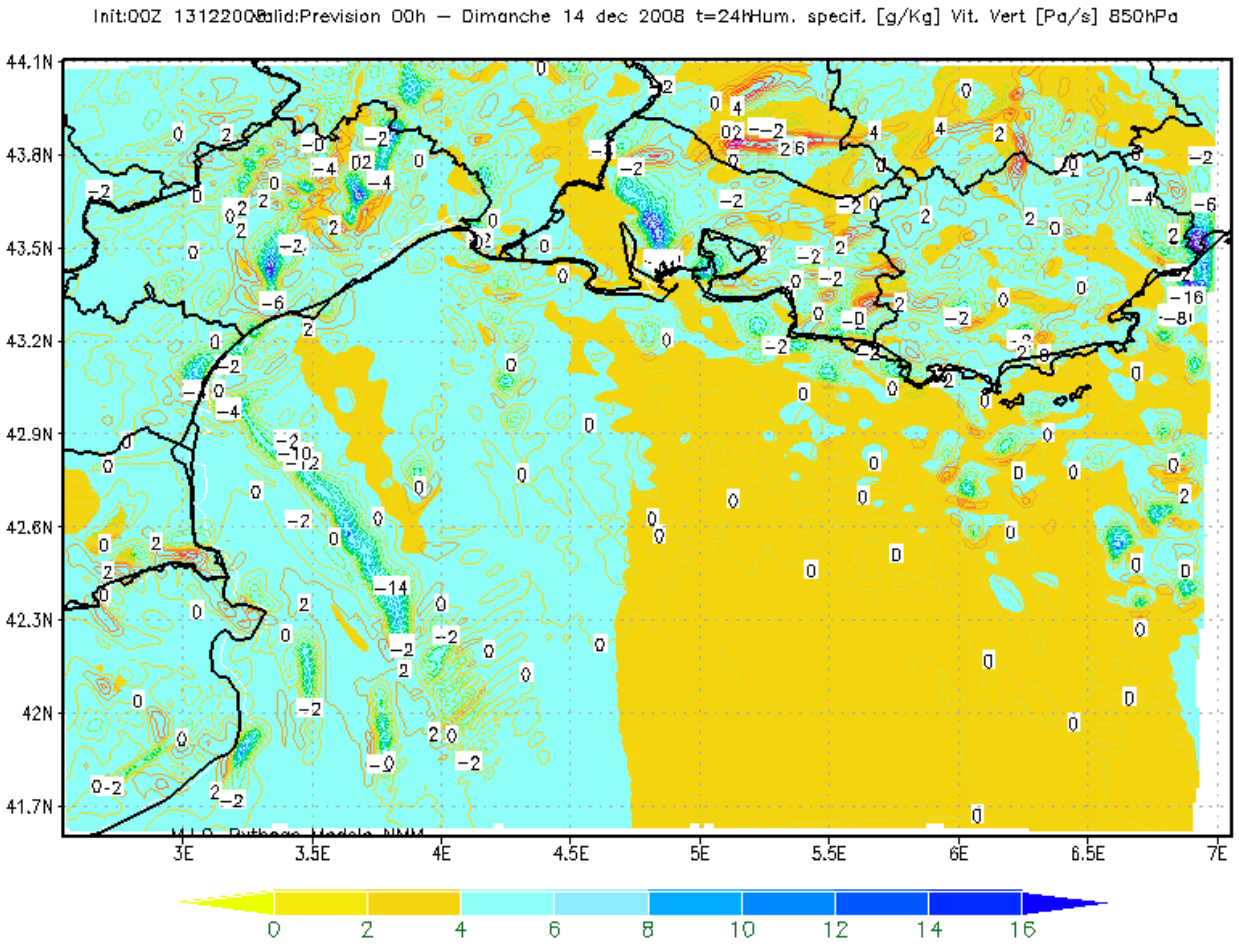


Figure 94 : Humidité spécifique (g/Kg) et vitesse verticale (Pa/s) 850hPa 14 décembre 2008 00h

Dans l'axe du front au large des Bouches du Rhône, une instabilité de basse couche se développe en matinée du 14 décembre et déborde sur le littoral marseillais où se produisent alors des orages parfois forts (Figure 95).
Les cumuls les plus importants se produisent dans la zone barocline bien visible dans le champ de Thetaw 850hPa.
En certains points, les quantités d'eau dépassent les 40mm sur 3h avec une zone plus active en mer dans la partie sud du front.

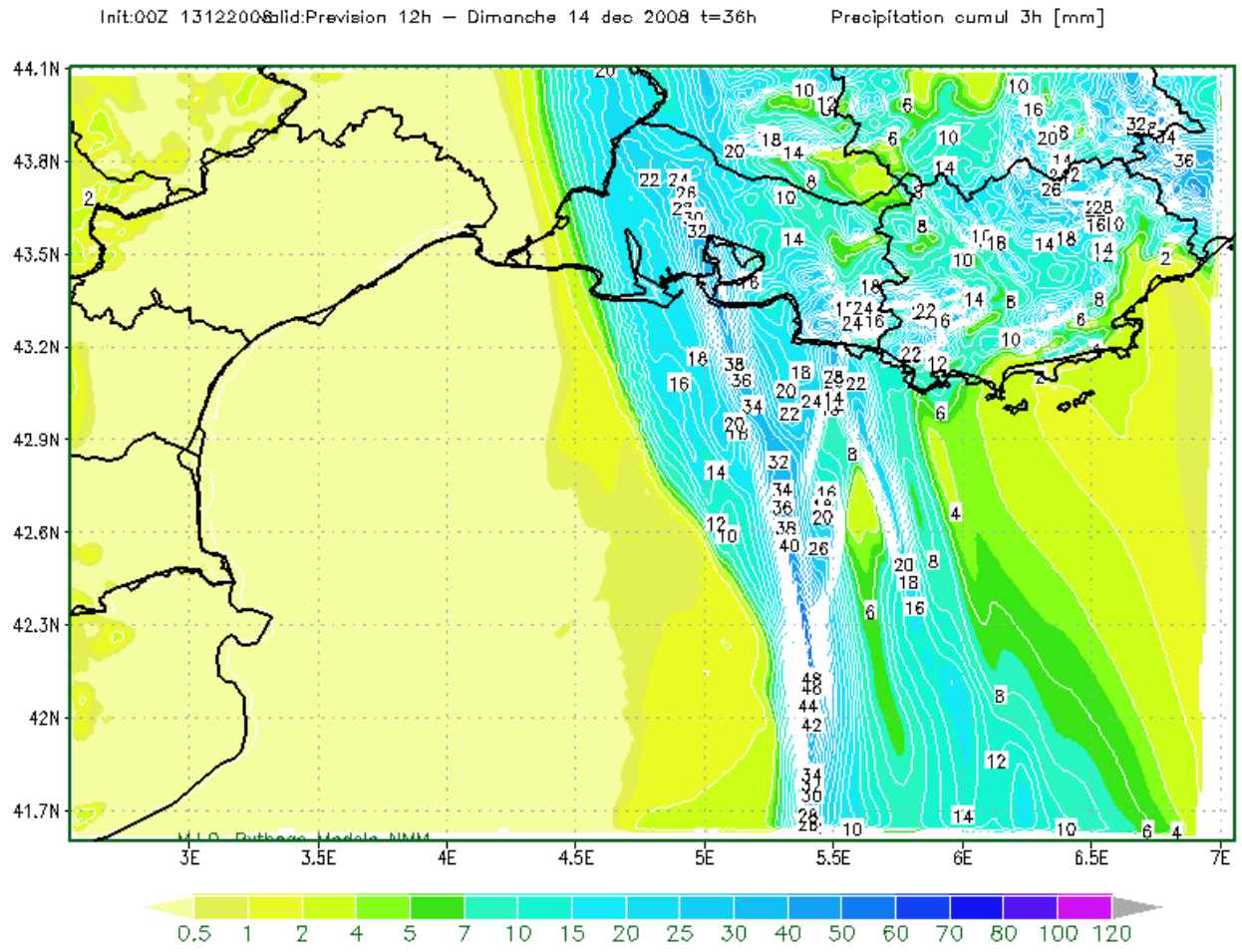


Figure 95 : Précipitations cumulées sur 3h (mm) 14 décembre 2008 12h.

En cours de journée du 14 décembre, le front pluvieux se décale vers l'est concernant d'abord le Var puis les Alpes Maritimes.
Les précipitations sur Marseille se sont produites essentiellement entre 7 h et 16 h avec une maximum d'intensité vers 12 h (heure locale).

c) Situation hydrodynamique (MARS3D-RHOMA) et biogéochimique (ECO3M-MASSILIA)

Les pluies qui ont lieu entre le 9 et le 15 décembre 2008 induisent de forts débits des rivières urbaines. Le 15 décembre 2008, la signature en salinité de ces forts rejets d'eaux via les rivières urbaines est très visible dans la baie de Marseille sur la carte de surface de salinité (Figure 96). A la station Somlit ce jour là, le modèle et les mesures *in situ* de salinité décrivent une dessalure (salinité d'environ 37.2) sur une couche de surface de 3m environ (Figure 97). Les rejets des rivières urbaines de la rade sud (Huveaune et Bonneveine) semblent donc avoir un impact en salinité jusqu'à la station Somlit. C'est aussi le cas en température, en effet, ces rejets par les rivières semblent être caractérisés par des températures assez faibles (Figure 98).

D'un point de vue biogéochimique, les rejets des rivières urbaines sont très riches en nutriment (NO_3 et PO_4), cependant ils interviennent à une période de l'année où les concentrations en nutriments sont déjà très élevées (Figure 99 et Figure 100). Le mélange hivernal ayant déjà eu lieu, les concentrations en nutriments dans la colonne d'eau de la baie de Marseille sont homogènes et élevées.

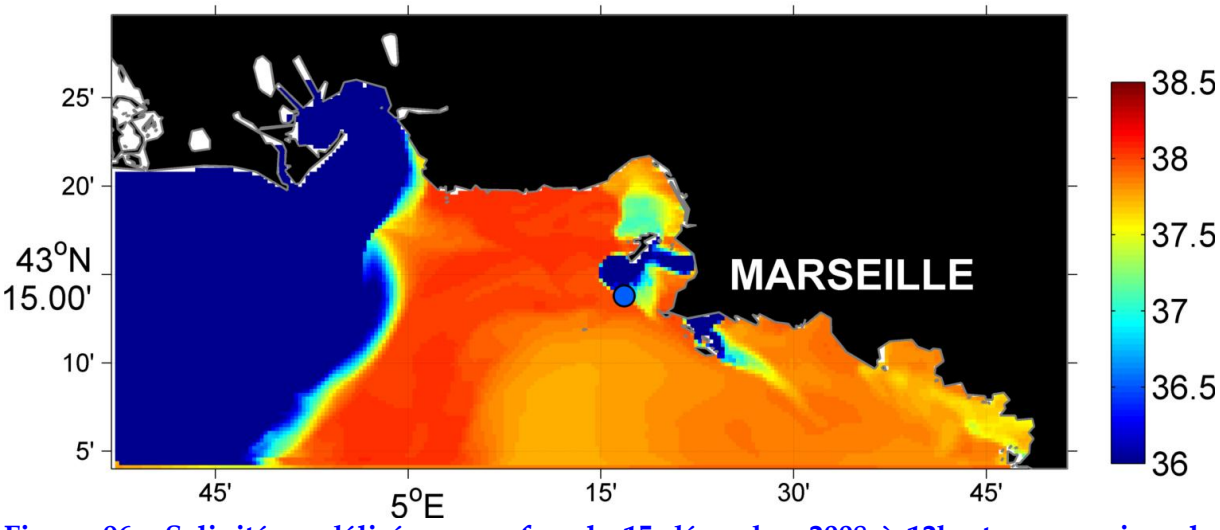


Figure 96 : Salinité modélisée en surface le 15 décembre 2008 à 12h et comparaison la station SOMLIT (le cercle représente la station SOMLIT et la couleur à l'intérieur du cercle représente la valeur de la salinité mesurée à cette station).

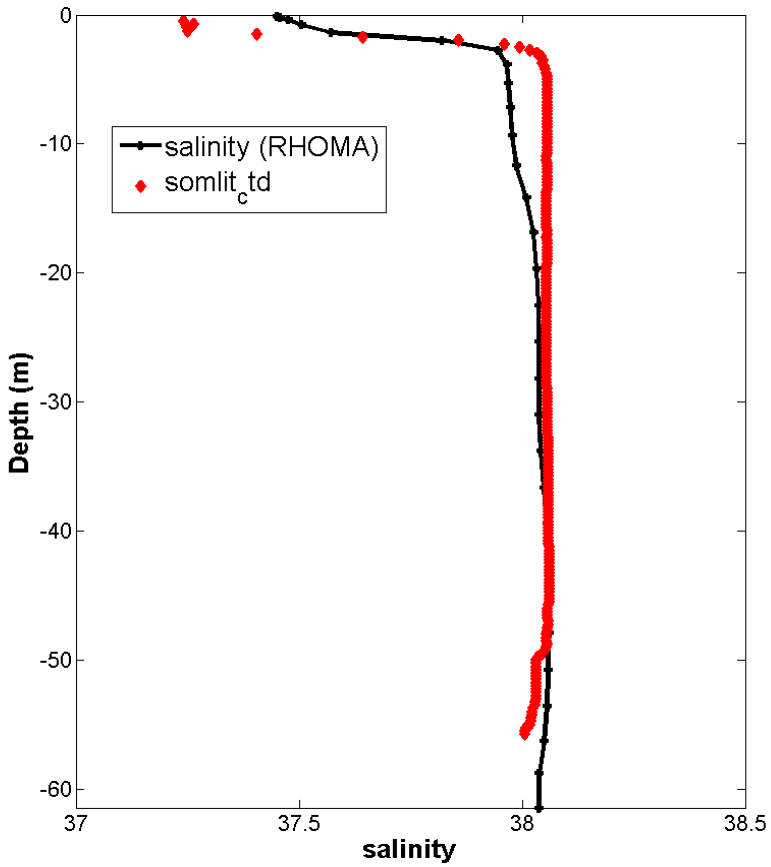


Figure 97 : Profil vertical de salinité à la station Somlit le 15 décembre 2008, comparaison entre la salinité modélisée (en noir) et la salinité mesurée à l'aide d'une CTD (en rouge)

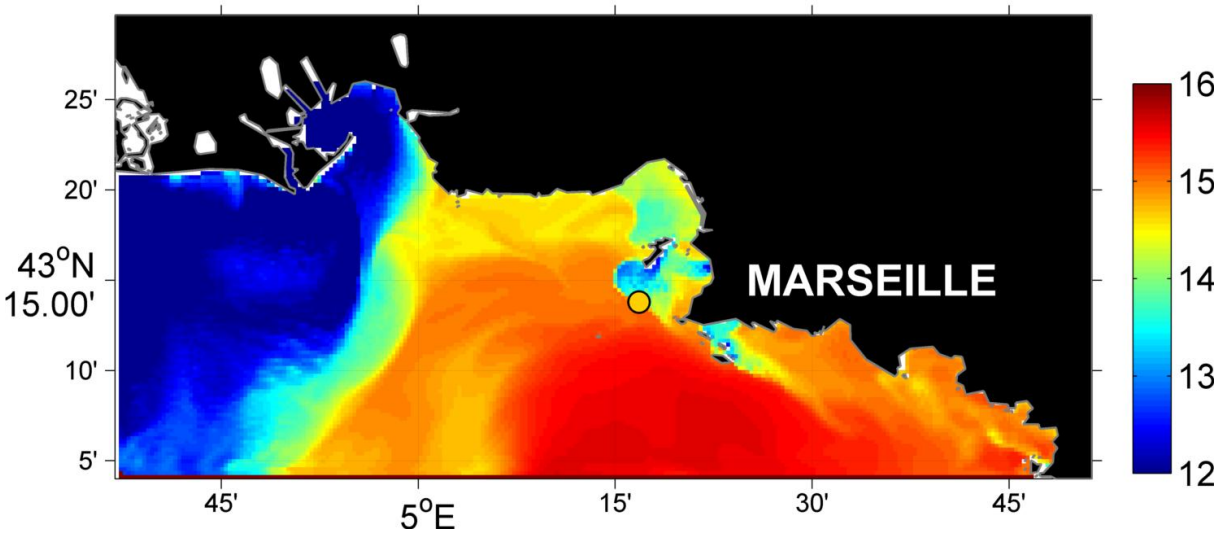


Figure 98 : Température (en °C) modélisée en la surface le 15 décembre 2008 à 12h et comparaison la station SOMLIT (le cercle représente la station SOMLIT et la couleur à l'intérieur du cercle représente la valeur de la température mesurée à cette station).

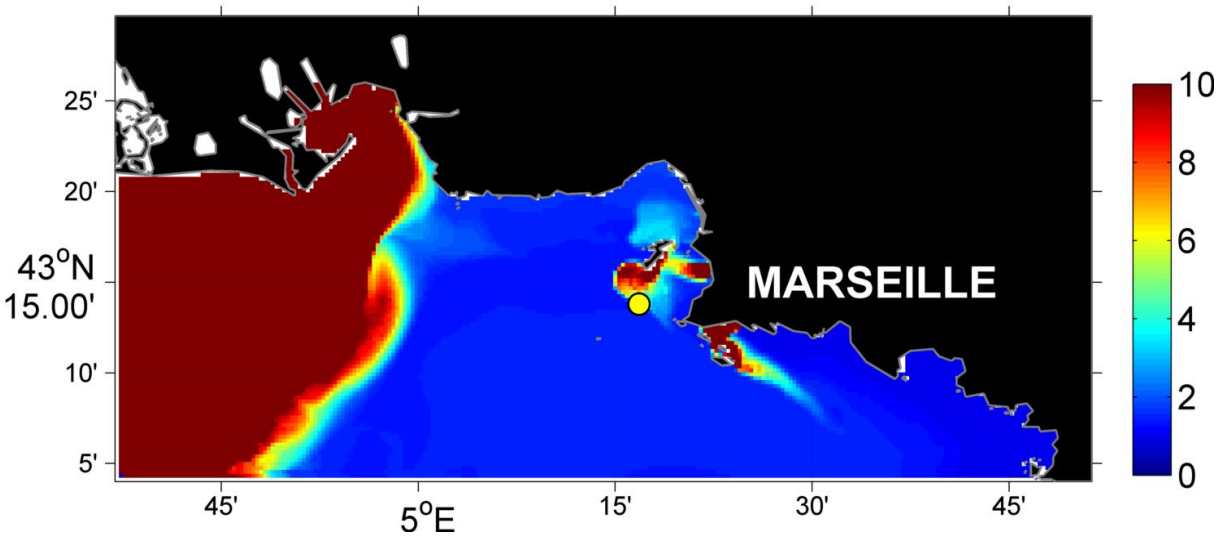


Figure 99 : Concentrations en nitrate (en µmol/L) modélisées en surface le 15 décembre 2008 à 12h et comparaison à la station SOMLIT (le cercle représente la station SOMLIT et la couleur à l'intérieur du cercle représente la valeur de la concentration mesurée à cette station).

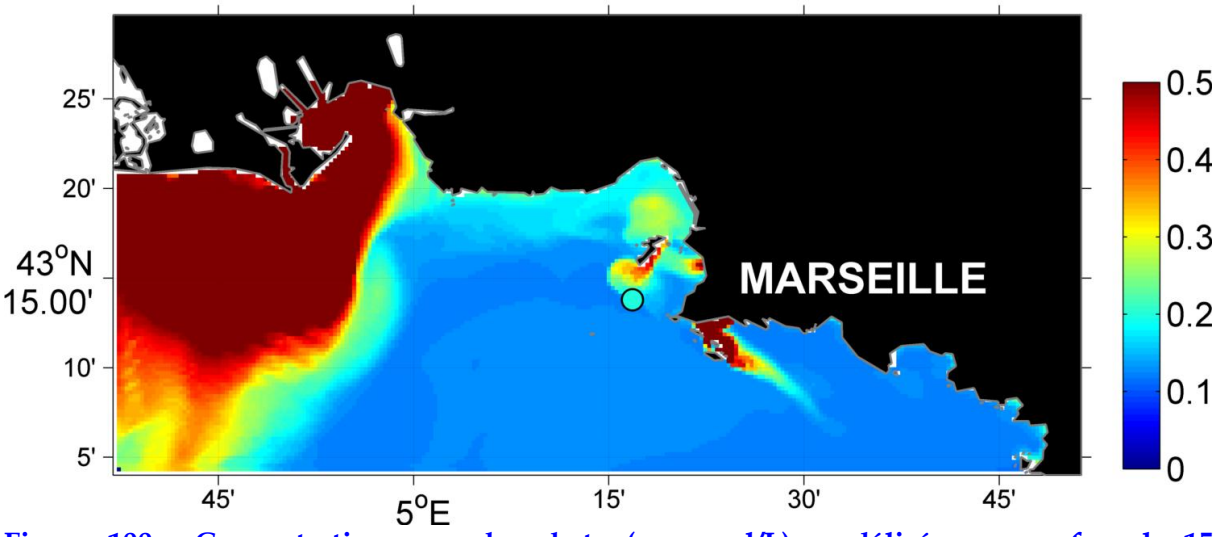


Figure 100 : Concentrations en phosphate (en µmol/L) modélisées en surface le 15 décembre 2008 à 12h et comparaison à la station SOMLIT (le cercle représente la station SOMLIT et la couleur à l'intérieur du cercle représente la valeur de la concentration mesurée à cette station).

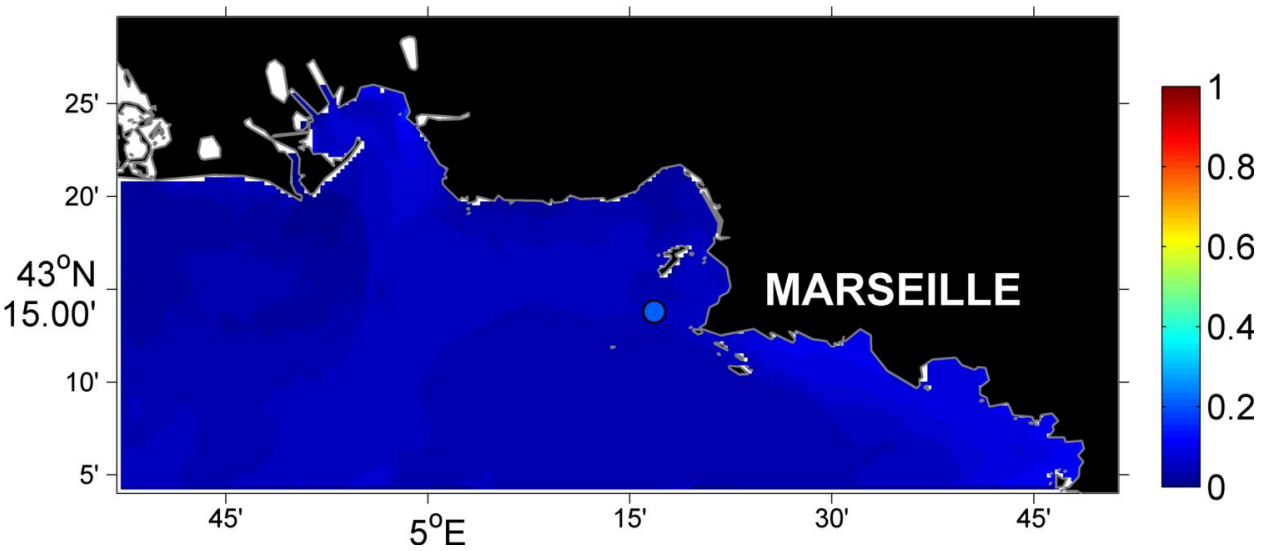


Figure 101 : Concentrations en chlorophylle_a (en µg/L) modélisées en surface le 15 décembre 2008 à 12h et comparaison à la station SOMLIT (le cercle représente la station SOMLIT et la couleur à l'intérieur du cercle représente la valeur de la concentration mesurée à cette station).

Le phytoplancton n'est donc pas limité par les nutriments, ce qui explique le fait qu'il n'y ait pas de production phytoplanctonique associée à ces rejets riches en nutriments (Figure 101). En revanche, on remarque de fortes concentrations en carbone organique particulaire (COP) à la station SOMLIT (Figure 102).

En conclusion, même si à cette période de l'année les forts apports des rivières urbaines lors des épisodes de pluies ont un impact faible sur le fonctionnement biogéochimique de la baie, des quantités importantes de matière organique particulaire sont rejetées dans la baie.

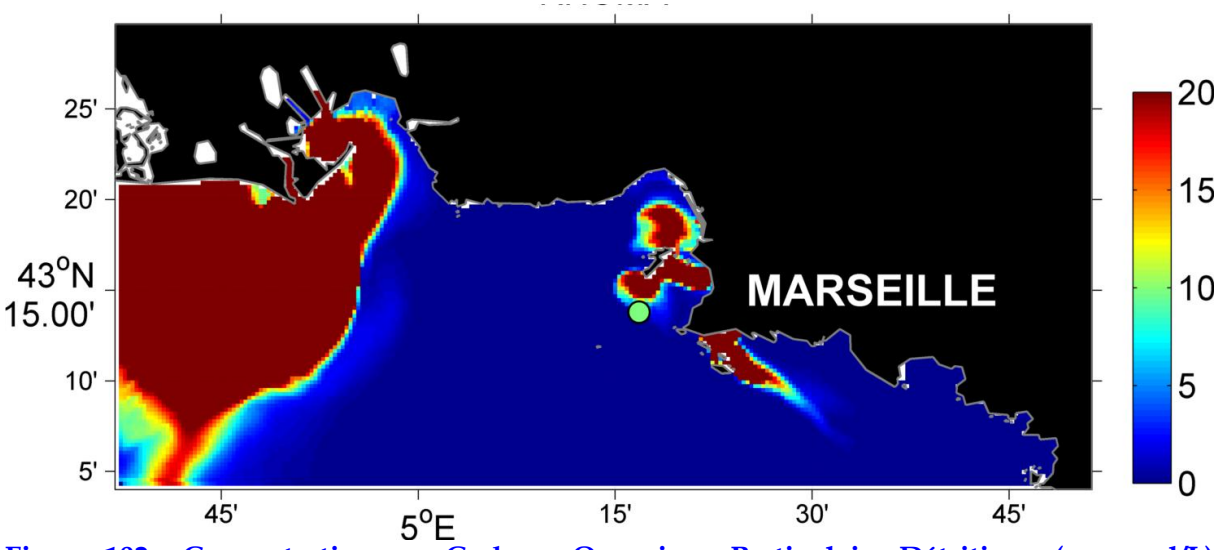


Figure 102 : Concentrations en Carbone Organique Particulaire Détritique (en µmol/L) modélisées en surface le 15 décembre 2008 à 12h et comparaison à la station SOMLIT (le cercle représente la station SOMLIT et la couleur à l'intérieur du cercle représente la valeur de la concentration mesurée à cette station).

d) Situation hydrosédimentaire (MARS3D-RHOMA)

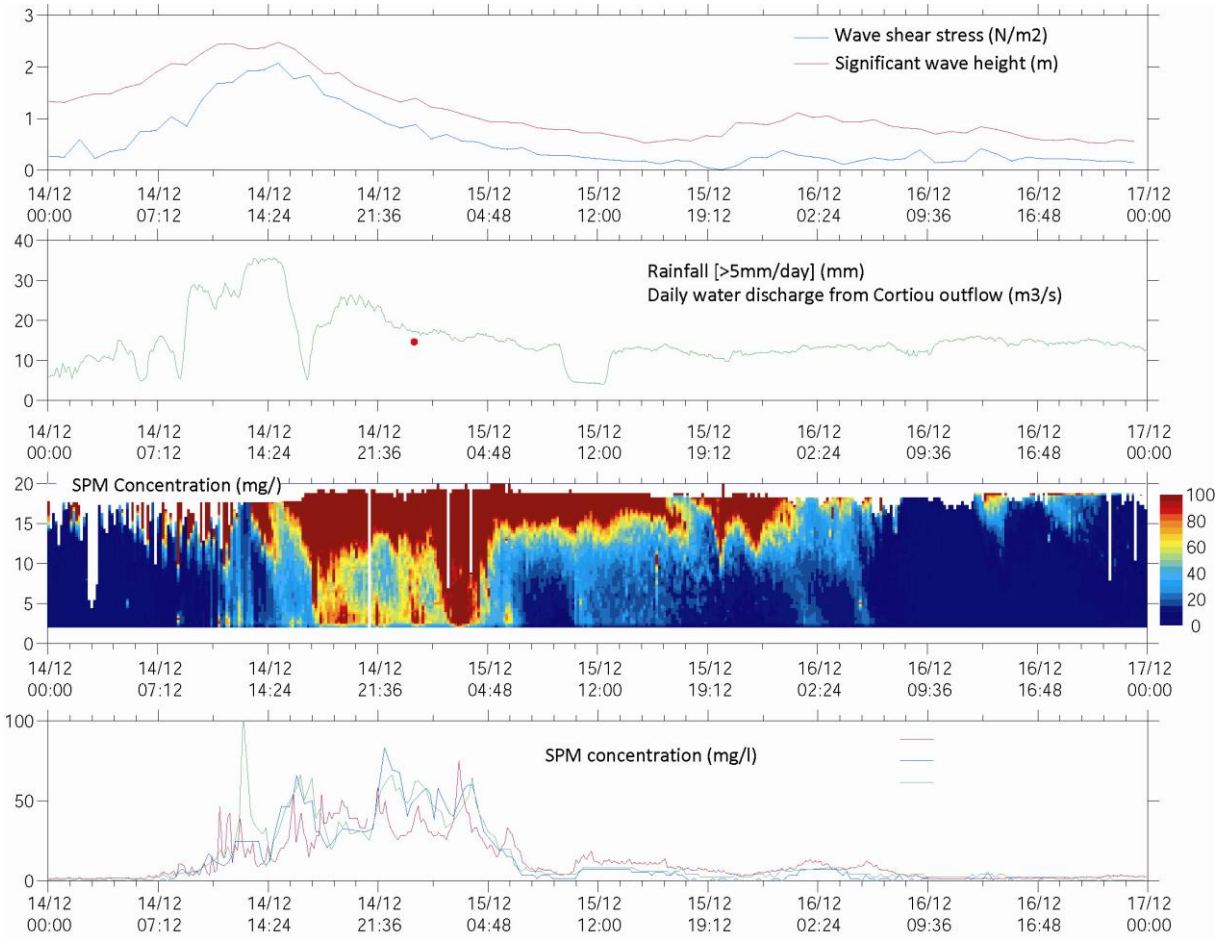


Figure 103 : Mesures hydrosédimentaires acquises par la station FRAME lors de l'épisode de pluie de fin décembre 2008: Vagues, apports liquide en provenance de Cortiou, matières en suspension estimée à partir de l'intensité acoustique rétrodiffusée, matière en suspension près du fond mesurée par les turbidimètres optiques.

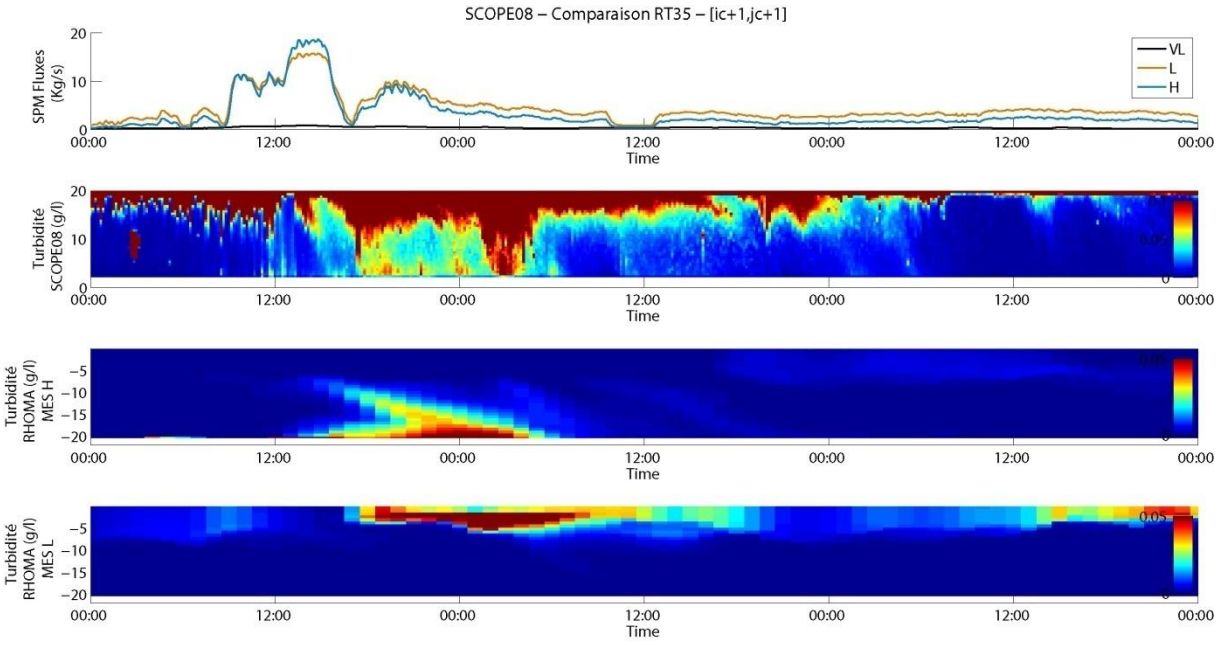


Figure 104 : Comparaison modèle mesure à proximité de la station FRAME lors de l'épisode de pluie de décembre 2008 (Flux de matières en suspension, matières en suspensions mesurées, et simulées par le modèle (MES H et MESL), concentration en g/L).

L'épisode de pluie de fin décembre 2008 a pu être particulièrement bien observé, la station de mesure autonome FRAME ayant été déployée sur le plateau des chèvres à l'ouest de l'émissaire de Cortiou pendant cette période. Les mesures ADCP et optiques montrent un apport rapide et significatif de matières en suspension sur quelques mètres d'épaisseurs, associé au panache d'eau turbide (>50mg/L) et dessalée crée par l'apport soudain d'eau continentale turbide (Figure 103). Outre le panache, des matières en suspension plus lourdes chutent dans la colonne d'eau et sédimentent.

Le modèle reproduit correctement ces deux processus, avec un panache soutenu par les MESL, avec des ordres de grandeurs similaires en termes d'épaisseur du panache et de concentration en matières en suspension (>50mg/L). Le transfert de MESH vers le fond est également simulé, avec toutefois des concentrations en MES potentiellement plus faibles (Figure 104). L'examen des concentrations en matières en suspension de surface montre une dynamique rapide du panache de surface, avec une extension loin vers le sud sous l'effet d'un fort mistral l'après midi du 14 décembre, panache qui se rabat vers l'ouest/nord ouest lorsque le vent passe de mistral à régime de sud-est (Figure 105). On peut également noter la forte turbidité en rade sud, induite par le by-pass des eaux en provenance du bassin versant dans l'ancien lit de l'Huveaune qui se déversent au milieu de la rade sud. Si une majorité des apports en MESL sortent rapidement de la zone de Marseille, une majorité de MESH en provenance de Cortiou se déposent i) au droit de l'émissaire mais également ii) à l'ouest des Iles et iii) de façon moins importante dans la partie ouest de la rade sud.

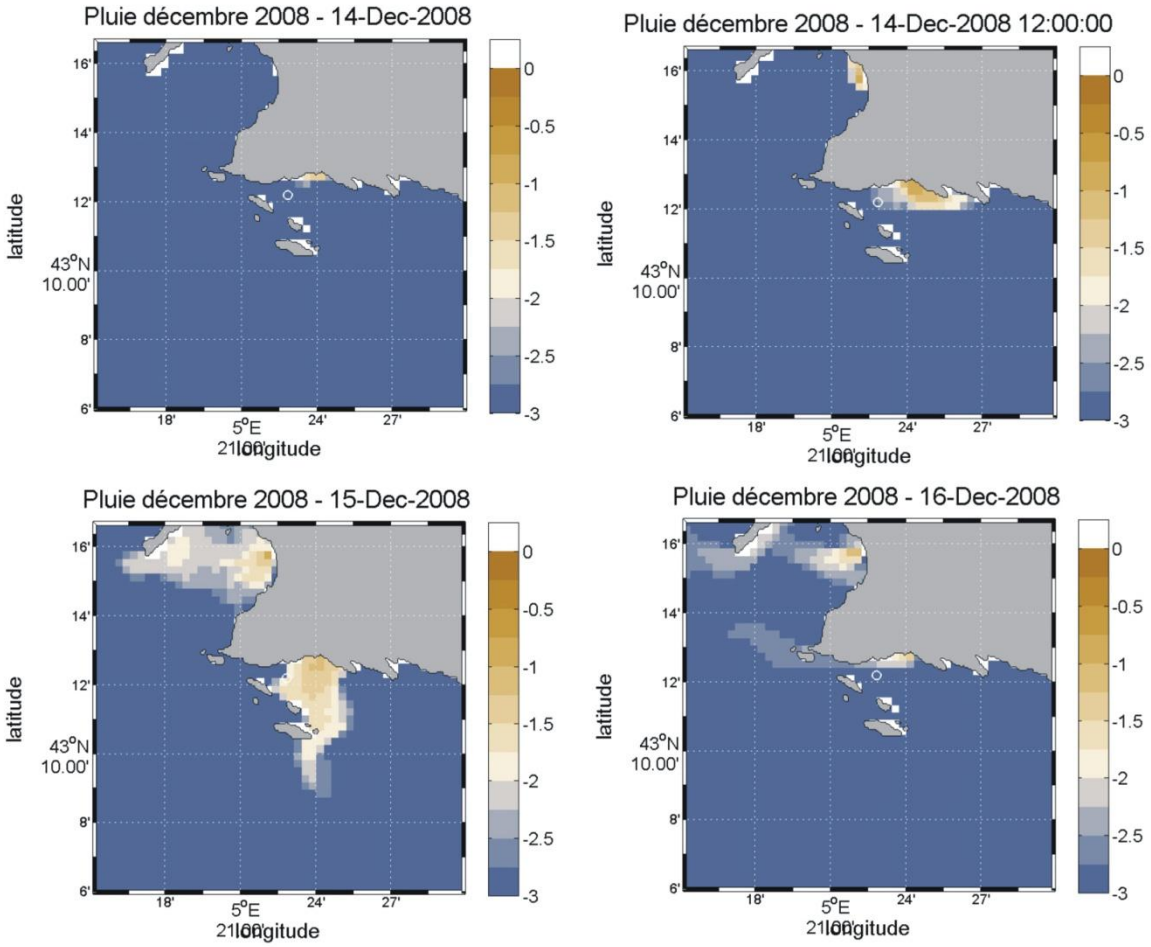


Figure 105 : Evolution de la concentration en matières en suspension de surface entre le 14 décembre minuit et le 16 décembre minuit. Concentration (g/l) en échelle logarithmique : -3 : 1mg/L, -2 : 10mg, -1 100mg/L).

e) Situation de la contamination en CB153

L'intensité des pluies pendant cet événement de décembre 2008 provoque un accroissement des débits apportés dans la rade de Marseille qui est beaucoup plus important que pendant l'événement « typique » d'octobre 2007 (voir le tracé des débits pendant ces deux périodes sur la Figure 7). L'Huveaune et le Jarret ont repris le lit du cours d'eau vers les plages du Prado du fait des très forts débits pendant la période. Le débit du Rhône est également largement augmenté. Par conséquent les panaches sont plus intenses et plus étendus (Figure 106). Les concentrations sont fortes, même en valeur moyenne sur la période (Figure 107). Les teneurs sur les particules sont caractéristiques des apports (Figure 108: autour de 10-30 ng/g, cf Tableau A1). Un épisode d'érosion vient s'ajouter aux apports le 14 décembre (Figure 109) à Cortiou et dans la rade sud surtout. Le modèle simule des dépôts de PCB en fin de période entre Cortiou et les îles ; en rade sud à la limite large entre les îles du Frioul et les Goudes ; et en rade nord (Figure 110). Comme dans la situation typique et du fait probablement de la saison, ces apports en éléments nutritifs et en matière organique détritique n'induisent pas une augmentation de la production primaire et n'ont donc pas de conséquence notable sur la spéciation du CB153 pendant cette période.

Dissous en surface (pg/L)

Particulaire en surface (pg/L)

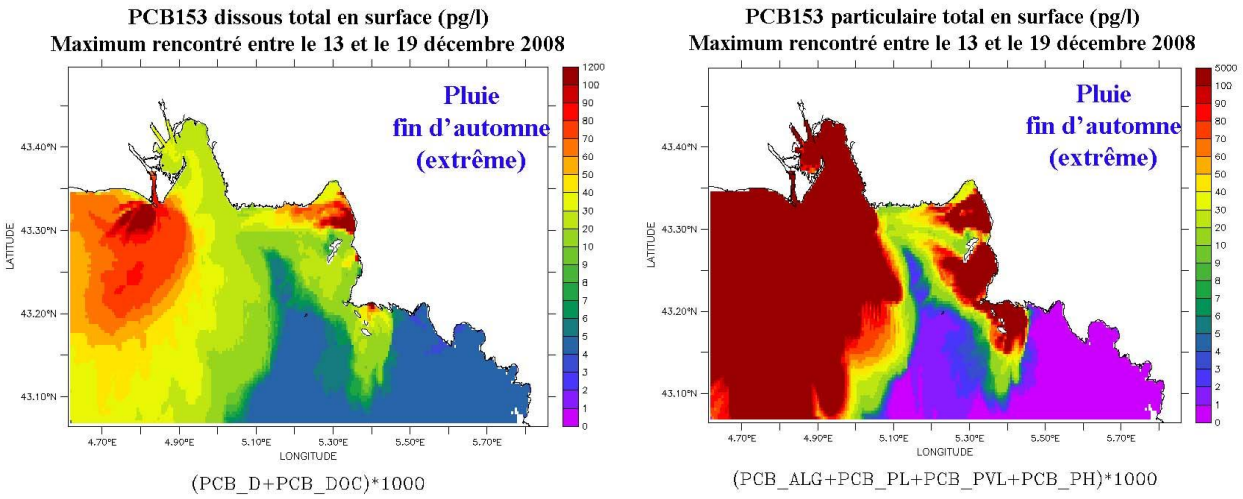


Figure 106 : Concentrations maximales rencontrées en surface (pg/L) entre le 13 et le 19 décembre 2008

Dissous en surface (pg/L)

Particulaire en surface (pg/L)

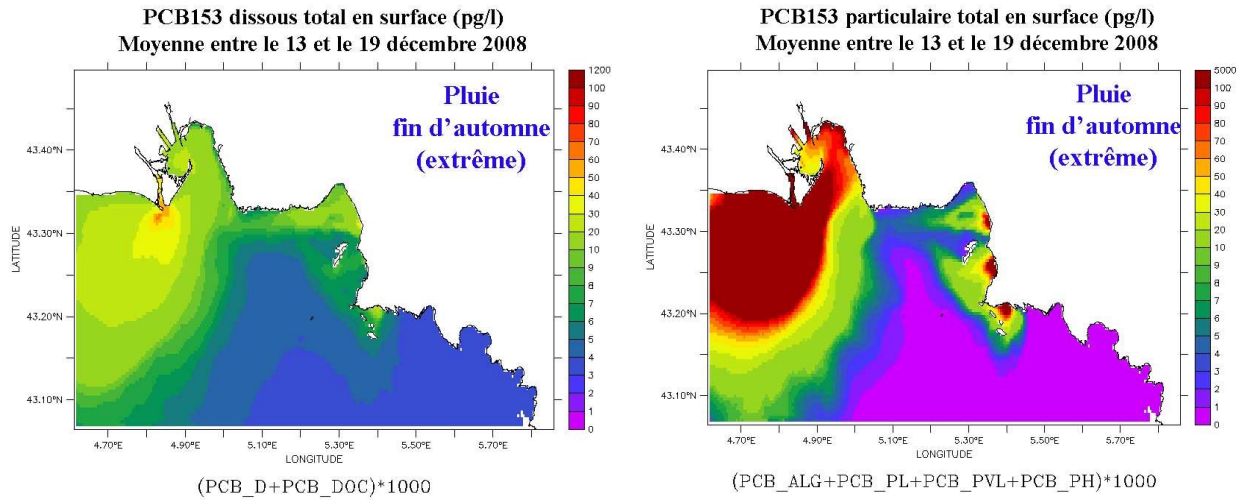


Figure 107 : Concentrations moyennes rencontrées en surface (pg/L) entre le 13 et le 19 décembre 2008

Particulaire en surface (ng/g)

Particulaire au fond (ng/g)

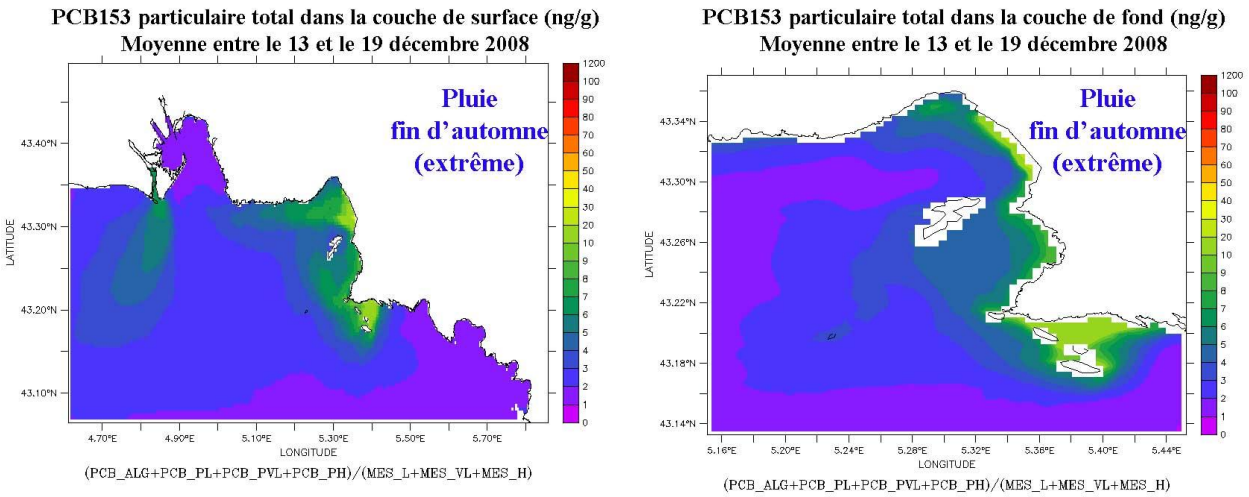


Figure 108 : Teneurs moyennes de CB153 particulaires (ng/g) rencontrées au fond et en surface entre 13 et 19 décembre 2008

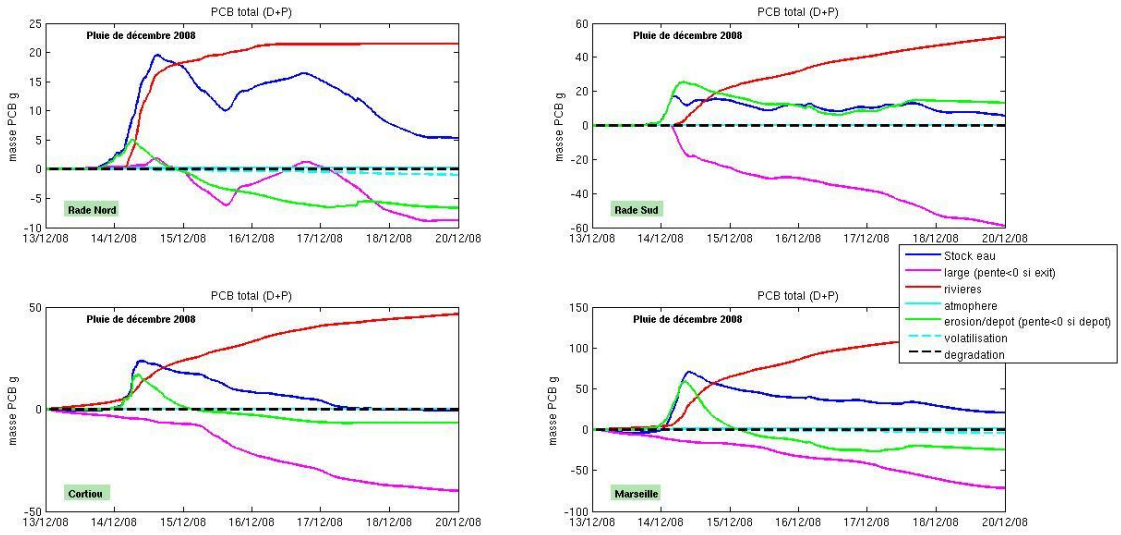


Figure 109 : Variation des stocks de CB153 total dans la colonne d'eau pendant la période et dans chaque zone (décrite sur la Figure 9), associée aux variations de concentrations dues à chaque processus « large » : entrée/sortie aux limites ; « rivières » : apports à la côte ; « atmosphère » : dépôts secs et pluie ; « érosion/dépôt » ; « volatilisation » et « dégradation ». (si pente >0 = variation positive de la concentration= apport de contaminant, inversement si pente <0 = perte de contaminant

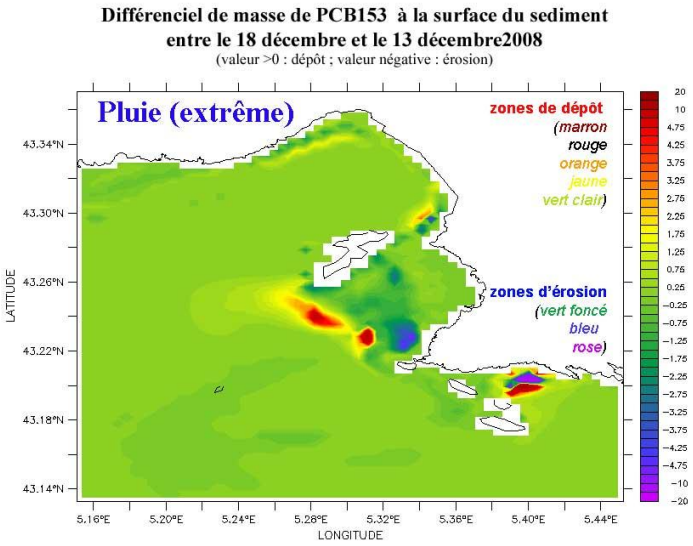


Figure 110 : Zones de dépôt/érosion après la période de l'événement de Pluie extrême

INTRUSION DU PANACHE DU RHONE

5.5. SITUATIONS D'INTRUSION DU PANACHE DU RHONE

5.5.1. Situation typique intrusion du panache vers l'est: 1er Octobre 2007

a) Situation hydrodynamique et biogéochimique

Une intrusion du panache du Rhône se produit le 1er octobre 2007 alors que le débit du Rhône est plutôt faible (Figure 111).

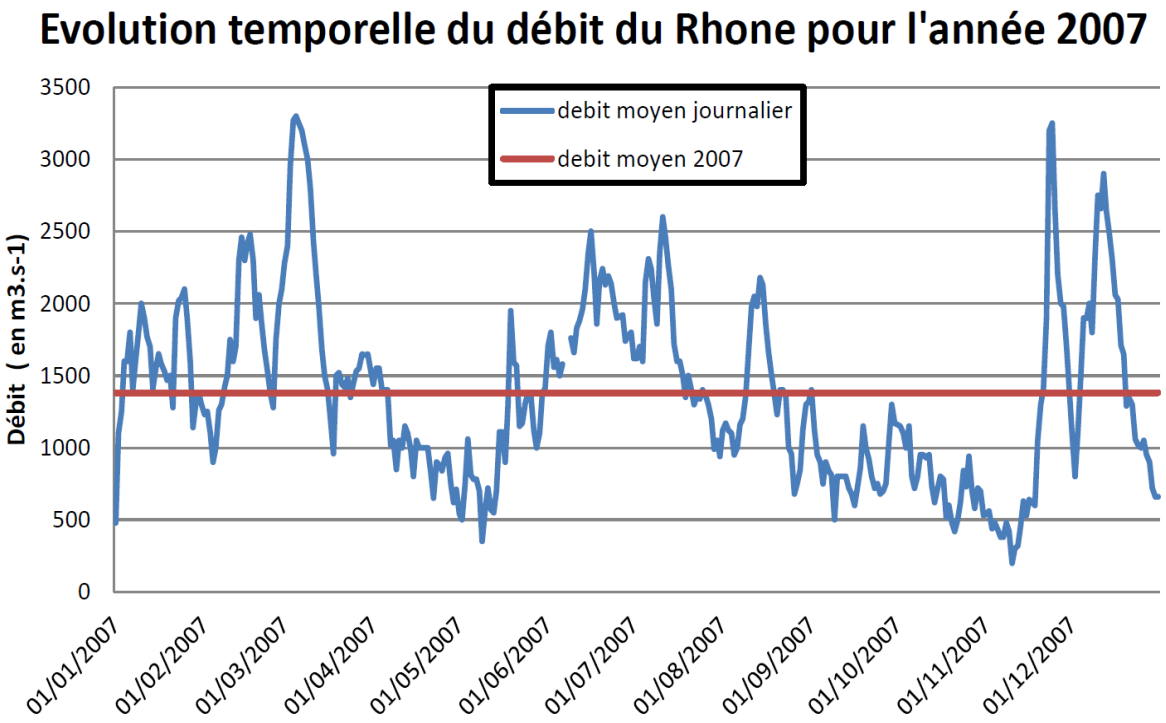


Figure 111 : Débits journaliers du Rhône pour l'année 2007 (en bleu) et débit moyen annuel (en rouge).

Le 27 septembre le panache du Rhône s'allonge vers le sud et s'étend vers l'est sous l'effet d'un fort vent de mistral. Du 28 au 29 septembre, les vents sont de faible intensité, une circulation s'installe favorisant le décalage vers l'est des eaux en provenance du Rhône. Le 30 septembre et le 1er octobre, des forts vents de sud-est rabattent le panache à la côte, des eaux diluées du Rhône sont présentent en rade nord et un filament s'étend sur un axe nord-sud (Figure 112 et Figure 113).
On remarque une augmentation en chlorophylle_a le 1er octobre dans la zone du filament d'eaux diluées du Rhône, à la fois sur les images satellites et dans le modèle.

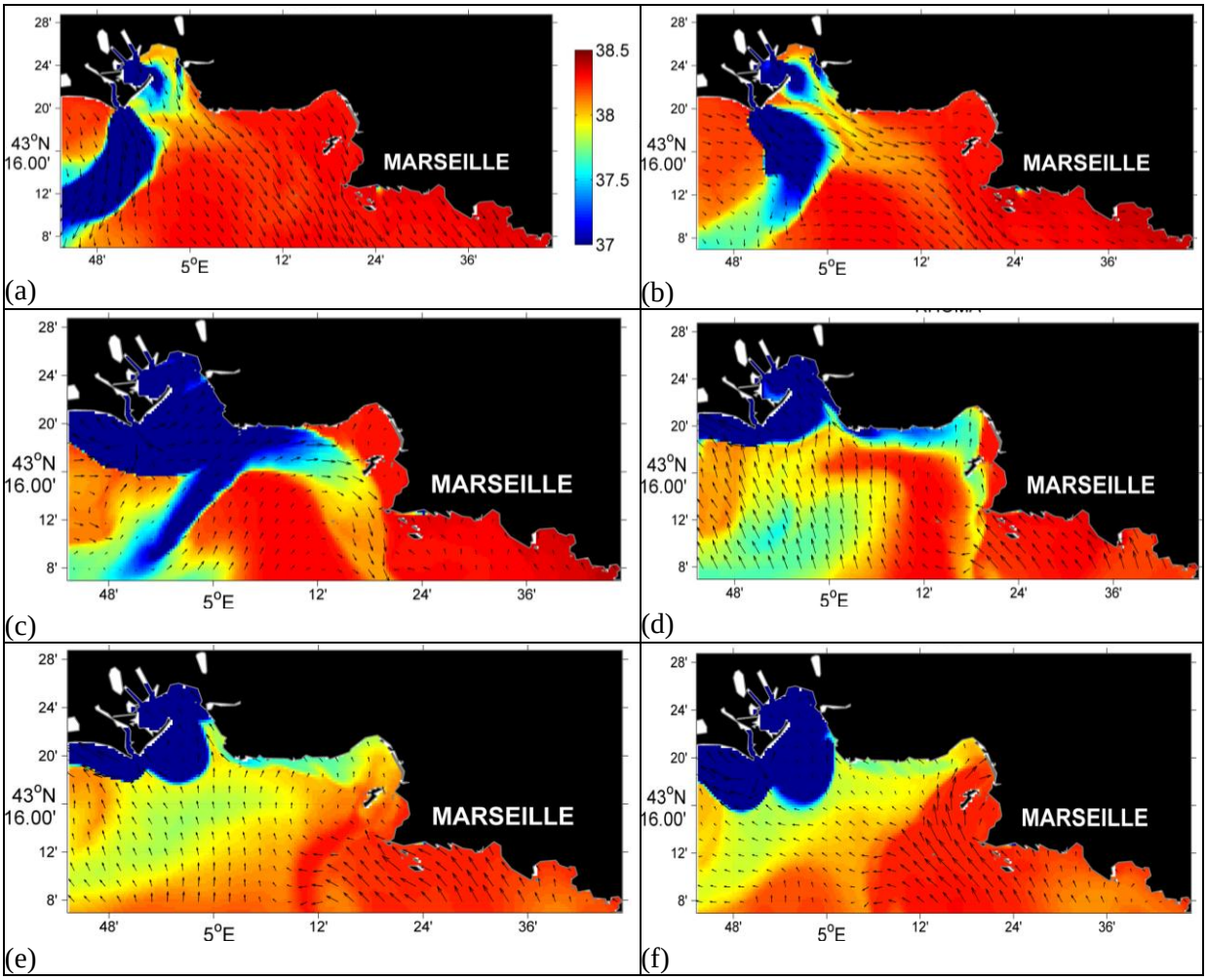


Figure 112 : Evolution de la salinité et des courants de surface le 27 septembre 2007(a), le 28 septembre 2007 (b) , le 29 septembre 2007 (c), le 30 septembre 2007 (d) , le 1 octobre 2007 (e) et le 2 octobre 2007 (f).

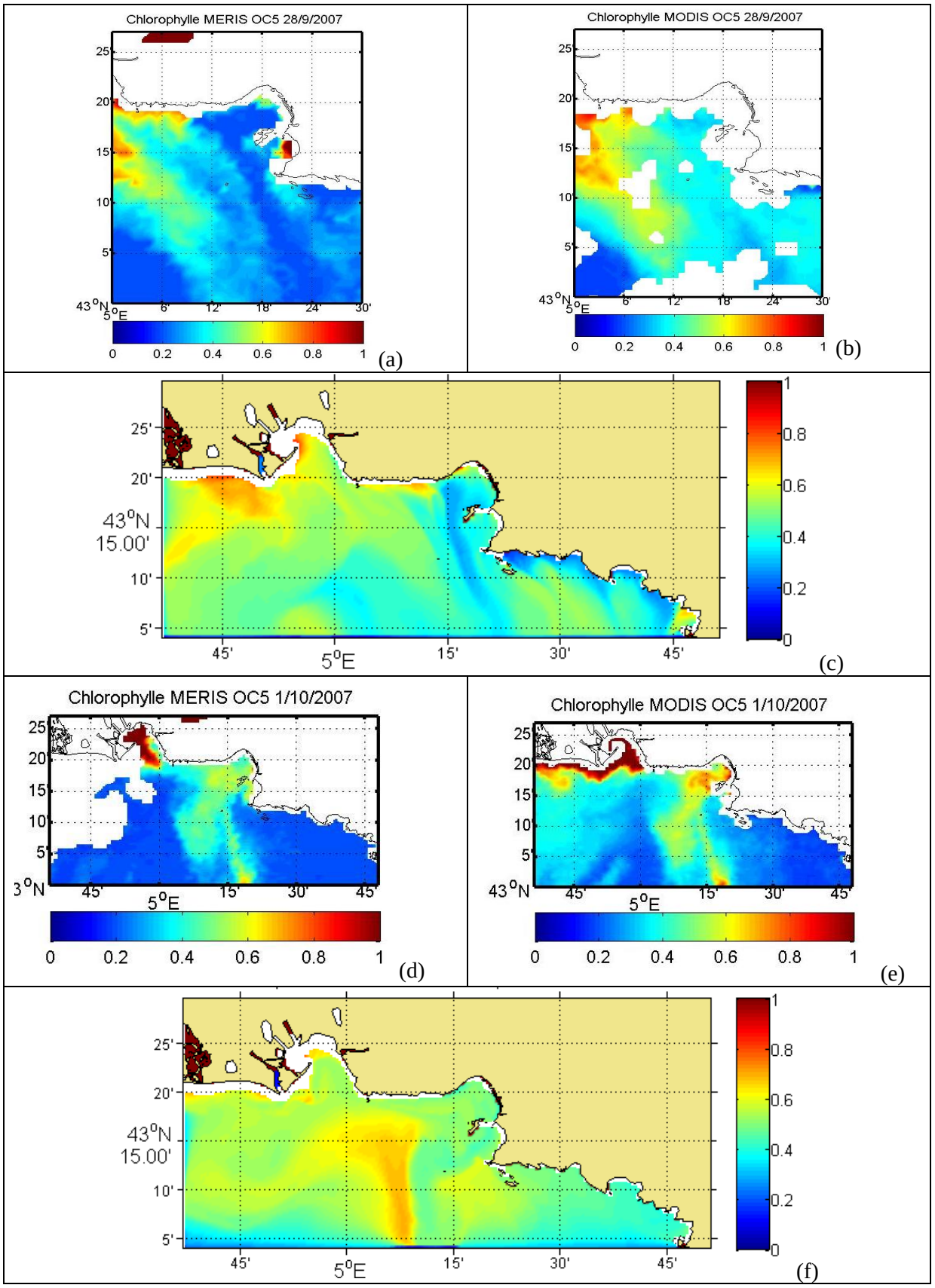


Figure 113 : Situation initiale le 28 septembre 2007 sur les images satellites MERIS (a) et MODIS (b) ainsi que la carte de surface de chlorophylle_a du modèle en µg/L (c). Situation pendant l'intrusion du Rhône du 1er octobre 2007 sur les images satellites MERIS (d) et MODIS (e) et la carte de surface de chlorophylle_a du modèle en µg/L (f).

b) Situation hydrosédimentaire

Une légère augmentation de la turbidité en rade nord est observée pour la période étudiée (Figure 114), qui semble correspondre à l'intrusion des eaux du Rhône sur les 30 premiers mètres sous la surface (Figure 115). Cette intrusion reste minime, du fait du faible débit du Rhône à cette période, et ne se traduit pas par un dépôt très significatif.

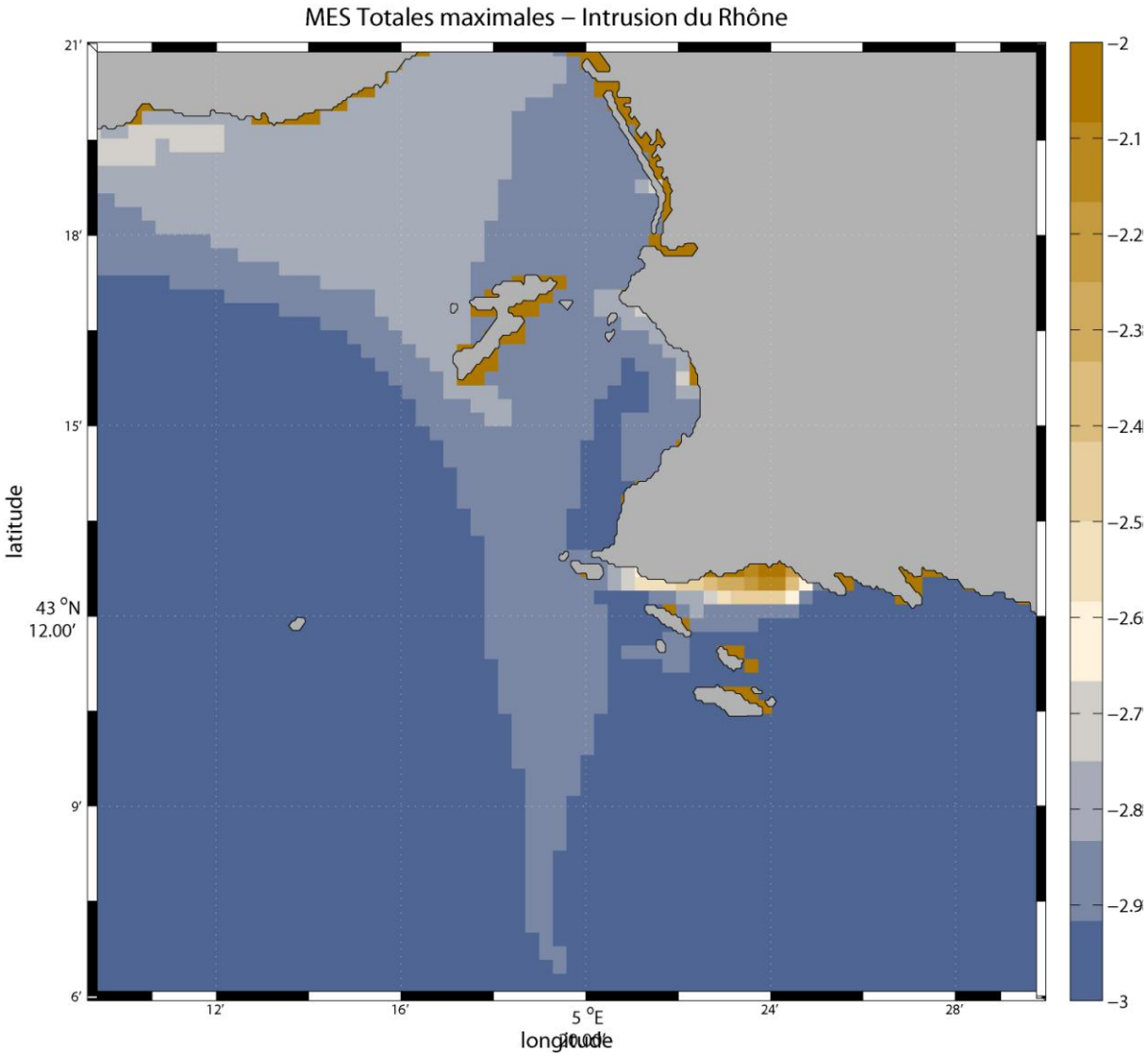


Figure 114 : Distribution spatiale des concentration en MES maximales (concentration en g/L, échelle logarithmique)

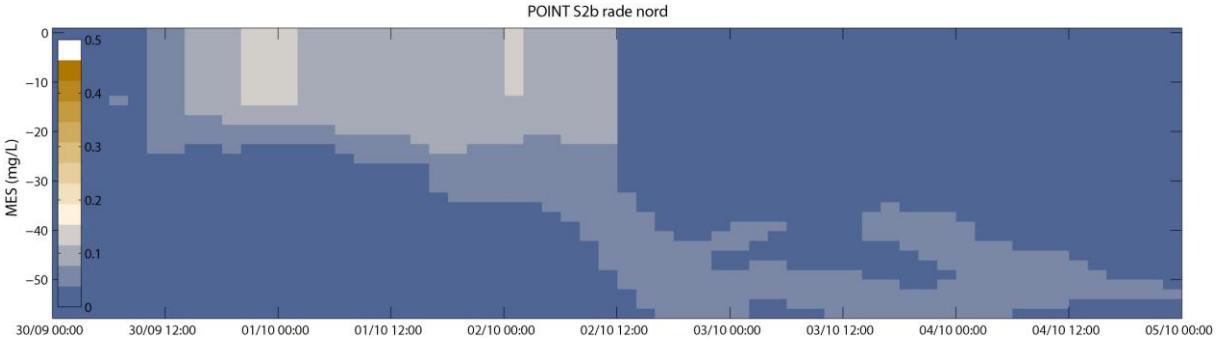


Figure 115 : Structure verticale de la colonne d'eau au point Rade nord entre le 30 septembre et le 6 octobre (concentrations en mg/l, échelle logarithmique)

c) Situation de la contamination en CB153

Quelque soit son débit, le flux apporté par le Rhône est caractérisé dans le modèle par des teneurs constantes en PCB sur les particules. Le contaminant a tendance à se désorber au fur et à mesure que les particules se dispersent dans la masse d'eau. Pendant la période du 1er octobre 2007, l'intrusion du Rhône dans la rade de Marseille a lieu surtout dans la rade nord et apporte des concentrations volumétriques relativement élevées qui ne sont pas accompagnées par de fortes teneurs dans les particules (Figure 116 et Figure 117). L'accroissement des teneurs en CB153 particulaire à l'ouest et à l'est du panache sont plutôt liées à des concentrations en COP détritique plus fortes. Les stocks de CB153 dans chacune des zones (Figure 118) augmentent légèrement, sauf dans la zone de Cortiou (après une décroissance due à une période de Mistral fin septembre ; voir événement de Mistral typique : §5.1.1.6). Cette intrusion n'est pas accompagnée d'un dépôt dans la rade. Un épisode d'érosion a lieu de façon concomitante à Cortiou.

(a) : Dissous en surface (pg/L) (b): Particulaire en surface (pg/L)

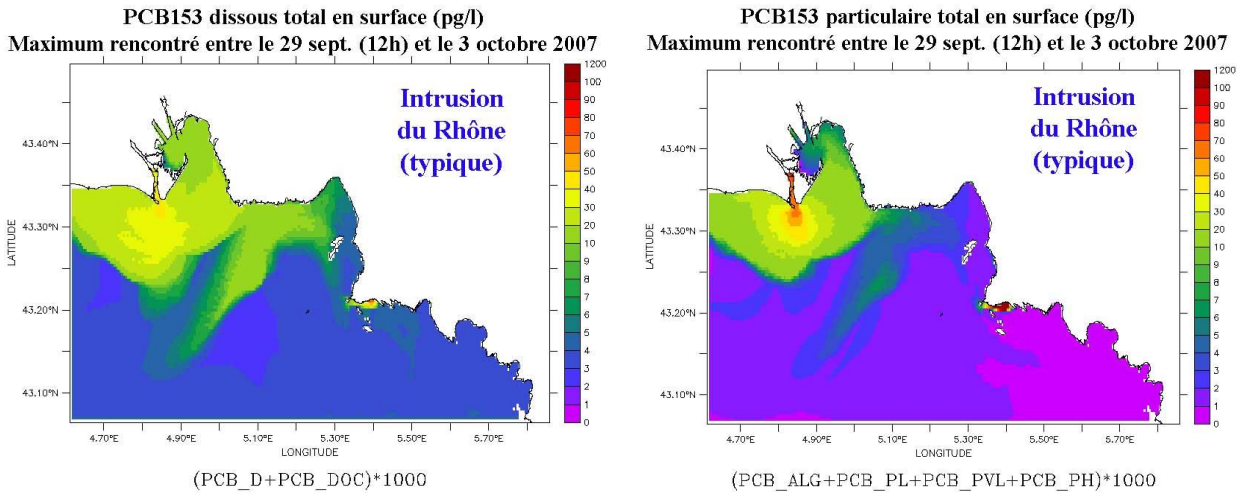


Figure 116 : Concentrations maximales rencontrées en surface (pg/L) entre le 29 septembre et le 3 octobre 2007

Particulaire en surface (ng/g) Particulaire au fond (ng/g)

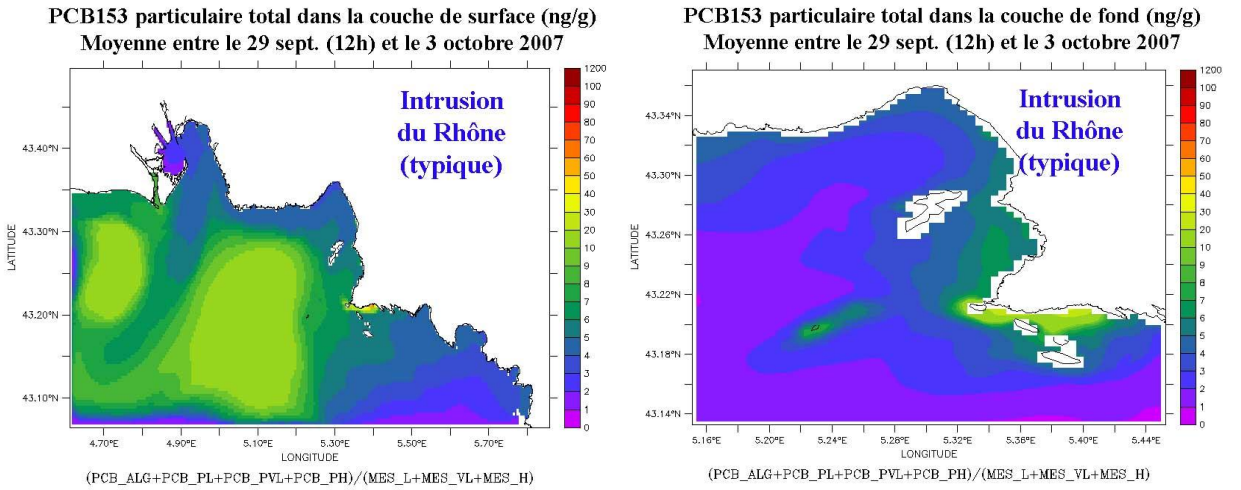


Figure 117 : Teneurs moyennes de CB153 particulaires (ng/g) rencontrées au fond et en surface entre le 29 septembre et le 3 octobre 2007

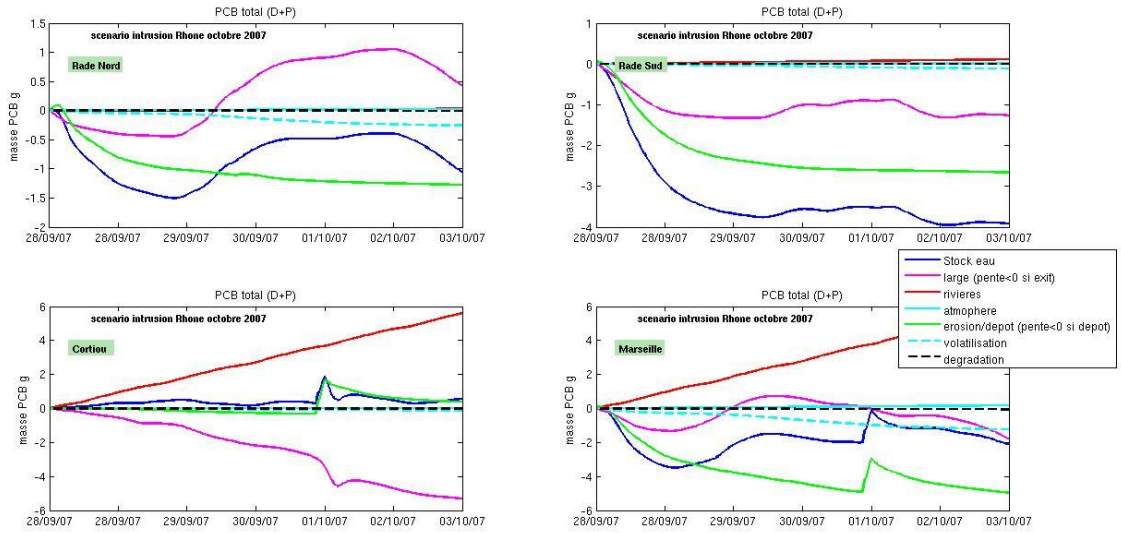


Figure 118 : Variation des stocks de CB153 total dans la colonne d'eau pendant la période et dans chaque zone (décrite sur la Figure 9), associée aux variations de concentrations dues à chaque processus « large » : entrée/sortie aux limites ; « rivières » : apports à la côte ; « atmosphère » : dépôts secs et pluie ; « érosion/dépôt » ; « volatilisation » et « dégradation ». (si pente >0 = variation positive de la concentration= apport de contaminant, inversement si pente <0 = perte de contaminant

5.5.2. Situation extrême d'Intrusion du panache du Rhône vers l'est: Juin 2008

a) Situation météorologique

Le 17 juin, anomalie de tropopause sur la péninsule ibérique. A l'avant de cette anomalie, régime de sud-ouest à 5000 m sur la partie sud de la France et le bassin méditerranéen. En cours de matinée, le minimum de vorticité potentielle (PV) associé à l'anomalie se déplace vers l'est et pénètre sur le Languedoc-Roussillon et le golfe du Lion. Il traverse la région PACA en journée du 17 juin et s'évacue sur l'Italie dans la nuit du 17 au 18 juin. Le jet alors positionné dans la partie sud de l'anomalie est progressivement rejetée vers la Corse. Dans la partie ouest du noyau de vorticité potentielle, le vent s'oriente nord-ouest avec une advection d'air sec en moyenne altitude.
A 850hPa, à l'avant du minimum d'altitude, minimum relatif sur le Languedoc-Roussillon évoluant sur la PACA en journée du 17 juin. Le vent en surface est de composante sud-est faible sur les trois départements côtiers de la PACA puis s'oriente ouest en journée. Le vent d'ouest se maintient ensuite sur la période en restant faible.

A méso-échelle, le vent d'abord orienté sud-est sur les Bouches du Rhône devient ouest faible. Le mistral s'établit dans la nuit du 17 au 18 juin mais son extension spatiale reste limitée sur l'ouest du département débordant jusqu'à Ensues-La-Redonne. Il souffle jusqu'à 24/26nds en rafale. Il faiblit dans la matinée du 18 juin puis progressivement bascule au secteur sud-ouest sur Camargue devenant

ouest de Port Saint Louis du Rhône à la Ciotat tout en restant faible 10/15nds. Dans la nuit du 18 au 19 juin, le vent d'ouest devient variable faible et on retrouve alors des brises de terre avec un écoulement du continent vers la mer.
En milieu de matinée, le vent synoptique vient se composer avec la brise marine orientant le vent au sud-ouest à l'ouest de l'Etang de Berre, ouest-sud-ouest ailleurs. On retrouve alors durant la période nocturne une bascule du vent au secteur nord-ouest sur le continent (régime de brise thermique).
En journée, le vent s'oriente de nouveau au sud-ouest sur la côte ouest des Bouches du Rhône et s'oriente à l'ouest-sud-ouest sur la région Marseillaise.
Cette alternance dans la direction du vent est liée à la mise en place des régimes de brise. En journée, le vent synoptique vient se composer avec la brise de mer permettant d'avoir des directions plutôt dans les 240/260 degrés et en période nocturne les vents sont relativement faibles de composantes dominante nord-ouest près des côtes.
Cette situation perdure jusqu'au 23 juin.

b) Situation hydrodynamique (MARS3D-RHOMA)

En juin 2008, le débit du Rhône atteint 4160 m3/s (Figure 119) et le panache couvre alors une grande partie du domaine RHOMA et il est susceptible de gagner la baie de Marseille (Figure 120).

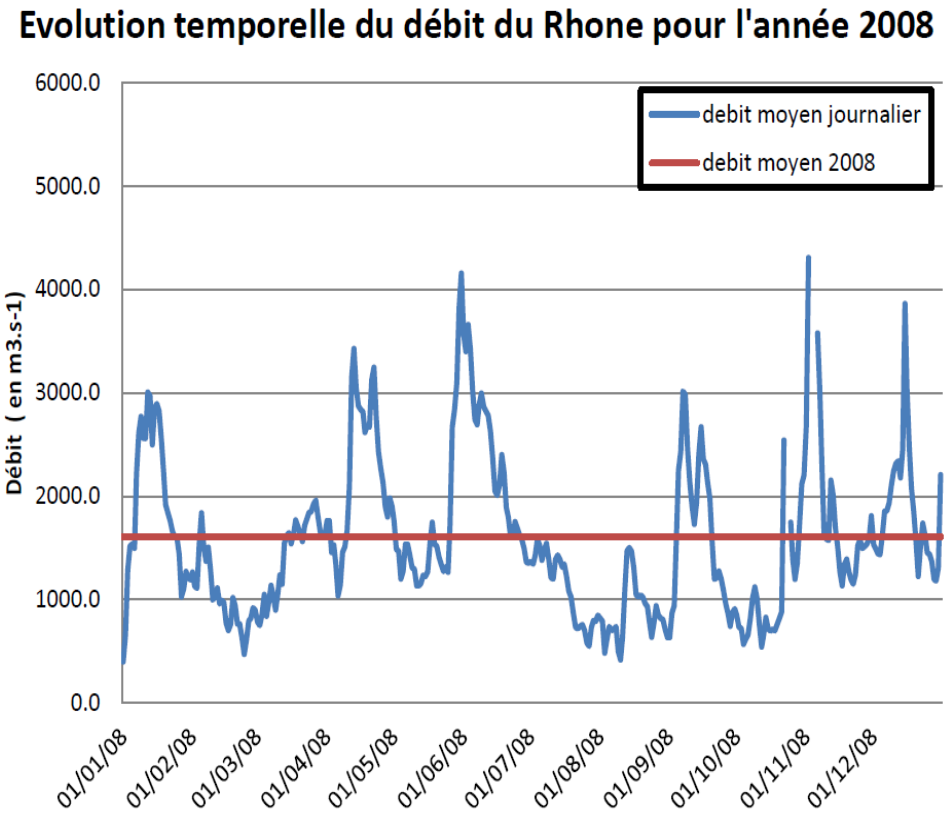


Figure 119 : Débits journaliers du Rhône pour l'année 2008 (en bleu) et débit moyen annuel (en rouge).

Le Rhône étant une source importante de nutriments, l'extension du panache est susceptible de correspondre à des zones d'importantes concentrations en Chlorophylle_a. La Figure 120 montre des comparaisons entre l'extension du panache modélisé, correspondant à des salinités inférieures à 36.5, et son extension observée estimée à l'aide de la chlorophylle_a issue d'images satellites Modis pour 3 dates: les 17, 19 et 23 juin 2008. L'extension du panache dans les sorties de modèle correspond à l'extension des maximum de chlorophylle_a satellite. Les eaux diluées du Rhône sont présentes plusieurs jours dans la baie de Marseille (Figure 120a, c et d), pour des conditions de vent différentes. Le 17, après deux jours de vent de sud qui poussent le panache vers la côte, les vents de nord-ouest

dans la partie ouest tendent à le faire s'écouler vers le large, tandis que dans la partie est les vents d'ouest poussent les eaux diluées du Rhône vers l'est, ce qui aboutit à deux bourrelets d'eau dessalée (Figure 120 a et b). Le 18, sous l'action du vent d'ouest, l'eau douce accumulée sur le plateau est advectée vers l'est et des eaux dessalées gagnent la baie de Marseille. Le 19 juin (Figure 120 c et d), les vents de sud-ouest poussent les eaux dessalées vers la baie, ce qui est renforcé par le coup de vent d'ouest du 20 juin. Le 23 juin (Figure 120e et f), après un jour de vent de sud-est, les eaux diluées en provenance du Rhône sont toujours présentes sur tout le domaine RHOMA.

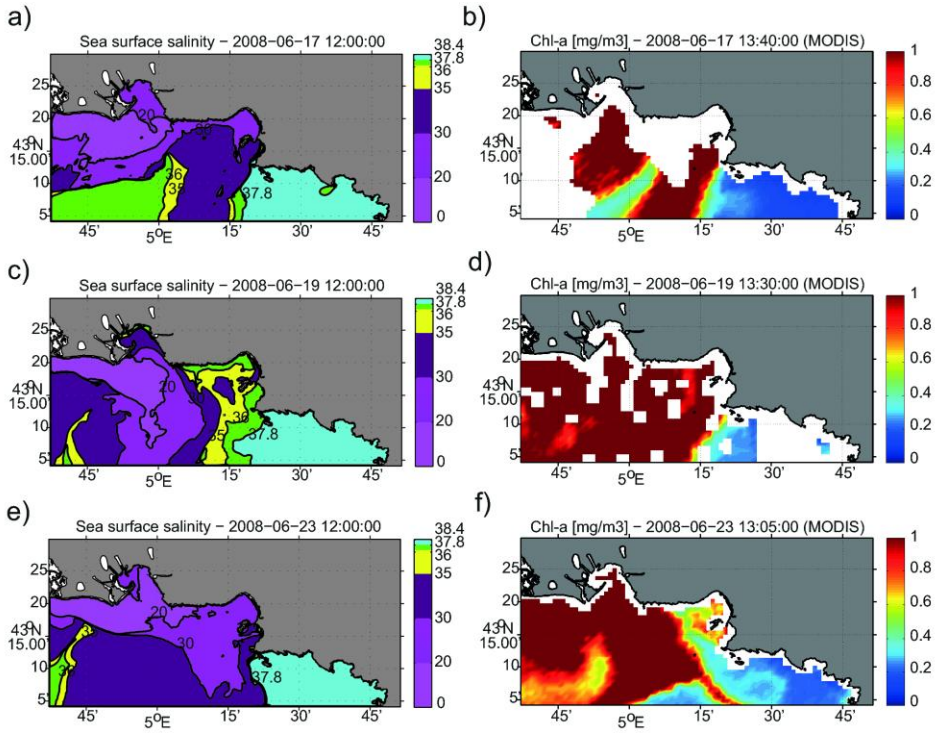


Figure 120 : Evolution du panache du Rhône vue à partir des salinités de surface modélisées (configuration RHOMA, à gauche) et des cartes de Chlorophylle_a (en µg/L) MODIS (à droite) pour différentes dates: 17 juin 2008 (a), 19 juin 2008 (b) et 23 juin 2008 (d'après Pairaud et al., 2011).

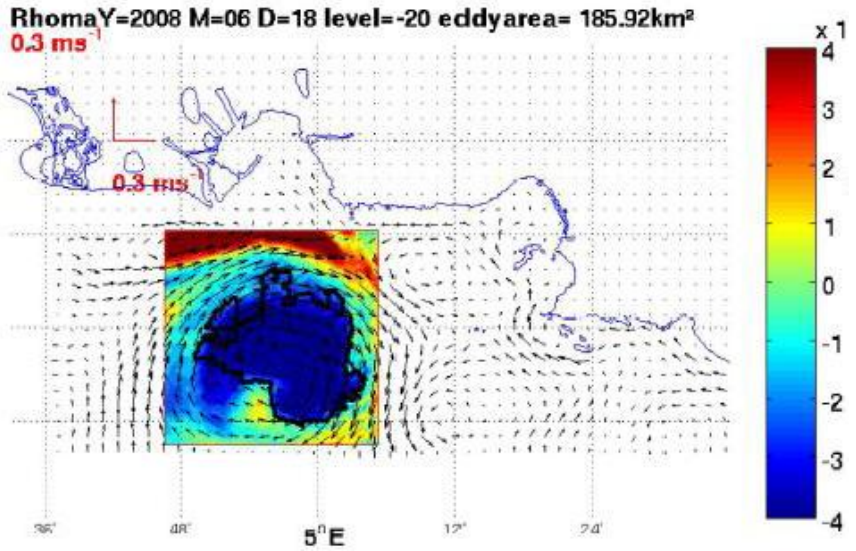


Figure 121 : Tourbillon anticyclonique détecté dans les champs de courants du modèle hydrodynamique le 18 juin 2008 (d'après Boiron, 2011)

La persistance de la présence des eaux du Rhône pourrait avoir un lien avec la présence d'un tourbillon anticyclonique déjà mesuré par radar HF par Schaeffer et al. (2011) et ici détecté dans les résultats du modèle hydrodynamique le 18 juin 2008 grâce à la méthode des ondelettes (Figure 121).

.

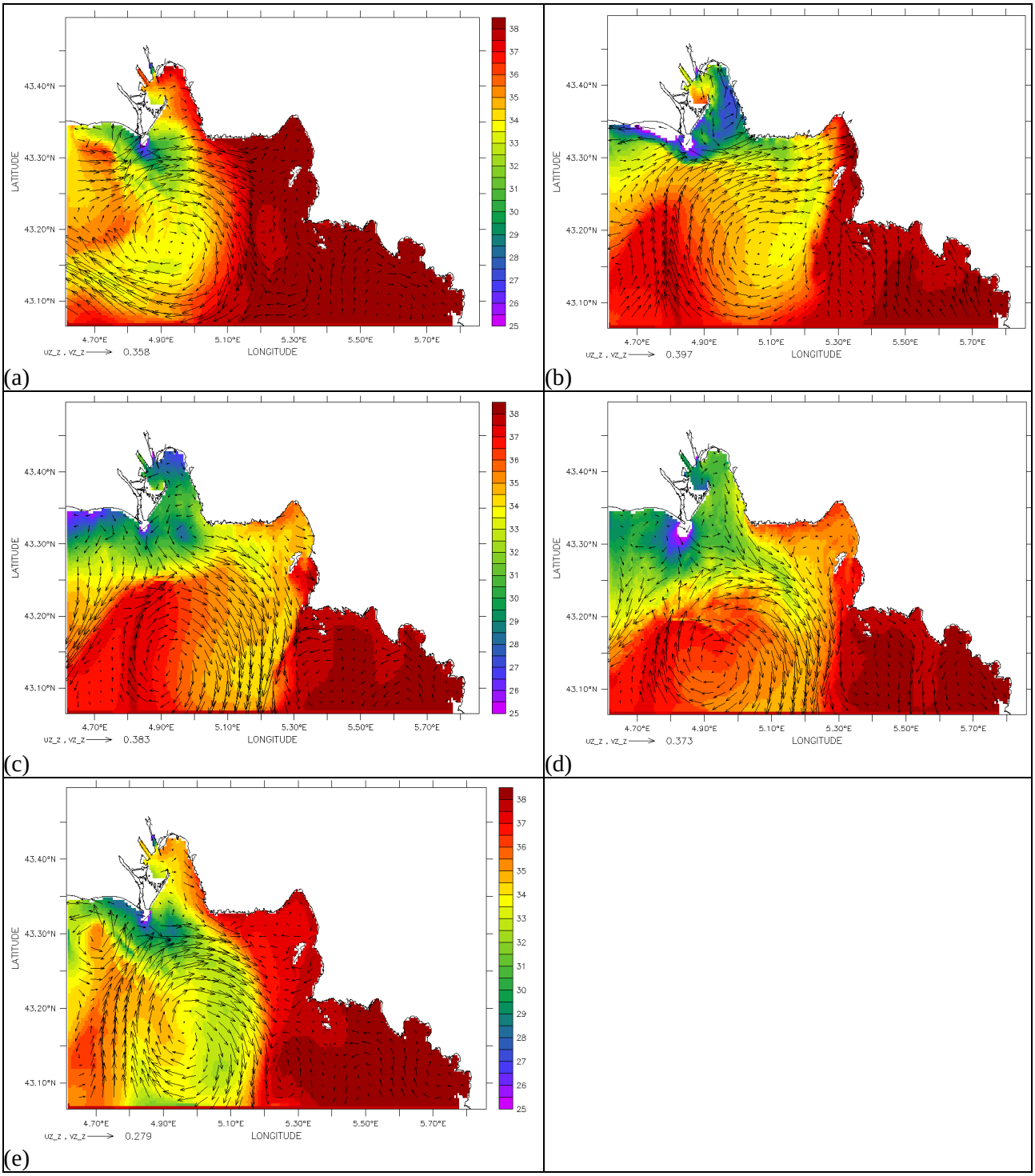


Figure 122: Cartes de salinité et de champs de courant à 2m le 15 juin 2008 à 6h (a), le 16 juin 2008 à 18h (b), le 17 juin 2008 à 6h (c), le 17 juin 2008 à 18h (d), le 20 juin 2008 à 6h (e).

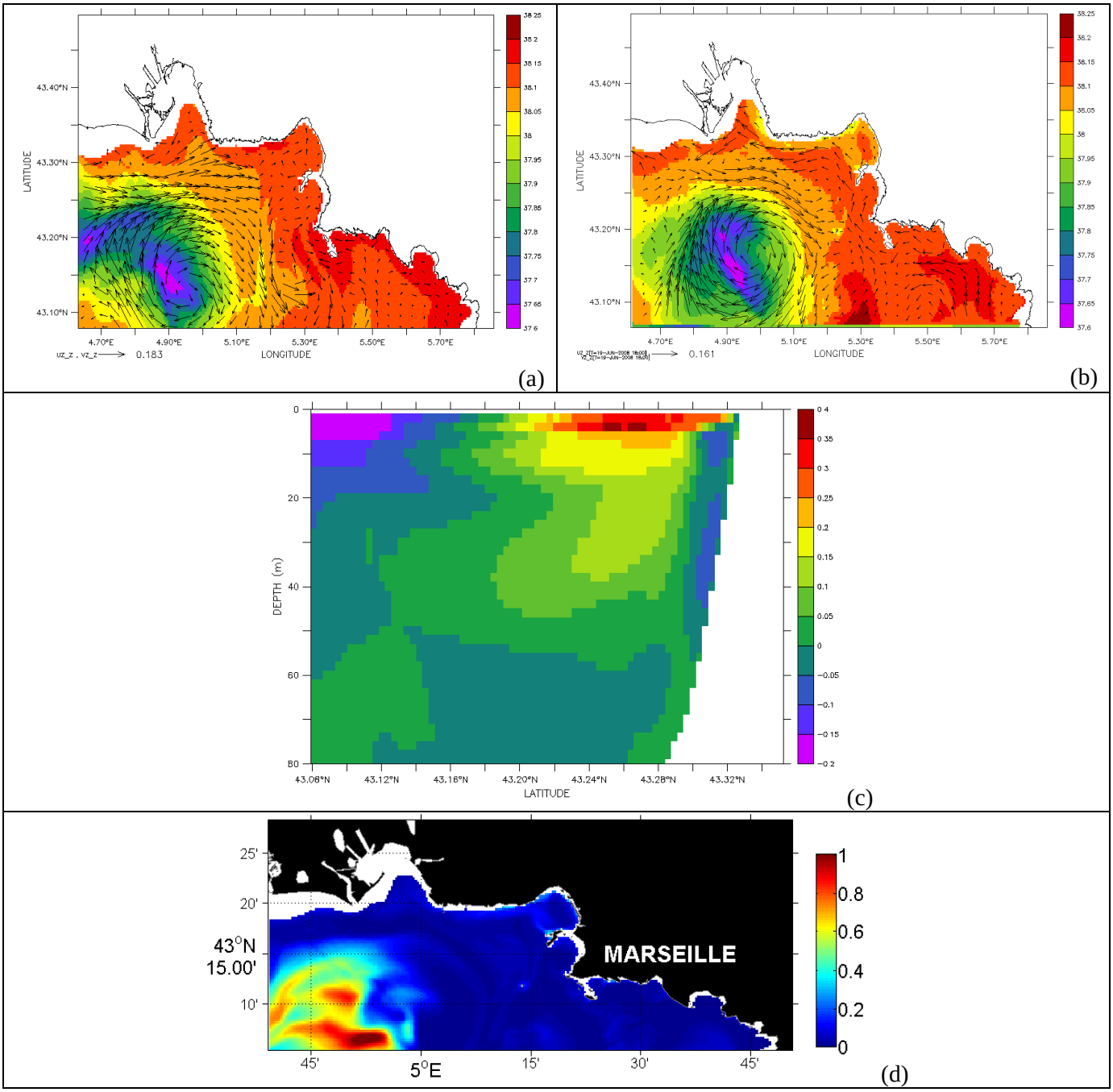


Figure 123 : Carte de salinité et de champs de courant à 20 m le 15 juin à 18h (a), le 20 juin à 18h (b), Coupe selon la longitude 5.1°E de vitesse zonale (en m/s) le 16 juin 2008 à 18h (c), carte à 20 m le 20 juin à 18h de concentration en nitrates (en µmol/L) (d).

Ce type de structure dynamique peut contribuer d'une façon significative au mélange horizontal et donc à la redistribution dans le domaine d'étude des eaux du panache du Rhône. Des tourbillons anticycloniques similaires avaient été aussi modélisés et observés par radar HF en juin 2005 et 2006 par Schaeffer et al. (2011). Ces derniers suggèrent deux mécanismes de formation. Un premier mécanisme est lié au forçage dû au vent de Mistral et à la topographie; un deuxième est lié à un fort vent du sud et à un pulse de flottabilité crée par les eaux du Rhône. Dans le cas du tourbillon 2008, le vent n'étant pas particulièrement intense, il est difficile de trancher entre ces deux possibles mécanismes, qui semblent agir en même temps.

On remarque la présence de ce tourbillon pendant une longe période (Figure 122a à e). Les courants en bordure du tourbillon semblent diriger les eaux en direction de la baie de Marseille, ce qui conduit à une forte intrusion d'eaux en provenance du Rhône le 17 juin (Figure 122c). D'après la coupe longitudinale des vitesses zonales passant par le centre du tourbillon (Figure 123c), on remarque que le tourbillon est présent jusqu'à 20-30 mètres. Un downwelling au centre du tourbillon anticyclonique semble piéger et faire couler les eaux dessalées du Rhône. En effet, on remarque des eaux dessalées au cœur du tourbillon à 20m de profondeur (Figure 123a et b). Les eaux du Rhône étant riches en nutriments, on a également au centre du tourbillon un enrichissement en nitrate (Figure 123d) qui conduit à un développement de phytoplancton et donc à de fortes concentrations en chlorophylle_a (Figure 123e).

Ce tourbillon semble donc interagir fortement avec les masses d'eaux en provenance du Rhône à la fois en les transportant en direction de la baie de Marseille, mais aussi en les piégeant et les exportant en profondeur.

c) Situation biogéochimique (ECO3M-MASSILIA)

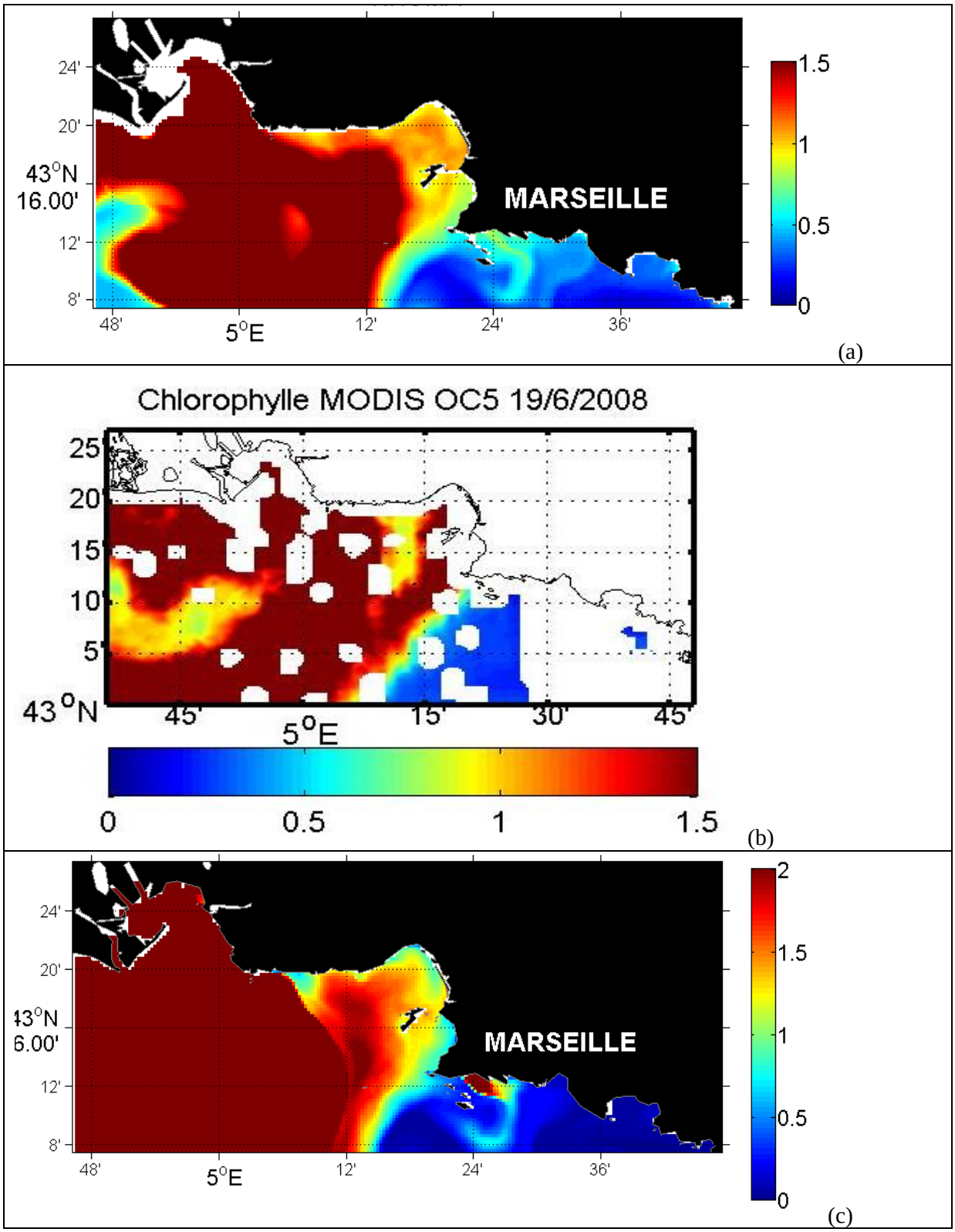


Figure 124 : Carte de concentrations de surface de Chlorophylle_a (en µg/L) modélisée le 19 juin 2008 (concentration intégrée sur 10 mètres) (a), cartes de Chlorophylle_a (en µg/L) MODIS du 19/06/2008, carte de concentration en nitrate modélisée le 19 juin 2008 (en µmol /L) (c).

Le modèle biogéochimique couplé représente également correctement l'augmentation de chlorophylle_a notamment observée sur les images satellites des 19 et 21 juin 2008 (Figure 124 et Figure 125). Cette augmentation en Chlorophylle_a est due aux fortes concentrations en sels nutritifs dans les eaux en provenances du Rhône. En effet, les concentrations en nitrates dans la baie de Marseille les 19 et 21 juin 2008 sont bien supérieures aux valeurs rencontrées habituellement.

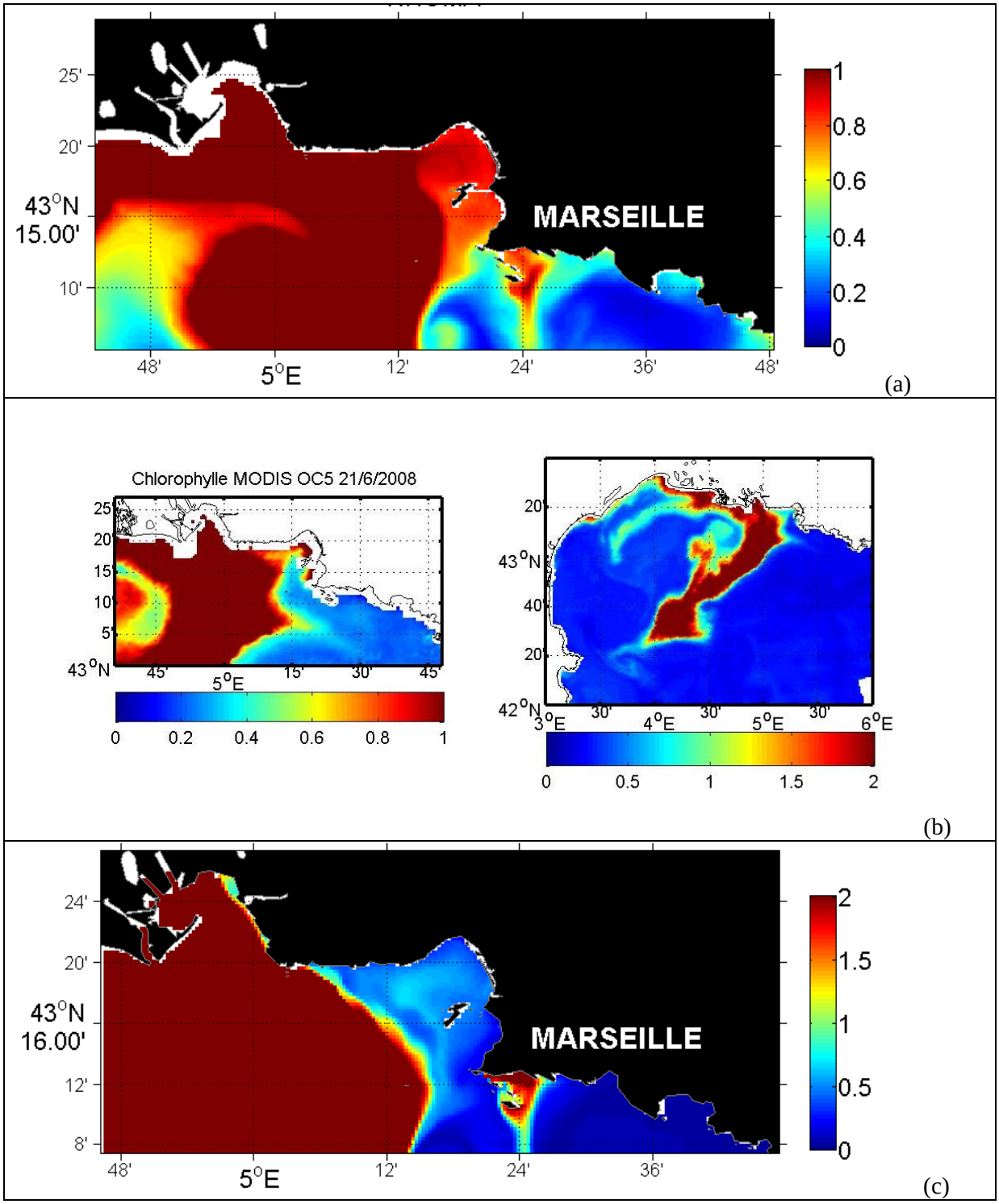


Figure 125 : Carte de concentrations de surface de Chlorophylle_a (en µg/L) modélisée le 21 juin 2008 (concentration intégrée sur 10 mètres) (a) , cartes de Chlorophylle_a (en µg/L) MODIS du 21/06/2008 à gauche pour la zone RHOMA et à droite pour le golfe du Lion (b), carte de concentration en nitrate modélisée le 21 juin 2008 (en µmol /L) (c).

d) Situation hyrosédimentaire

Contrairement à l'intrusion typique observée en 2007, celle extrême de 2008 concorde avec un débit du Rhône important, donc un fort flux solide apporté par le fleuve. La Figure 126 montre la dynamique du panache de surface lors de l'intrusion des eaux du Rhône. La concentration en MES est forte dans le prodelta (supérieure à 100mg/L) les 14 et 15 juin. Progressivement, le panache se décale vers l'est, et atteint la Rade nord les 17 et 18 juin, avec des concentrations dans cette zone supérieure à 10mg/L. Cette intrusion se traduit par un dépôt dans la Rade nord sur une longue période après le début de l'intrusion (Figure 127).

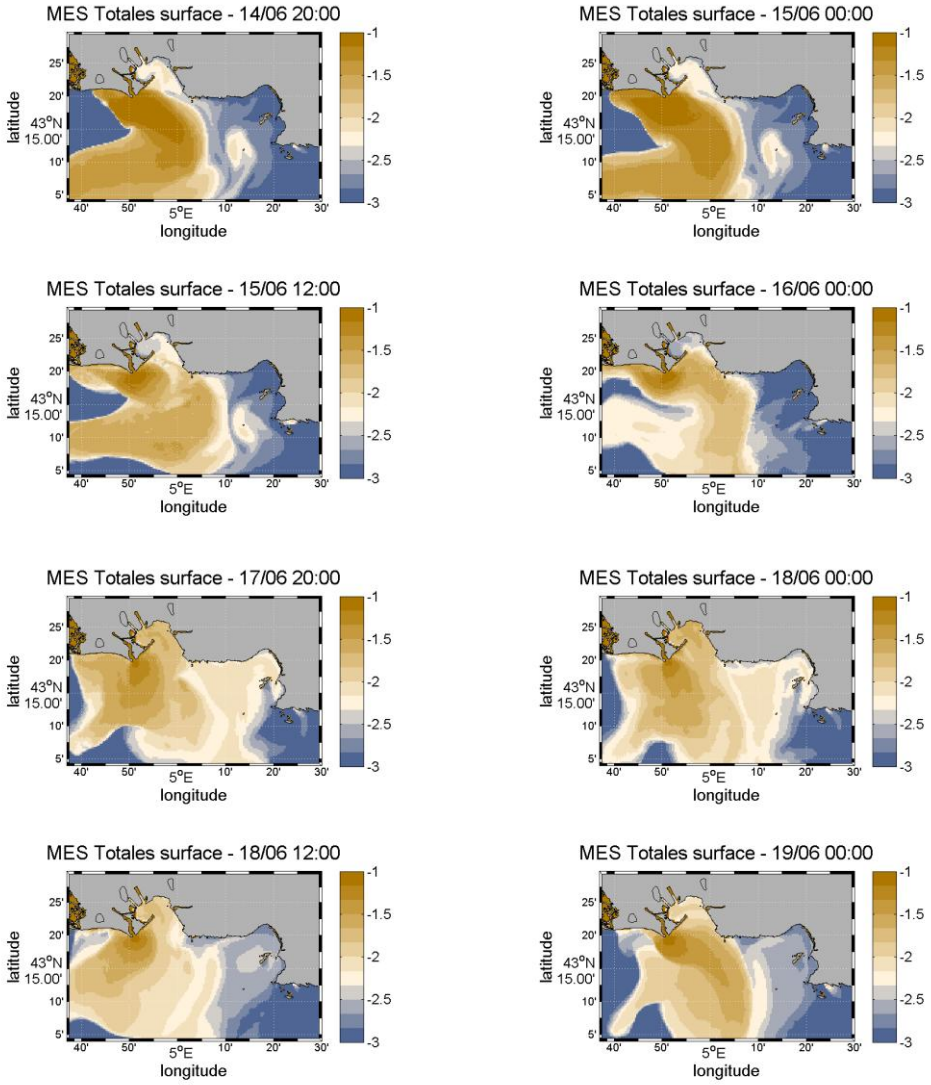


Figure 126 : Distribution spatiale des MES de surface (concentration en g/L, échelle logarithmique) entre le 14 et le 19 juin 2008

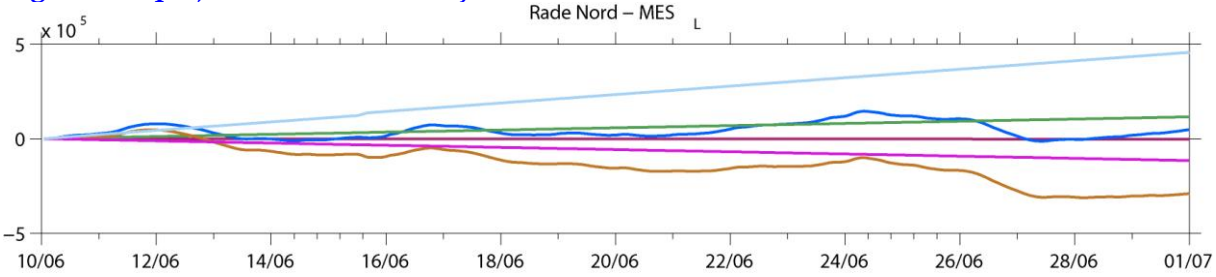
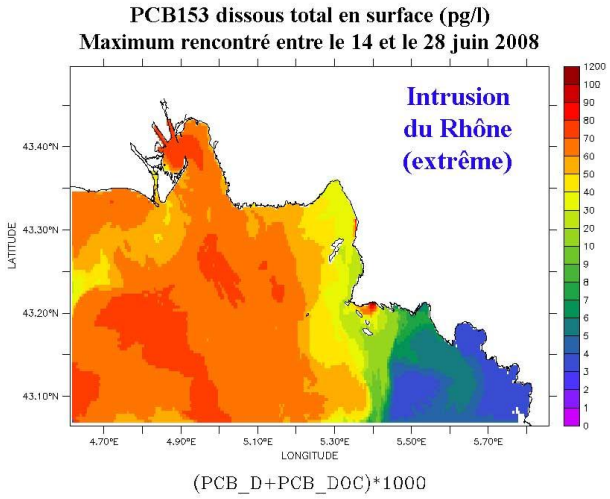


Figure 127 : Bilan des MES légères (seules apportées par le Rhône) dans la Rade nord (concentration en g/L, échelle logarithmique)

e) Situation de la contamination en CB153

L'intrusion du Rhône pendant cette période provoque un accroissement très significatif des concentrations dans la rade de Marseille. (Figure 128 à Figure 130). Mais le panache est surtout localisé en surface (sur les 10 premiers mètres) (Figure 130) et les concentrations moyennes dans la couche de fond restent du même ordre de grandeur que dans les autres situations examinées (Figure 129). L'évolution du stock de CB153 dans la rade nord suit exactement les entrées /sorties par les limites, tandis qu'on observe un léger dépôt dans la rade sud (Figure 131). La zone de Cortiou n'est à l'inverse pas impactée par cette intrusion du Rhône. Globalement à l'échelle de la rade de Marseille, l'intrusion du Rhône a un impact important mais bref, surtout dans la rade nord et dans la partie ouest.

Dissous en surface (pg/L)



Particulaire en surface (pg/L)

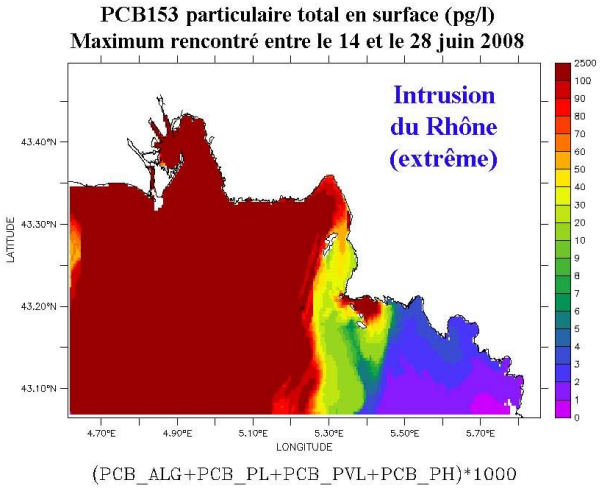
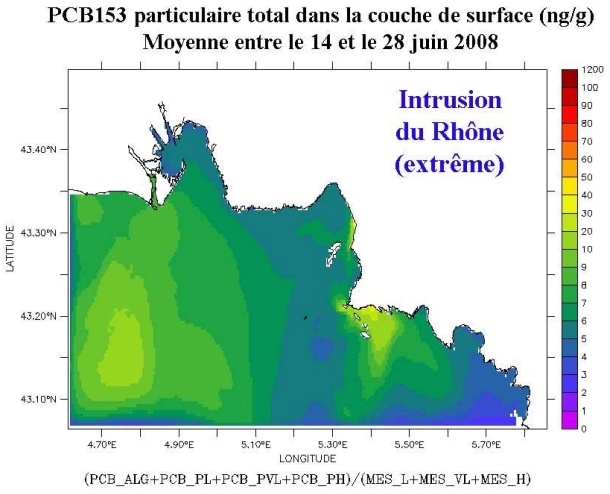


Figure 128 : Concentrations maximales rencontrées en surface (pg/L) entre le 14 et le 28 juin 2008

Particulaire en surface (ng/g)



Particulaire au fond (ng/g)

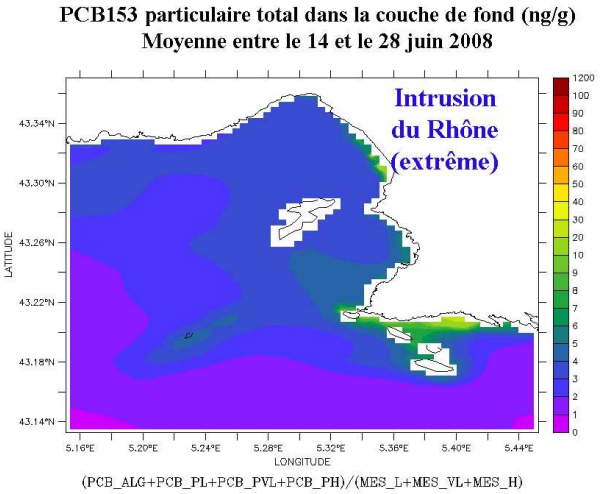


Figure 129 : Teneurs moyennes de CB153 particulaires (ng/g) rencontrées au fond et en surface entre le 14 et le 28 juin 2008

Dissous (pg/L)

Particulaire (pg/L)

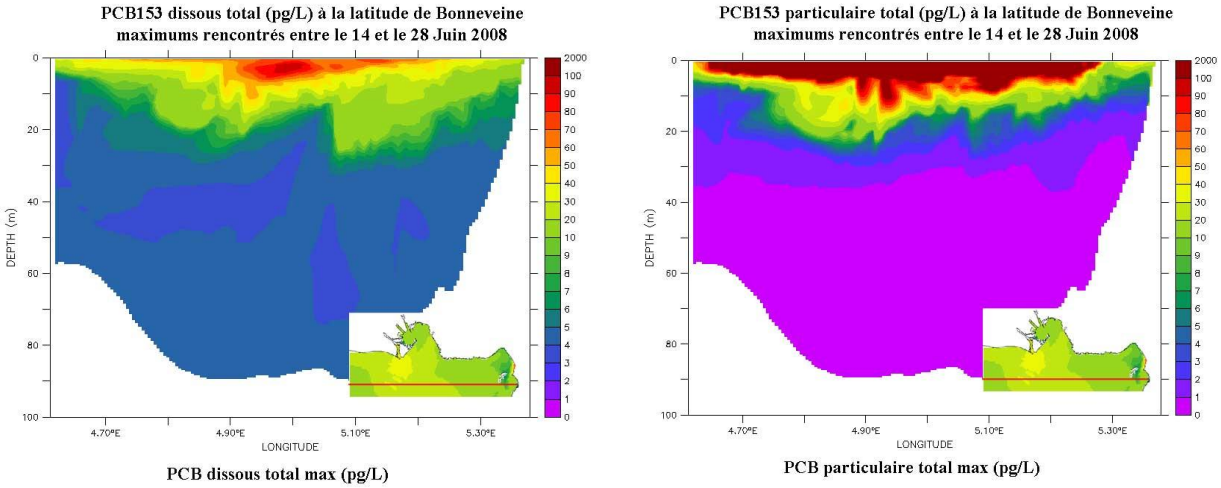


Figure 130 : Concentrations maximums rencontrées entre les 14 et 28 juin 2008 en coupes verticales à la latitude de Bonneveine

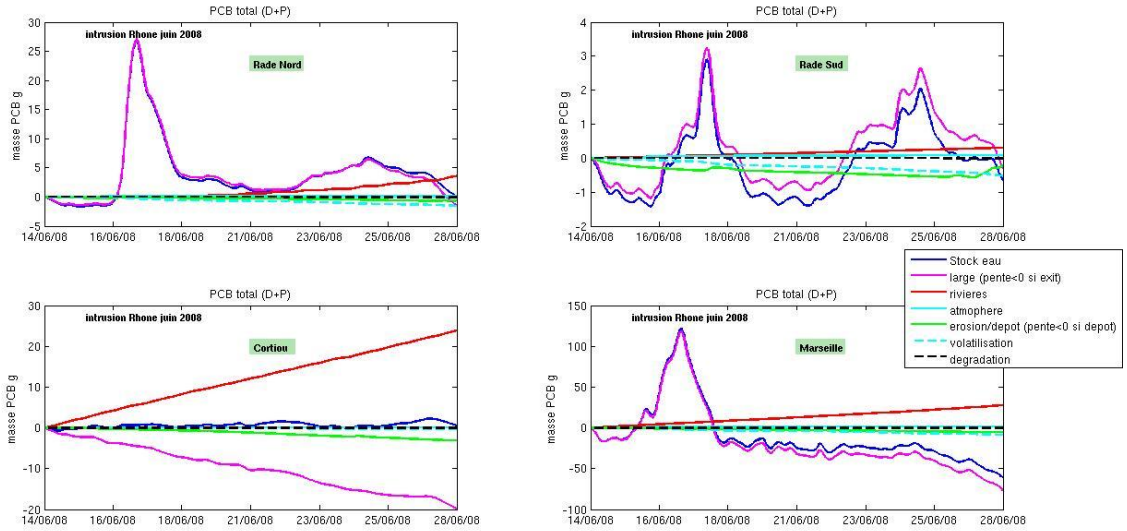


Figure 131 : Variation des stocks de CB153 total dans la colonne d'eau pendant la période et dans chaque zone (décrite sur la Figure 9), associée aux variations de concentrations dues à chaque processus « large » : entrée/sortie aux limites ; « rivières » : apports à la côte ; « atmosphère » : dépôts secs et pluie ; « érosion/dépôt » ; « volatilisation » et « dégradation ». (si pente >0 = variation positive de la concentration= apport de contaminant, inversement si pente <0 = perte de contaminant

6. CONCLUSIONS et PERSPECTIVES

6.1. SYNTHESE PAR TYPE D'EVENEMENTS

6.1.1. Evénements de Mistral

Le Mistral induit des processus d'upwelling qui font remonter de l'eau de fond froide et riche en sels nutritifs en surface, tandis que les eaux déjà présentes en surface sont exportées vers le large. Les eaux qui remontent au niveau de la côte bleue forment un front bien marqué avec les eaux de surface environnantes. On observe également un effet de remise en suspension des sédiments de la rade sud qui sont ensuite emmenés vers le large. Les différences entre les événements typique et extrême se situent essentiellement dans l'intensité et le temps de réponse du refroidissement des eaux de surface après le début du coup de vent, et la profondeur maximum d'origine des masses d'eau remontées en surface, ainsi que dans la distance de l'exportation au large et de l'intensité de la remise en suspension dans la rade sud. Potentiellement, ces événements peuvent induire des poussées phytoplanctoniques dans la zone frontale en bordure du panache d'eau upwellée et des remobilisations temporaires de CB153, mais avec une tendance à l'export de contaminant vers le large.

6.1.2. Evénements de Vent de sud-est

Les vents de sud-est provoquent un apport des eaux du large, en général plus chaudes et plus pauvres en sels nutritifs et en chlorophylle_a, puis des processus de downwelling à la côte qui font plonger ces eaux du large vers le fond. Du point de vue pélagique, ce processus de downwelling semble homogénéiser l'ensemble de la colonne d'eau (environ 0-100 m) de la baie de Marseille avec des eaux présentant les mêmes caractéristiques que celles du large.

Pendant ces événements, les rades sud et nord sont protégées de l'influence des vagues et les sédiments restent en général en place. Par contre on peut observer des épisodes d'érosion dans la zone des Calanques au voisinage de Cortiou qui sont susceptibles de mobiliser une certaine quantité de sédiment et de CB153. La différence entre les événements typique et extrême se situe essentiellement dans l'intensité de la remise en suspension. Potentiellement, ces événements peuvent donc induire des remobilisations temporaires de sédiment issus de zones chargées en contaminant comme celle de Cortiou; ces particules sont ensuite transportées au gré des courants pendant la période et se redéposent plus au large ou dans la rade sud.

6.1.3. Evénements de pluie de fin d'été

Même si les pluies ne semblent pas avoir un effet important sur l'hydrodynamisme de la zone, elles apportent de l'eau douce chargée en sels nutritifs, matières en suspension et contaminants qui se rejette essentiellement au niveau de l'émissaire de Cortiou, mais aussi au niveau du Port Autonome et des déversoirs d'orages et ponctuellement au droit de l'Huveaune. Ces apports ne semblent pas avoir un impact significatif sur le phytoplancton en fin d'été contrairement aux pluies de printemps (Fraysse, comm. pers.), ce qui suggère un effet de limitation de la croissance phytoplanctonique autre que par l'azote.

Par contre, les apports en matières en suspension (panache de concentration >10mg/L au large de l'exutoire) et en CB153 sont très significatifs pendant ces évènements. Le devenir des matières en suspension apportées par les pluies est ensuite fortement contraint par la situation météorologique (régime de vent) concomitante. Mais ces événements sont souvent associés à des régimes de vent fort

ou à des houles qui engendrent des érosions à la côte et donc une remobilisation des sédiments. D'autre part ces forts apports particulaires dus à la pluie sont constitués d'une plus grande proportion de particules « lourdes » qui vont se déposer localement, notamment au droit de l'émissaire de Cortiou. Les particules plus légères, qui constituent le panache de surface (d'une profondeur de 5 à 10m sous la surface) vont migrer au gré des courants de surface. Ces événements sont ceux qui engendrent le plus de variabilité des concentrations dans la colonne d'eau et le plus de dépôt, donc de rétention et d'accumulation de contaminant dans la zone.

6.1.4. Evénements d'intrusions des eaux du Rhône

Les intrusions du Rhône induisent en surface une diminution de la salinité, et une augmentation des sels nutritifs, des matières en suspension et de CB153. Ces événements ont un impact important sur le fonctionnement de l'écosystème de la baie de Marseille. Ils ne semblent pas forcément directement reliés au débit du Rhône. Par contre, les régimes de vent particuliers peuvent induire une intrusion et la maintenir dans la durée. Les intrusions peuvent être associées à la présence d'un tourbillon détecté dans la zone, comme en juin 2008, dont il existe deux mécanismes de formation (Schaeffer et al., 2011): un premier mécanisme est lié au forçage du vent de Mistral et à la topographie; un second est lié à un fort vent du sud et à un pulse de flottabilité crée par les eaux du Rhône.
C'est un processus important à prendre en compte, surtout si son occurrence est significative au cours de l'année. Du point de vue contamination, les intrusions du Rhône peuvent provoquer de fortes fluctuations des concentrations dans la rade (surtout en rade nord), mais l'impact est transitoire et n'induit pas d'accumulation significative localement; le panache est surtout cantonné en surface.

6.2. LES REPONSES AUX QUESTIONS POSEES

En introduction de ce projet, un certain nombre de questions ont été posées. Il s'agit ici d'essayer d'y apporter une réponse. Les modèles, outils diagnostiques d'exploration, ont permis à partir des simulations de scénarios réalistes de comprendre et de hiérarchiser le rôle des forçages dans le fonctionnement de l'écosystème.

En prenant l'exemple de l'écosystème marin soumis à l'influence de la métropole marseillaise, nous avons tenté de répondre aux questions suivantes plus générales:

- Quels sont les rôles respectifs des forçages physiques (vent : mélange, stratification, upwelling, tourbillons) et biogéochimiques (apports en sels nutritifs, MOP, MOD) dans des processus qui pourraient conduire à une éventuelle dégradation ou relative restauration d'écosystèmes côtiers soumis à de forts apports anthropiques?

A partir des événements que nous avons étudiés, nous avons voulu décrire les processus qui peuvent conduire potentiellement à une relative augmentation des concentrations en nutriments, en phytoplancton, en MES ou encore en contaminant. Nous savions en début de projet que la baie de Marseille constituait un milieu très particulier, puisqu'il présente un niveau de base correspondant à un milieu plutôt oligotrophe où l'on mesure régulièrement des valeurs de chlorophylle_a < 0.2 µg/L (mesures à SOFCOM, réseau SOMLIT), mais qui peut être l'objet ponctuellement de fortes concentrations de chlorophylle_a >1 µg/L. La réponse de l'écosystème (en terme de production primaire) à un même processus physique (upwelling, downwelling, etc..) est très variable en fonction de la saison. En effet, un apport en nutriments ou en matière organique ne conduit pas toujours à une poussée phytoplanctonique, d'autres limitations peuvent intervenir comme la lumière ou la température.

Les eaux provenant du panache du Rhône constituent dans la baie de Marseille un très fort apport en nutriments (NO_3 > 1 µmol/L), en matières en suspension (>1 - 15 mg/L) et en contaminant (CB153 dissous total: 5-20 pg/L, CB153 total particulaire: 2 - 50 pg/L; [4 - 5 ng/g]). L'intrusion de ces eaux dans la baie de Marseille a également un impact sur le phytoplancton, surtout si ce processus est associé à une stratification et /ou à un tourbillon anticyclonique.

Le tourbillon anticyclonique ME (Schaeffer et al., 2011) semble avoir un rôle dans le maintien des eaux provenant du panache du Rhône dans la baie de Marseille.

La stratification haline observée lors de l'intrusion du Rhône extrême de juin 2008, avec une salinité < 35 en baie de Marseille, a permis d'atteindre une concentration de chlorophylle_a > 1 µg/L ce qui est important pour cette zone. En effet, la chlorophylle_a en baie de Marseille est généralement inférieure à 0.2 µg/L en dehors du bloom printanier ou d'apports terrigènes.

Les eaux provenant des pluies constituent également de forts apports en nutriments dans la baie de Marseille (NO_3: > 2 - 5 µmol/L; PO_4 > 0.1 µmol/L), en matières en suspension (> 10 mg/L - 100 mg/L devant le rejet) et en contaminants (CB153 max dissous total: > 20 pg/L - 100 pg/L devant le rejet, CB153 max total particulaire: >50 pg/L - 100 pg/L [> 10 ng/g] devant le rejet). Ces apports concernent la baie de Marseille dans les zones près des rejets des fleuves côtiers urbains, mais aussi la zone de Cortiou. Les événements de pluie que nous avons étudiés (mais aussi de manière plus générale) sont associés à des vents de sud-est qui génèrent des houles permettant la remise en suspension de sédiment (qui peut être contaminé par des PCB ou des bactéries coliformes). Une fois dans la colonne d'eau, les courants induits par le vent de sud-est sont susceptibles de transporter ces sédiments dans la rade sud de Marseille.

Les processus d'upwelling induits par le Mistral remontent en surface des eaux froides (les variations de température sont de l'ordre de -2 à -3 °C à la Côte Bleue et d'environ - 4°C aux Calanques) et riches en nutriments (NO_3: 1 - 2 µmol/L à la Côte Bleue et 2 - 3 µmol/L aux Calanques). Cet apport de nutriments peut avoir un impact sur le phytoplancton avec une augmentation de la chlorophylle_a là où la diminution de température n'est pas trop limitante.

A partir des évènements étudiés, nous avons voulu considérer les processus qui peuvent conduire à une diminution du temps de résidence des eaux par un renouvellement de ces eaux, grâce à des processus advectifs et de mélange.

Le vent de sud-est qui est généralement associé à une intrusion des eaux du large, conduit à une homogénéisation de toute la colonne d'eau (0-100m) de la baie de Marseille, ce qui constitue un renouvellement quasi-total des eaux locales par des eaux arrivant de l'extérieur de la baie.

Le Mistral induit les processus d'upwelling qui font remonter les eaux du fond et induisent un mélange au moins en surface, puis vers le large.

Ces processus advectifs ont un impact majeur sur le renouvellement rapide des eaux de la baie de Marseille beaucoup plus important que l'impact du mélange turbulent induit par le vent en surface.

- Quel est le rôle des événements physiques extrêmes dont la fréquence augmente avec le changement climatique (tempêtes, crues, orages, vagues de chaleur) dans les modifications majeures des écosystèmes marins ?

Sur la base des résultats des modèles hydrodynamique, biogéochimique et sédimentaire, nous avons uniquement pu étudier les tempêtes, les crues et les orages de fin d'été.

Les tempêtes de Mistral et de sud-est ont montré en général pour les événements extrêmes étudiés, une intensification des processus typiques. Les upwelling sont plus intenses, amenant en surface des eaux plus froides provenant d'une profondeur plus importante. Les événements de remise en suspension peuvent être plus importants (plutôt dans les rades sud et nord par Mistral, et plutôt à Cortiou par vent de sud-est) mais les différences entre les événements typiques et extrêmes étudiés ne se sont pas avérées significatives.

Les orages de fin d'été n'ont pas d'impact notable sur la biomasse phytoplanctonique en octobre et en décembre du fait de la saison, par contre les quantités de nutriments, matières en suspension, et contaminants apportées en baie de Marseille près de la côte et à Cortiou, sont importantes. Pour les MES et les contaminants, c'est pendant ces périodes que les variations de concentration dans le milieu sont les plus importantes, les apports constituant le forçage prépondérant. La pluie de décembre 2008 correspond à un apport extrême à peu près du double de celui d'octobre 2007. Les concentrations en nutriments près des exutoires varient 5 fois plus lors de l'événement extrême de 2008 (NO_3 > 10 µmol/L). Les concentrations en MES et en contaminant atteignent des valeurs fortes près des exutoires (MES > 100 mg/L, CB153 dissous >100 pg/L, CB153 part >1000 pg/L). La concentration moyenne sur toute la colonne d'eau en CB153 total (dissous+particulaire) varie 5 à 10 fois plus pendant l'événement extrême que pendant l'événement typique dans chaque zone. Les panaches résultants sont très visibles à côté du panache du Rhône, mais, contrairement à ce dernier, ils ne sont présents que pendant la durée des pluies et jouent assez peu dans les flux globaux annuels. La variation des concentrations est rapide mais peut être forte et contribuer à un transfert vers la chaine trophique si ces apports importants sont concomitants avec un développement de phytoplancton dans la zone proche. A ces événements de pluie sont associés des vents de sud-est qui peuvent transporter une petite partie de ces forts apports dans la rade sud de Marseille.

Le Rhône peut conduire à des intrusions d'eau provenant de son panache à l'est jusque dans la baie de Marseille. Ces eaux restent parfois longtemps dans la rade, comme en juin 2008. En plus de la quantité des apports qui est considérable, la durée dans le temps induit un impact sur la biomasse phytoplanctonique qui atteint des valeurs de chlorophylle_a > 1 µg/L pendant le temps de l'intrusion (plusieurs jours, voire exceptionnellement plusieurs semaines comme en mars 2001). Dans le cas d'un développement de phytoplancton, les PCB peuvent s'adsorber sur la biomasse phytoplanctonique et être transférés vers la chaine trophique via le broutage du zooplancton sur les particules détritiques et vivantes ainsi contaminées.

- Le milieu côtier méditerranéen, à l'échelle d'une baie comme celle de Marseille, constitue-t-il une zone de transit ou de stockage des contaminants hydrophobes ? Quel est le rôle de la spéciation d'un PCB dans son cycle biogéochimique à l'échelle de la baie de Marseille ?

L'application du modèle au CB153 dans la rade de Marseille permet, malgré les nombreuses incertitudes sur les paramètres et les forçages, d'obtenir et de préciser un certain nombre d'informations sur sa dispersion et son transfert vers le large.
Comme beaucoup de contaminants, il est présent dans le milieu sous plusieurs espèces: certaines dissoutes, d'autres particulaires. Le CB153 étant un composé hydrophobe et persistant, il arrive en mer essentiellement sous forme particulaire et a une affinité forte pour les particules organiques.

A l'échelle de la baie de Marseille, il ne se dégrade pas et se volatilise très peu; les échanges atmosphériques sont relativement faibles. La variation des concentrations dans la baie résulte essentiellement des épisodes de pluie qui augmentent l'apport des rejets côtiers (ruisseaux, déversoirs d'orage), mais elle résulte également des intrusions du Rhône qui entraînent les eaux contaminées du fleuve notamment dans la rade nord.

La très forte dilution des rejets côtiers en mer contribue à la dispersion rapide des particules dans la colonne d'eau, les plus lourdes chutant dans la zone proche des rejets. En l'absence d'eaux turbides, le PCB particulaire tend alors à se désorber pour passer en phase dissoute, où il sera associé en partie à la matière organique dissoute. Si un développement phytoplanctonique est présent aux abords des rejets, le PCB va s'adsorber sur ces cellules vivantes et être transféré dans la chaîne trophique.
Du fait du déplacement des petits panaches côtiers au gré des courants et des forts gradients locaux, l'observation de la variation des concentrations en un point de la zone (par exemple à SOMLIT) ne renseigne pas de façon évidente sur l'impact des différents événements. La réponse moyenne dans chaque zone a donc été analysée dans cette étude selon les événements et selon les processus (apports, érosion, dépôt, sortie vers le large).

Sous sa forme dissoute, le contaminant transite dans la baie en quelques heures ou jours selon la circulation des masses d'eau. Sous sa forme particulaire, il est soit dispersé de la même manière que la phase dissoute lorsqu'il est associé à des particules fines et légères, soit déposé sur le fond lorsqu'il est associé à des particules lourdes (sablo-vaseuses). Une grande incertitude demeure sur l'affinité respective du CB153 pour les particules légères ou lourdes et sur la caractérisation des apports. Néanmoins par temps sec, la plupart des particules rejetées sont fines et très légères; elles se dispersent vers le large et leurs concentrations sont rapidement atténuées. Il n'y a que par temps de pluie que les apports importants induisent de fortes augmentations de concentration dans la zone, avec une proportion non négligeable associée aux particules lourdes qui vont sédimenter localement.

L'accumulation du contaminant dans les sédiments est surtout significative dans les zones proches du rejet, dans la zone de Cortiou ou dans les rades sud et nord. Les épisodes de remise en suspension peuvent provoquer des accroissements significatifs des concentrations près du fond. Selon la situation, le contaminant est alors exporté vers le large où il se redépose assez rapidement (en quelques heures ou quelques jours en fonction de la circulation) dans des zones proches et notamment en rade sud.
L'adsorption sur les particules plus ou moins riches en matière organique introduit une variabilité dans les concentrations en CB153 particulaire, mais étant données les faibles concentrations, le PCB, même si il est très hydrophobe, se retrouve en plus grande quantité sous forme dissoute. La faible fraction qui s'adsorbe sur les particules organiques détritiques ou vivantes résultant des cycles biogéochimiques (production primaire, lyse ...) ne suit pas une dynamique locale spécifique qui serait liée aux apports de la baie de Marseille.

La baie de Marseille semble être, selon cette étude, une zone de transit plutôt qu'une zone de stockage même si il existe des dépôts non négligeables dans les rades nord et surtout sud et au droit de

l'émissaire de Cortiou. Ces dépôts représentent seulement quelques % de la totalité des apports qui arrivent par la côte. Cette valeur ne peut malheureusement pas être précisée puisqu'elle dépend des hypothèses et des paramètres choisis qui sont très mal connus.

6.3. CONCLUSION GENERALE

Les résultats de ce travail indiquent une bonne reproduction de l'hydrologie de la zone par le modèle hydrodynamique. Les processus principaux d'upwelling, d'intrusion d'eaux dessalées dans la baie en provenance du Rhône et d'intrusion du Courant Nord (CN) et des eaux du large depuis le sud, de tourbillon, qui ont une incidence sur l'advection et le mélange des masses d'eau, sont correctement reproduits. Dans le cadre de cette étude, des expériences académiques numériques d'étude de la dispersion d'un rejet ont montré l'apport de la haute résolution du modèle.

Concernant la modélisation biogéochimique couplée, les résultats sont très intéressants pour les simulations des années 2007-2008. Une validation rigoureuse a été ensuite effectuée en utilisant des simulations pluriannuelles sur les années postérieures 2009 à 2011, indépendantes des événements de MASSILIA qui ont été utilisés pour la calibration (Fraysse et al., submitted).

Le projet a permis l'acquisition et l'analyse d'un jeu de données hydrosédimentaires cohérent (érodabilité, érosion/remise en suspension/dépôt/transport) permettant de comprendre les processus mis en jeu et leur modélisation. Dans le cadre de MASSILIA et de METROC, le modèle hydrosédimentaire a été amélioré avec la mise en place d'un sédiment mixte sable/vase dégradé.

La phase de mise en place des modèles avec les premières simulations réalistes a été réalisée dans le projet, même si elle a été un peu ralentie par le passage à la version V8 de MARS3D qui a nécessité de nombreuses adaptations. Les simulations réalistes effectuées ont permis une première phase de validation des modèles grâce aux données historiques et complémentaires. Un effort particulier a été consacré au rassemblement des données nécessaires au forçage des modèles comme les apports par le Rhône, par l'atmosphère (en collaboration avec le Service d'Observation du M.I.O.) et les apports par les petits fleuves côtiers et la STEP (en collaboration avec la Communauté Urbaine Marseille Provence Métropole et la SERAM).

Des situations typiques, puis des événements extrêmes ont été simulés. L'exploitation de ces simulations a été effectuée avec de nombreux stages de formation d'étudiants, d'une thèse et de premières valorisations des résultats sous formes de présentations à des congrès internationaux (CIESM2010, EGU2011, JONSMOD2012, Coastal Dynamics2013, CIESM2013) (Annexe 3). Les travaux seront ensuite publiés par discipline ou par étude de processus dans des revues à comité de lecture. Ce rapport permet de consigner toutes les informations issues de ce programme dans un seul recueil. Les simulations ont été exploitées afin de déterminer les rôles respectifs des forçages physiques (vent : mélange, stratification, upwelling, tourbillons) et biogéochimiques (apports en sels nutritifs, MOP, MOD) dans la modulation des forts apports anthropiques auxquels sont soumis les écosystèmes côtiers; d'étudier le rôle des événements physiques extrêmes dont la fréquence augmente avec le changement climatique (principalement les crues, tempêtes, orages); de savoir si le milieu côtier méditerranéen, à l'échelle d'une baie comme celle de Marseille, constitue une zone de transit ou de stockage des contaminants hydrophobes.

6.4. PERSPECTIVES

Lors de cette étude, nous avons privilégié une approche événementielle pour tenter de comprendre les processus mis en jeu dans cet écosystème et leurs imbrications. Par la suite, une approche de modélisation pluriannuelle mettant en œuvre les modèles mis en place dans MASSIIA permettrait de pouvoir replacer ces événements dans la variabilité interannuelle observée dans cette zone. Du point de vue résolution spatiale, étant donné que les zones d'intérêt semblent situées près de la côte à de faibles profondeurs, il serait sans doute pertinent de développer des zooms de plus grande précision (50 m) pour les zones de Cortiou, la rade sud, la rade nord avec la côte bleue. De plus, tous les événements étudiés dans le projet MASSILIA datent d'avant la mise en service de l'étage biologique de Géolide dans la STEP. Il serait donc intéressant d'étudier de nouveaux événements de pluie avec les nouveaux systèmes de traitement de l'usine.

Etant donné que le renouvellement des eaux de la zone semble avoir un impact majeur sur la qualité de cet écosystème, il serait intéressant de compléter cette étude par des calculs de temps de résidence des eaux. Une telle étude pourrait être complétée par des lâchés *in situ* de flotteurs lagrangiens dans la zone qui pourraient être comparés à des trajectoires numériques dans le modèle. Cette thématique serait également très utile aux halieutes qui étudient la distribution des larves dans cette zone.

Il a été montré dans cette étude que la zone de Marseille est plutôt une zone de transit pour des contaminants comme les PCB. Pourtant, une petite partie de ces contaminants restent dans la zone d'étude et à l'avenir il serait intéressant de développer des études à plus petite échelle ciblées sur ces zones de stockage des PCB pour étudier l'évolution de leur contamination. De plus, d'autres contaminations pourraient être étudiées comme les HAP, les phtalates ou les suies des feux de forêt.

Pour compléter cette étude, nous pouvons envisager par la suite d'intégrer, en plus du compartiment sédimentaire inorganique, un couplage bentho-pélagique biogéochimique, mais également la prise en compte d'organismes benthiques tels que le microphytobenthos ou les Posidonies.

Les outils de modélisation développés lors de cette étude, et dans les projets METROC et GIRAC, vont pouvoir être utilisés dans de nouveaux projets tels que Mermex C3A, Mermex River, FP7 Perseus, l'étude de la connectivité des larves des récifs artificiels du Prado.

7. REFERENCES

Alberola, C., and C. Millot. 2003. Circulation in the French mediterranean coastal zone near Marseilles: the influence of wind and the Northern Current. Continental Shelf Research 23 (6):587-610.

Arfi R., A. A., Bellan-Santini D., Bellan G., Laubier L., Pergent-Martini C., Bourcier M., Dukan S., Durbec J-P., Marinopoulos J., Millot C., Moutin T., Patriti G., Petrenko A. 2000. Impact du grand emissaire de Marseille et de l'Huveaune détournée sur l'environnement marin de Cortiou - Etude bibliographique raisonnée 1960-2000. Rapport de la ville de Marseille:137 pp.

Axelman J., Broman D., Näf C., 1997. Field measurements of PCB partitioning between water and planktonic organisms: influence of growth, particle size, and solute-solvent interactions. Environmental Science and Technology 31: 665-669

Boiron A., 2011. Comparaison de l'activité mésoéchelle entre différents modèles numériques 3D de circulation. Rapport de stage, Ecole normale supérieure de Lyon, http://www.com.univ-mrs.fr/~doglioli/report_master1_Antoine_Boyron.pdf.

Burkhard L.P., 2000. Estimating DOC partition coefficients for non-ionic organic chemicals. Environmental Science and Technology 34: 4663-4668

Castro-Jimenez J., Mariani G., Vives I., Skejo H., Umlauf G., Zaldivar J.M., Dueri S., Messiaen G., Laugier T., 2011. Atmospheric concentrations, occurence and deposition of persistent organic pollutants (POPs) in a Mediterranean coastal site (Etang de Thau, France). Environmental Pollution 159, 1948-1956.

Conan P., 1996. Variabilité et bilan de la production primaire en zone côtière (Méditerranée nord occidentale, entrée du golfe du Lion) en relation avec les systèmes biologique, chimique et hydrodynamique (Courant Nord Méditerranéen). Thèse, Université de la Méditerranée, (T. I 185 p. et T. II 102 p.).

Del Vento S., Dachs J., 2002. Prediction of uptake dynamics of persistent organic pollutants by bacteria and phytoplankton. Environmental Toxicology and Chemistry 21: 2099-2107

Dencausse G. J., M. Arhan, and S. Speich, 2010. Routes of agulhas rings in the south eastern cape basin, Deep-Sea Res. I, 57, 1406–1421, doi:10.1016/j.dsr.2010.07.008.

Doglioli A. M., Blanke B., Speich S., and Lapeyre G., 2007. Tracking coherent structures in a regional ocean model with wavelet analysis: Application to Cape Basin eddies. J. Geophys. Res., 112, C05043, doi:10.1029/2006JC003952.

Fraysse M., 2010. Modélisation couplée physique-biogéochimie de la baie de Marseille, Rapport de stage Master 2 Recherche d'Océanographie, Université de la méditerranée, Marseille: 1-45.

Fraysse M., C. Pinazo, V. Faure, R. Fuchs, P. Lazzari, P. Raimbault, I. Pairaud. 3D coupled physical-biogeochemical model development around Marseille's coastal area (NW Mediterranean Sea): What complexity is required in coastal zone? Submitted to Plos One.

Faure, V., C. Pinazo, J.-P. Torréton, and P. Douillet. 2010b. Modelling the spatial and temporal variability of the SW lagoon of New Caledonia II: Realistic 3D simulations compared with in situ data. Marine Pollution Bulletin 61 (7-12):480-502.

Faure, V., C. Pinazo, J.-P. Torréton, and S. Jacquet. 2010a. Modelling the spatial and temporal variability of the SW lagoon of New Caledonia I: A new biogeochemical model based on microbial loop recycling. Marine Pollution Bulletin 61 (7-12):465-479.

Gatti, J., A. Petrenko, J.-L. Devenon, Y. Leredde, and C. Ulses. 2006. The Rhone river dilution zone present in the northeastern shelf of the Gulf of Lion in December 2003. Continental Shelf Research 26 (15):1794-1805.

Gerofke A., Kömp P., McLachlan M.S., 2005. Bioconcentration of persistent organic pollutants in four species of marine phytoplankton. Environmental Toxicology and Chemistry. Vol.24 N°11, pp2908-2917

Halling-Sorensen B., Nyholm N., Kusk KO, Jacobsson, 2000. Influence of nitrogen status on the bioconcentration of hydrophobic organic compounds to Selenastrum capricornutum. Ecotoxicology and Environmental safety. Vol.45, 1, pp33-42

Harrmelin-Vivien M., Bodiguel X., Charmasson S., Loizeau V., Mellon-Duval C., Tronczynski J., Cossa D., 2012. Differential biomagnification of PCB, PBDE, Hg and Radiocesium in the food web of the European hake from the NW Mediterranean. Marine Pollution Bulletin 64. pp974-983

Jany C., Zebracki M., Sauzade Didier, Cossa Daniel, Thouvenin Benedicte, Pairaud Ivane, Djellali Z., Mounier Stephane, Garnier C., Andral Bruno 2012. METROC : Evaluation des apports de containants chimiques de la métropole marseillaise au milieu marin. Rapport Ifremer DOP/LER-PAC/12-02 Convention AERM&C / Ifremer n° 2009-0351. 140pp

Jany, C., & Thouvenin, B., 2012. Récapitulatif des hypothèses utilisées pour les rejets de MES dans les simulations pour METROC. Rapport Ifremer, RST.ODE/LER/PAC/12-19: 33pp.

Jurado E., Zaldivar J-M., Marinov D., Dachs J., 2007. Fate of persistent organic pollutants in the water column: Does turbulent mixing matter?. Marine Pollution Bulletin 54. pp441-451

Le Masson J. 1995 . Mesures de pollution par temps de pluie à Marseille. Rapport SERAM. 20pp.

Le Masson J. 1997. Mesures de pollution par temps de pluie à Marseille entre 1992 et 1996 -- Synthèse -- Rapport SERAM. 34pp

Le Masson J. 1998. Mesures de pollution par temps de pluie à Marseille. Rapport SERAM. 17pp

Li N., Wania F., Lei Y.D., Daly G.L., 2003. A comprehensive and critical compilation, evaluation, and selection of physical-chemical property data for selected polychlorinated biphenyls. Journal of Physical and Chemical Reference Data 32: 1545-1590

Liss P.S., Slater P.G., 1974. Flux of gases across the air-water interface. Nature 274:181-184

Mandalakis M, Stephanou E G., 2004. Wet Deposition of Polychlorinated Biphenyls in the Eastern Mediterranean. Environ. Sci. Technol., 38, pp3011-3018

Pairaud, I.L., J. Gatti, N. Bensoussan, R. Verney and P. Garreau, 2011. Hydrology and circulation in a coastal area off Marseille: Validation of a nested 3D model with observations, Journal of Marine Systems, 88, 20-33.

Pairaud I., Andral B. 2010. Metroc : les apports par les grandes métropoles. Evaluation des apports et modélisation hydrosédimentaire de la Baie de Marseille. RST.DOPLER/PAC/10-13, AERM&C/Ifremer n° 2007 1745, 83p.

Para J., P. G. Coble, B. Charrière, M. Tedetti, C. Fontana, and R. Sempéré, 2010. Fluorescence and absorption properties of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in coastal surface waters of the northwestern Mediterranean Sea, influence of the Rhône River. Biogeosciences, 7, 4083-4103

Petrenko, A., Y. Leredde, and P. Marsaleix. 2005. Circulation in a stratified and wind-forced Gulf of Lions, NW Mediterranean Sea: in situ and modeling data. Continental Shelf Research 25 (1):7-27.

Pont D., Bombled B., Coste B., Moutin T., Raimbault P., Thomas A.J., Huang W.W., Noel H., Tronczynski J., Chiffoleau J.F., Cossa D., Auger D., Chartier E., Sanjuan S., Moizan T., Sicre M.A., Ferandes M.B., Cauwet G., 1996. Evaluation des charges polluantes du Rhône à la Méditerranée. Rapport pour le compte de l'Agence de l'Eau Rhône-Mediterranée-Corse et l'Agence Régionale pour l'Envronnement Provence-Alpes-Côtes d'Azur.

Rubio A., Blanke B., Speich S., Grima N. and Roy, C., 2009. Mesoscale eddy activity in the southern Benguela upwelling system from satellite altimetry and model data, Prog. Oceanogr., 83, 288–295.

Sauzade D., Andral B., Gonzalez J.L., Galgani F., Grenz C., Budzinski H., Togola A., Lardy S. (2007). Synthèse de l'état de la contamination chimique du golfe de Marseille. Rapport Ifremer DOP/LER-PAC/07-05 – Agence de l'eau RM&C- Vol 1 : 118p. Vol 2, 86p.

Schaeffer A. Molcard A., Forget P., Fraunie P. and P. Garreau, 2011. Generation mechanisms of mesoscale eddy in the Gulf of Lions: radar observations and modelling. Ocean Dynamics, 61 (10) 1587-1609.

Sinkkonen S., Paasirvita J., 2000. Degradation half-lift times of PCDDs, PCDFs, and PCBs for environmental fate modeling. Chemosphere 40: 943-949

Souza J.M. A. C., C. de BoyerMontégut, and P. Y. Le Traon, 2011. Comparison between three implementations of automatic identification algorithms for the quantification and

characterization of mesoscale eddies in the South Atlantic Ocean, Ocean Sc., 7, 317–334, doi:10.5194/os-7-317-2011.

Staudinger J., Roberts P.V., 2001. A critical compilation of Henry's law constant temperature dependence relations for organic compounds in dilute aqueous solutions. Chemosphere 44: 561-576

Tolosa I., Readman J.W., Fowler S.W., Villeneuve J.P., Dachs J., Bayona M., Albaiges J., 1997. PCBs in the western Mediterranean. Temporal trends and mass balance assessment. Deep-Sea Research II, Vol. 44, No. 34, pp. 907-928

Tronczynski J., Tixier C., Cadiou J.F., Belly N., Heas-Moisan K., Castelle S., Migon C., Dufour A., Merieau R., 2012. Apports rhodaniens et suivi atmosphérique des contaminants organiques persistants (PCB, PBDE, HAP, PCDD/F) dans le Golfe du Lion (2009 – 2010). ARC-MED. Rapport Ifremer RST-RBE/BE/LBCO/2012-04 pour l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée-Corse. 68pp

Tronczynski J., Munschy C., Héas-Moisan K., Guiot N., Truquet I., 2005a. Analyse de contaminants organiques (herbicides, PCB, OCP, HAP) dans les eaux estuariennes et marines côtières. Ed. Ifremer, méthodes d'analyse en milieu marin, 52p

Tronczynski J., Munschy C., Héas-Moisan K., Guiot N., Truquet I., 2005b. Analyse de contaminants organiques (PCB, OCP, HAP) dans les sédiments marins. Ed. Ifremer, méthodes d'analyse en milieu marin, 44p

Van Noort P.C.M., Cornelissen G., ten Hulscher T.E.M., Vrind B.A., Rigterink H., Belfroid A., 2003. Slow and very slow desorption of organic compounds from sediment: influence of sorbate planarity. Water Research, 37, pp2317-2322

Vousdoukas M.I., , R. Verney, F. Dufois, C. Pinazo, S. Meulé, D. Sauzade, Ph. Cann, T. Plomaritis, 2011. Sediment dynamics in the Bay of Marseille: hydrodynamic forcing versus bed erodibility. Journal of Coastal Research, doi: 10.2112/JCOASTRES-D-10-00122.1, 27 (5): 942-958.

Zebracki M, 2011. Evaluation des flux bruts de contaminants chimiques par la métropole marseillaise à la mer. Rapport final. Contrat n°10/3211467

8. ANNEXE 1 : Mesures de contaminant à SOMLIT

8.1. Matériels et méthodes

Les grandes lignes de la méthodologie utilisée sont présentées ci dessous. Une description plus complète est présentée dans Tronczyński *et al.,* 2005a et b.

Principe général

Le principe des analyses des contaminants à l'état dissous et associés aux matières en suspension repose sur la séparation par la filtration de ces deux phases liquide et solide, avant l'extraction des composés ciblés par des techniques appropriées. Les extraits destinés aux analyses des composés organochlorés sont purifiés et fractionnés par la chromatographie d'adsorption (sur une colonne ouverte remplie d'alumine et de gel de silice) avant l'analyse. Les différentes fractions des PCB et des OCP sont analysées par la chromatographie en phase gazeuse à haute résolution avec un détecteur à capture d'électrons (ECD).

Mode opératoire

Schéma du protocole analytique

.

Le schéma ci-dessous présente les différentes étapes du protocole analytique pour les analyses des contaminants organiques dissous et particulaires (incluant les composés dans le plancton marin). Quelques détails relatifs à chacune de ces étapes sont précisés dans les paragraphes suivants.

Prélèvement des échantillons

Les échantillons d'eau ont été collectés à bord d'un navire océanographique, par pompage à l'aide d'un dispositif entièrement téflonné (pompe ASTI et tuyaux en téflon) afin de minimiser les éventuelles contaminations. Un grand volume d'eau filtrée est nécessaire pour récupérer une quantité suffisante de MES (plus de 400 litres) et le volume d'eau de mer extrait pour les analyses des contaminants dissous peut être de 200 litres.

Phase d'extraction

Extraction des composés dissous : liquide /solide

L'extraction liquide /solide (ELS) des composés dissous est effectuée à bord, en utilisant des colonnes en Téflon remplies de résine de copolymère réticulée de styrène divinylbenzène AmberliteTM XAD-2. La phase de sorption des composés consiste au pompage de l'échantillon au travers de la colonne avec un débit ajusté à environ 80 ml par minute (le débit ne doit en aucun cas excéder 100 ml/min). Les contaminants organiques retenus par la résine sont ensuite désorbés à l'aide d'un solvant organique. La désorption s'effectue avec 150 ml de dichlorométhane percolant par gravité à environ 10 ml/min au maximum. Une quantité de Na2SO4 est ajoutée à l'extrait récupéré dans un flacon en verre (préalablement passé au four à 450°C pendant 8 h.), puis l'extrait est stocké réfrigéré jusqu'à l'étape de concentration.

Extraction par ultrasons des MES

Les contaminants organiques associés aux MES sont extraits au laboratoire par des solvants organiques en utilisant un bain à ultrasons. Les filtres, prélablement découpés, sont extraits après décongélation directement dans les flacons de leur conservation. Trois extractions consécutives sont menées : deux premières avec un mélange de dichlorométhane / méthanol en proportion 2 à 1 (volume) et la troisième avec du dichlorométhane pur. Chaque extraction dure 20 minutes. Les étalons de rendement sont ajoutés au début de la première extraction. L'ensemble de l'extrait est récupéré dans une ampoule à décanter de 3 litres. Après l'ajout de 300 ml d'eau MilliQ-UV, on

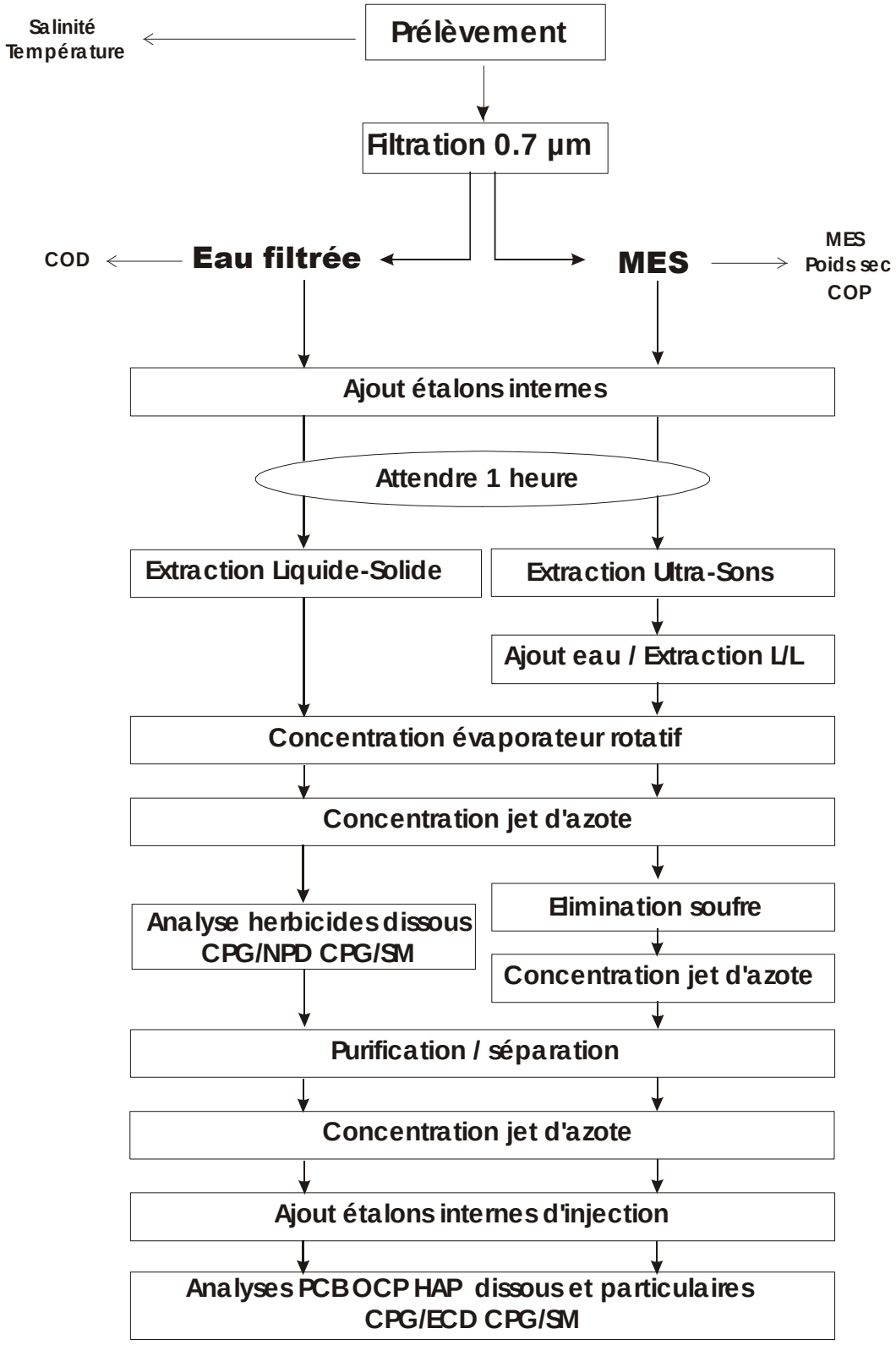
procède à une extraction liquide/liquide effectuée trois fois avec 100 ml de dichlorométhane. La phase organique est récupérée dans un flacon en verre calciné. A la fin de ces trois extractions 150 ml d'acétate d'éthyle, 2 spatules de Na_2SO_4 et 5 ml d'isooctane sont ajoutés. L'extrait est concentré à l'évaporateur rotatif sous vide. Après plusieurs rinçages au DCM puis à l'isooctane, l'extrait est concentré à 500 µl.

Purification et séparation des extraits

L'échantillon concentré (environ 500 µl) est déposé en tête de colonne de silice et alumine (pour plus détails cf Tronczynski et al 2005a). L'élution se fait à environ 1 goutte par seconde. Pour chaque série d'échantillons réalisée un essai de contrôle avec un mélange de solutions étalons est fait permettant de vérifier les rendements de récupération et le fractionnement pour le lot de silice et d'alumine utilisé. Les extraits sont séparés en trois fractions. La fraction F1 contient les composés suivants : PCB, p,p'-DDE, et une partie des HAP et de PBDE de plus faibles poids moléculaires. La fraction F2 contient les composés suivants : HAP et PBDE et la fraction trois contient le reste de HAP de plus hauts poids moléculaires.et des pescticides organochlorés.

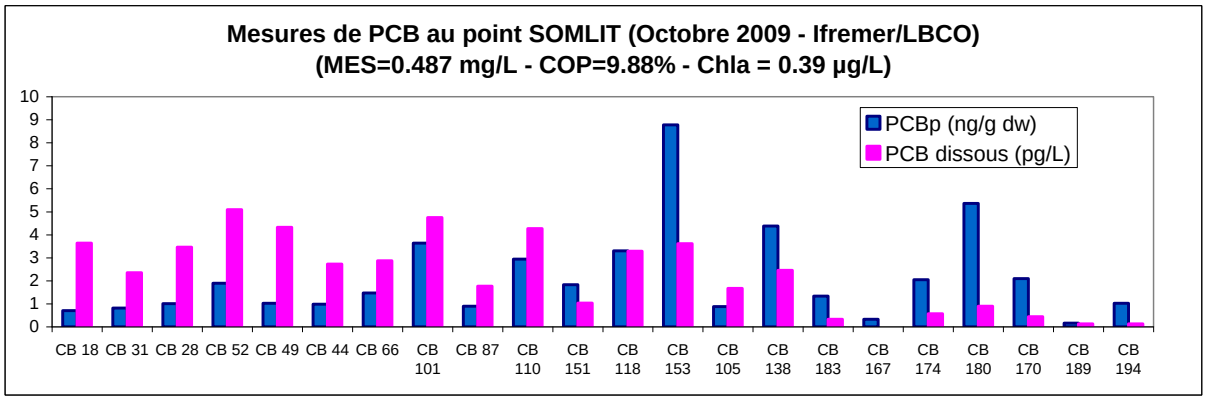
Conditions analytiques utilisées en CPG-ECD

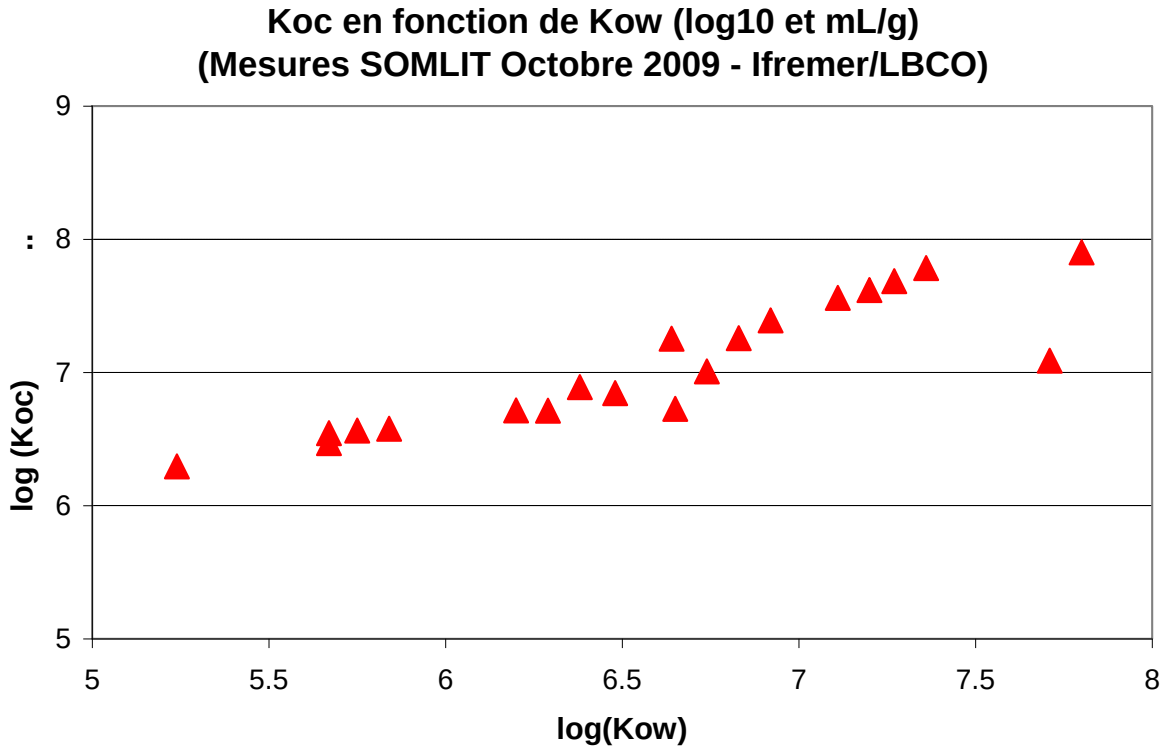
Les extraits dissous et de MES sont analysés en chromatographie en phase gazeuse avec un détecteur à capture d'électrons (CPG/ECD). Les échantillons sont injectés sur une colonne non polaire généralement de type DB5 (5 %-phényl-méthylpolysiloxane), 60 m x 0.25 mm, 0.25 µm épaisseur de phase. Une seconde colonne de type HT8 (8 %-phényl-polysiloxane-carborane) est utilisée pour la confirmation des résultats pour certains composés mal ou non résolus sur la colonne DB5. Pour une réduction du temps d'analyse, les injections sont faites simultanément sur les deux colonnes au moyen d'un CPG équipé de deux injecteurs et de deux détecteurs. Ceci impose d'utiliser la même programmation de température pour les deux colonnes. Les conditions chromatographiques utilisées sont données dans Tronczyński *et al.*, 2005a.



.Protocole analytique utilisé pour l'analyse des contaminants organiques dissous et particulaires (Tronczynski et al. 2005a)

8.2. Résultats





9. ANNEXE 2 : Hypothèses et paramètres utilisés dans la modélisation des contaminants (PCB)

Les hypothèses sur lesquelles s'appuie le modèle de contaminant portent sur les forçages et les processus mis en jeu dans la dynamique des PCBs. Les espèces simulées dans le modèle sont les suivantes :

- PCB dissous libre
- PCB dissous associé à la matière organique dissoute
- PCB particulaire associé aux différentes fractions de MES
- PCB particulaire associé au phytoplancton

Les espèces dissoutes de PCB sont transportées et dispersées dans la masse d'eau. Les espèces particulaires subissent en plus la chute des particules, le dépôt sur le fond et l'érosion pendant les épisodes de vagues.

- Hypothèses sur les forçages

    - Apports à la côte

Il existe plusieurs points d'apports dans la rade de Marseille, qui viennent s'ajouter aux apports du Rhône. Le modèle s'appuie sur toutes les données qui ont pu être rassemblées et qui sont le plus représentatif possible des connaissances acquises : MES mesurées par la Communauté Urbaine Marseille Provence Métropole et la SERAM (Lemasson, SERAM, 1995, 1997, 1998) , MES et contaminants mesurés dans le cadre du projet METROC (Ifremer LER/PAC et USTV : Zebracki 2011, Jany et al, 2012). La complexité du système (multiplicité des apports et très forte variabilité) et la difficulté pour mesurer les concentrations en contaminant supposent de faire des hypothèses simplificatrices et d'accepter une grande marge d'incertitude.

Les valeurs des concentrations pour le PCB153 sont présentées dans le Tableau A1. Le test présenté dans ce rapport correspond à l'hypothèse d'une concentration égale sur les particules rejetées, qu'elles soient « légères » ou « lourdes » (même affinité quelque soit le type de particules).

Tableau A1	CB153 dissous	CB153 part sur MES
STEP (eaux traitées)	0.06 ng/L	96 ng/g
Emissaire 1 (eaux bypassées)	0.25 ng/L	35 ng/g
Emissaire 2 (Eaux rivières)	0.25 ng/L	10 ng/g
Aygalades	0.33 ln(Q)+0.74	50 ng/g
Huveaune Prado (= Huveaune en crue)	0.03 ng/L	10 ng/g
Littoral Sud	0.4 ng.L	2 ng/g
Littoral Nord	0.5 ng/L	5 ng/g
Déversoirs d'orage	2 ng/L	30 ng/g
Rhône (d'après mesures de Tronczynski et al., 2012)	0.036 ng/L	9ng/g

Tableau A1: valeurs des concentrations pour le CB153 dissous et particulaire dans les différents apports.

- Apports atmosphériques

Une proportion significative de PCB entre dans l'environnement marin via l'atmosphère par dépôt sec et mouillé ou directement par diffusion à partir de la phase gazeuse (Tolosa, 1997). Les flux introduits dans le modèle résultent de données tirées de la littérature (Tableau A2) (Castro-Jimenez et al, 2011, Mandalakis et Stephanou 2004)

Apports atmosphériques	CB153 dissous	CB153 particulaire
Dépôt sec	0	27 ng/m^2/an
Concentration dans les eaux de pluie	45 pg/L	15 pg/L

Tableau A2: valeurs des apports atmosphériques de CB153 dissous et particulaire

- Hypothèses sur les processus

- Affinité aux particules – processus d'adsorption/désorption

Le processus d'adsorption/désorption est simulé par un partage à l'équilibre régi par un coefficient de partage Koc, normalisé au carbone organique. Cet équilibre est néanmoins atteint progressivement selon une cinétique du premier ordre. Ces hypothèses classiques pour représenter ces processus nécessitent de poser des hypothèses sur l'évaluation du contenu en matière organique des particules et de d'estimer un certain nombre de paramètres à partir de mesures et de la littérature.

Dans le test présenté ici (voir Tableau A3) :

- les coefficients de partage Koc sont relativement forts par rapport à la littérature (entre 6 et 8.5, variable en fonction du type de MOP) et sont inspirés de la mesure à SOMLIT. Celle-ci correspond à un COP de 10% dont 50% environ serait algal. Le coefficient Koc_phy correspond au BCF plus généralement utilisé dans la littérature quand il est rapporté au poids sec ou mouillé du phytoplancton. Le Koc_phy est ici normalisé au carbone organique « algal ». Sa valeur dépend de la température et varie également selon les espèces et les auteurs entre 6 et 8 (Halling-Sorensen et al, 2000, Del Vento & Dachs,2002, Gerofke et al, 2005, Axelman et al (1997)
- le coefficient Kod est classique (=5.92 selon l'équation proposée par Farley et al, 1999 in Jurado et al, 2007, entre 5.4 à 5.8 selon l'équation proposée par Burkhard (2000)
- Les cinétiques de désorption sont en général rapides d'après la littérature, ce qui amène à l'hypothèse classique de partage à l'équilibre. Néanmoins, étant donnés les faibles temps de séjour des particules qui chutent dans les proches environs des rejets, l'introduction d'une cinétique a été testée. Dans les résultats présentés ici, la cinétique de désorption pour le phytoplancton est prise égale à la valeur proposée par Del Vento & Dachs, 2002; les autres cinétiques sont choisies dans ce test plus lentes pour les particules détritiques et encore plus rapides pour la matière organique dissoute.

Adsorption/désorption	Carbone organique	Coefficient de partage (log10 mL/g)	Cinétique de désorption
PCB-DOC dissous	COD issu du modèle MARS-ECO3M + COD réfractaire (50 µmole/L)	5.9 (Kod)	1 h^{-1} = 24 j^{-1}
PCB_PVL (particules très légères)	COP=0.1% des MES_VL	7. (Koc_VL)	1 j^{-1}
PCB_PL (particules légères	COP=0.5% des MES_L + COP détritique issu du modèle MARS-ECO3M	7. (Koc_L)	1 j^{-1}
PCB_PH (particules lourdes)	COP=3% des MES_H	8. (Koc_H)	1 j^{-1}
PCB_ALG (particules phytoplanctoniques)	COP=COP algal issu du modèle MARS-ECO3M	6.8 (Koc_phy)	7. j^{-1}

Tableau A3

- Volatilisation

Le transfert à l'interface air/eau est calculé à l'aide du modèle à deux couches de Liss et Slater (1974), en évaluant les coefficients de transfert en phase liquide et gazeuse par rapport à des composés de référence (H_2O pour le phase gazeuse et CO_2 pour la phase liquide). La constante de Henry adimensionnelle est prise égale à 9.e-3 (moyenne issu de Li et al, 2003) pour le CB153, elle est corrigée de la température et de la salinité (Staudinger et al, 2001).
Le flux de transfert est proportionnel au gradient entre la concentration dissoute libre du contaminant dans l'eau et sa concentration en phase gazeuse, divisée par la constante de Henry adimensionnelle. La concentration en CB153 dans l'air dépend de la température mais elle est prise, dans ces tests, égale à une constante (4.5 e-3 pg/L), uniforme sur toute la zone.

- Dégradation
-

Le PCB153 subit une dégradation très lente du premier ordre dont la cinétique est prise égale à 1.4 e-4 j-1 (Sinkkonen & Paasirvita, 2000)

- Conditions aux limites et conditions initiales

Les conditions initiales sont construites pour l'hydrodynamique et l'hydrosédimentaire à partir de résultats de simulations antérieures (2 ans pour l'hydrosédimentaire). Pour les contaminants, une valeur initiale uniforme sur toute la colonne d'eau et dans toute la zone est choisie et cette même valeur est supposée constituer la concentration dans les eaux du large entrant aux limites de la zone (voir Tableau A4). Dans les sédiments, la condition initiale est construite à partir des mesures réalisées pendant la campagne METROC en novembre 2004 (Sauzade et al, 2007) en excluant les fortes concentrations dues aux rejets locaux. L'impact historique des rejets dans la rade n'est donc pas pris en compte.

PCB153	PCB dissous	PCB part sur MES légères	PCB part sur MES lourdes	PCB part sur MES très légères	PCB Phyto
CI eau/ CL eau	4 pg/L	1.e-5 pg/L	0	1.5 pg/l (3 ng/g)	0
CI sediment (ng/g)	0.	2 ng/g	1.5 ng/g	0.0005 ng/g	0

Tableau A4 (CI : concentration initiale ; CL : concentrations aux limites)

10. ANNEXE 3 : Valorisation

Articles dans des revues internationales à comité de lecture

Pairaud I., J. Gatti, N. Bensoussan, R. Verney, P. Garreau. Circulation in a coastal area off Marseille from 3D modeling and observations, 2011. Journal of Marine Systems, 88: 20-33.

Vousdoukas M.I., , R. Verney, F. Dufois, C. Pinazo, S. Meulé, D. Sauzade, Ph. Cann, T. Plomaritis, 2011. Sediment dynamics in the Bay of Marseille: hydrodynamic forcing versus bed erodibility. Journal of Coastal Research, doi: 10.2112/JCOASTRES-D-10-00122.1, 27 (5): 942-958.

Fraysse M., C. Pinazo, V. Faure, R. Fuchs, P. Lazzari, P. Raimbault, I.L. Pairaud. 3D coupled physical-biogeochemical model development around Marseille's coastal area (NW Mediterranean Sea): What complexity is required in coastal zone? Submitted to Plos One.

Communications à des Congrès

Vousdoukas M.I., J.L Gonzales, S. Meulé, C. Pinazo, D. Sauzade, R. Verney, 2008. Study of the Sediment dynamics regime in the Gulf of Marseille. 13th France-Japan Oceanography Symposium, "Global change: interactions mankind-marine environments" Marseille, France, September 8th - 10th, 2008.

Pairaud I., Garreau P., Gatti J., Verney R., Thouvenin B., Bensoussan N., Petrenko A. and Pinazo C., 2009. 3D numerical modelling of the oceanic circulation in the bay of Marseilles: towards the evaluation of anthropogenic supply to the marine environment. The 41st International Liège Colloquium on ocean dynamics, Liège, 4-8 Mai 2009.

Vousdoukas M.I., Verney R., Dufois F., Pinazo, C., Sauzade, D., Meulé, S. and Cann, P., 2009. Sediment dynamics in the bay of Marseille. Oral communication to *Coastal Dynamics 2009*, September 7-11 2009, Tokyo, Japan

Pinazo C., Desbiolles F., Doglioli A., Faure V., Fraysse M., Gonzalez J-L., Pairaud I., Petrenko A., Thouvenin B., Tronczynski J., Verney R., Yohia C., Zebracki M., 2010. MASSILIA: Modélisation de la baie de MArSeILLe : Influence des apports Anthropiques de la métropole sur l'écosystème marin. Colloque EC2CO INSU, 23-25 Novembre 2010, Toulouse.

Fraysse M., Pinazo C., Faure V., Pairaud I., 2011. 3D coupled physical and biogeochemical modelling approach: limitation on biological productions by the different nutrients in Marseilles coastal area. EGU General Assembly, 3 - 8 april 2011, Vienna, Austria.

Faure V., Pinazo C., Fraysse M., Pairaud I., 2011. 3D coupled physical-biogeochemical modelling of the Bay of Marseille: role of the physical forcing on the modulation of natural and anthropogenic nutrient inputs. EGU General Assembly, 3 - 8 april 2011, Vienna, Austria.

Fraysse M., Pairaud I.L., Faure V. and Pinazo C., 2012. 3D coupled physical-biogeochemical modeling in a coastal area: Study of Rhone River diluted water intrusion in Marseille's Bay. JONSMOD 2012 Workshop, 21-23 May 2012, Brest.

Pinazo C., M. Fraysse, R. Fuchs, B. Thouvenin, I. Pairaud , P. Garreau, 2012. Modelling the Gulf of Lions coastal area with a 3D coupled physical and biogeochemical approach. 50th ECSA Conference, 3-7 June 2012, Venice, Italy

Verney R., Ph. Cann, C. Jany, I. Pairaud, B. Thouvenin, C. Pinazo, 2013. Sediment transport in the Bay of Marseille : Role of extrem events. Coastal Dynamics 2013, June 24-28 2013, Arcachon, France

Stages

- stage de Licence " Comparaison des algorithmes pour calculer la chlorophylle_a à partir des images couleur de l'eau avec les mesures in-situ." (mars - mai 2013). Mathieu Caffin, Licence SNTE Parcours MER.

- stage de Master1 Recherche «Analyse des résultats du modèle couplé physique biogéochimique RHOMA à partir des techniques S.O.M."» (juin - août 2012). Nicolas Chaplain, Master d'Océanographie, OPB, Marseille.

- stage de Master1 Recherche «Analyse des résultats de modèle couplé physique biogéochimique à partir des techniques S.O.M."» (juin - juillet 2011). Matthieu Dorel, Master d'Océanographie, OPCB, Marseille.

- stage d'année de césure ingénieur « Utilisation des méthodes SOM (Self-Organizing Maps) pour le traitement et l'analyse des simulations 3D de modèles couplés physiques et biogéochimiques » (janvier-juin 2011). Jean Soavi, élève de 2ème année de l'ENSEEIHT, Toulouse.

- stage ingénieur 1ère année «Comparaison de l'activité mésoéchelle entre différents modèles numériques 3D de circulation.» (mai – juillet 2011). Antoine Boyron, ENS Lyon.

- stage de Master1 Recherche «Comparaison des données satellites GlobColour GSM avec les données in situ de la campagne Chlorosat 2009"» (mai – juin 2011). Romain Rainaud, Master d'Océanographie, OPCB, Marseille).

- stage de Master1 Recherche «Analyse des résultats de modèle couplé physique biogéochimique à partir des techniques S.O.M."» (juin - juillet 2011). Matthieu Dorel, Master d'Océanographie, OPCB, Marseille).

- stage de DUT Chimie « Analyse chimique et Description de la distribution de la chlorophylle_a dans la baie de Marseille» (janvier – juin 2010). Thomas Castaner, DUT Chimie, Marseille.

- stage de Master1 Recherche «Analyse des données ADCP de coque du N.O. Tethys» (janvier – juin 2010). Fabien Desbiolles, Master d'Océanographie, OPCB parcours modélisation couplée, Marseille).

- stage de Master2 Recherche «Modélisation 3D couplée physique - biogéochimique de la baie de Marseille» (janvier – juin 2010). Marion Fraysse, Master d'Océanographie, OPCB parcours modélisation couplée, Marseille).

- stage de Licence « Comparaison des mesures *in-situ* de la concentration de chlorophylle_a dans la baie de Marseille avec les mesures obtenues à partir des images satellites de couleur de l'eau » (janvier – mai 2009). Julie Rimaud, L3 Sciences de la Mer, Marseille.

- stage de Licence « Etude des conditions de forçage environnemental (vent, pluie, Rhône) durant la période d'étude du projet MASSILIA et de leur impact sur la distribution de la concentration de

chlorophylle_a dans la baie de Marseille obtenue à partir des images satellites de couleur de l'eau » (octobre 2008-aout 2009). Fabien Desbiolles, L3 Physique-Chimie, Marseille.

- stage Pré Doctorat « Traitement des données d'érodimétrie des sédiments de la baie de Marseille : Intercomparaison de dispositifs de mesure » (septembre-novembre 2008). Nathalie Molnar, MNHN, Paris.

- stage de Licence « Caractérisation de typologie de la distribution de la concentration de chlorophylle_a dans le Golfe du Lion à partir des images satellites de couleur de l'eau : Etude de l'impact des forçages environnementaux » (janvier-février juin-juillet 2008). Fabien Desbiolles, L3 Physique-Chimie, Grenoble.

Thèses:

Marion Fraysse: " Rôle du forçage physique sur l'écosystème à l'est du Golfe du Lion : modulation de l'impact des apports anthropiques en sels nutritifs et matière organique étudiée par modélisation 3D couplée physique et biogéochimique" co-direction C. Pinazo (LOPB) et I. Pairaud LER/PAC, Ifremer La Seyne (2010-2013).

Post Doctorats:

Vincent Faure: « Coupled Physical-Biogeochemical 3D Modelling in the Bay of Marseilles ». (avril 2009 - mars 2011).