



IFREMER

**UTILISATION DU MODELE ECO-MARS 3D POUR
EVALUER LE BON ETAT ECOLOGIQUE DE LA FAÇADE
MANCHE-ATLANTIQUE AU REGARD DU DESCRIPTEUR 5
« EUTROPHISATION » DE LA DCSMM**

Phase 1

IFREMER	Rapport n°POC.0399_1	V2.0	08/11/2011
----------------	-----------------------------	-------------	-------------------

SUIVI DES MODIFICATIONS

Version	Date	Modifications	Auteurs	Validé par
1.0	14/10/2011		M Dussauze	J.P Maze
2.0	08/11/2011		M.Dussauze	

LISTE DE DIFFUSION

Nom	Organisme	Date de relecture
Patrick Camus	Ifremer	
Caroline Gernez	Ifremer	
Alain Lefebvre	Ifremer	
Pierre Le Hir	Ifremer	
Alain Menesguen	Ifremer	

INTRODUCTION	2
1 PRÉSENTATION DU MODÈLE.....	3
1.1 EMPRISE DU MODÈLE.....	3
1.2 DESCRIPTION DU MODÈLE BIOGÉOCHIMIQUE	5
1.3 DONNÉES DISPONIBLES	7
1.3.1 Données <i>in situ</i>	7
1.3.2 Données satellitaires.....	8
1.4 COMPARAISON MODÈLE-MESURES	9
1.4.1 Répartition spatiale moyenne de la chlorophylle de surface par an	9
1.4.2 Variation temporelle de la chlorophylle de surface par strate bathymétrique.....	11
1.4.3 Nutriments et chlorophylle à quelques stations ponctuelles	13
2 COMPARAISON AVEC LES CARTES SATELLITAIRES ET <i>IN SITU</i>.....	18
2.1 PRINCIPE DU CALCUL DU PERCENTILE	18
2.2 COMPARAISON DU PERCENTILE 90 DE CHLOROPHYLLE SIMULÉE ET SATELLITAIRE	19
2.3 COMPARAISON DES CARTES DE NUTRIMENTS ISSUES DU MODELE ET DES MESURES	23
3 CARTES DES PERCENTILES DES DIFFÉRENTS INDICATEURS.....	35
3.1 N INORGANIQUE DISSOUS EN PÉRIODE HIVERNALE NON-PRODUCTIVE (SURFACE)	39
3.1.1 Percentile 90	39
3.1.2 Percentile 50	40
3.1.3 Percentile 10	41
3.2 P INORGANIQUE DISSOUS EN PÉRIODE HIVERNALE NON-PRODUCTIVE (SURFACE)	42
3.2.1 Percentile 90	42
3.2.2 Percentile 50	43
3.2.3 Percentile 10	44
3.3 RAPPORT N/P DES FORMES INORGANIQUES DISSOUTES EN PÉRIODE HIVERNALE	45
3.3.1 Percentile 90	45
3.3.2 Percentile 50	46
3.3.3 Percentile 10	47
3.4 CHLOROPHYLLE TOTALE EN PÉRIODE PRODUCTIVE (SURFACE).....	48
3.4.1 Percentile 90	48
3.4.2 Percentile 50	49
3.4.3 Percentile 10	50
3.5 RAPPORT DIATOMÉES/DINOFLAGELLÉS EN PÉRIODE PRODUCTIVE (SURFACE).....	51
3.5.1 Percentile 90	51
3.5.2 Percentile 50	52
3.5.3 Percentile 10	53
3.6 TRANSPARENCE EN PÉRIODE PRODUCTIVE	54
3.6.1 Percentile 90	54
3.6.2 Percentile 50	55
3.6.3 Percentile 10	56
3.7 OXYGÈNE DISSOUS EN PÉRIODE PRODUCTIVE (FOND).....	57
CONCLUSION.....	59
RÉFÉRENCES	63

INTRODUCTION

La DCSMM (Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin) a pour but de mettre en place des actions qui doivent mener au bon état écologique des masses d'eaux marines.

Pour la France, un « Plan d'Action pour le Milieu Marin » (PAMM, article L219-9 du code de l'environnement) va être mis en œuvre à l'échelle des quatre sous-régions: Manche-Mer du Nord, Golfe de Gascogne, Mers Celtiques et Méditerranée Occidentale.

La première étape de ce plan d'action est l'évaluation de l'état écologique actuel de ces quatre sous régions au regard de 11 descripteurs listés dans l'annexe 1 de la directive.

La deuxième étape de ce plan réside dans la définition du bon état écologique (BEE) toujours basée sur les 11 descripteurs qualitatifs.

Pour cette étude, le descripteur étudié est le numéro 5 « eutrophisation » dont l'évaluation initiale est actuellement réalisée à partir de mesures *in situ* (température, salinité, nutriments) et à partir de l'imagerie satellitaire (chlorophylle).

L'étude, qui sera décomposée en deux phases, doit permettre d'évaluer, en utilisant les résultats du modèle de production primaire ECO-MARS3D de l'Ifremer, ce qui pourrait être considéré comme le Bon Etat Ecologique de la façade Manche-Atlantique au regard du descripteur 5 en comparant les classements obtenus en appliquant diverses normes existantes (OSPAR, DCE, HELCOM) à l'état écologique actuel d'une part, à une situation théorique à apports "naturels" de nitrates (N) et phosphates (P) d'autre part.

Ce rapport présente les résultats de la phase 1 de l'étude qui consiste :

- à présenter rapidement les résultats et la validation du modèle sur la période 2001-2003 qui balaye des années très contrastées (2001 humide, 2002 moyenne, 2003 caniculaire).
- à comparer des cartes de synthèses des résultats du modèle à des cartes d'état initial calculées d'après les mesures *in situ* (nutriments) et satellitaires (chlorophylle).
- à utiliser les sorties du modèle afin d'établir des cartes de percentiles (10, 50 et 90) de différents indicateurs associés au descripteur 5 qui permettront d'aider à l'établissement de l'évaluation initiale de l'état écologique actuel des eaux marines. Ces indicateurs sont :
 - N inorganique dissous en période hivernale non-productive (novembre à février)
 - P inorganique dissous en période hivernale non-productive
 - rapport N/P des formes inorganiques dissoutes en période hivernale non-productive
 - chlorophylle totale en période productive (mars à octobre)
 - rapport diatomées/dinoflagellés en période productive
 - transparence en période productive
 - oxygène dissous au fond en période productive

1 PRESENTATION DU MODELE

Ce chapitre 1 reprend quelques résultats issus de l'étude de calibration/Validation du modèle ECO-MARS 3D sur l'emprise MANGA (MENESGUEN et DUSSAUZE, 2011).

Le modèle ECO-MARS 3D est composé d'un modèle hydrodynamique en trois dimensions MARS3D (3D hydrodynamical Model for Application at Regional Scale) développé à l'Ifremer (LAZURE et DUMAS, 2008) auquel a été couplé un modèle biogéochimique simulant à la fois les proliférations phytoplanctoniques (diatomées, dinoflagellés) et les proliférations d'ulves (macroalgues vertes) (MENESGUEN et DUSSAUZE, 2011).

MARS est un modèle aux différences finies fondé sur la résolution des équations de Navier-Stokes. Il est basé sur la séparation des modes barotrope et barocline et fonctionne selon le principe des emprises emboîtées. Un modèle 2D de rang 0 (couvrant la zone Atlantique-Nord-Ouest et mer du Nord) donne les conditions aux limites en élévation de la surface libre à un modèle de rang 1. Les forçages entre l'océan et l'atmosphère sont calculés à l'aide des données issues du modèle ARPEGE de Météo France, qui fournit tous les paramètres (température de l'air, vent, pression, couverture nuageuse, humidité relative) permettant de disposer de forçages météorologiques réalistes.

1.1 EMPRISE DU MODELE

Le modèle de rang 1, développé pour être mis en œuvre en fonctionnement opérationnel et dont les résultats sont accessibles quotidiennement sur le site previmer.org, couvre la zone 43°12'N à 52°45'N, 8°05'W à 5°E (figure 1). Celle-ci englobe donc tout le Golfe de Gascogne, la Mer d'Iroise et la Manche, ainsi que les parties sud de la Mer d'Irlande et de la Mer du Nord. La moitié nord est totalement comprise sur le plateau continental (profondeurs $\leq 200\text{m}$), tandis que la partie sud-ouest est située au-dessus de la plaine abyssale (profondeurs $\geq 4000\text{m}$). Cette emprise permet de couvrir la totalité de la sous-région DCSMM "Manche-Mer du Nord", ainsi que la majeure partie des deux autres sous-régions DCSMM "Mers celtiques" et "Golfe de Gascogne" (figure 2) à l'exception de leur pointe occidentale. Chaque maille carrée a un côté de 4km, et est discrétisée verticalement sur 30 niveaux sigmas.

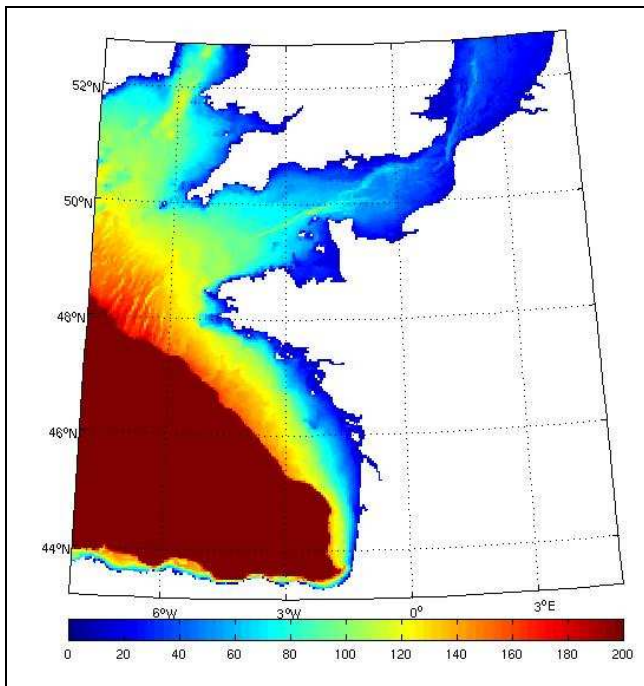


Figure 1: Emprise de la zone MANGA.

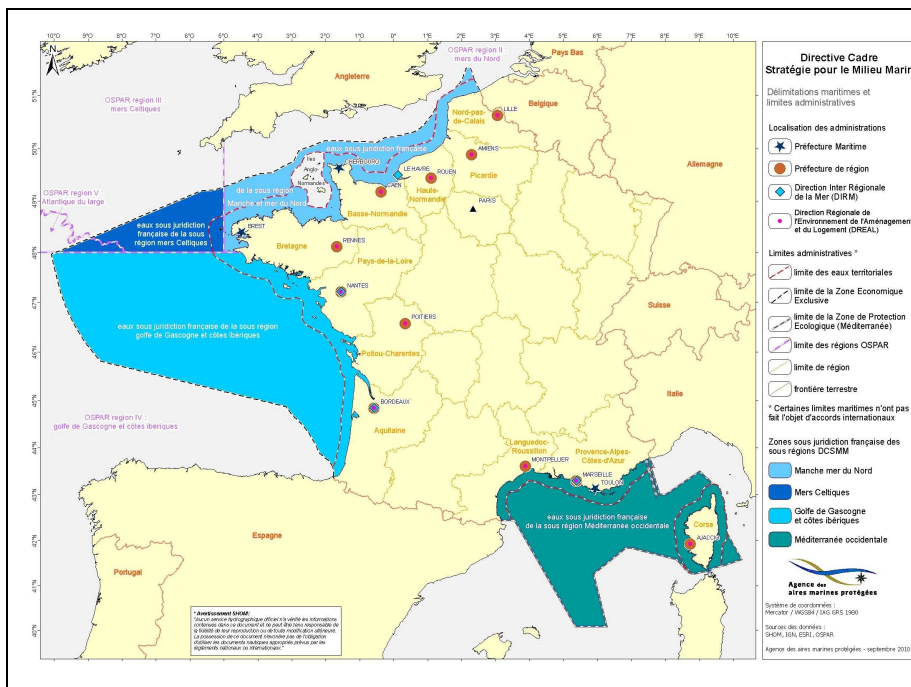


Figure 2: Sous-zones DCSMM pour la France métropolitaine.

1.2 DESCRIPTION DU MODELE BIOGEOCHIMIQUE

Les processus et leurs équations sont décrits en détails dans l'étude effectuée par Menesguen et Dussauze (2011) dans le cadre du projet PREVIMER.

Le modèle biogéochimique est un modèle de type NPZD (NUTRIMENT > PHYTOPLANCTON > ZOOPLANCTON > DETRITIQUE) qui reproduit le cycle de l'azote, du phosphore et de la silice. Dans l'azote minéral dissous, on distingue le nitrate (NO_3) de l'ammonium (NH_4), la forme nitrite (NO_2) étant négligée. Le phosphore minéral est représenté sous forme PO_4 dissoute et sous forme adsorbée sur les particules argileuses en suspension dans la colonne d'eau.

Le compartiment phytoplanctonique est représenté par trois variables : les diatomées, majoritaires dans le milieu au printemps, les dinoflagellés, surtout visibles en été et automne, et les nanoflagellés, d'apparitions plus fugaces. Ces trois types de microalgues sont exprimés dans le modèle sous la forme de leur contenu en azote.

Afin de prendre en compte une régulation par broutage du stock phytoplanctonique, le zooplancton est également simulé par deux classes de taille : le microzooplancton, qui ne se nourrit que de nanoflagellés et de matière organique détritique, et le mésozooplancton, qui ne se nourrit que de diatomées, de dinoflagellés et de microzooplancton.

À ces variables d'état du modèle écologique, s'ajoutent les variables d'état permettant de représenter les caractéristiques physiques du milieu : la salinité, la température, et les matières en suspension minérales, qui conditionnent la turbidité du milieu et la pénétration de la lumière.

L'organigramme général montrant les interrelations entre les variables d'état est fourni par la figure 3.

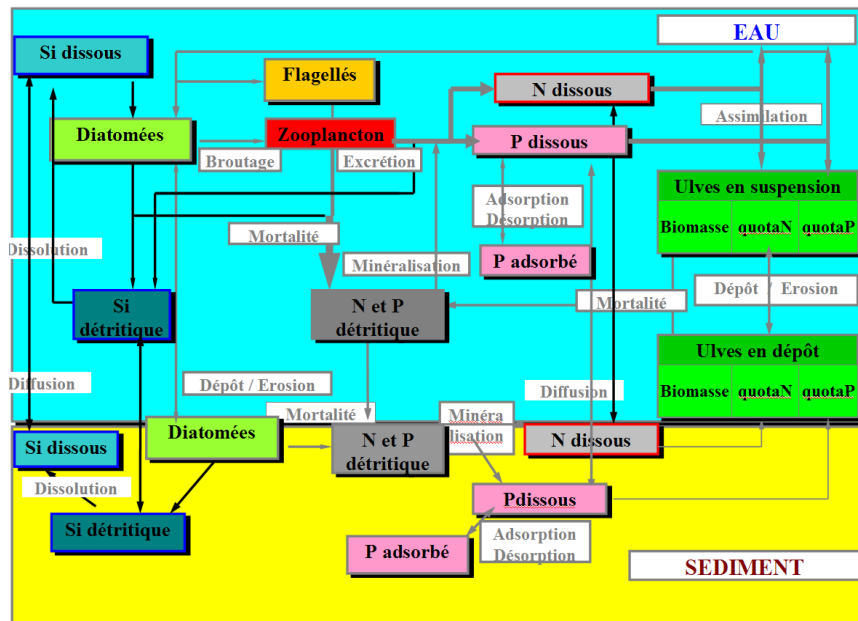


Figure 3: Schéma conceptuel du modèle biogéochimique.

Deux modules complémentaires ont été rajoutés au modèle de base : un module représentant de manière simple le compartiment benthique et un module modélisant l'évolution de l'oxygène dissous dans la colonne d'eau.

Très rudimentaire, le module benthos sert, dans les modèles ne comportant pas de couches sédimentaires avec gestion du matériel organique particulaire déposé au fond et des substances dissoutes dans le fluide interstitiel, à assurer un succédané de compartiment benthique par des variables fixées ne prenant des valeurs non-nulles que dans la couche d'eau de fond. Pour l'instant, ce module gère le stockage-déstockage des formes détritiques des 3 éléments azote, phosphore et silicium. En fonction de la vitesse du courant au fond, chaque variable détritique en suspension dans la dernière couche d'eau transfère une partie de sa masse à la variable détritique fixée (dépôt selon la formule de Krone) et regagne simultanément une partie de la masse de la variable détritique fixée (érosion selon la formule de Parthéniades). Les 3 variables détritiques fixées se dégradent en donnant, dans la couche d'eau de fond, les mêmes variables inorganiques dissoutes que les variables détritiques en suspension dans l'eau, mais avec une vitesse réduite d'un facteur constant défini en paramètre.

Le module d'oxygène dissous est fondé sur le modèle de Chapelle et al. (1994) et simule l'évolution de l'oxygène dissous par le biais d'équations représentant la production et la consommation d'oxygène. La production d'oxygène provient de la photosynthèse qui est fonction de la biomasse phytoplanctonique et par réaération à l'interface eau-air. La consommation d'oxygène provient de la respiration du phytoplancton et du zooplancton et des processus de minéralisation et nitrification de la matière détritique.

Le module oxygène n'est pas couplé au modèle biogéochimique de base. Il n'y a donc pas de rétroaction des teneurs en oxygène sur la reminéralisation de la matière détritique.

1.3 DONNEES DISPONIBLES

1.3.1 Données in situ

De nombreuses données in situ ont été rassemblées afin de valider le modèle. Les données proviennent principalement des réseaux REPHY, MAREL et SOMLIT pour le littoral français, du CEFAS et du WCO (Western Channel Observatory) pour le littoral anglais (figure 4), du BMDC (Belgian Marine Data Center) pour le littoral belge, ainsi que de campagnes océanographiques (MODYCOT). Toutes les comparaisons ne seront pas montrées dans la suite du rapport.

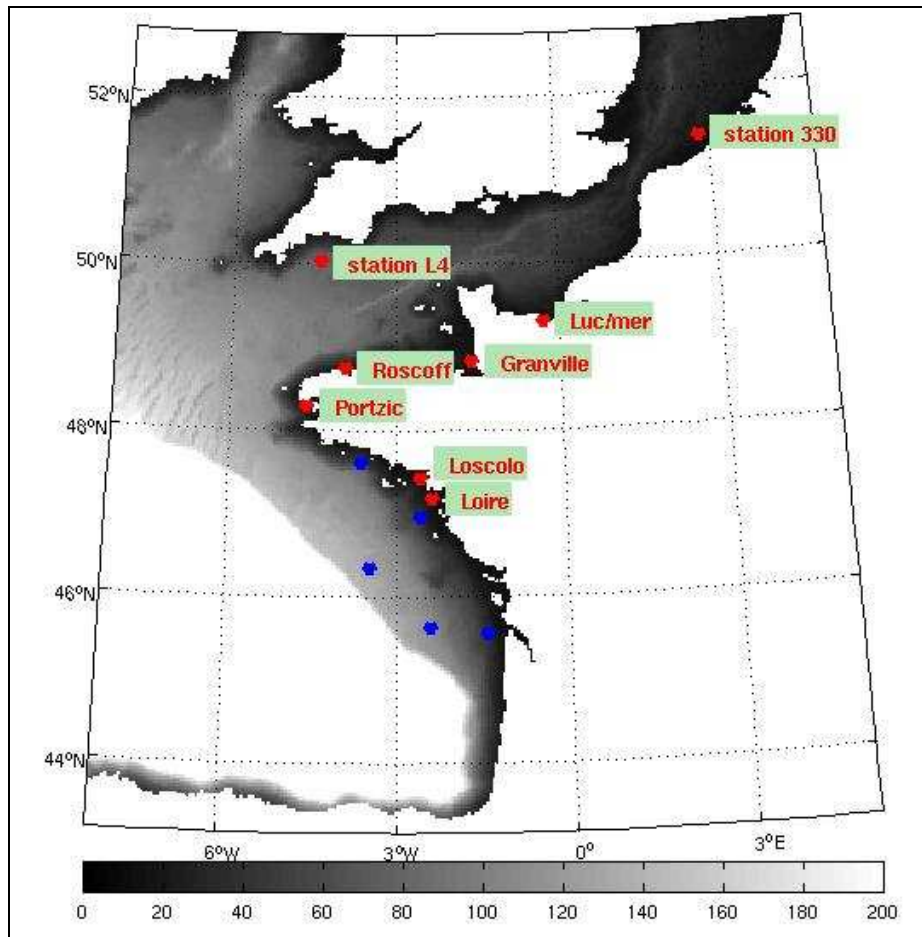


Figure 4: Points de mesures utilisés pour la validation du modèle (en bleu : les points MODYCOT).

1.3.2 Données satellitaires

L'imagerie satellitaire permet d'avoir une couverture quasi journalière (si absence de nuages) de la zone Manche/Golfe de Gascogne en température, matière en suspension et chlorophylle a (Figure 5) et apparaît comme un complément indispensable aux mesures *in situ*, éparses dans le temps et dans l'espace bien qu'une certaine prudence soit requise dans les zones côtières très turbides où les concentrations en chlorophylle peuvent être surestimées (Gohin et al., 2008).

La concentration en chlorophylle de surface est obtenue en routine à partir d'un algorithme spécifique (Gohin et al, 2002) qui utilise la réflectance mesurée par les satellites SeaWifs (Sea-viewing Wide Field Instrument Sensor), MODIS ou MERIS. Cette méthode se base sur l'algorithme OC4 (O'Reilly et al., 1998) qui utilise le rapport Bleu/Vert sur 4 canaux (433, 490, 510, 555 nm) afin d'obtenir les valeurs de chlorophylle en eau peu turbide, et prend également en compte un cinquième canal (412 nm) qui permet d'obtenir des valeurs de chlorophylle plus conformes aux mesures dans les eaux côtières très turbides riches en matières en suspensions minérales (qui absorbent également dans le bleu comme la chlorophylle).

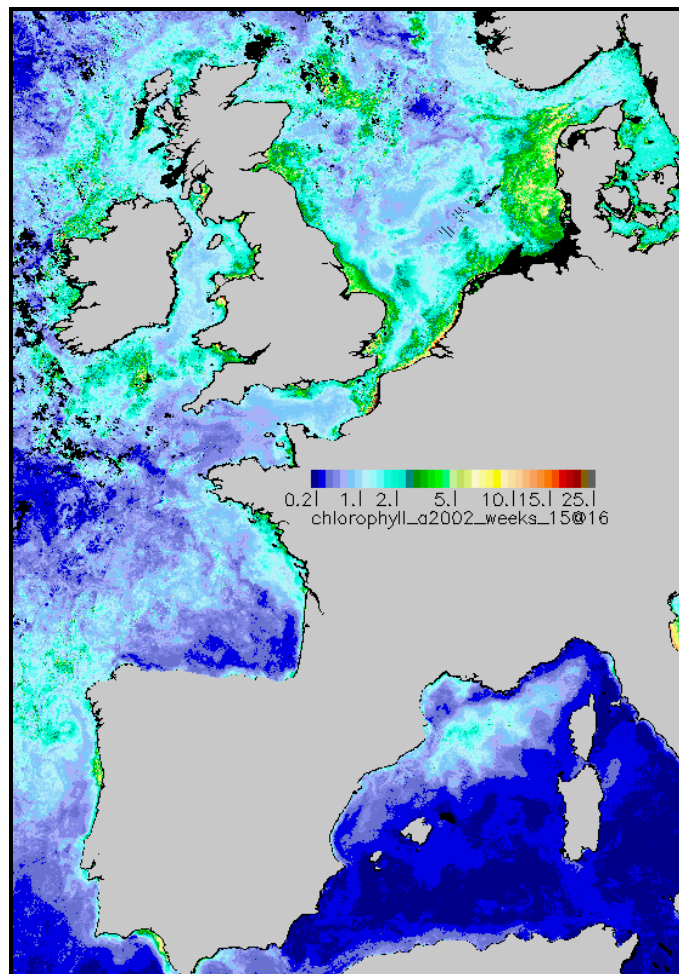


Figure 5: Chlorophylle SeaWifs ($\mu\text{g/L}$) pour la quinzaine 8 de l'année 2002.

1.4 COMPARAISON MODELE-MESURES

La première étape de la validation a consisté à évaluer les caractéristiques spatiales du modèle en comparant sa répartition annuelle moyenne de chlorophylle de surface avec celle fournie par le satellite pour les différentes emprises.

Dans la deuxième étape, afin d'évaluer les caractéristiques spatio-temporelles du modèle, l'emprise a été divisée en 5 strates bathymétriques (0-25 m, 25-50m, 50-100m, 100-200m et >200m). Cette séparation arbitraire permet d'avoir une vue synoptique du comportement du modèle en ce qui concerne la chlorophylle sur différentes zones de l'emprise allant des panaches de fleuves très enrichis aux zones du large moins impactées.

La troisième étape a consisté à comparer plus en détail le modèle aux mesures de diverses variables (nitrate, phosphate, silicate, chlorophylle) effectuées sur quelques stations.

1.4.1 Répartition spatiale moyenne de la chlorophylle de surface par an

Les figures 6, 7 et 8 présentent la moyenne annuelle de chlorophylle sur les années 2001 à 2003, pour l'emprise MANGA-4km. Les résultats obtenus sont conformes aux moyennes annuelles satellitaires aussi bien du point de vue de la répartition spatiale, que du point de vue des valeurs.

En effet, les zones les plus productives sont les estuaires de la Gironde, de la Loire, de la Seine et du Rhin très enrichies en sels nutritifs. La bande côtière Atlantique et la partie française de la Manche, sous influences de la Loire, de la Vilaine, de la Gironde et de la Seine, sont également productives.

On peut toutefois noter que le modèle a tendance à sous-estimer la moyenne annuelle en Manche à partir de la Baie de Seine et à surestimer la moyenne annuelle en Atlantique. La sous-estimation est franche dans les zones très turbides de l'estuaire de la Severn et au niveau de la Tamise au sud-est de l'Angleterre. Comme les moyennes annuelles de chlorophylle modélisée sont plus proches des moyennes satellitaires dans le reste du domaine, deux cas sont possibles pour ces deux zones : soit le satellite surestime la chlorophylle en raison de la turbidité ; soit le phytoplancton présent dans ces zones possède des paramètres de croissance qui n'entrent pas dans le faisceau de paramètres des 3 types de phytoplancton modélisés.

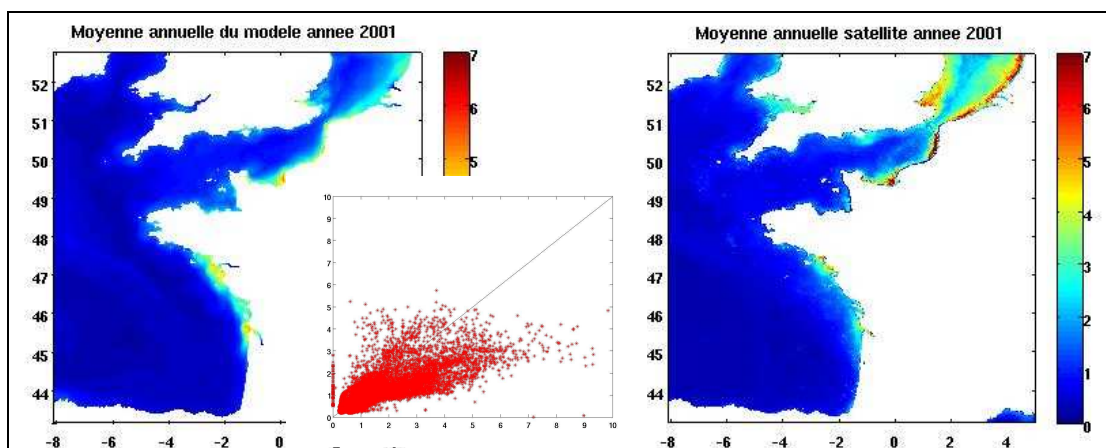


Figure 6: Chlorophylle ($\mu\text{g/L}$) moyenne annuelle simulée (à gauche) et satellitaire (à droite) sur l'emprise MANGA pour l'année 2001.

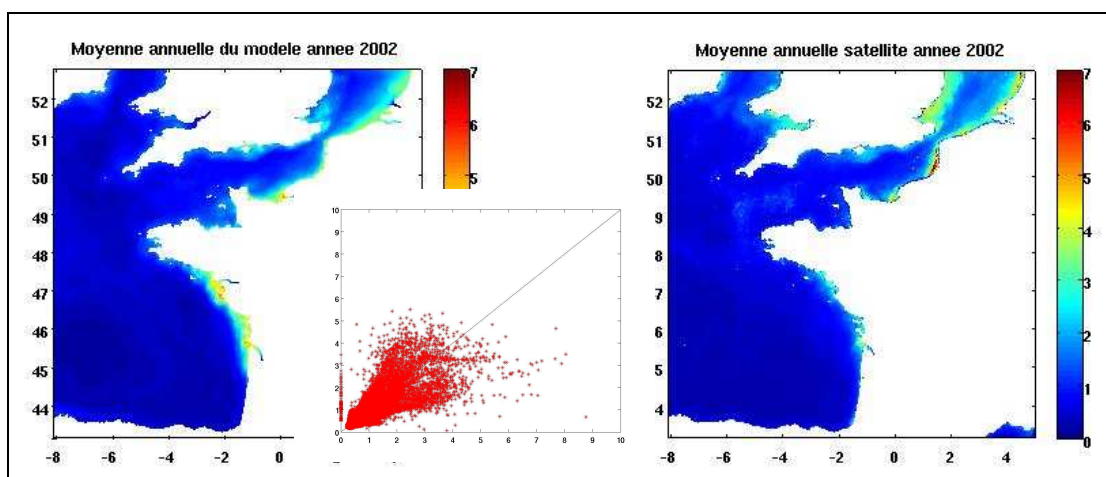


Figure 7: Chlorophylle ($\mu\text{g/L}$) moyenne annuelle simulée (à gauche) et satellitaire (à droite) sur l'emprise MANGA pour l'année 2002.

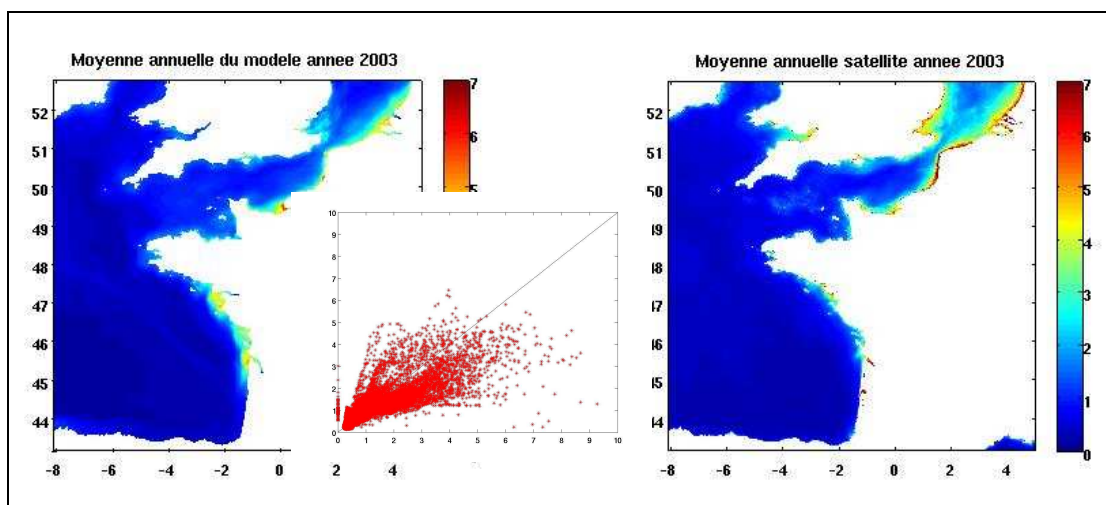


Figure 8: Chlorophylle ($\mu\text{g/L}$) moyenne annuelle simulée (à gauche) et satellitaire (à droite) sur l'emprise MANGA pour l'année 2003.

1.4.2 Variation temporelle de la chlorophylle de surface par strate bathymétrique

Afin d'avoir une vue générale du comportement du modèle (phasage et amplitude du bloom), l'emprise MANGA a été divisée en 5 strates bathymétriques (0-25 m, 25-50m, 50-100m, 100-200m et supérieure à 200m). A partir des pixels de chaque strate, la moyenne de chlorophylle a été calculée par quinzaine pour le modèle et pour le satellite.

Cette comparaison a été effectuée pour les années 2001 à 2003. D'une manière générale, les comparaisons (figures 9, 10 et 11) mettent en évidence un bon phasage du bloom printanier sur quasiment toute la zone. L'amplitude du bloom est bien représentée pour les zones hauturières (profondeur supérieure à 100m). En revanche, elle est sous-estimée au niveau des zones très côtières (entre 0 et 50m) notamment en 2001 et à un degré moindre en 2003. De plus, la variabilité interannuelle n'est pas obtenue dans cette bande. A partir de 50m, l'amplitude du bloom est plutôt surestimée (notamment en 2002 et 2003).

Le modèle reproduit correctement le bloom automnal au moment de la déstratification (visible sur les figures à partir de 50m) qui remet à disposition des nutriments dans la couche de surface.

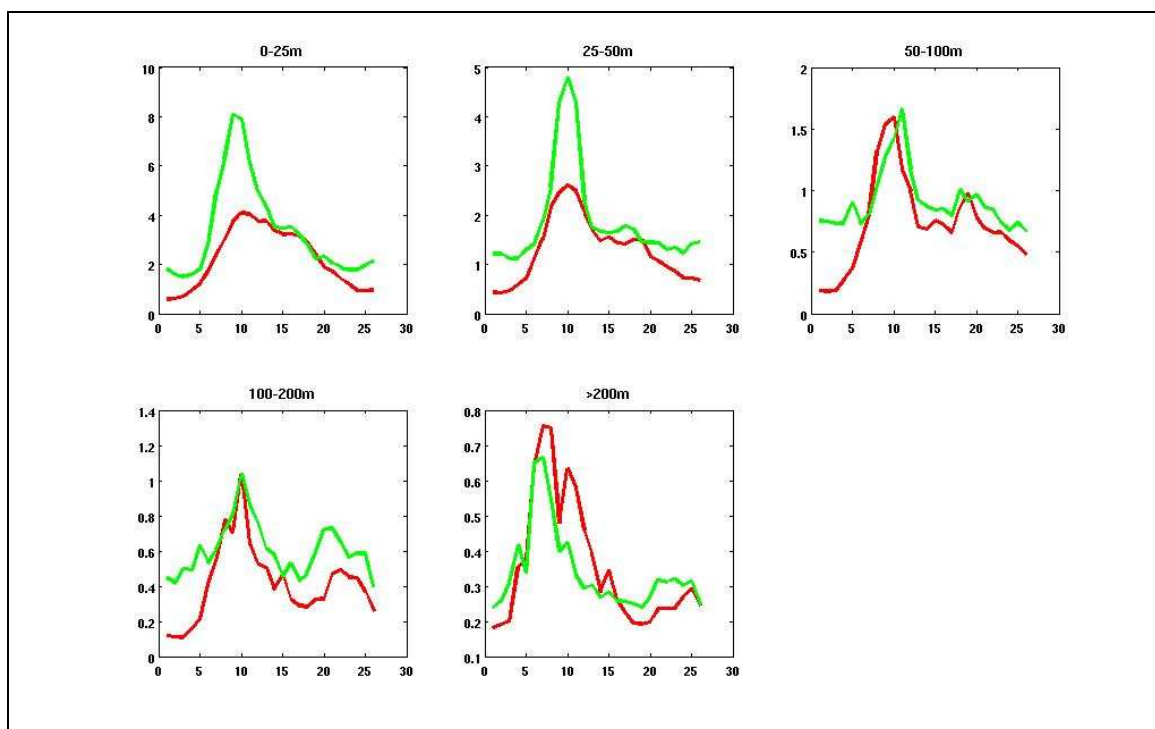


Figure 9: Chlorophylle par quinzaine ($\mu\text{g/L}$) simulée (en rouge) et satellitaire (en vert) par strates bathymétriques et pour l'année 2001 sur l'emprise MANGA 4km.

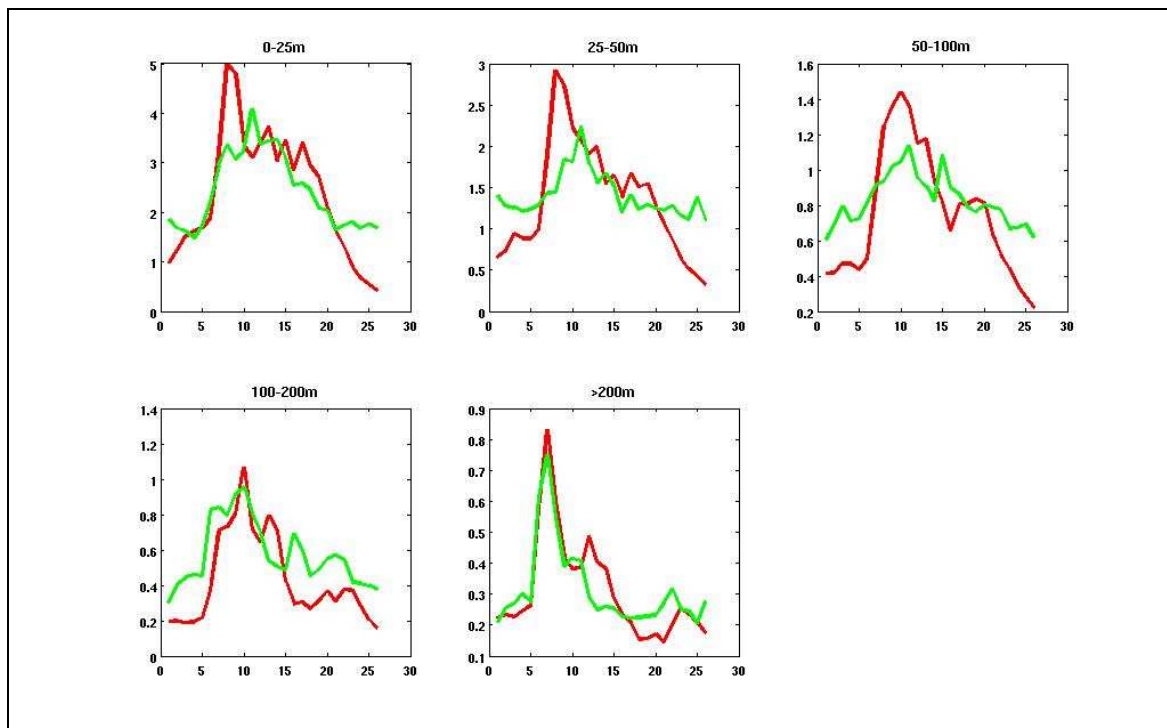


Figure 10: Chlorophylle par quinze jours ($\mu\text{g/L}$) simulée (en rouge) et satellitaire (en vert) par strates bathymétriques et pour l'année 2002 sur l'emprise MANGA 4km.

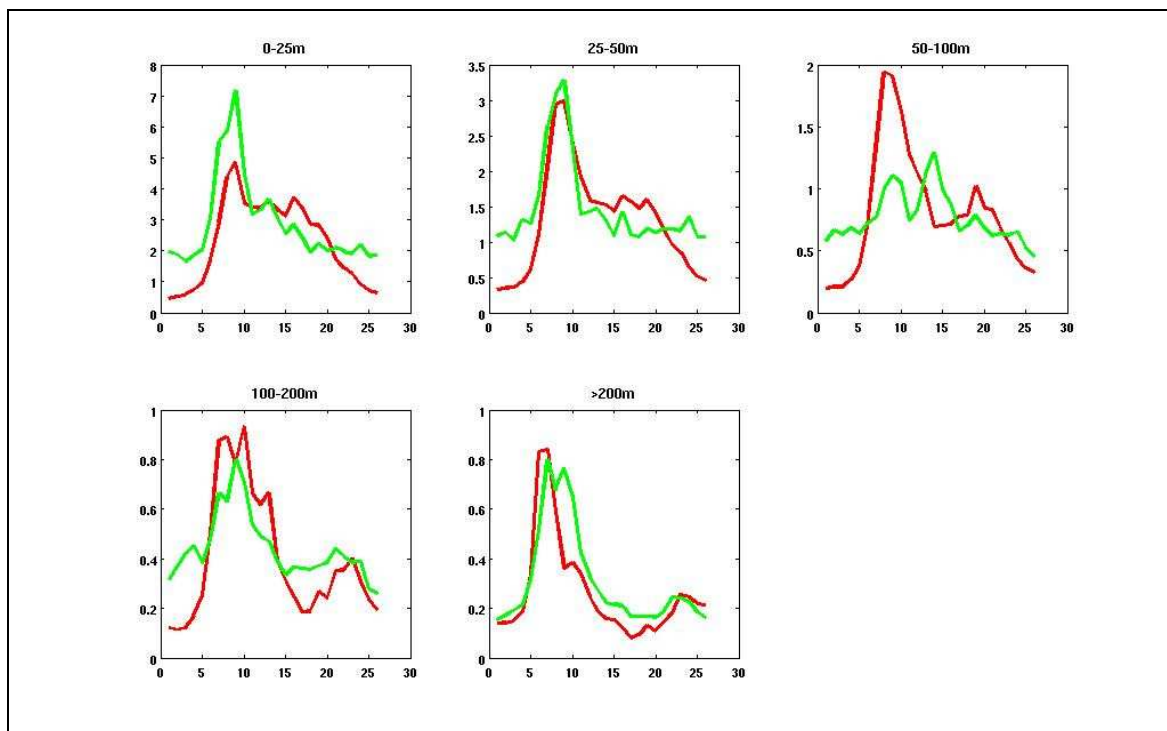


Figure 11: Chlorophylle par quinze jours ($\mu\text{g/L}$) simulée (en rouge) et satellitaire (en vert) par strates bathymétriques et pour l'année 2003 sur l'emprise MANGA 4km.

1.4.3 Nutriments et chlorophylle à quelques stations ponctuelles

D'une manière générale (figures 12 à 19), le modèle réussit à reproduire le cycle saisonnier des 3 nutriments, sauf dans la zone belge (figure 12) où la turbidité retarde et amoindrit excessivement la croissance phytoplanctonique.

En ce qui concerne l'évolution du nitrate, le modèle est en phase avec la mesure, montrant la remontée automnale assez lente due à la reminéralisation, puis la baisse printanière rapide due à la consommation par le phytoplancton. Le désaccord important du modèle avec les mesures tant de nitrate que de phosphate sur la seule année 2001 à Plymouth (figure 13) fait penser plutôt à une sous-estimation systématique des mesures cette année-là, qui apparaît inexplicablement beaucoup moins riche en nitrate et phosphate que les 3 autres années, alors que le contexte océanographique plaide pour une assez grande régularité des cycles de N et P en cet endroit.

On note également que le modèle surestime les concentrations en nitrate à Luc/mer en Baie de Seine. Cela est expliqué par le fait que la maille de rejet de la Seine est trop près de l'embouchure : au niveau de Honfleur alors que les données de débits et de concentrations ont été mesurées à Poses beaucoup plus en amont.

Concernant les concentrations en silicate et en phosphate, le modèle reproduit bien la chute des concentrations au moment du bloom mais est décalé sur la remontée automnale.

En ce qui concerne la chlorophylle de surface, le modèle reproduit de manière correcte l'occurrence du bloom printanier sur quasiment tous les points de mesures, sauf dans la zone côtière belge (figure 12). En revanche, à l'opposé du résultat annuel moyen, les valeurs maximales du bloom peuvent être sous-estimées de manière particulièrement flagrante dans les zones estuariennes.

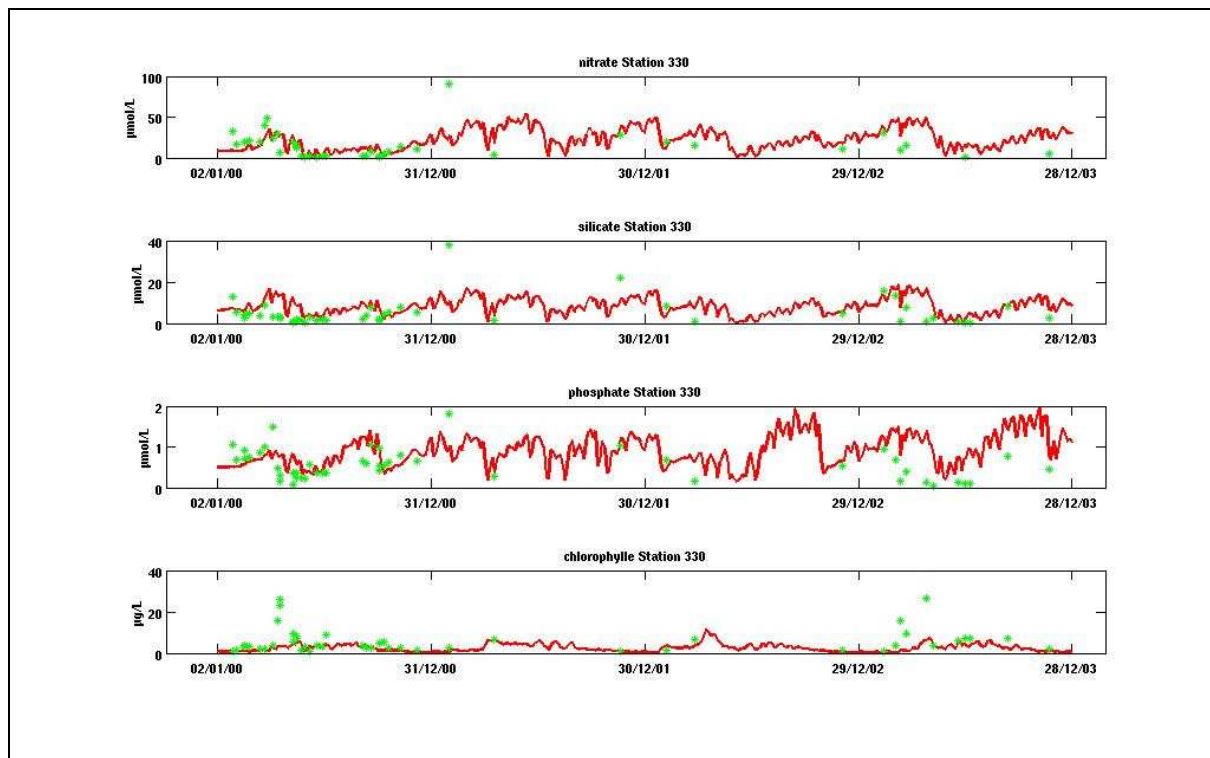


Figure 12: Nitrate, silicate, phosphate et chlorophylle de surface à la station belge 330 pour l'emprise MANGA (en vert : mesure ; en rouge : modèle).

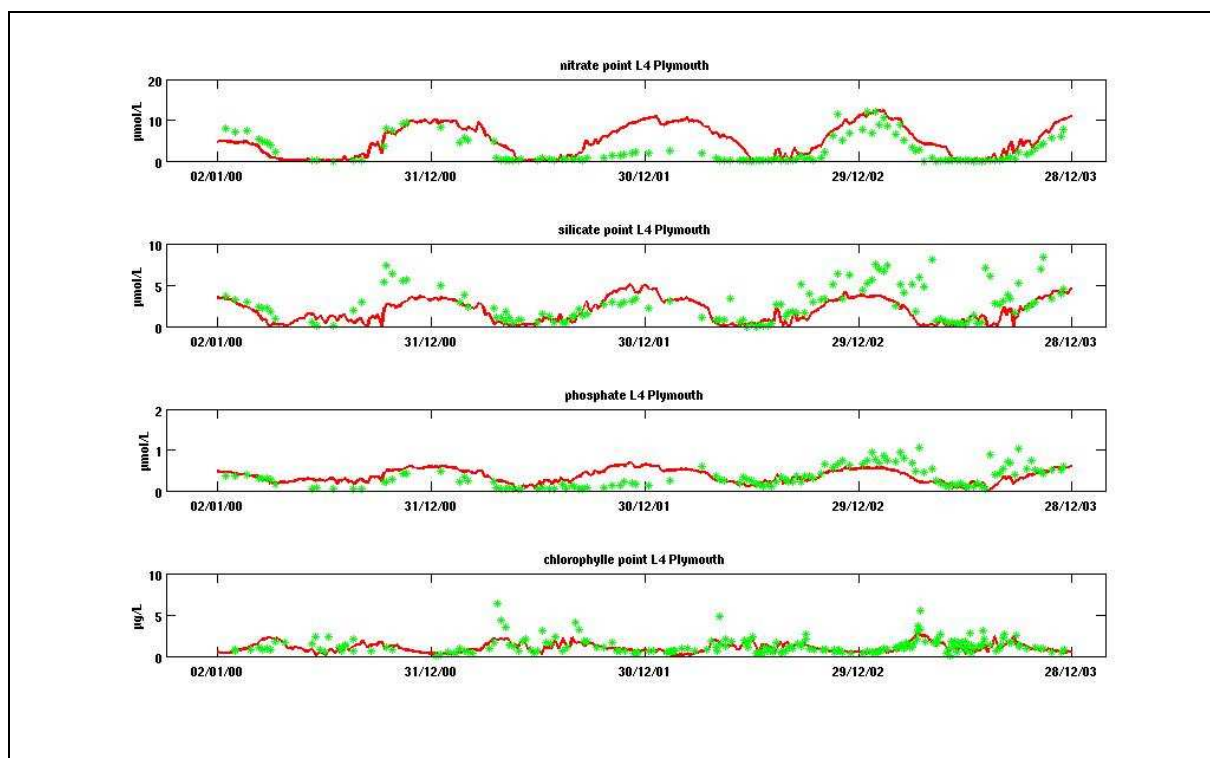


Figure 13: Nitrate, silicate, phosphate et chlorophylle de surface à la station anglaise L4 pour l'emprise MANGA (en vert : mesure ; en rouge : modèle).

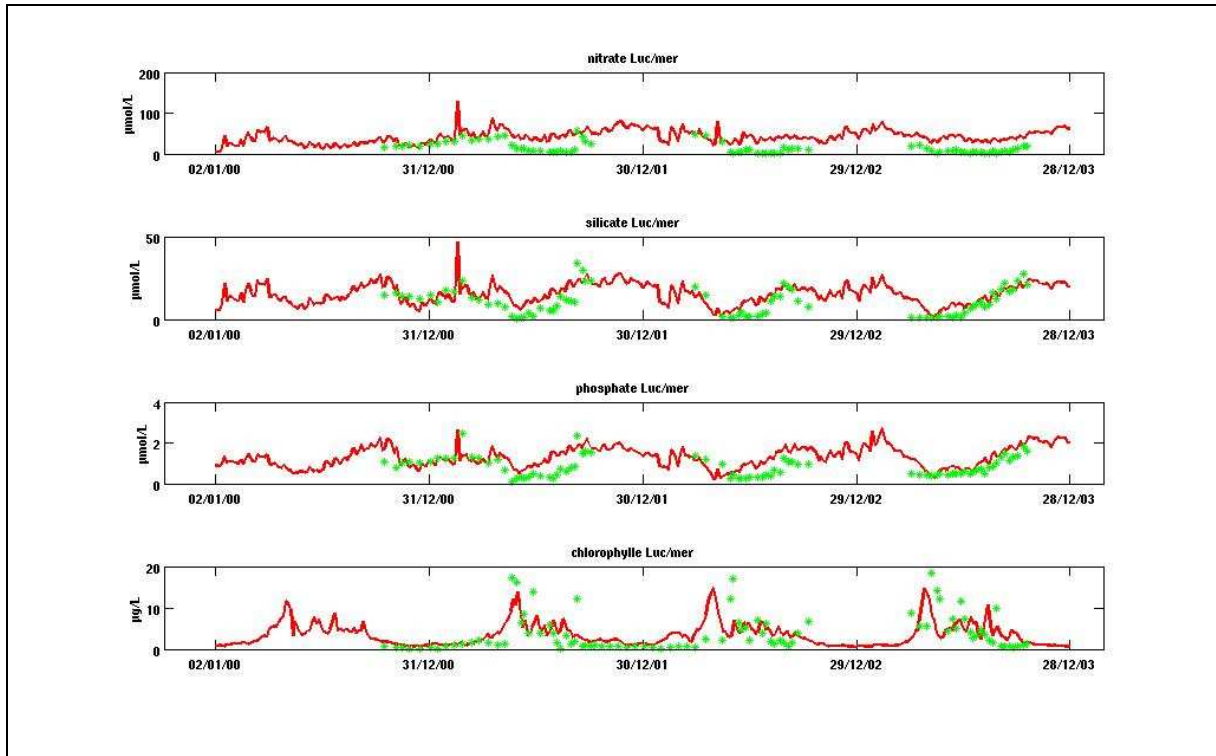


Figure 14: Nitrate, silicate, phosphate et chlorophylle de surface à Luc/mer pour l'emprise MANGA (en vert : mesure ; en rouge : modèle).

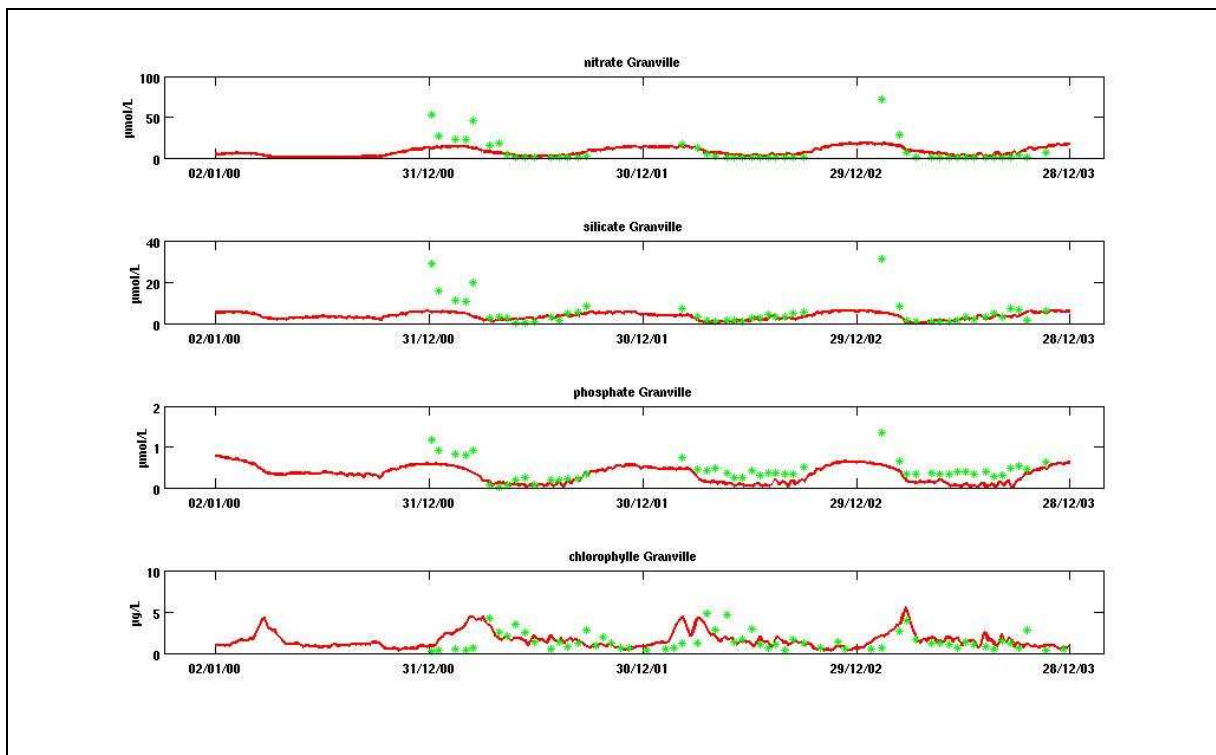


Figure 15: Nitrate, silicate, phosphate et chlorophylle de surface à Granville pour l'emprise MANGA (en vert : mesure ; en rouge : modèle).

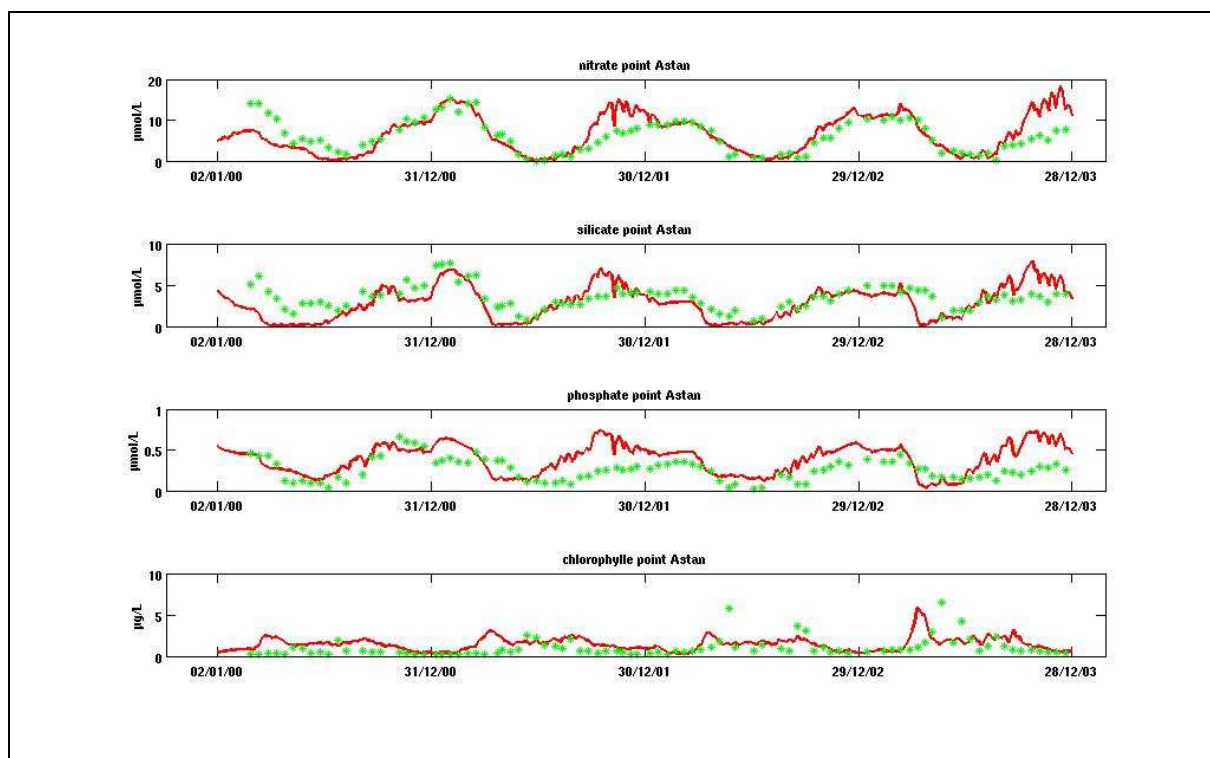


Figure 16: Nitrate, silicate, phosphate et chlorophylle de surface à Roscoff/Astan pour l'emprise MANGA (en vert : mesure ; en rouge : modèle).

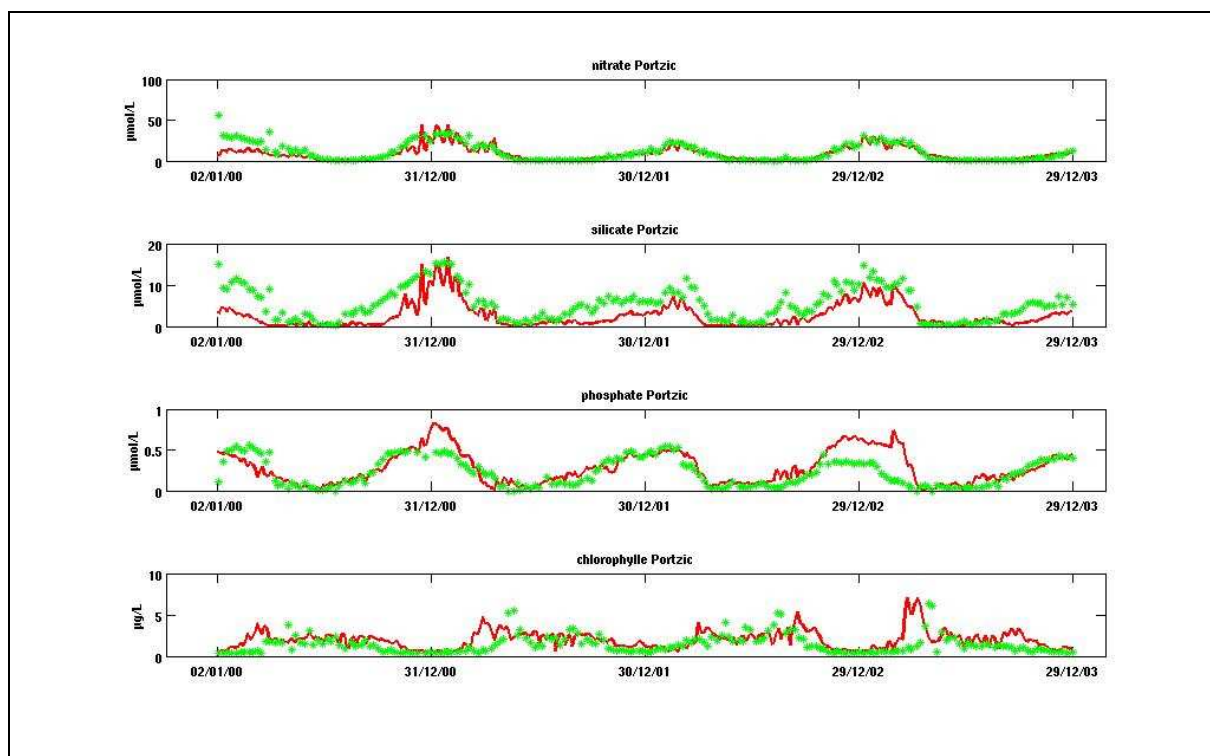


Figure 17: Nitrate, silicate, phosphate et chlorophylle de surface à Brest/Portzic pour l'emprise MANGA (en vert : mesure ; en rouge : modèle).

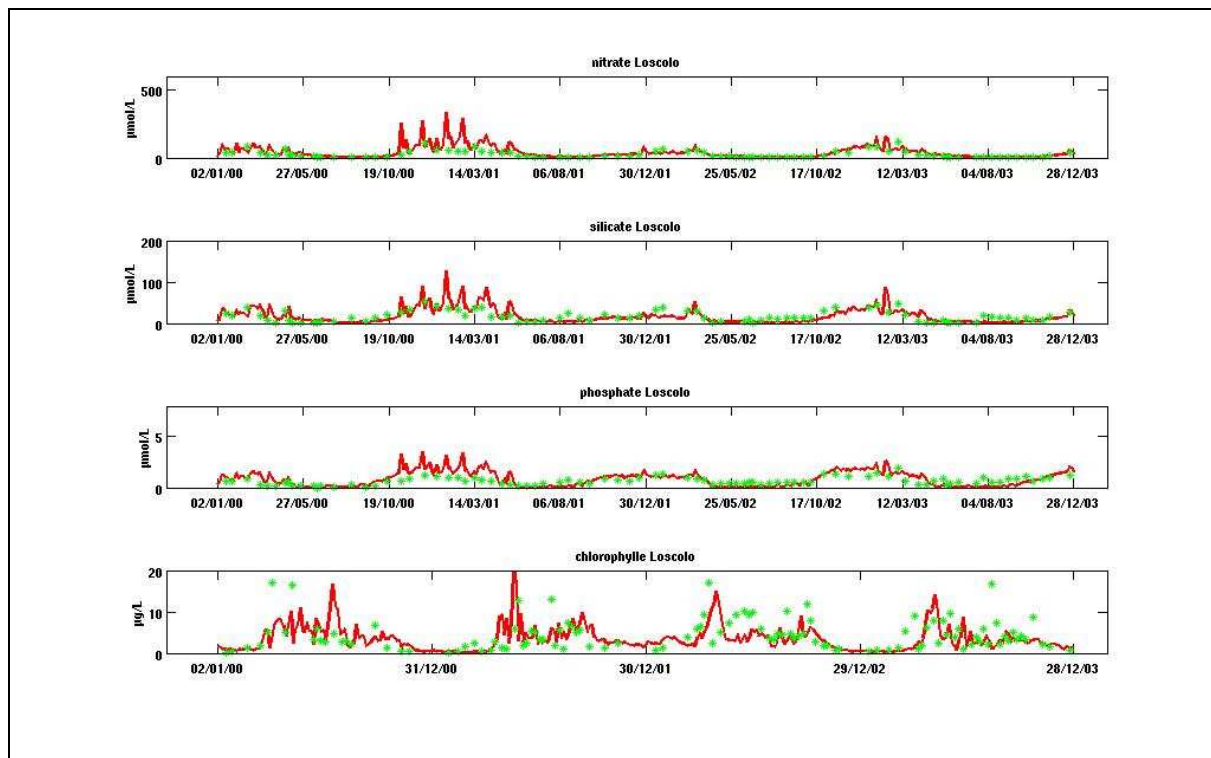


Figure 18: Nitrate, silicate, phosphate et chlorophylle de surface à Loscolo pour l'emprise MANGA (en vert : mesure ; en rouge : modèle).

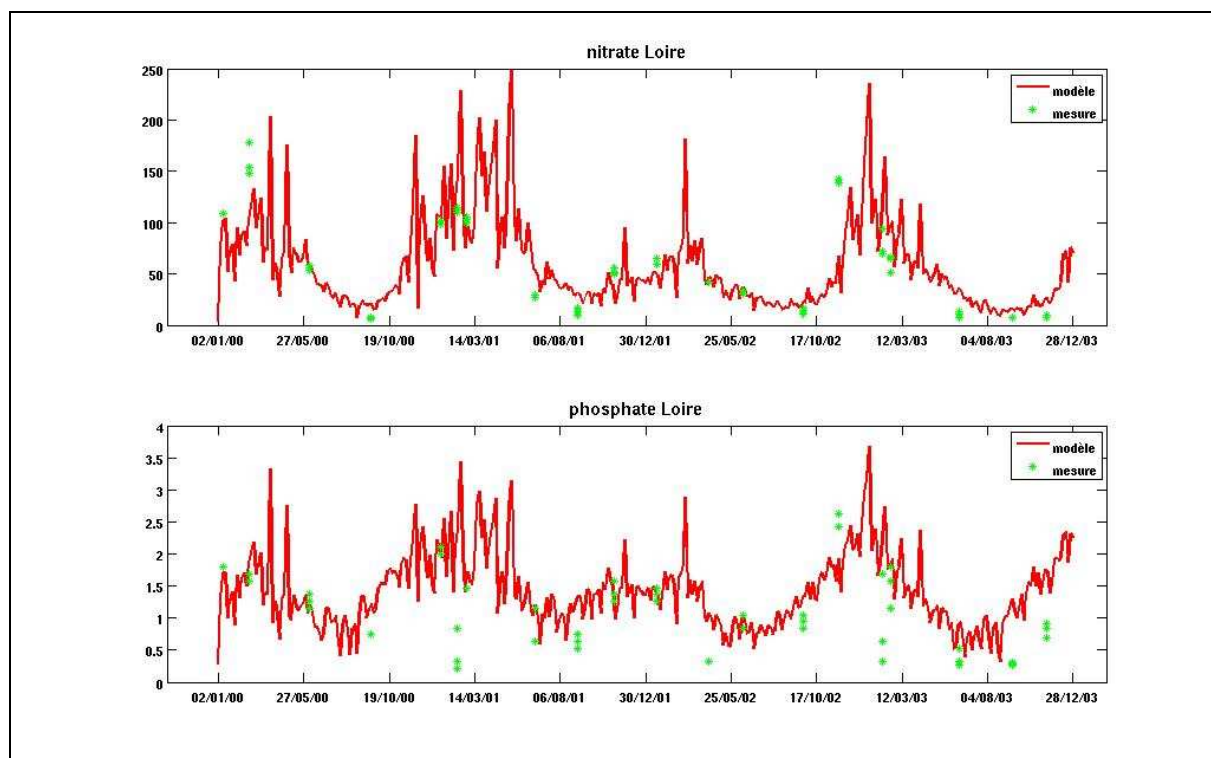


Figure 19: Nitrate et phosphate de surface ($\mu\text{mol/L}$) à la station RNO Loire estuaire pour l'emprise MANGA (en vert : mesure ; en rouge : modèle).

2 COMPARAISON AVEC LES CARTES SATELLITAIRES ET *IN SITU*

2.1 PRINCIPE DU CALCUL DU PERCENTILE

Pour chaque maille, le modèle fournit une valeur tous les 4 jours de 2001 à 2003. A partir de la série temporelle de la variable choisie (par exemple la concentration en nitrate de surface pour une maille située devant la Loire-figures 20 et 21), la fonction de répartition est calculée (figure 21). De cette fonction de répartition sont déduits les percentiles 10, 50 et 90 de la variable qui vont être présentés dans le rapport. Par exemple, le percentile 10 (également appelé premier décile) correspond à la valeur de la variable pour laquelle 10% de l'échantillon statistique a une valeur qui lui est inférieure, et 90% une valeur supérieure. Le percentile 50 correspond à la valeur médiane. La fonction de répartition présentée figure 21 est calculée sur l'ensemble des valeurs de 2001 à 2003. Les valeurs de percentiles qui seront présentées par la suite seront calculées sur la période productive (mars à octobre) ou non-productive (novembre à février) suivant la variable considérée.

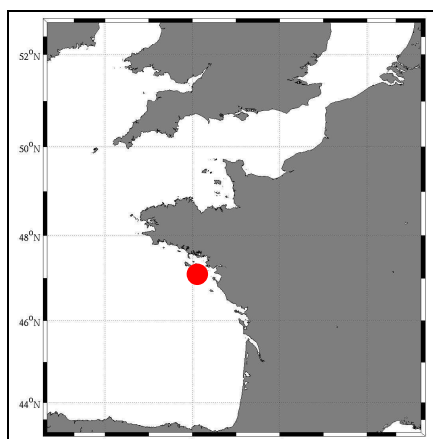


Figure 20: Emprise MANGA et emplacement de la maille exemple.

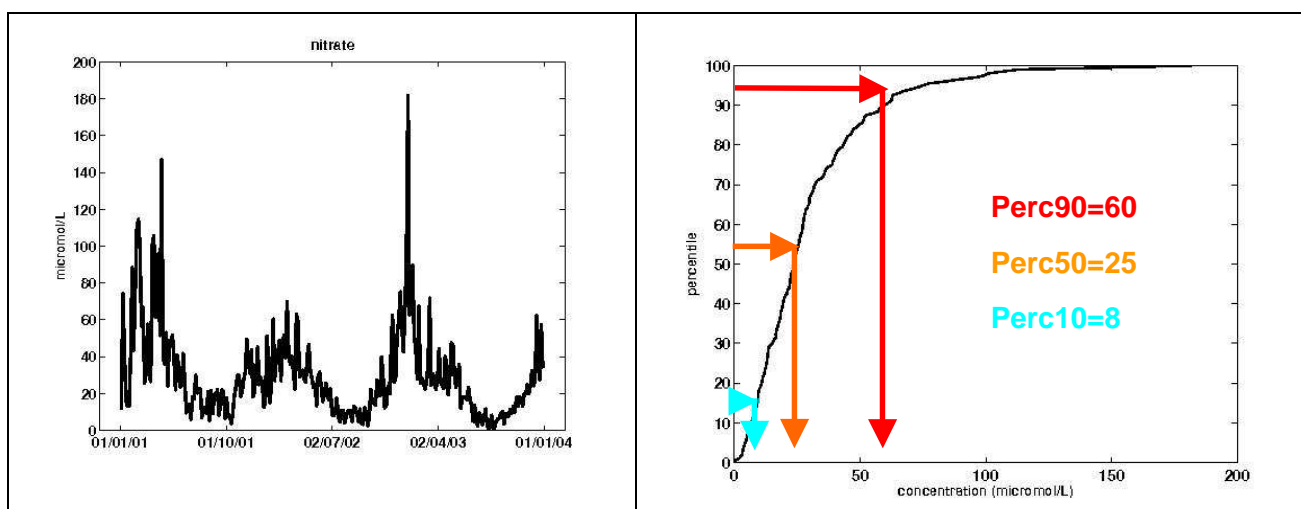


Figure 21: à gauche, série temporelle de la concentration en nitrate entre 2001 et 2003 au niveau de la Loire ($\mu\text{mol/L}$) ; à droite, la fonction de répartition de cette série temporelle (en rouge : percentile 90, en orange : médiane, en bleu : percentile 10).

2.2 COMPARAISON DU PERCENTILE 90 DE CHLOROPHYLLE SIMULEE ET SATELLITAIRE

D'une manière générale, le percentile 90 reste assez stable selon les périodes considérées. Le résultat du percentile 90 de la chlorophylle sur la période productive (mars à octobre) du modèle (période 2001-2003) (figure 22) peut donc être comparé à la carte d'état initial obtenue avec les données satellitaires sur la période 2003-2009. La carte du percentile 90 de la chlorophylle de surface lors de la période productive (moyenne 2003-2009) est fournie par le projet MarCoast2 (figure 23). Elle résulte du traitement des reflectances MODIS selon l'algorithme Ifremer OC5 (Gohin et al., 2002).

Globalement, les résultats du modèle et du satellite sont assez proches notamment au niveau de la Loire et de la Seine. Le gradient côte-large est également bien représenté.

On note toutefois que le modèle a tendance à sous-estimer les valeurs par rapport au satellite dans les zones turbides du domaine (figure 24). Cela est particulièrement notable devant les côtes hollandaises fortement influencées par le Rhin et l'Escaut et dans lesquelles on observe chaque année des blooms importants de *Phaeocystis globosa*, espèce qui n'est pas simulée dans le modèle de base. A un degré moindre, le modèle sous-estime également les valeurs dans le Bristol Channel.

Au niveau des côtes françaises, le modèle sous-estime les valeurs en baie de Somme (environ 6 µg/L pour le modèle ; environ 9 µg/L pour le satellite) et en Bretagne sud (4 µg/L pour le modèle ; 6 µg/L pour le satellite). Par contre, il les surestime au niveau de l'embouchure de la Gironde (6 µg/L pour le modèle ; 4 µg/L pour le satellite).

Le biais moyen sur l'ensemble du domaine est de 0,5 µg/L avec un écart-type de 0,8 µg/L. Si on considère uniquement les mailles situées au sud de 51° de latitude (on exclut le sud de la mer du Nord où les biais sont les plus importants), on obtient un biais moyen de 0,4 µg/L avec un écart-type de 0,7 µg/L.

La figure 25 donne les histogrammes des valeurs pour chaque sous-région.

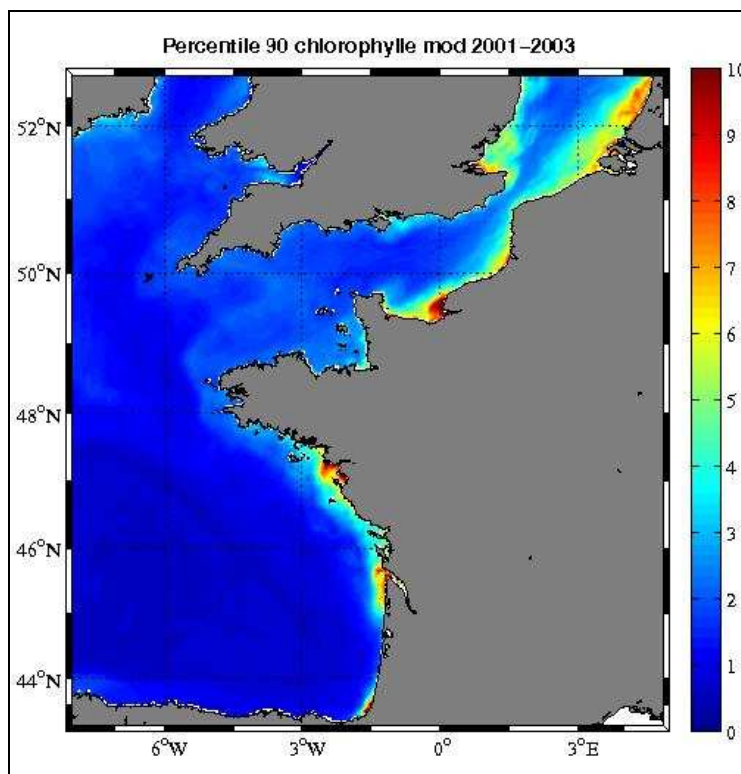


Figure 22: Percentile 90 de chlorophylle ($\mu\text{g/L}$) obtenu avec le modèle sur la période 2001-2003.

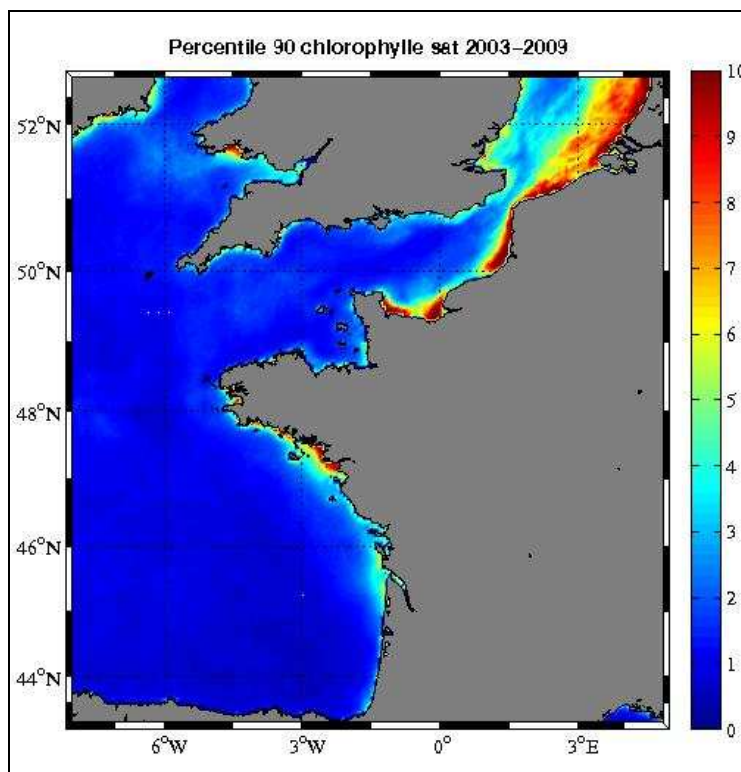


Figure 23: percentile 90 de chlorophylle ($\mu\text{g/L}$) obtenu à partir du satellite sur la période 2003-2009.

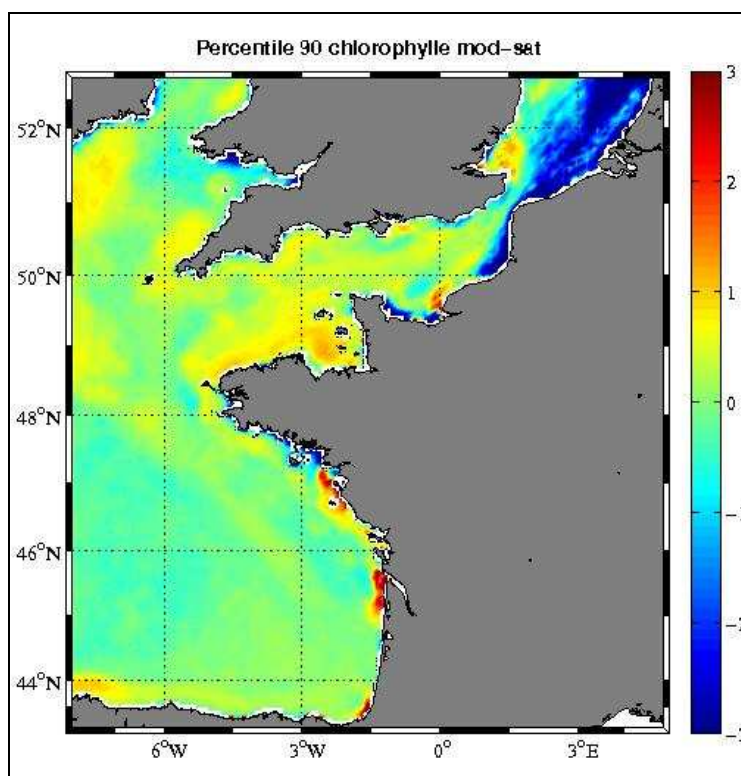


Figure 24: Biais ($\mu\text{g/L}$) entre le percentile 90 de chlorophylle du modèle et du satellite.

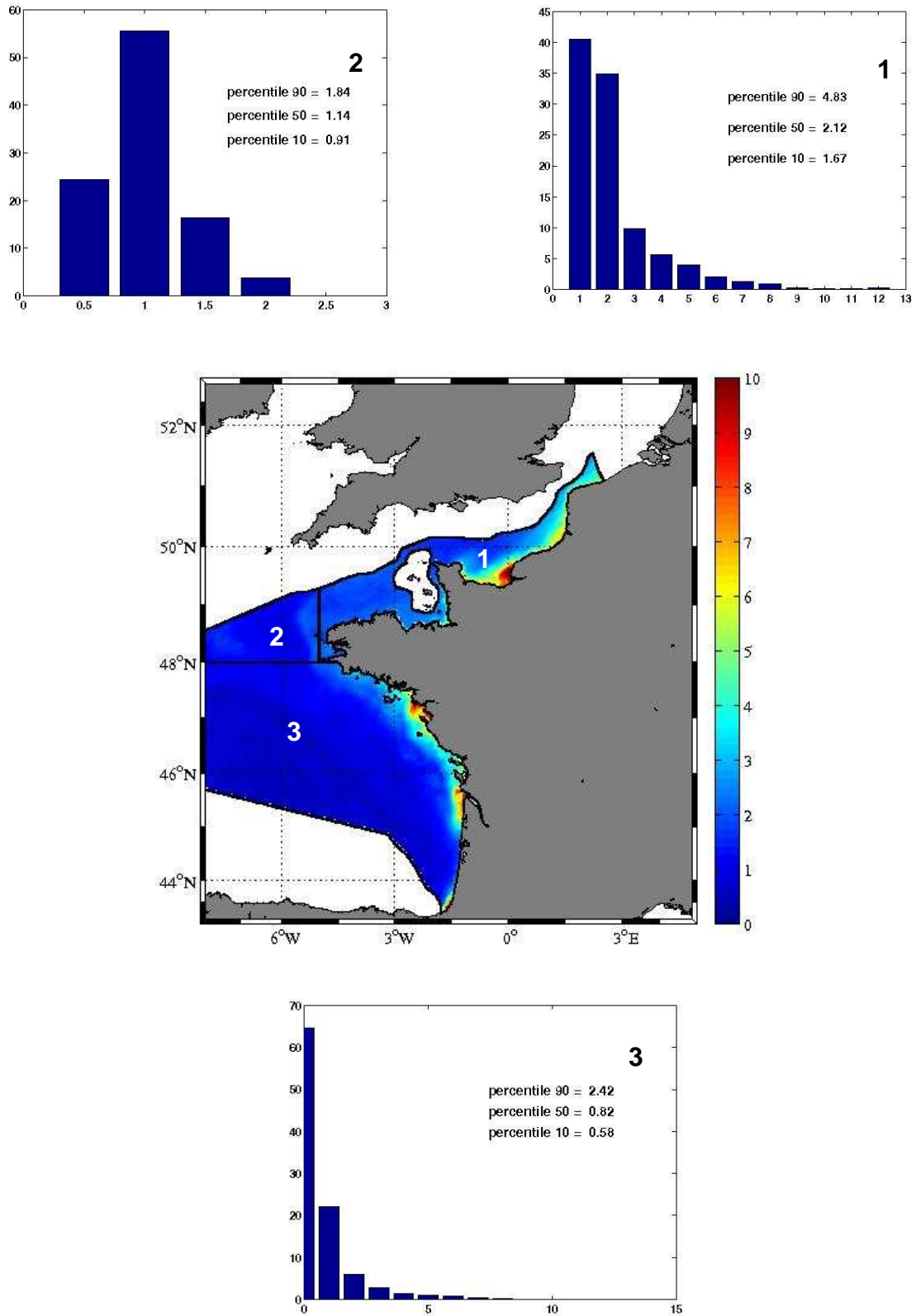


Figure 25 : Percentile 90 de chlorophylle ($\mu\text{g/L}$) + histogramme des valeurs pour les sous-zones DCSMM Manche/Mer du Nord (1), Mer Celtique (2) et Golfe de Gascogne (3).

2.3 COMPARAISON DES CARTES DE NUTRIMENTS ISSUES DU MODELE ET DES MESURES

Dans le cadre de la DCSMM, une analyse des données de mesures de campagnes et de réseau de surveillance (qui s'étendent de 1930 à 2010) a été effectuée pour les sous-zones Golfe de Gascogne (Sourisseau et Rogé, 2011a), Mers Celtiques (Sourisseau et Rogé, 2011b) et Manche-Mer du Nord (Sourisseau et Rogé, 2011c). Cette analyse se base sur des bases de données nationales et internationales (ICES, SeaDataNet (SDN), QUADRIGE²) qui représentent la majeure partie des données (tableau 1). Elle ne prend pas en compte les données non validées ou sous moratoire mais inclut des données qualifiées de douteuses, c'est-à-dire des données dont les méthodes analytiques ne sont pas définies. Les données sont très majoritairement issues de mesures sur le plateau continental. Au-delà du talus, les mesures sont très éparées (figure 26).

Bases de données	Nombre de données
Données ponctuelles	1945 (0,6%)
SOMLIT	6844 (2,11%)
ICES	85410 (26,33%)
SDN	113414 (34,96%)
Quadrige	116799 (36%)

Tableau 1 : Origine des données (nombre de données : 324 412).

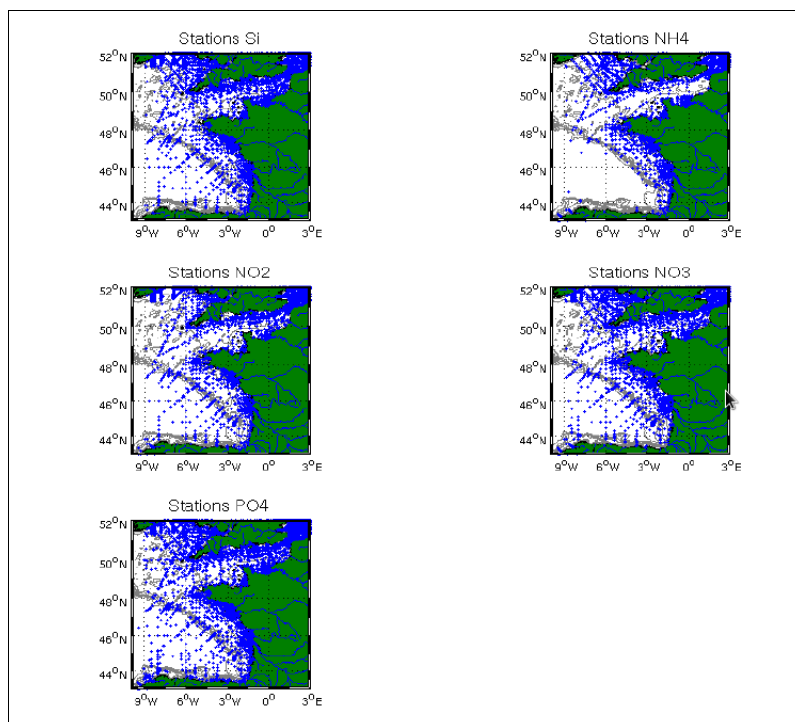


Figure 26: Cartes des stations par sels nutritifs.

Un résultat de cette étude est l'élaboration d'une climatologie mensuelle des principaux nutriments (nitrate, phosphate, silicate) en couche de surface (0-10m) (Rogé, 2011) obtenue en utilisant la méthode d'analyse objective ISAS (In Situ Analysis System ou interpolation optimale) qui introduit une notion de confiance dans l'estimation du champ analysé (figures 27, 29 et 31). La méthode utilise une théorie de l'estimation pour cartographier un champ scalaire sur une grille régulière à partir de données irrégulières dans le temps et l'espace en maximisant la confiance dans l'estimation d'une anomalie par rapport à une climatologie de référence. Cette estimation va dépendre de plusieurs paramètres (rayon d'influence des données, poids des variances des échelles, variance de l'erreur sous grille). La climatologie de référence est celle fournie par la NOAA (Levitus) qui a été moyennée par niveau et par maille de 1 degré puis interpolée sur la verticale afin d'avoir une base complète. Seules les données hauturières (bathymétrie >150m) ont été prises en compte afin de ne pas biaiser les résultats en surévaluant les données côtières. Les climatologies initiales de chaque paramètre ont été interpolées au sixième de degré.

La climatologie obtenue en utilisant la méthode d'analyse objective pour traiter les données de mesures met en évidence une bonne dynamique saisonnière des nutriments sur toute la zone (Rogé, 2011).

A partir des résultats du modèle (sorties tous les 4 jours), les moyennes mensuelles (sur la période 2001-2003) des concentrations de surface en nutriments ont été générées (figures 28, 30 et 32).

Nitrate

Mesures

La dynamique du nitrate (figure 27) est cohérente avec un minimum observé en août (valeurs proches de 0.1 $\mu\text{mol/L}$) au-delà du talus. Le maximum est observé en mars. Des biais sont visibles en Manche Occidentale (en août et décembre) et le long de la côte espagnole (données non transmises ou utilisation restreinte dans les bases de données interrogées) (Rogé, 2011).

Modèle

La dynamique saisonnière du nitrate simulé (figure 28) est dans l'ensemble en accord avec celle issue des mesures sur les trois sous-zones (Golfe de Gascogne, Mer Celtique et manche/Mer du Nord).

Le maximum de concentration est simulé en mars et la consommation débute en mars/avril. Les panaches de la Loire, de la Gironde, de la Seine ainsi que celui de l'Adour sont bien visibles. Ce dernier semble être cependant surestimé en raison d'une maille de rejet de l'Adour certainement trop proche de son embouchure. Les concentrations sont cohérentes avec les mesures au niveau des sous-zones DCSMM Manche/Mer du Nord et Mer Celtique et sur le plateau continental de la sous-zone Golfe de Gascogne.

Le principal biais par rapport aux mesures est une très forte sous-estimation des concentrations au-delà du talus et en mer Celtique entre juin et septembre. Les valeurs redeviennent plus en accord à partir d'octobre au moment de la déstratification.

Phosphate

Mesures

Comme pour le nitrate, la dynamique saisonnière est cohérente avec des valeurs hivernales entre 0,5 et 1 $\mu\text{mol/L}$ au large (figure 29). Le minimum est observé en août sur toute la zone. Pour les mêmes raisons que pour le nitrate, des biais sont observés en Manche Occidentale (août et décembre) et le long de la côte espagnole (Rogé, 2011).

Modèle

La dynamique saisonnière du phosphate simulé (figure 30) est globalement en accord avec les mesures avec, comme pour le nitrate, un minimum simulé en juillet/août et un maximum en mars. Les panaches des fleuves sont également bien visibles. Le modèle semble cependant s'épuiser en phosphate de mai jusqu'à août sur une partie du plateau de la partie Golfe de Gascogne avant d'être de nouveau en accord avec les mesures à partir de septembre. En période estivale, au-delà du talus, le phosphate est peu consommé (tout le nitrate a été consommé) et semble être surestimé.

En Manche/Mer du Nord et en Mer Celtique, les concentrations simulées sont en accord avec les mesures.

Silicate

Mesures

La dynamique saisonnière (figure 31) est cohérente avec un minimum en juillet/août et un maximum en février. Les panaches des principaux fleuves (Loire, Gironde, Seine) sont bien délimités excepté celui de l'Adour. De nombreux biais provenant de la climatologie de références sont observés. Les mois de janvier (mer Celtique et Golfe de Gascogne) et juin (sud du Golfe de Gascogne) ne sont pas en accord avec les dynamiques observées ; les passages du mois de décembre à janvier et du mois de janvier à février ne sont pas progressifs avec notamment une chute des concentrations en mer Celtique en janvier ou une augmentation des concentrations suivies d'une rapide diminution en juin dans le sud du Golfe. Ces biais seraient expliqués par un nombre insuffisant de données permettant de corriger la climatologie à ces endroits ou une variance imposée ne permettant de prendre en compte les données (Rogé, 2011).

Modèle

La dynamique saisonnière du silicate simulé (figure 32) est cohérente avec les mesures sur l'ensemble du domaine. Les concentrations sont aussi en accord avec les mesures avec un minimum en juillet/août sur le plateau continental (juin/juillet au-delà du talus) et un maximum en février/mars. Comme pour les deux autres nutriments, les panaches sont bien visibles. La consommation du silicate débute vers mars/avril. Les valeurs simulées sont très proches des mesures sur le plateau mais semble un peu plus faible au-delà du talus.

Les figures 33 et 34 présentent les moyennes hivernales (janvier, février, mars) d'azote et phosphore inorganique dissous, obtenues avec le modèle ainsi que les histogrammes pour les sous-zones DCSMM Manche/Mer du Nord, Mer Celtique et Golfe de Gascogne.

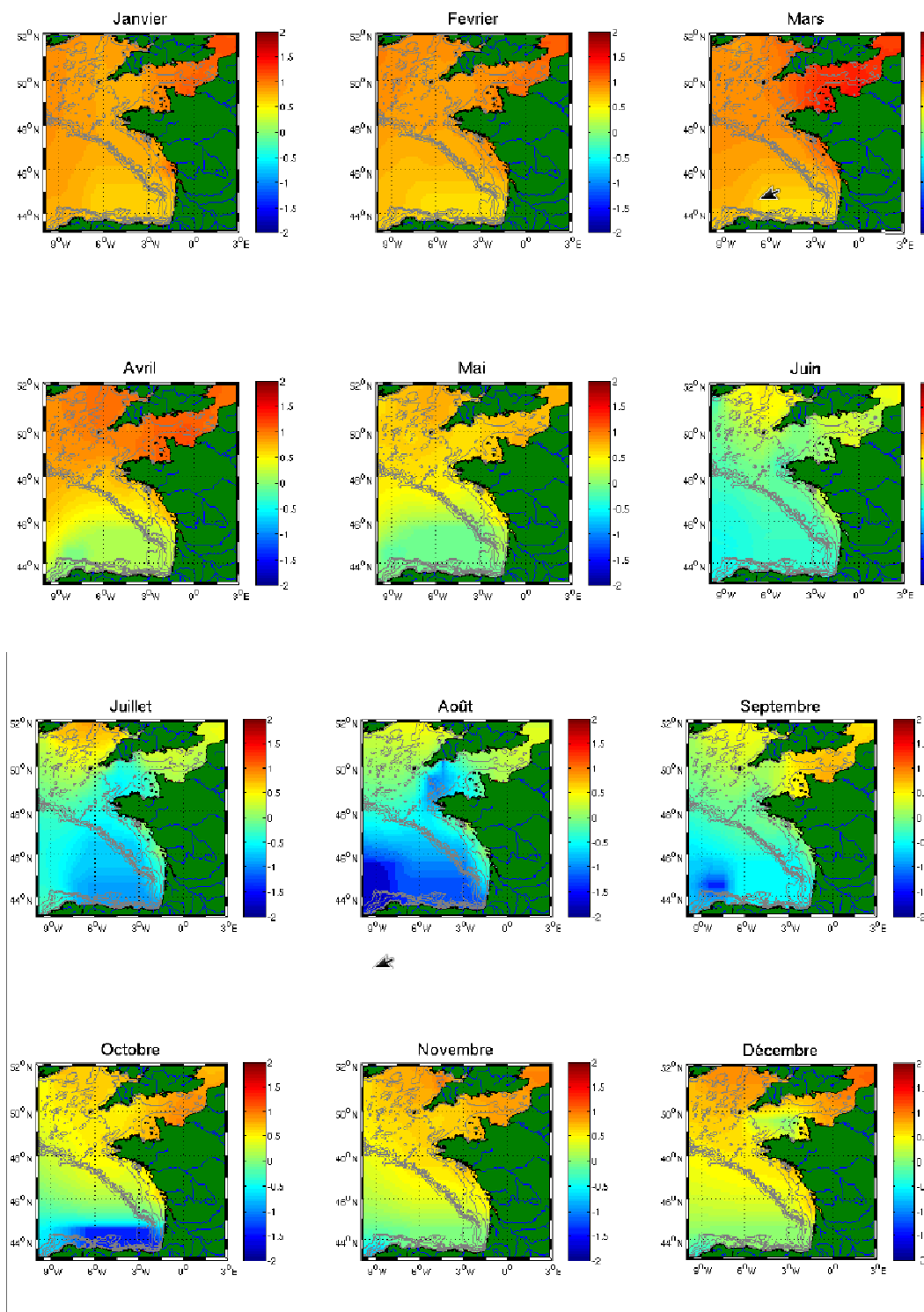


Figure 27: Climatologie mensuelle de la concentration en nitrate ($\mu\text{mol/L}$ en échelle \log_{10}) obtenue après traitement des données de mesures (Rogé, 2011).

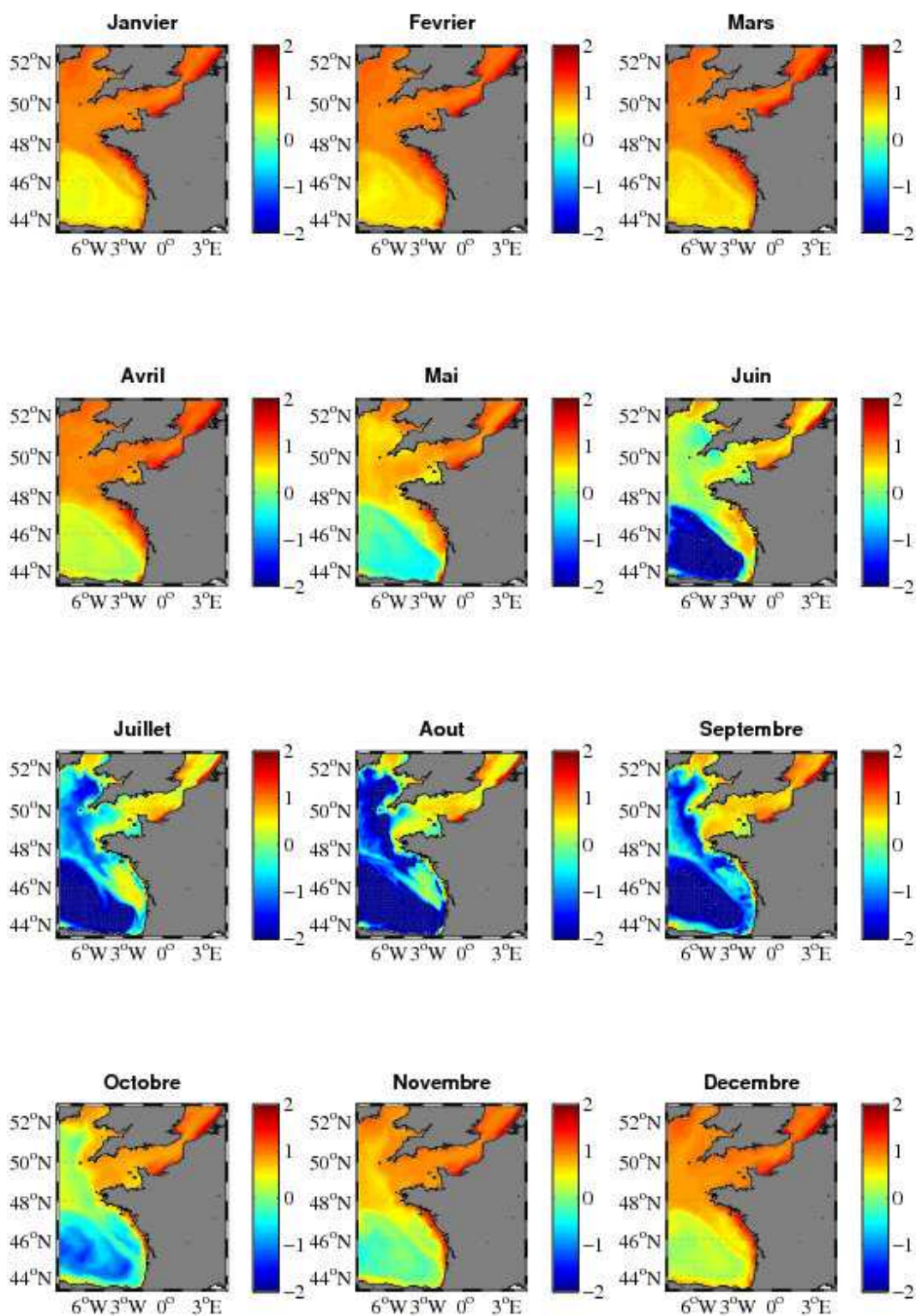


Figure 28: Cartes mensuelles de la moyenne de la concentration en surface de nitrate ($\mu\text{mol/L}$ en échelle \log_{10}) obtenues avec le modèle sur la période 2001-2003.

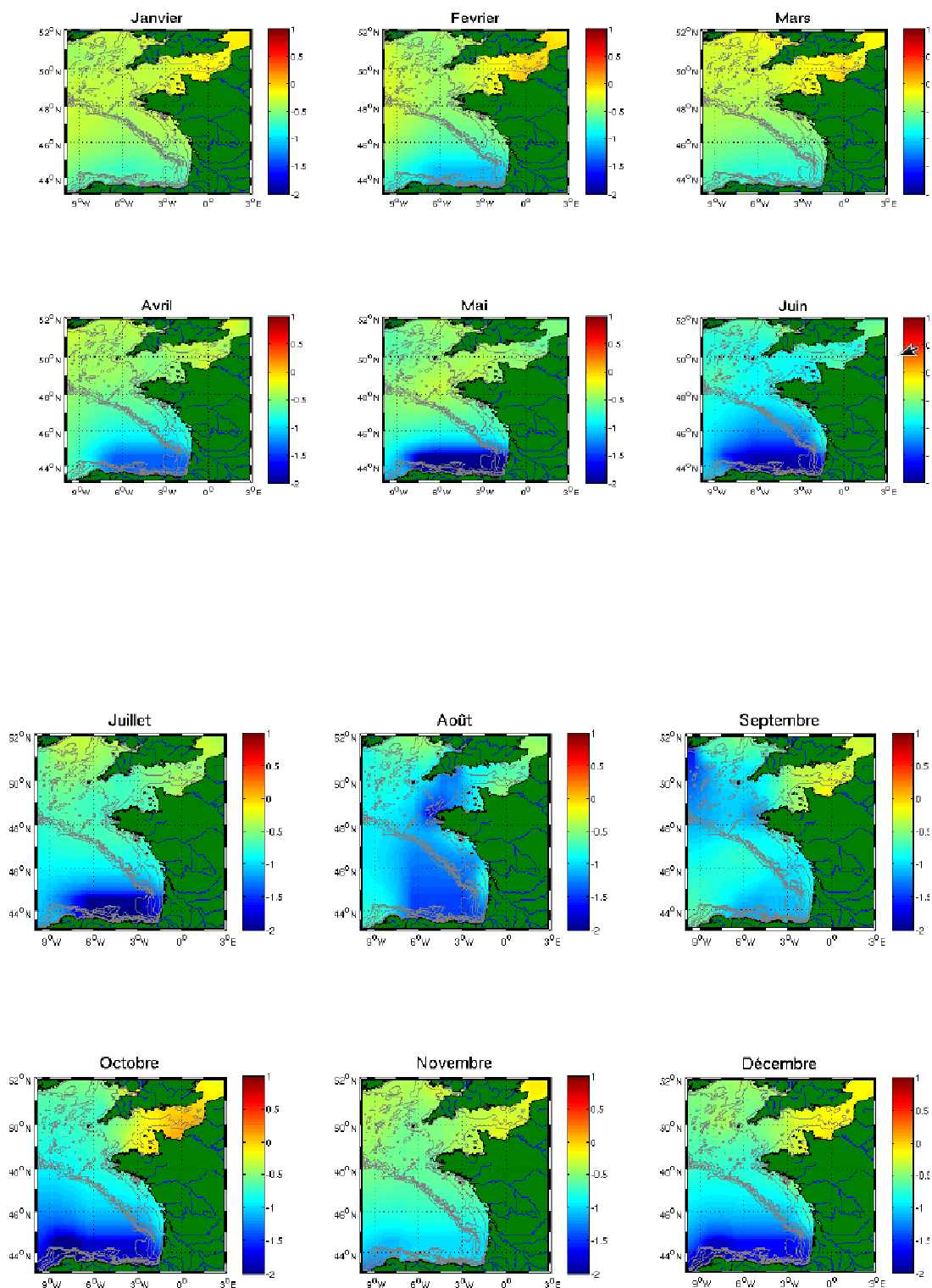


Figure 29: Climatologie mensuelle de la concentration en phosphate ($\mu\text{mol/L}$ en échelle \log_{10}) obtenue après traitement des données de mesures (Rogé, 2011).

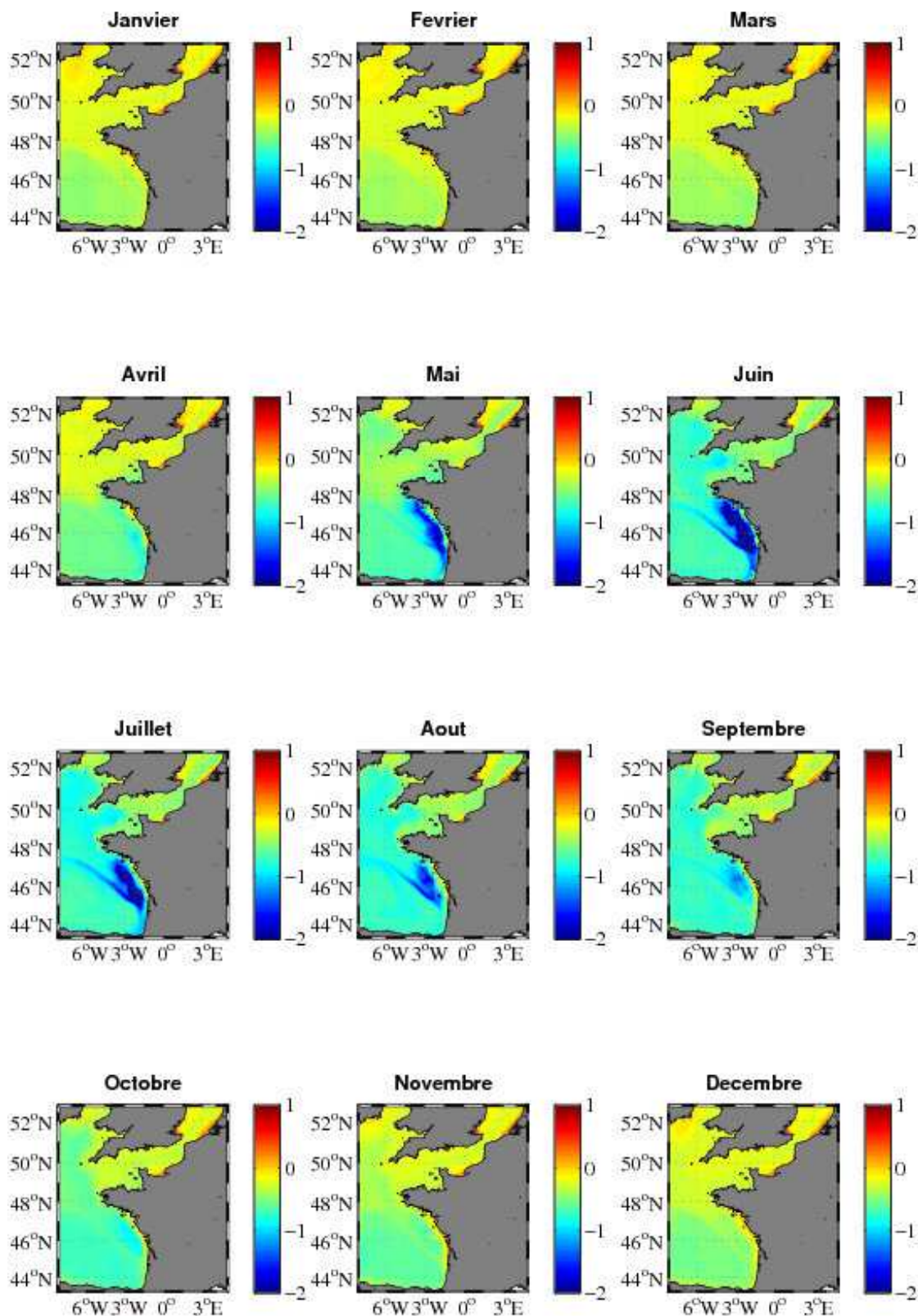


Figure 30: Cartes mensuelles de la moyenne de la concentration en surface de phosphate ($\mu\text{mol/L}$ en échelle \log_{10}) obtenues avec le modèle sur la période 2001-2003.

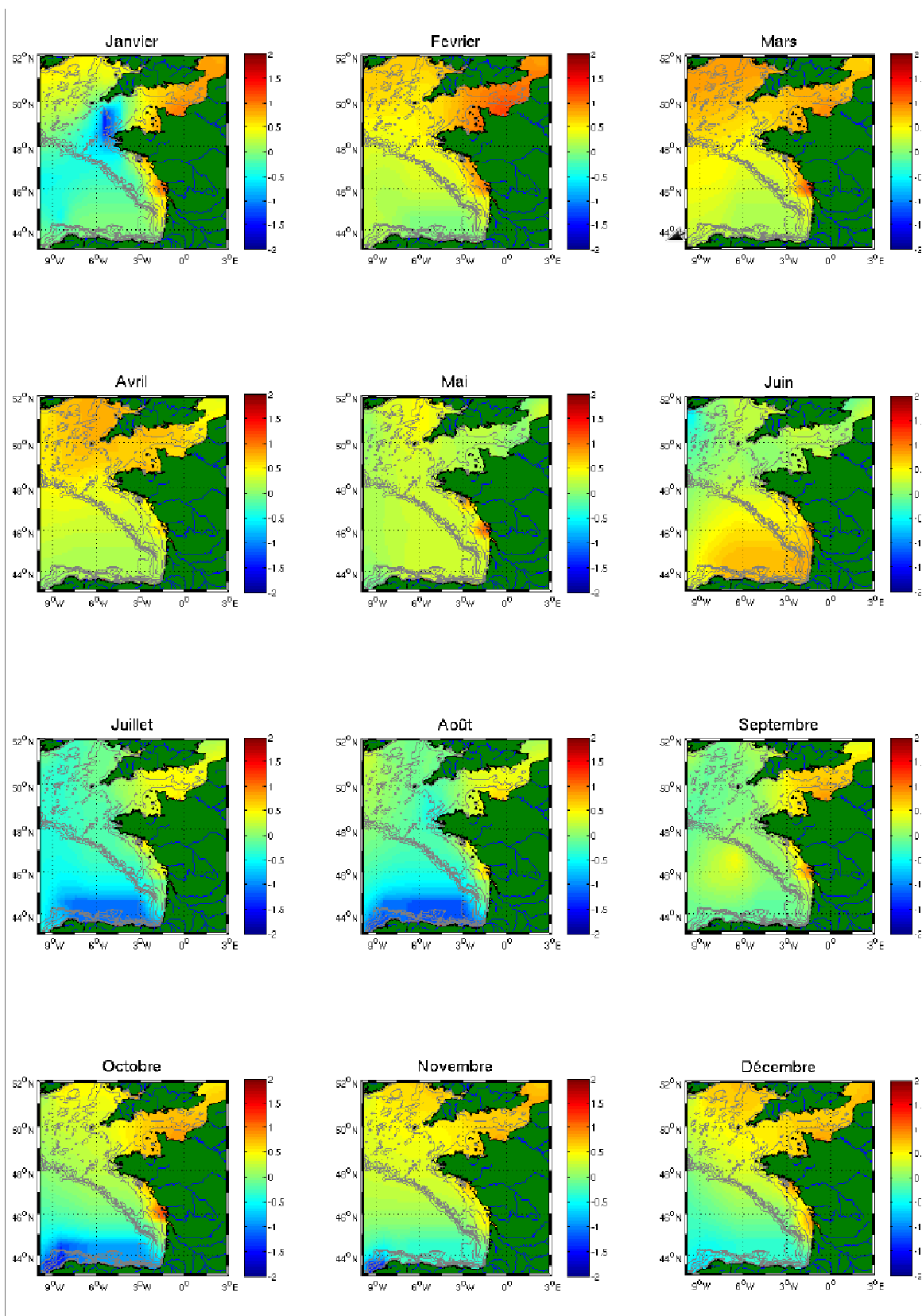


Figure 31: Climatologie mensuelle de la concentration en silicate ($\mu\text{mol/L}$ en échelle \log_{10}) obtenue après traitement des données de mesures (Rogé, 2011).

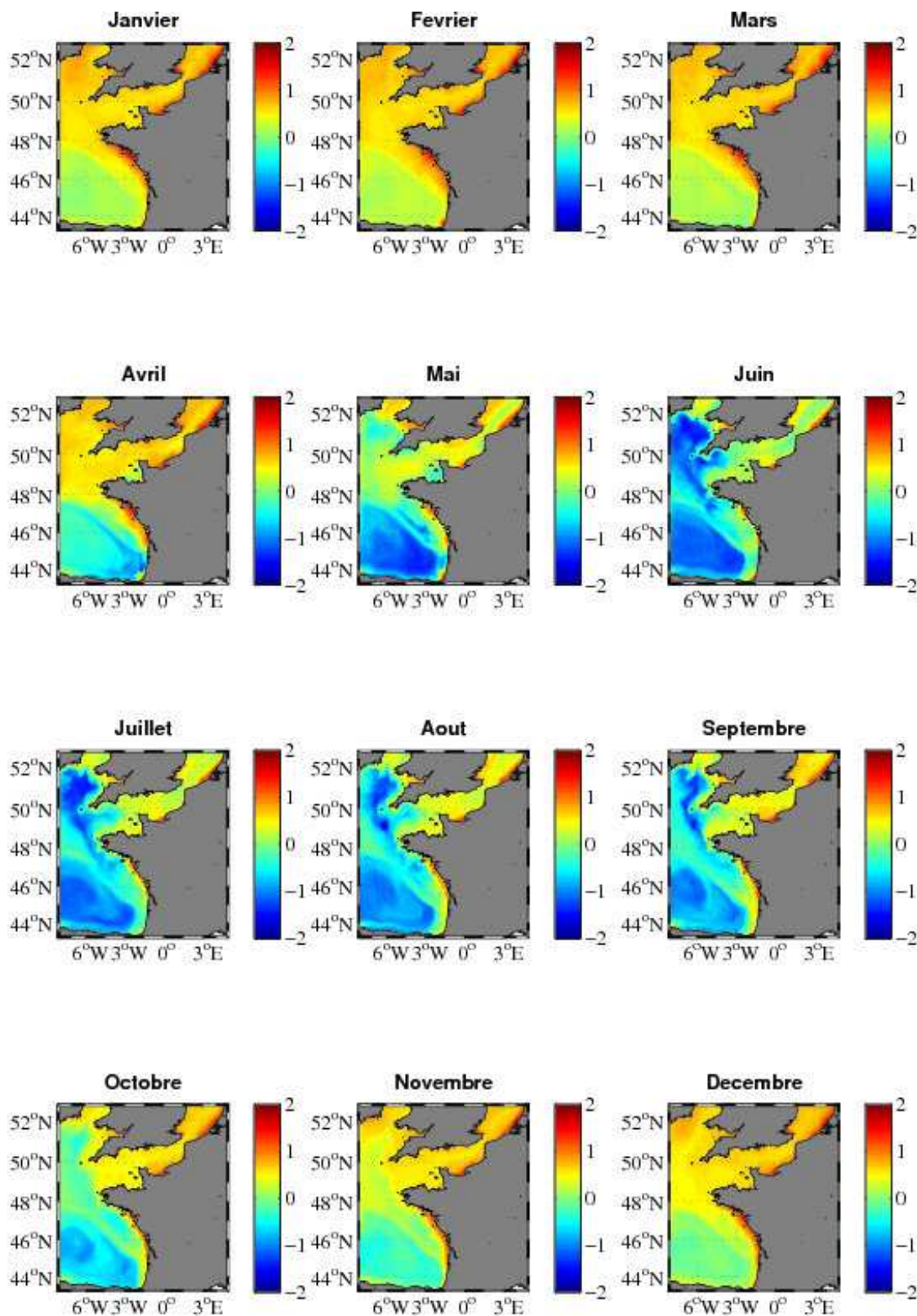


Figure 32: Cartes mensuelles de la moyenne de la concentration en surface de silicate ($\mu\text{mol/L}$ en échelle \log_{10}) obtenues avec le modèle sur la période 2001-2003.

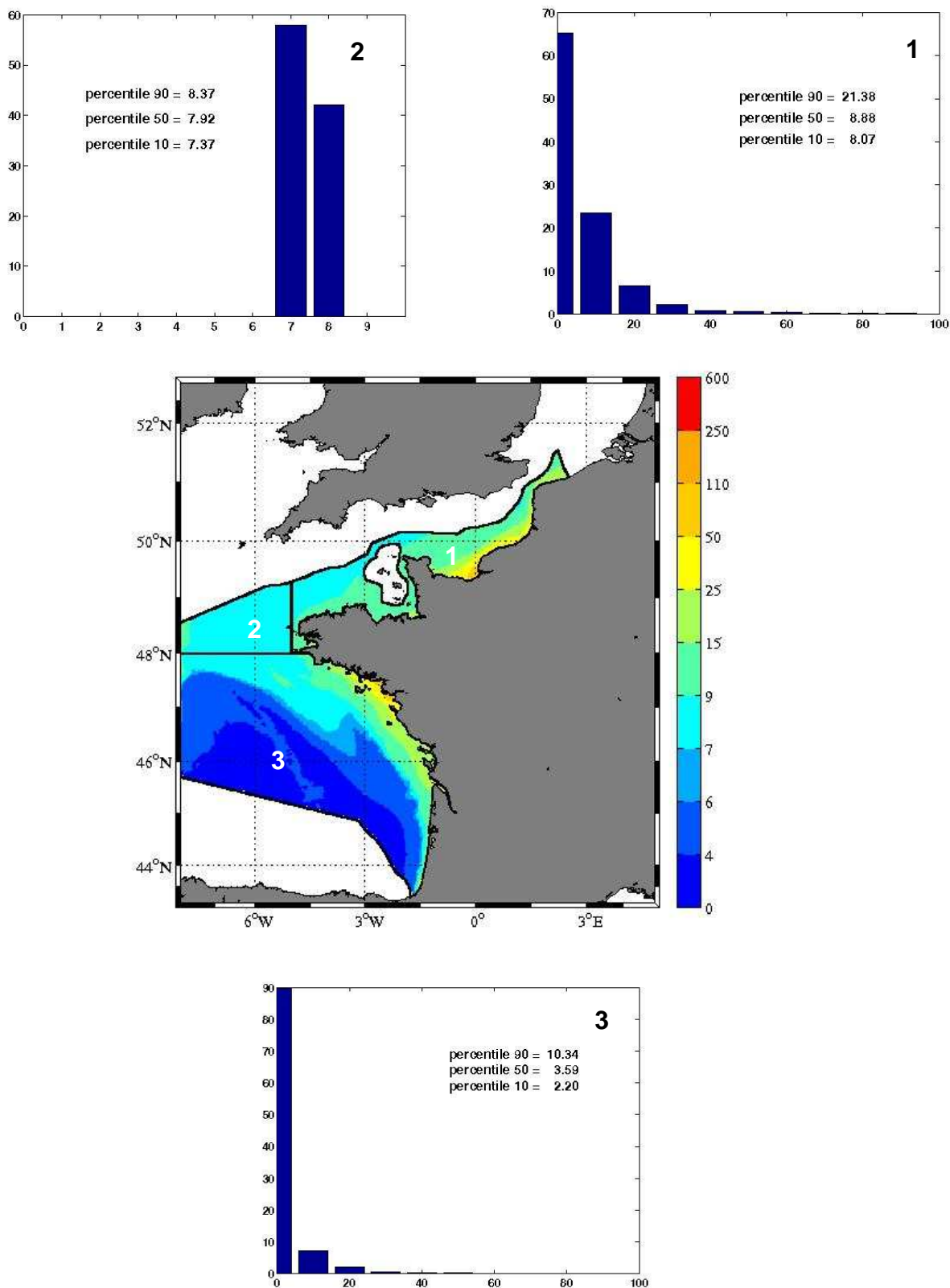


Figure 33: Moyenne hivernale de l'azote inorganique dissous ($\mu\text{mol/L}$) + histogramme des valeurs pour les sous-zones DCSMM Manche/Mer du Nord (1), Mer Celtique (2) et Golfe de Gascogne (3).

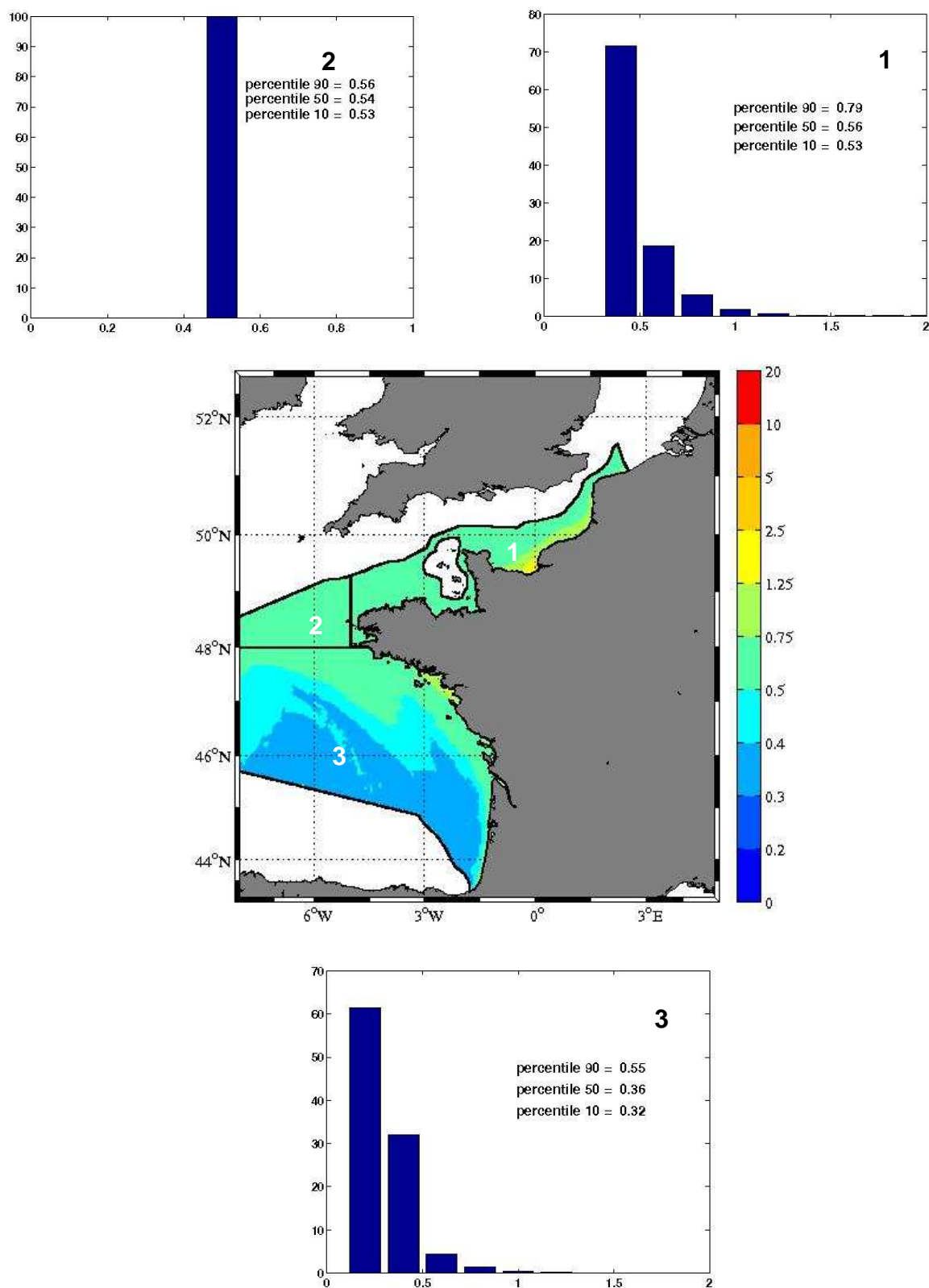


Figure 34: Moyenne hivernale du phosphore inorganique dissous ($\mu\text{mol/L}$) + histogramme des valeurs pour les sous-zones DCSMM Manche/Mer du Nord (1), Mer Celtique (2) et Golfe de Gascogne (3).

3 CARTES DES PERCENTILES DES DIFFERENTS INDICATEURS

Dans ce chapitre, les cartes des percentiles 10, 50 et 90 des indicateurs ont été générées pour les années 2001, 2002, 2003 considérées respectivement comme représentatives des années humides, moyennes et sèches et pour les 3 années réunies. **Les périodes non-productive (de novembre à février) et productive (mars à octobre) sont celles qui ont été choisies dans le cadre de la DCE pour effectuer les classements des différentes masses d'eau.**

Pour les variables « azote inorganique dissous », « phosphore inorganique dissous », « rapport N/P » et « rapport diatomées/dinoflagellés » dont les valeurs peuvent varier jusqu'à un facteur 2, une échelle de couleur non linéaire a été utilisée.

Les tableaux 2, 3 et 4 présentent respectivement pour les principaux fleuves de la zone, les moyennes des débits, des concentrations en nitrate et des concentrations en phosphate sur la période hivernale non-productive (novembre à février) pour les 3 années considérées. On peut en déduire que si la notion d'année humide est justifiée pour l'année 2001 en Atlantique, ce n'est pas vraiment le cas pour les principaux fleuves de la Manche et de la Mer du Nord (Seine et Rhin).

	2001	2002	2003
Rhin	2765	3065	3995
Escaut	300	160	235
Seine	1075	917	958
Vilaine	340	61	198
Loire	1870	760	1940
Gironde	855	275	1005

Tableau 2: Moyenne du débit (m^3/s) sur la période hivernale.

	2001	2002	2003
Rhin	235	235	200
Escaut	370	345	300
Seine	380	405	380
Vilaine	485	360	535
Loire	255	255	255
Gironde	135	125	140

Tableau 3 : Moyenne de la concentration en nitrate ($\mu mol/L$) sur la période hivernale.

	2001	2002	2003
Rhin	3	2,5	2,5
Escaut	4,8	4	4,4
Seine	5,5	7,8	8,5
Vilaine	7,7	4	6
Loire	2,7	1,6	2,7
Gironde	1,5	1,4	1,6

Tableau 4: Moyenne de la concentration en phosphate ($\mu\text{mol/L}$) sur la période hivernale.

Les cartes des percentiles d'azote inorganique dissous (nitrate+ammonium) (figures 35 à 37) mettent logiquement en évidence des zones très enrichies en azote au niveau des différents estuaires (Gironde, Loire, Seine, Escaut, Rhin) avec des percentiles 90 dépassant $60 \mu\text{mol/L}$ et des médianes dépassant $30 \mu\text{mol/L}$. On note que les concentrations sont plus faibles en 2002 au niveau de la zone proche de la Loire qu'en 2001 et 2003. C'est beaucoup moins flagrant en Manche au niveau de la Seine et de la Baie de Somme.

Dans la partie stratifiée de la Manche occidentale, les percentiles restent relativement constants selon les années (environ $8 \mu\text{mol/L}$).

Dans la zone hauturière, les concentrations sont assez faibles (percentile 90 d'environ $4.5 \mu\text{mol/L}$, percentile 50 d'environ $2 \mu\text{mol/L}$) et sous-estiment vraisemblablement la réalité.

Les cartes de percentiles de phosphore inorganique dissous (phosphate) (figures 38 à 40) mettent en évidence, comme pour les cartes d'azote inorganique dissous, des zones très enrichies au niveau des estuaires (percentiles 90 $> 2 \mu\text{mol/L}$). On note également des apports moins importants en 2002 surtout au niveau de la Loire et de manière moins marquée sur les côtes vendéennes et landaises. Cette différence entre l'année 2002 et les deux autres années n'est pas aussi marquée dans la Manche.

Sur le plateau continental, les concentrations sont plus faibles (percentile 90 d'environ $0.8 \mu\text{mol/L}$, percentile 50 d'environ $0,4 \mu\text{mol/L}$).

La zone la moins riche est la zone hauturière au-delà du talus continental. Le percentile 90 est d'environ $0,45 \mu\text{mol/L}$, le percentile 50 d'environ $0,3 \mu\text{mol/L}$.

Les rapports N/P des formes inorganiques dissoutes durant la période hivernale (figures 41 à 43) sont très élevés à l'embouchure des principaux fleuves de la zone (percentiles 90 supérieurs à 60, percentiles 50 supérieurs à 40). Ceci montre un déséquilibre important des apports en

azote par rapport à ceux en phosphore. Les rapports N/P sont donc très éloignés du rapport de Redfield(*) (environ égal à 16). Dans le Golfe de Gascogne, les rapports N/P sont moins élevés au niveau de la Gironde qu'au niveau de la Loire. Cette différence est également mise en relief par les mesures (Loyer et al., 2006).

En Manche et sur le plateau continental du Golfe de Gascogne, les rapports N/P sont proches du rapport de Redfield.

Dans la partie hauturière, en revanche, les rapports sont de l'ordre de 10, ce qui semble beaucoup trop bas. Ce résultat est toutefois logique en raison de la vraisemblable sous-estimation des concentrations en nitrate dans cette zone.

Les cartes de chlorophylle de surface (figures 44 à 46) entre mars et octobre montrent des zones très productives au niveau des panaches de fleuves (Loire, Seine, Rhin) avec des percentiles 90 (utilisés la plupart du temps pour les classifications des masses d'eau) supérieurs à 10 µg/L. Pour le reste de la bande côtière, les percentiles 90 sont entre 3 et 6 µg/L. Sur le reste du plateau continental Atlantique, le milieu de la Manche et la zone hauturière, les percentiles 90 atteints sont très faibles (entre 1 et 2 µg/L). Le modèle reproduit bien la variabilité inter-annuelle avec des années 2001 et 2003 plus productives que 2002, notamment devant la Loire et la Seine (percentiles 90 supérieurs à 10 µg/L en 2001 et 2003 ; de l'ordre de 7-8 µg/L en 2002). Au niveau des côtes belges et hollandaises, les percentiles 90 sont les plus élevés en 2003.

Durant la période productive, les rapports diatomées/dinoflagellés (figures 47 à 49) sont les plus élevés dans la bande côtière avec des médianes au moins supérieures à 10 et des percentiles 90 supérieurs à 50.

Au large, les rapports sont beaucoup moins élevés avec des médianes inférieures à 5.

Dans l'ensemble, les rapports diatomées/dinoflagellés sont beaucoup plus importants en Manche (plus brassées) qu'en Atlantique, où la stratification saisonnière est plus favorable à la croissance des dinoflagellés.

Le rapport est beaucoup plus élevé en 2002 qu'en 2001 et 2003, que ce soit en Manche ou sur le plateau continental Atlantique. Cette différence indique que cette année est plus dominée par les diatomées ce qui est vérifié par les recensements du REPHY notamment en Baie de Vilaine (Ouest Loscolo et Men er Roue).

La transparence de l'eau (en profondeur Secchi-unité : m) a été déduite du coefficient d'extinction lumineuse (unité : m^{-1}) simulée par le modèle à partir de la concentration en matière minérale (forcée par des images satellites) et la concentration en chlorophylle simulée (la formule utilisée est la formule empirique $profondeur\ secchi = 1,7 / extinction$ (Poole et Atkins, 1929)).

Pour cette raison, les résultats sont très forcés par le satellite et ne présentent pas une grande variabilité inter-annuelle (figures 50 à 52).

De manière logique, la zone où l'eau est la plus transparente est la zone hauturière au-delà du talus avec une profondeur Secchi d'environ 20m. Sur le plateau continental Atlantique et en

Mer Celtique, la transparence est proche de 17-18m. Elle est moins importante en Manche (environ 12m).

En revanche, les zones très influencées par les panaches des fleuves (Loire, Gironde, Seine, Escaut, Rhin, Tamise, Severn) sont celles où la transparence est logiquement la plus faible (<2m).

Seules les cartes de percentiles de l'oxygène dissous de fond sur la période 2001-2003 sont montrées (figures 53 à 55). Les valeurs de percentile 10 sur la période productive (le percentile 10 est utilisé pour la classification des masses d'eaux DCE pour le critère oxygène dissous, mais entre juin et septembre) sont élevées (supérieures à 6 mg/L) dans les sous-zones Manche/Mer du Nord et Mer Celtique. Ceci est cohérent compte tenu du fort brassage de la colonne d'eau dans les deux zones. Les valeurs sont beaucoup plus faibles dans la sous-zone Golfe de Gascogne dont la stratification saisonnière empêche les échanges entre la surface et le fond. La Baie de Vilaine, très enrichie par les apports de la Vilaine et de la Loire, est connue pour sa forte sensibilité aux épisodes hypoxiques et même anoxiques comme l'épisode de l'été 1982 qui a provoqué la mort de nombreux poissons et invertébrés (Merceron, 1987). Le modèle reproduit bien dans cette zone la baisse des teneurs en oxygène.

En revanche, les résultats du modèle affichent deux zones fortement hypoxiques près de la Vendée et sur toute la côte landaise, ce qui n'a jamais été observé. Cette erreur est certainement due à une mauvaise prise en compte de la consommation benthique de l'oxygène (respiration du zoobenthos et du phytobenthos, minéralisation) qui est trop forte dans ces deux zones et qui représente l'essentiel de la consommation de l'oxygène. De plus, la perte d'azote par enfouissement ou dénitrification n'est pas prise en compte. Nous n'avons malheureusement pas eu le temps de régler ce problème.

() Le rapport de Redfield représente approximativement la composition de la matière organique océanique. Les valeurs actuelles sont O/C/N/P = 172/105/16/1, c'est à dire que pour un atome de phosphore utilisé lors de la photosynthèse, 16 atomes d'azote et 105 atomes de carbone sont consommés alors que 172 atomes d'oxygène sont produits.*

3.1 N INORGANIQUE DISSOUS EN PERIODE HIVERNALE NON-PRODUCTIVE (SURFACE)

3.1.1 Percentile 90

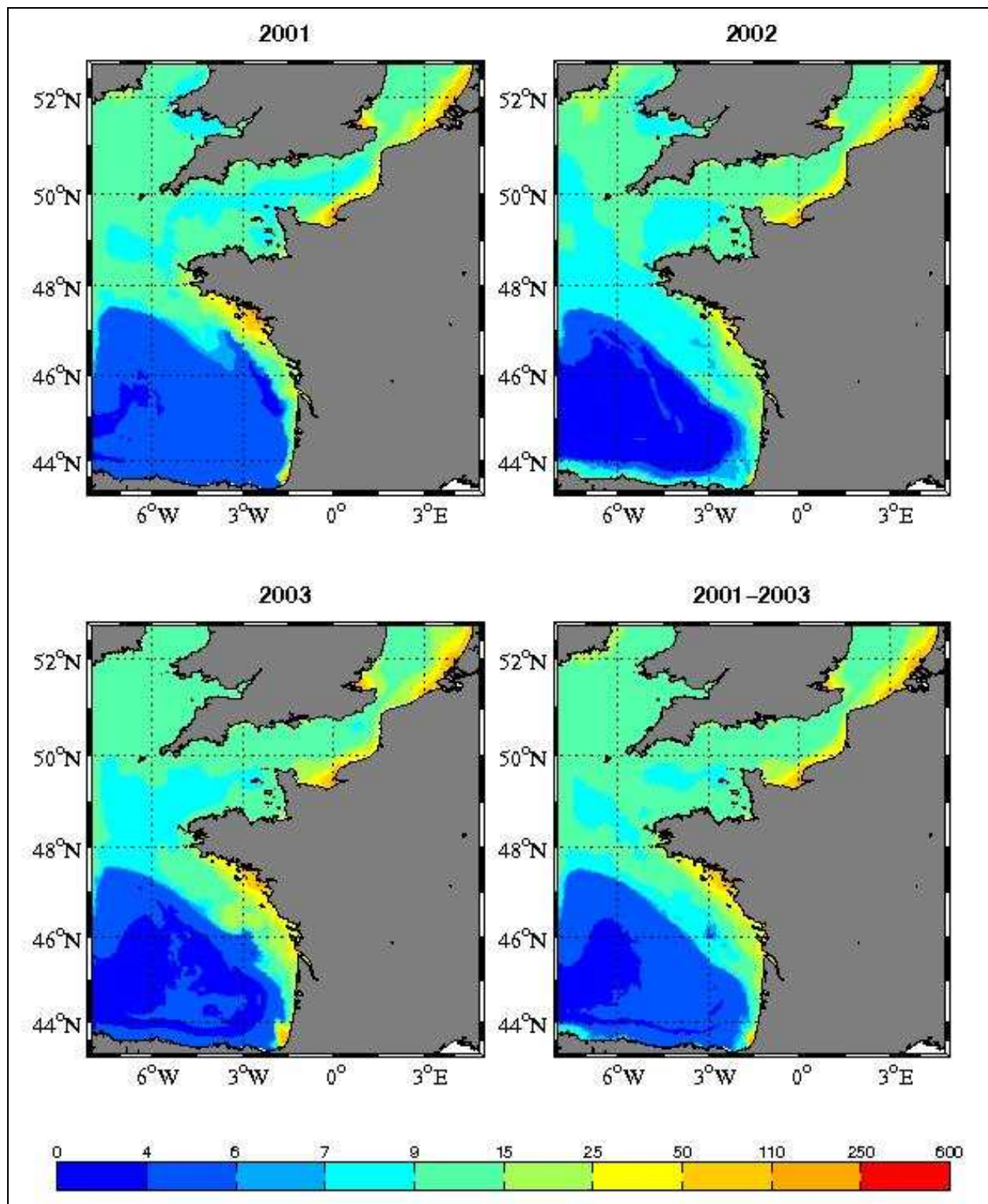


Figure 35: Percentile 90 de l'azote inorganique dissous ($\mu\text{mol/L}$) en surface sur les périodes non-productives des années 2001, 2002, 2003 et 2001-2003 cumulées.

3.1.2 Percentile 50

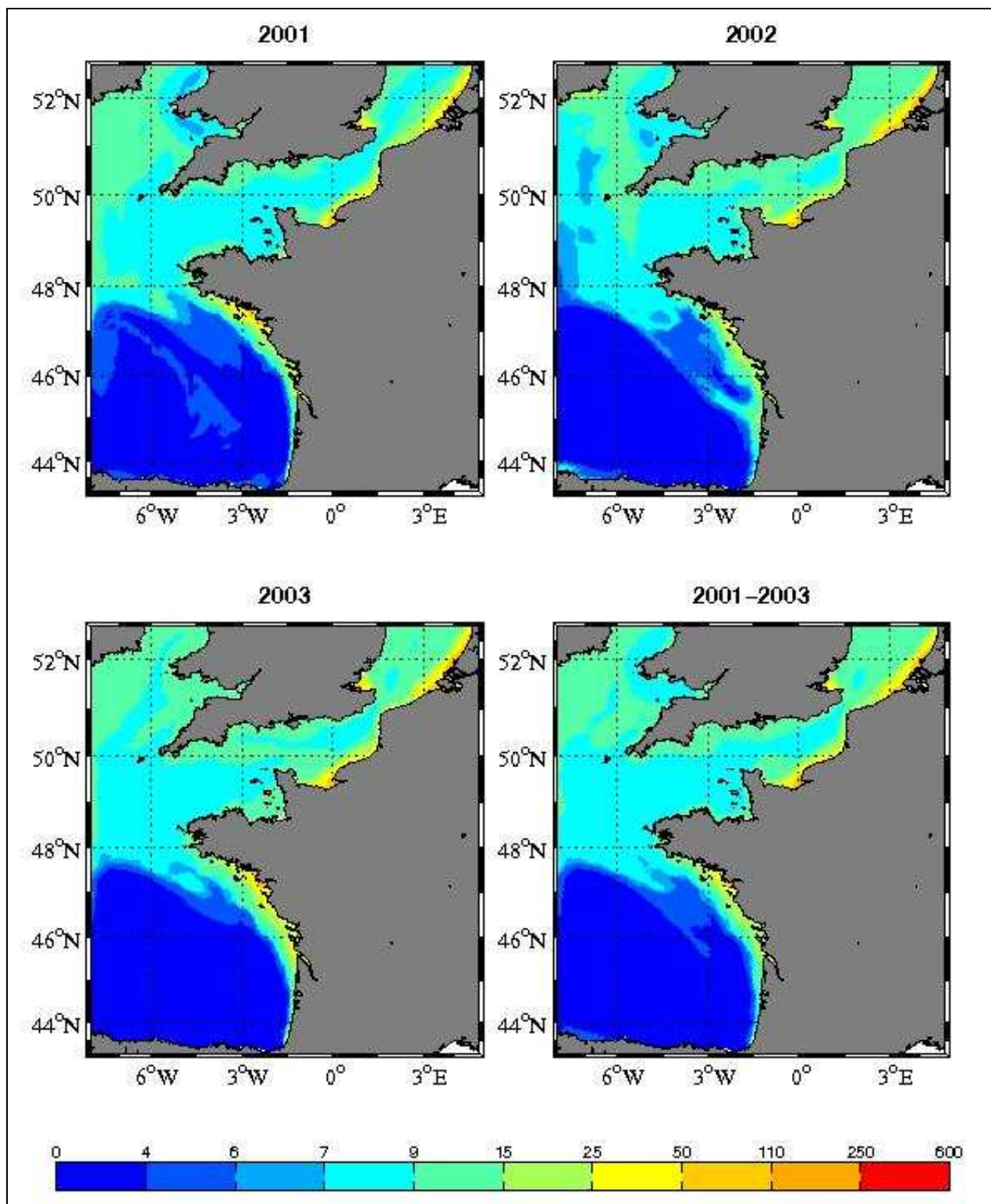


Figure 36: Percentile 50 de l'azote inorganique dissous ($\mu\text{mol/L}$) en surface sur les périodes non-productives des années 2001, 2002, 2003 et 2001-2003 cumulées.

3.1.3 Percentile 10

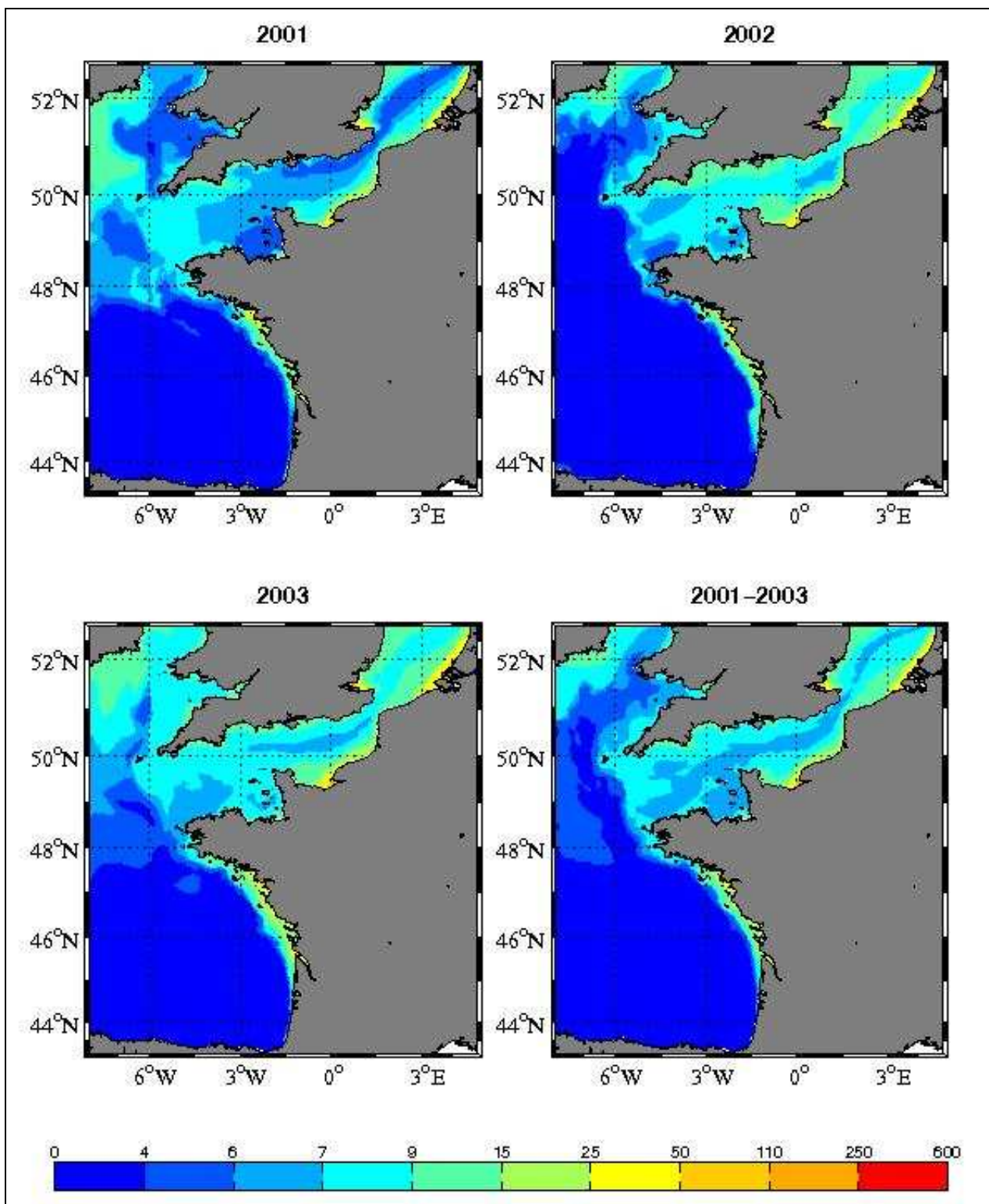


Figure 37: Percentile 10 de l'azote inorganique dissous ($\mu\text{mol/L}$) en surface sur les périodes non-productives des années 2001, 2002, 2003 et 2001-2003 cumulées.

3.2 P INORGANIQUE DISSOUS EN PERIODE HIVERNALE NON-PRODUCTIVE (SURFACE)

3.2.1 Percentile 90

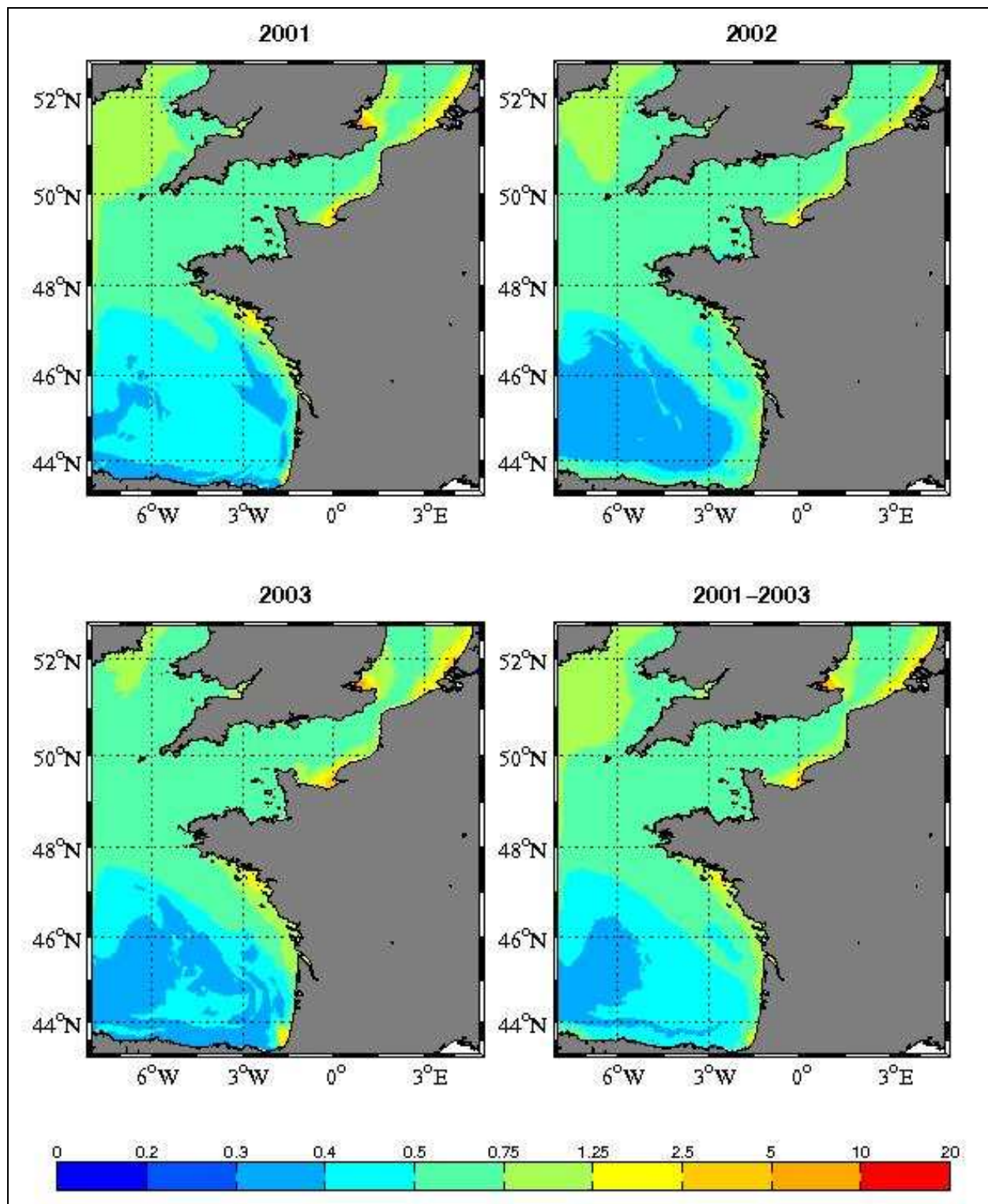


Figure 38: Percentile 90 du phosphore inorganique dissous ($\mu\text{mol/L}$) en surface sur les périodes non-productives des années 2001, 2002, 2003 et 2001-2003 cumulées.

3.2.2 Percentile 50

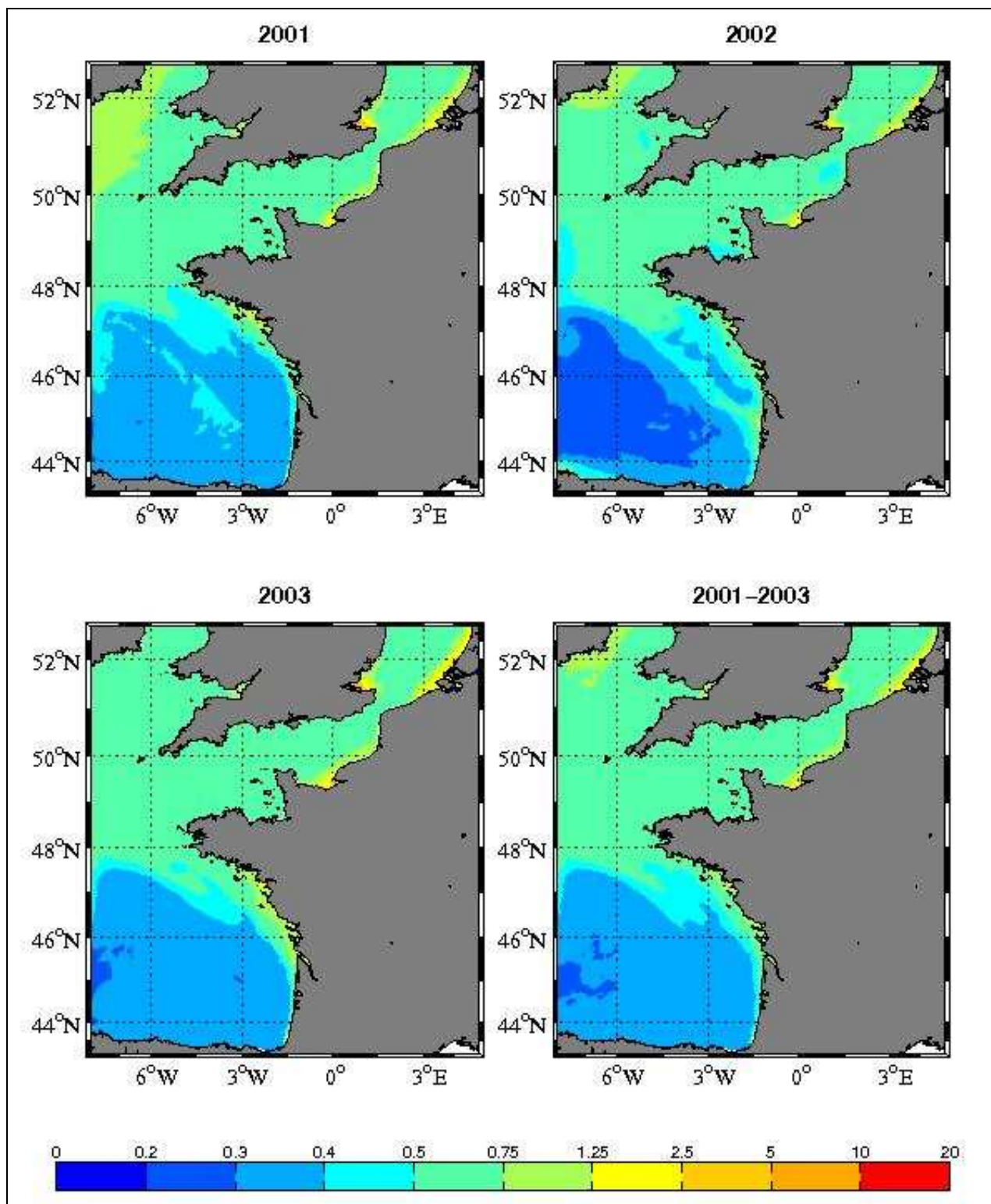


Figure 39: Percentile 50 du phosphore inorganique dissous ($\mu\text{mol/L}$) en surface sur les périodes non-productives des années 2001, 2002, 2003 et 2001-2003 cumulées.

3.2.3 Percentile 10

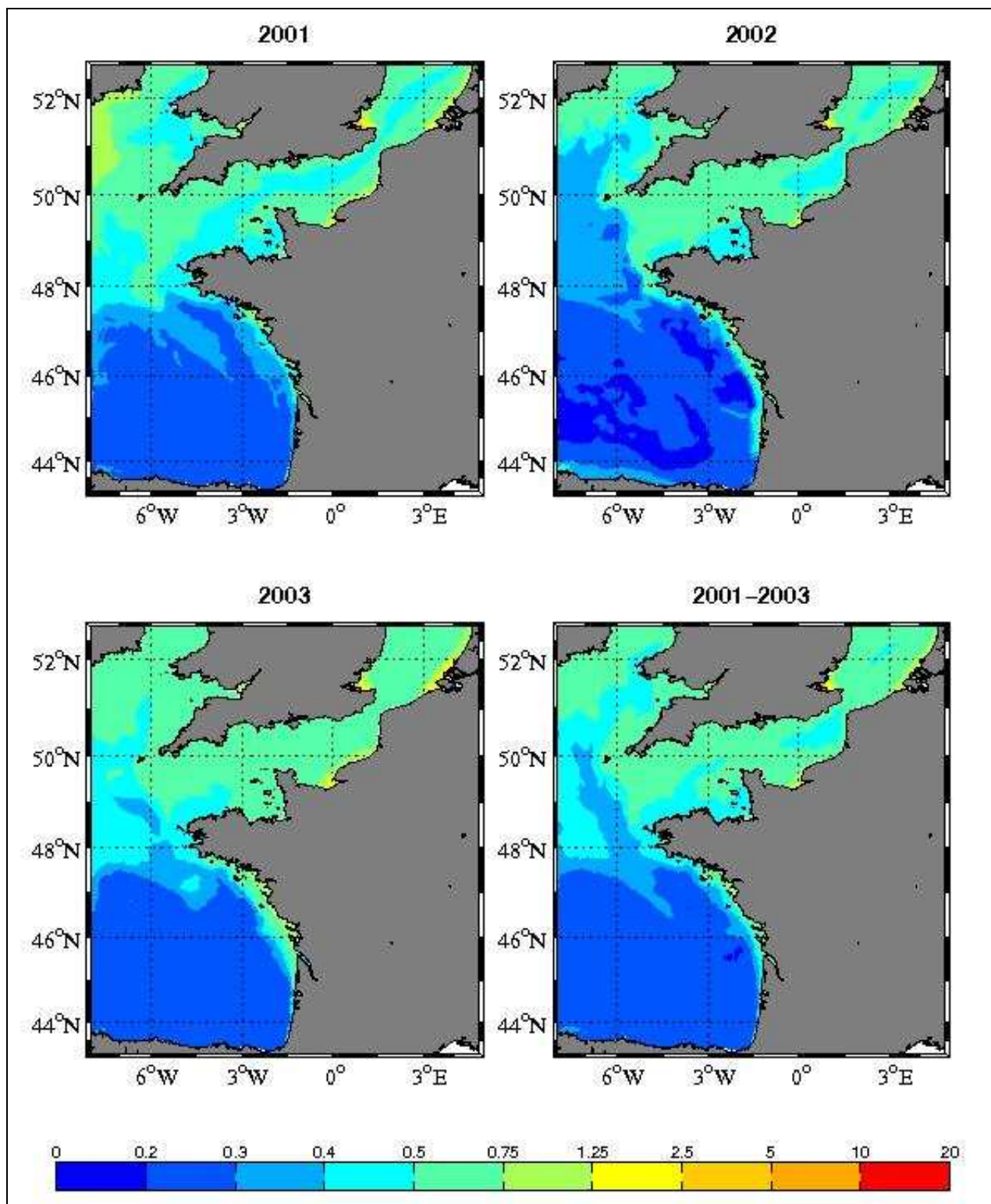


Figure 40: Percentile 10 du phosphore inorganique dissous ($\mu\text{mol/L}$) en surface sur les périodes non-productives des années 2001, 2002, 2003 et 2001-2003 cumulées.

3.3 RAPPORT N/P DES FORMES INORGANIQUE DISSOUTES EN PERIODE HIVERNALE

3.3.1 Percentile 90

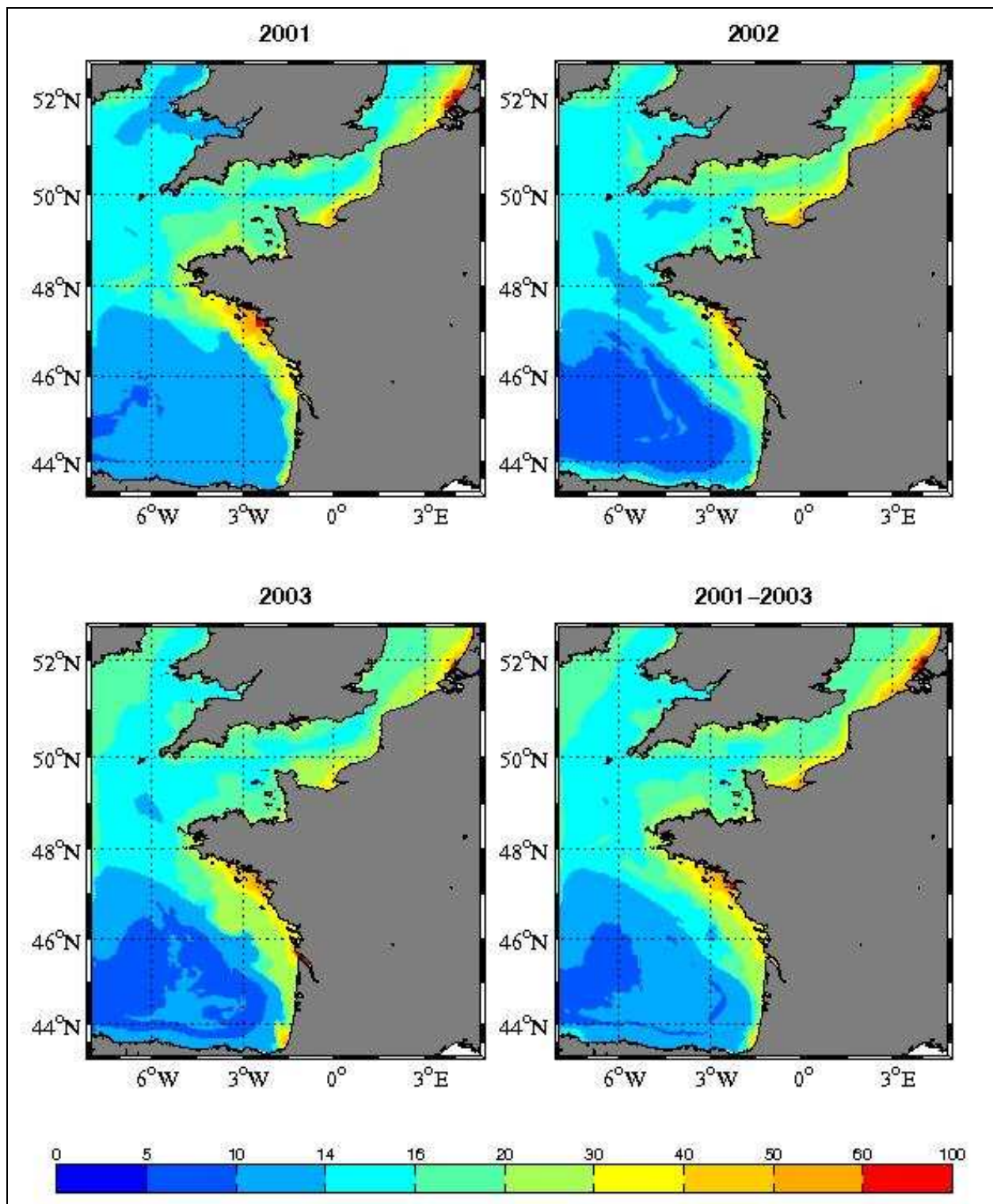


Figure 41: Percentile 90 du rapport N/P des formes inorganique dissous ($\mu\text{mol/L}$) en surface sur les périodes non-productives des années 2001, 2002, 2003 et 2001-2003 cumulées.

3.3.2 Percentile 50

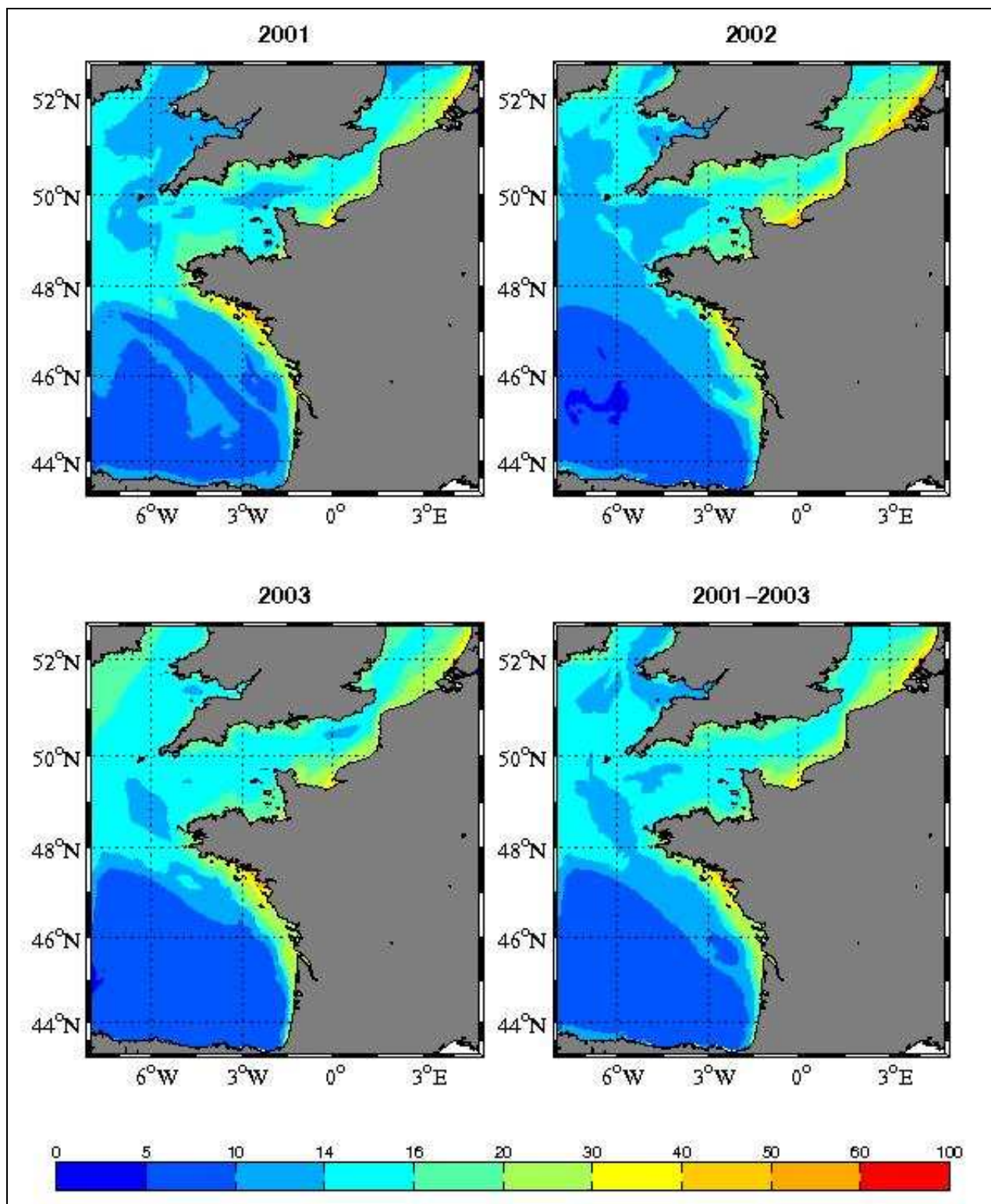


Figure 42: Percentile 50 du rapport N/P des formes inorganique dissous ($\mu\text{mol/L}$) en surface sur les périodes non-productives des années 2001, 2002, 2003 et 2001-2003 cumulées.

3.3.3 Percentile 10

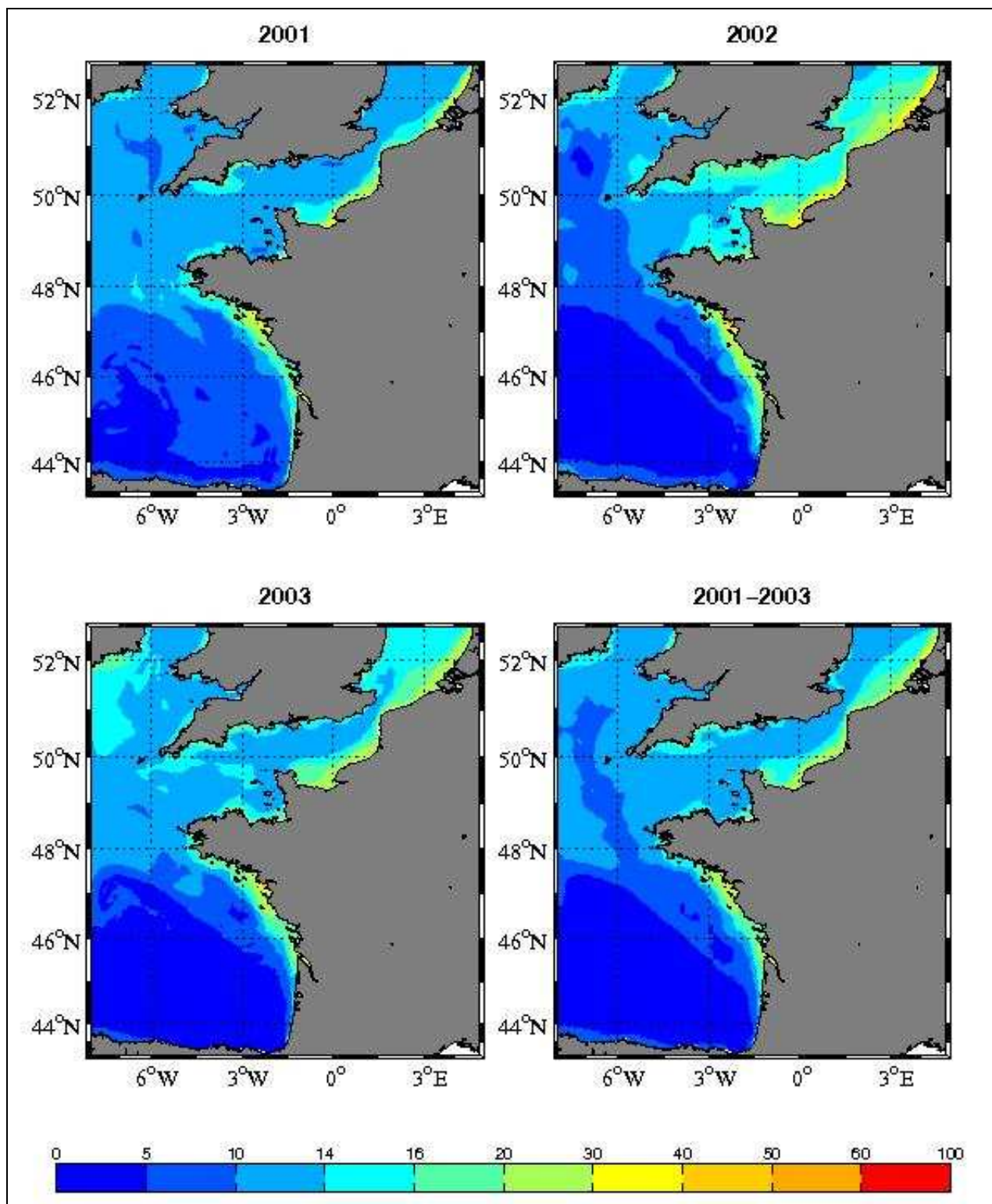


Figure 43: Percentile 10 du rapport N/P des formes inorganique dissous ($\mu\text{mol/L}$) en surface sur les périodes non-productives des années 2001, 2002, 2003 et 2001-2003 cumulées.

3.4 CHLOROPHYLLE TOTALE EN PERIODE PRODUCTIVE (SURFACE)

3.4.1 Percentile 90

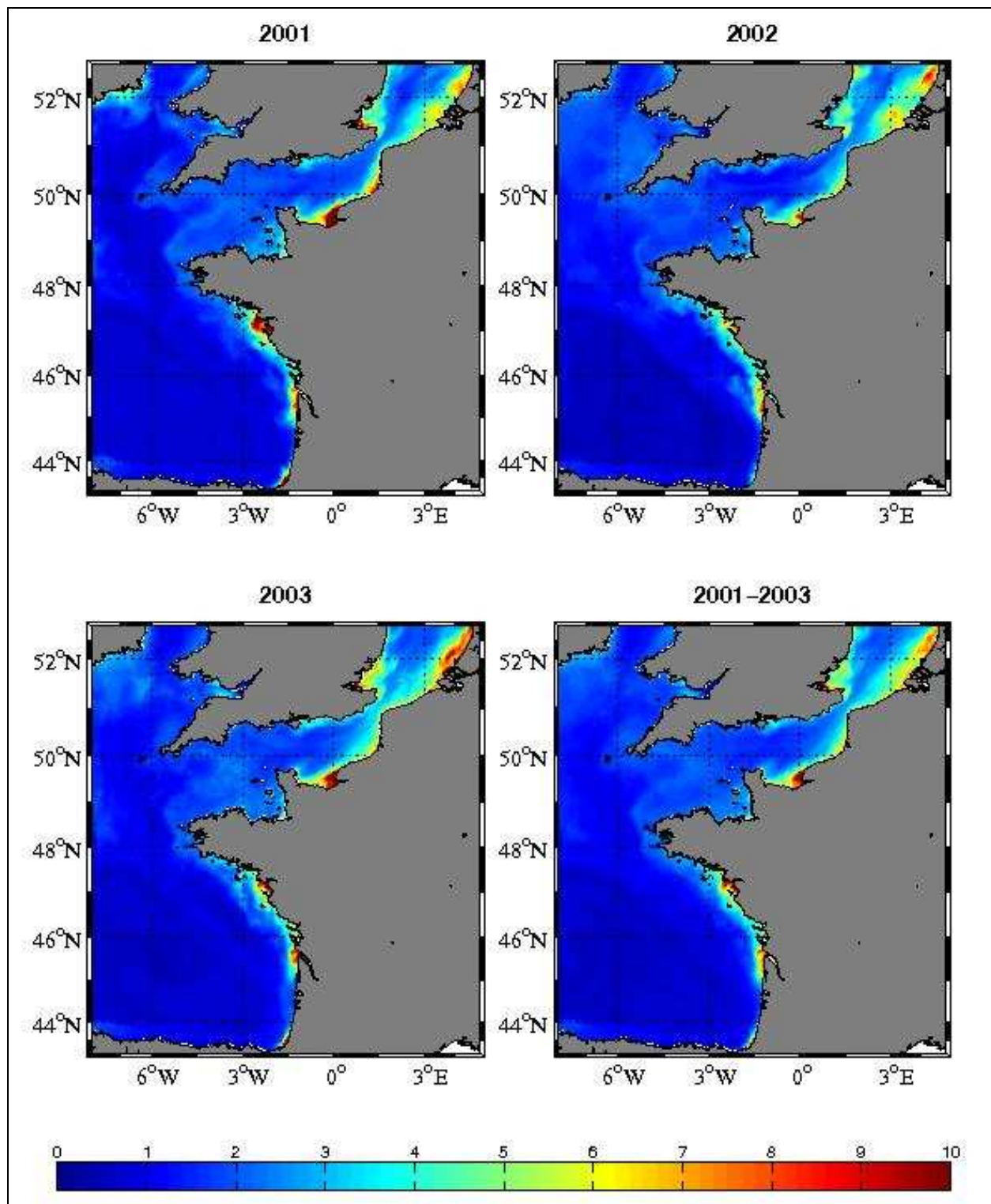


Figure 44: Percentile 90 de la chlorophylle de surface ($\mu\text{g/L}$) sur la période productive des années 2001, 2002, 2003 et 2001-2003 cumulées.

3.4.2 Percentile 50

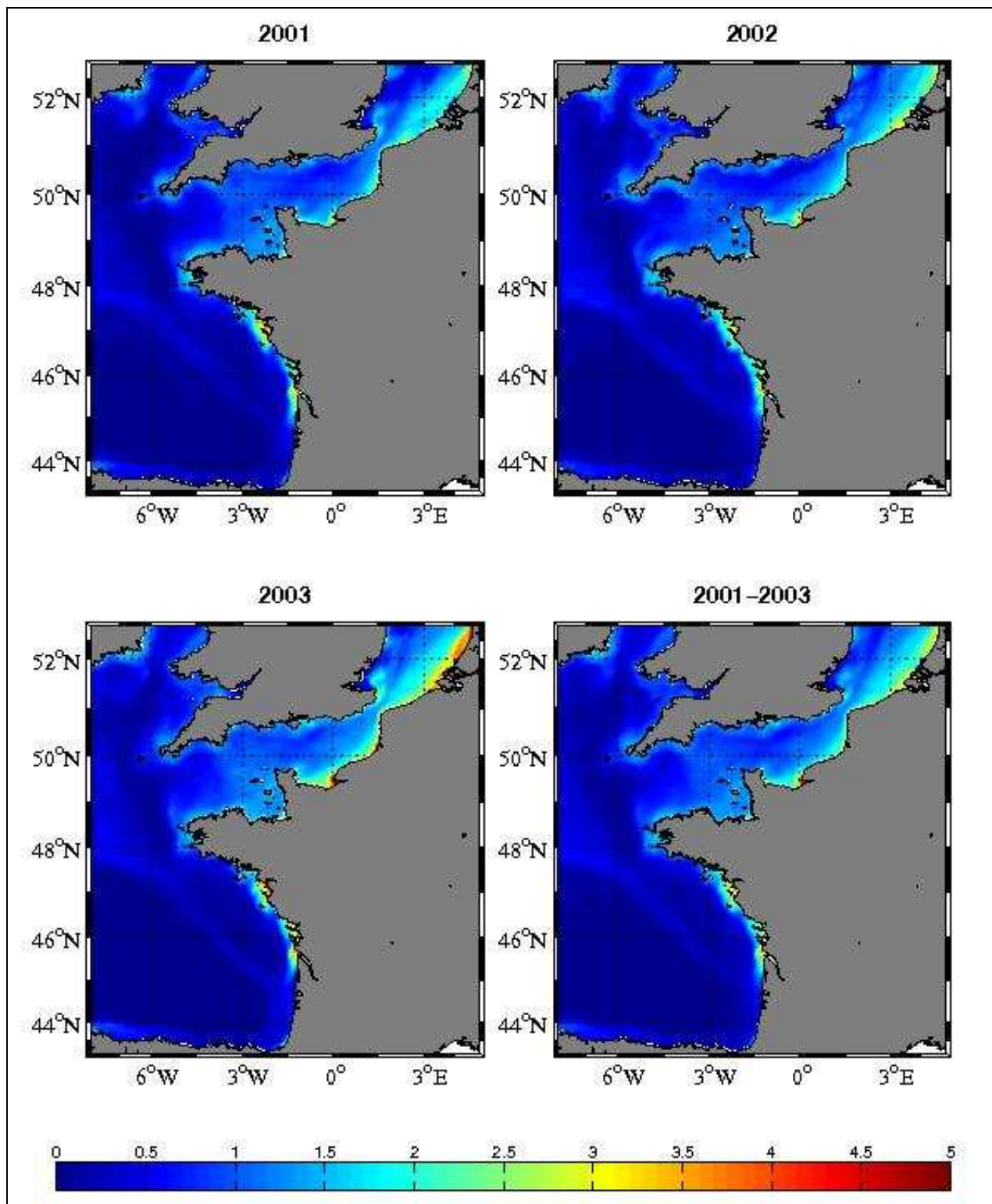


Figure 45: Percentile 50 de la chlorophylle de surface ($\mu\text{g/L}$) sur la période productive des années 2001, 2002, 2003 et 2001-2003 cumulées.

3.4.3 Percentile 10

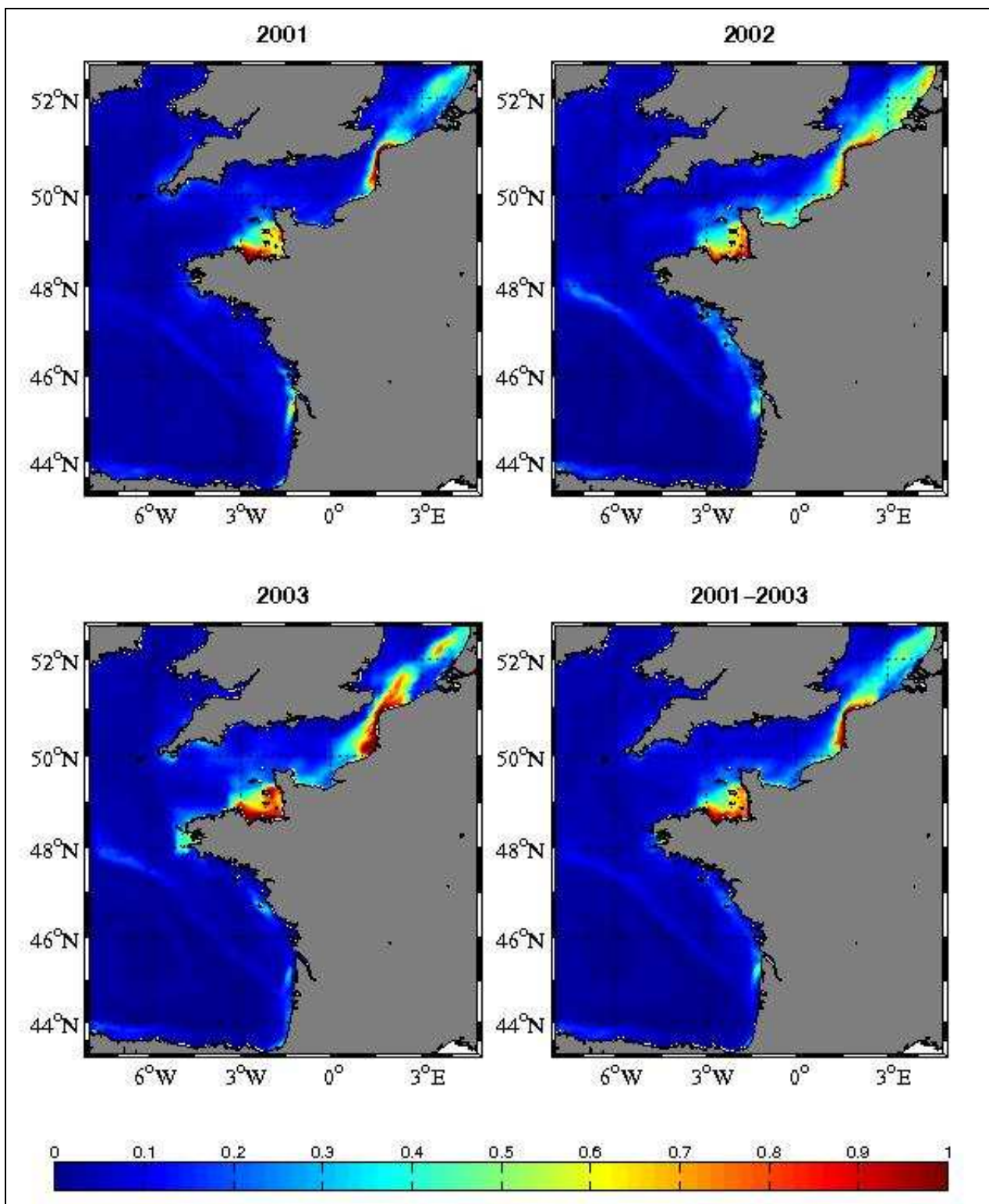


Figure 46: Percentile 10 de la chlorophylle de surface ($\mu\text{g/L}$) sur la période productive des années 2001, 2002, 2003 et 2001-2003 cumulées.

3.5 RAPPORT DIATOMÉES/DINOFLAGELLES EN PERIODE PRODUCTIVE (SURFACE)

3.5.1 Percentile 90

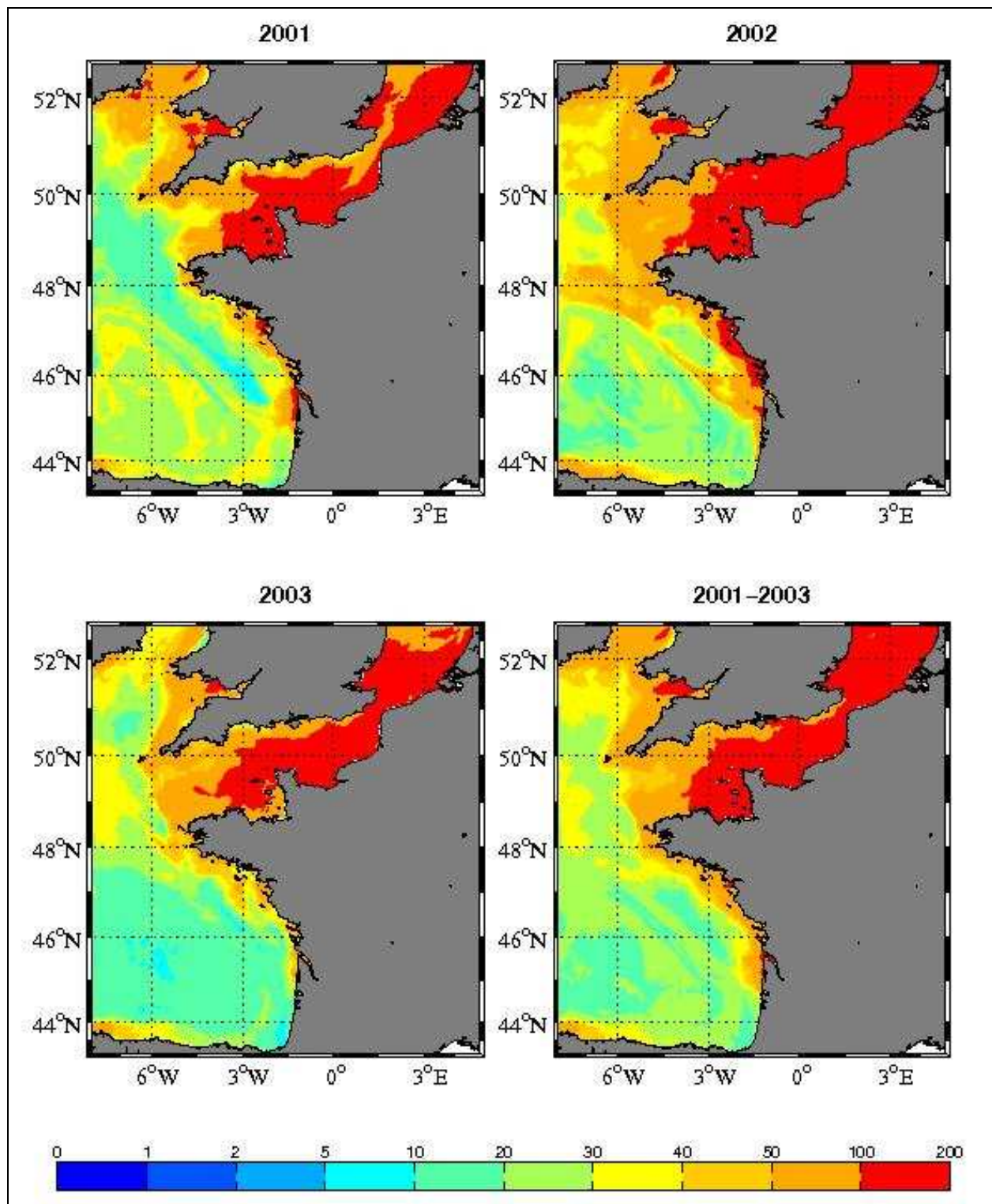


Figure 47: Percentile 90 du rapport diatomées/dinoflagellés de surface sur la période productive des années 2001, 2002, 2003 et 2001-2003 cumulées.

3.5.2 Percentile 50

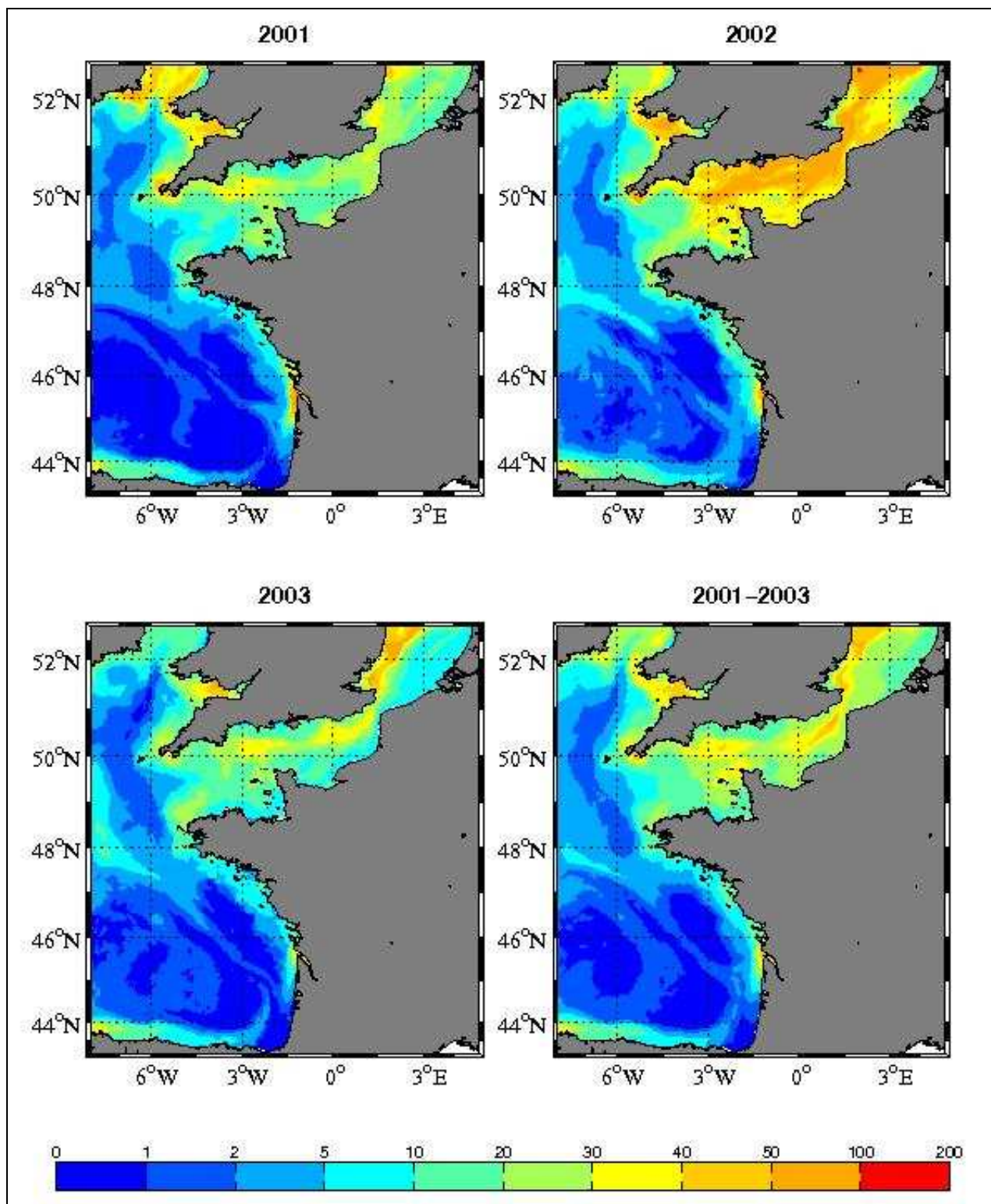


Figure 48: Percentile 50 du rapport diatomées/dinoflagellés de surface sur la période productive des années 2001, 2002, 2003 et 2001-2003 cumulées.

3.5.3 Percentile 10

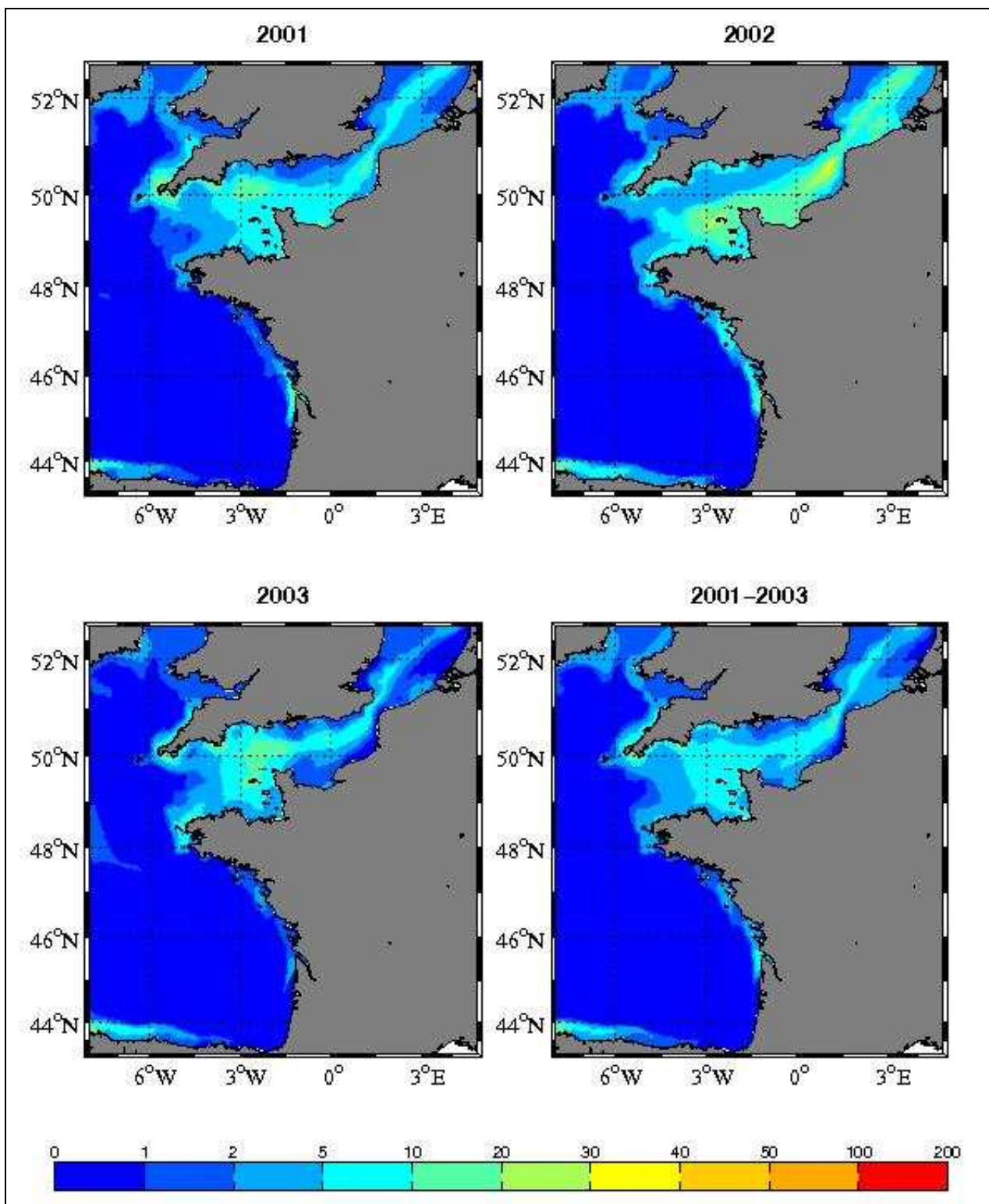


Figure 49: Percentile 10 du rapport diatomées/dinoflagellés de surface sur la période productive des années 2001, 2002, 2003 et 2001-2003 cumulées.

3.6 TRANSPARENCE EN PERIODE PRODUCTIVE

3.6.1 Percentile 90

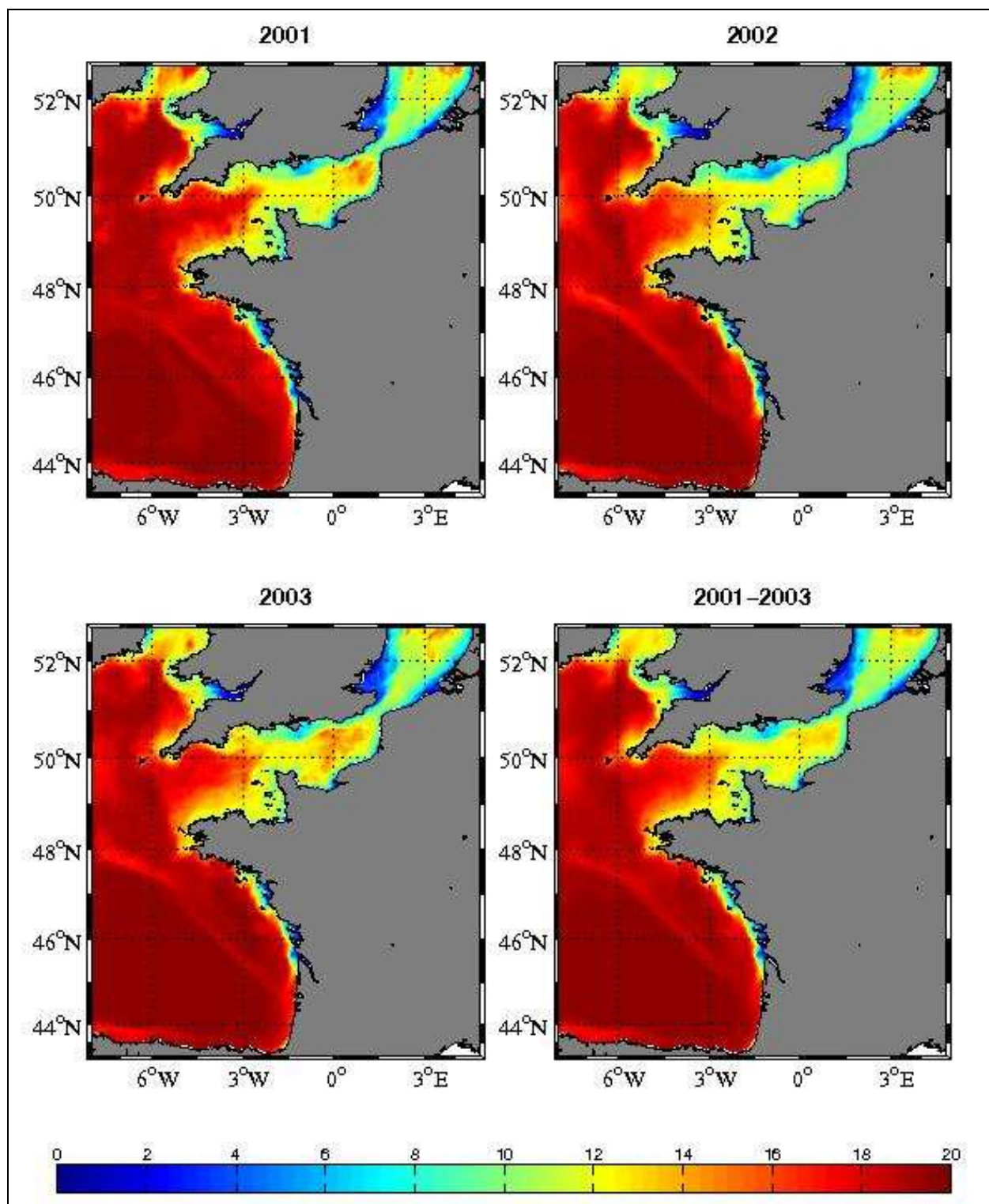


Figure 50: Percentile 90 de la transparence en surface (m) sur la période productive des années 2001, 2002, 2003 et 2001-2003 cumulées.

3.6.2 Percentile 50

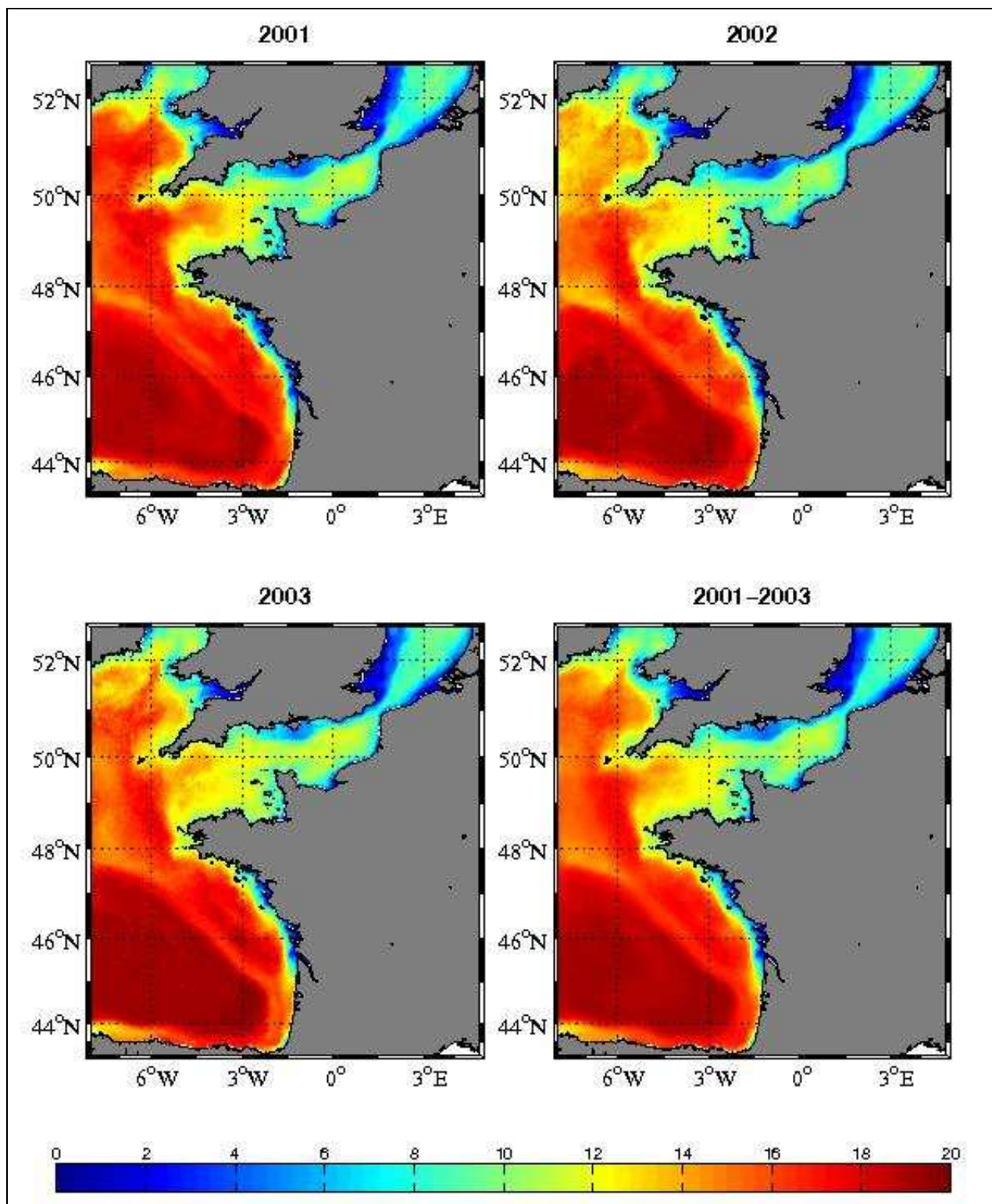


Figure 51: Percentile 50 de la transparence en surface (m) sur la période productive des années 2001, 2002, 2003 et 2001-2003 cumulées.

3.6.3 Percentile 10

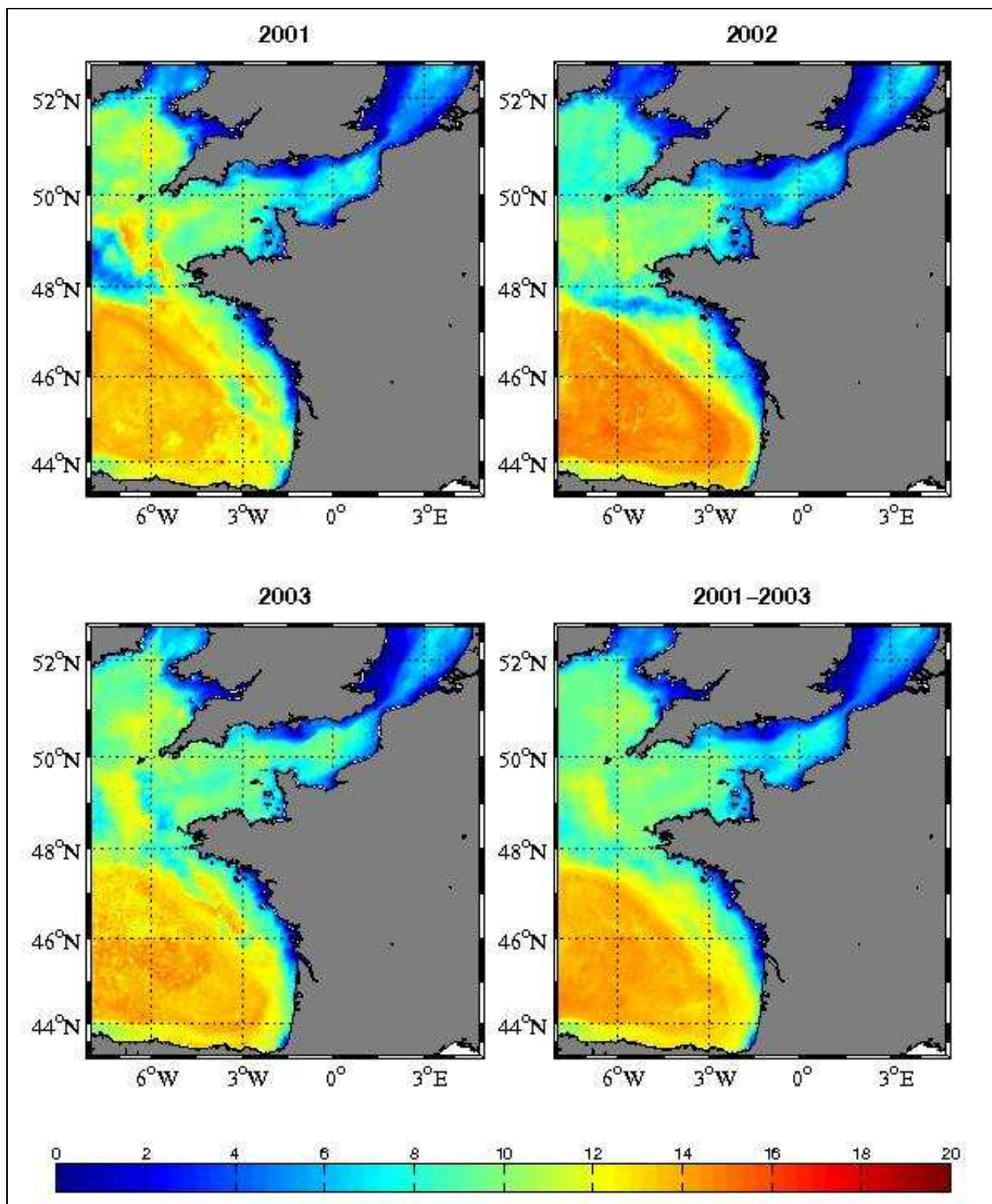


Figure 52: Percentile 10 de la transparence en surface (m) sur la période productive des années 2001, 2002, 2003 et 2001-2003 cumulées.

3.7 OXYGENE DISSOUS EN PERIODE PRODUCTIVE (FOND)

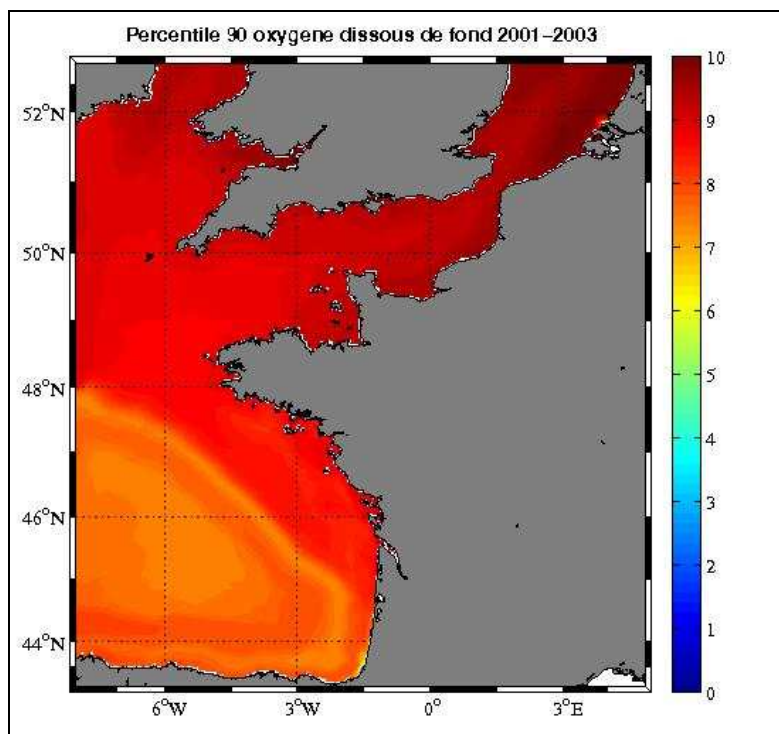


Figure 53: Percentile 90 de l'oxygène dissous de fond (mg/L) sur la période productive 2001-2003.

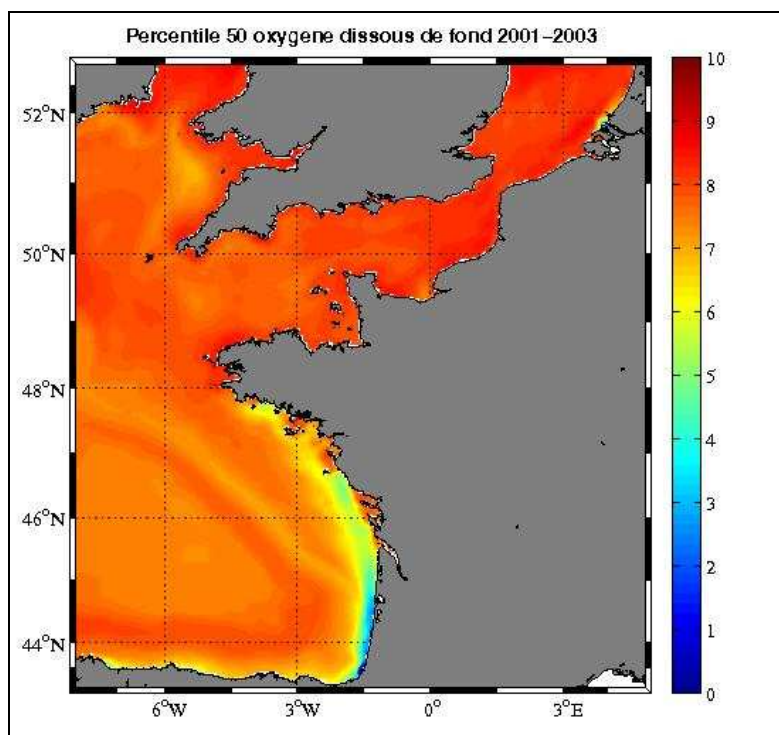


Figure 54: Percentile 50 de l'oxygène dissous de fond (mg/L) sur la période productive 2001-2003.

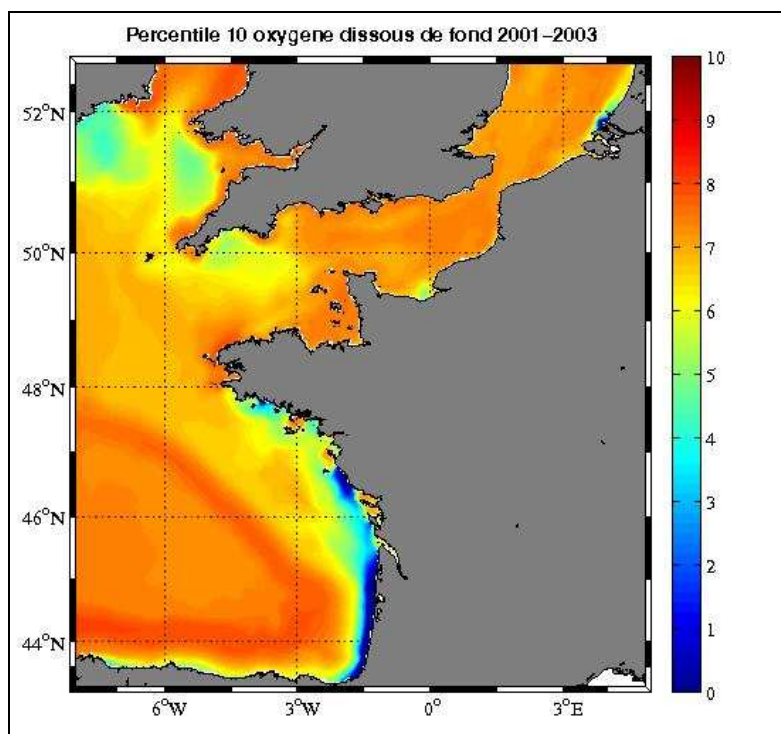


Figure 55: Percentile 10 de l'oxygène dissous de fond (mg/L) sur la période productive 2001-2003.

CONCLUSION

Les résultats du modèle de l'Ifremer ECO-MARS 3D appliqué à l'emprise Manche/Golfe de Gascogne (MANGA) ont été comparés dans un premier temps aux mesures *in situ* en nutriments et chlorophylle de différents réseaux et à l'imagerie satellitaire (SeaWifs) en chlorophylle sur la période 2001-2003. Dans un deuxième temps, des cartes de synthèses en nutriments et chlorophylle, générées à partir des résultats du modèle, ont été comparées à des cartes de synthèses obtenues à partir d'une analyse des mesures des campagnes et des réseaux de surveillance effectuée pour les sous-zones Golfe de Gascogne, Mer Celtique et Manche-Mer du Nord.

Cette comparaison (parties 1 et 2) a permis, de manière globale, de mettre globalement en relief une bonne représentation de la variation saisonnière des nutriments et de la chlorophylle à la côte au niveau des points de mesures et une représentation correcte de la chlorophylle de surface sur l'ensemble de la zone d'étude. Cependant, des biais par rapport aux mesures ont été identifiés. Le tableau 5 résume par paramètres les potentielles surestimations et sous-estimations du modèle par rapport à la mesure :

- Dans la partie hauturière de la sous-zone Golfe de Gascogne, le nitrate simulé semble être sous-estimé et devient donc l'élément limitant. Par conséquent, le phosphate n'est pas entièrement consommé et est surestimé en période printanière et au début de l'été (figure 30), le rapports N/P des formes inorganiques dissoutes (environ 10) est très éloigné du rapport de Redfield (environ 16), et la chlorophylle de surface simulée est sous-estimée en période estivale (absence d'azote dans la couche de surface). Ce constat se vérifie également sur une partie du plateau continental de la sous-zone Golfe de Gascogne en période estival mais pour le phosphate qui est trop en limitation. **Une prise en compte des formes organiques dissoutes de l'azote et du phosphore permettrait probablement d'améliorer les résultats en chlorophylle et en rapport N/P au niveau de la zone hauturière et dans la zone stratifiée du plateau continental en maintenant des nutriments dans la couche de surface (travail de post-doctorat de Virginie Sibert dirigé par Marc Sourisseau).**
- D'une manière générale le modèle sous-estime la chlorophylle en période hivernale (figures 9 à 11). A la côte, au niveau des panaches turbides, la chlorophylle est également souvent sous-estimée au moment du bloom printanier notamment en 2001 et 2003 (figures 9 et 11). Si l'absence de prise en compte dans le modèle de base de *Phaeocystis globosa*, qui est très présente en Mer du Nord au printemps, peut être un début d'explication, deux autres explications sont probables.

Tout d'abord, l'**adaptation du phytoplancton** n'est qu'effleurée dans le modèle avec un rapport chlorophylle/azote variable. Ce rapport variable a amélioré de manière sensible les résultats (Menesguen et Dussauze, 2011) mais relève plus du post-traitement des résultats que d'une véritable intégration dans les équations. Dans la version actuelle du modèle, les paramètres de croissance du phytoplancton (intensité lumineuse optimale, constante de Michaelis) sont fixes et sont des valeurs moyennes représentatives des trois groupes de phytoplancton (diatomées, dinoflagellés, nano-picoplancton). **L'amélioration des résultats**

résidera certainement dans l'utilisation d'un modèle permettant l'adaptation du phytoplancton aux facteurs extérieurs que sont la lumière, la concentration en nutriments et la température ((Geider et al., 1998), Pahlow et al., 2008)).

La prédation du phytoplancton par le zooplancton est également une piste d'amélioration des résultats en chlorophylle. Le modèle simule deux groupes fonctionnels de zooplancton : le mesozooplancton qui effectue une prédation sur les diatomées, les dinoflagellés et le microzooplancton ; et le microzooplancton qui agit sur les nanoflagellés et la matière détritique. Les différents tests effectués dans (Menesguen et Dussauze, 2011) (simulations sans zooplancton) ont montré que la production primaire est très sensible à la biomasse zooplanctonique. Cette variable n'est pourtant quasiment pas validée dans le modèle et sa formulation relativement schématique. Dans les zones turbides du modèle, en plus du problème d'adaptation lumineuse peut s'ajouter un problème de zooplancton trop réactif qui « tamponne » la biomasse phytoplanctonique ce qui empêche d'atteindre les concentrations en chlorophylle observées par le satellite ou les mesures *in situ*. Ce comportement est très difficile à calibrer dans le modèle. Un test de reformulation des variables zooplanctoniques avec une prise en compte de différentes classes de tailles est actuellement mené au sein du laboratoire PELAGOS de DYNECO (travail de post-doctorat de Pieter Vandromme dirigé par Marc Sourisseau et Martin Huret).

- La concentration en oxygène dissous est un indicateur important de l'état d'eutrophisation d'une masse d'eau et le module oxygène (sans rétroaction sur le modèle de base) a été validé sur des emprises très restreintes (en baie de Vilaine avec la bouée MOLIT et en rade de Brest avec la bouée MAREL Iroise). Il était pour la première fois testé sur une emprise aussi vaste et hétérogène que l'emprise MANGA. Les mesures d'oxygène sont peu nombreuses mais les résultats sont tout de même cohérents : concentrations élevées en Manche (brassage important) ; baisses des teneurs au niveau des estuaires notamment en baie de Vilaine qui est identifiée comme étant un des points les plus sensibles à l'hypoxie des côtes françaises. Cependant, une énorme bande anoxique apparaît sur tout le littoral Aquitain et Landais dans la couche de fond ce qui n'est pas du tout observé. Cette erreur vient certainement d'une prise en compte trop importante de la consommation d'oxygène par le compartiment benthique qui, dans le modèle, correspond uniquement à la reminéralisation de l'azote organique particulaire benthique (dans le modèle : azote organique particulaire pélagique de la première couche d'eau). Ce compartiment est donc simulé de manière très schématique dans le modèle et une meilleure représentation (notamment la prise en compte du sédiment) permettrait de pouvoir représenter un peu plus finement les flux eau/sédiment en nutriments et oxygène ce qui permettrait également d'intégrer la perte d'azote par dénitrification qui est évaluée entre 0.5 et 1 mmolN.m⁻².jour⁻¹ sur le plateau continental de l'Atlantique Nord ((Sorensen, 1978), (Seitzinger et Giblin, 1996)).

Dans la deuxième phase du travail, des classes de qualité seront déterminées pour chaque paramètre de l'eutrophisation, en appliquant les grilles de qualité existantes (OSPAR, DCE, HELCOM). L'application à la simulation nominale d'une part, et à deux simulations correspondant à 50% et 70% d'abatement des rejets actuels d'autre part, permettra d'évaluer pour chaque grille l'aire des zones dont l'état écologique est susceptible d'être amélioré.

		Manche/Mer du Nord	Mer Celtique	Golfe de Gascogne
nitrate	côte	Bonne représentation des concentrations et de la dynamique saisonnière (partie 1.4.3)	Bonne représentation des concentrations et de la dynamique saisonnière (partie 2.3)	Bonne représentation des concentrations et de la dynamique saisonnière (partie 2.3)
	large	Bonne représentation de la saisonnalité et de la dynamique saisonnière (partie 2.3)	Bonne représentation des concentrations et de la dynamique saisonnière (partie 2.3)	Sous-estimation estivale au-delà du talus (partie 2.3)
phosphate	côte	Bonne représentation de la saisonnalité et des concentrations (partie 1.4.3)	Bonne représentation de la saisonnalité et des concentrations (partie 2.3)	Bonne représentation des concentrations à la côte (partie 1.4.3) sous-estimation estivale sur une partie du plateau continental
	large	Bonne représentation de la saisonnalité et des concentrations (partie 2.3)	Bonne représentation de la saisonnalité et des concentrations (partie 2.3)	Surestimation estivale au-delà du talus (partie 2.3) et sous-estimation estival au niveau du plateau continental.
silicate	côte	Bonne représentation des concentrations et de la dynamique saisonnière (partie 1.4.3)	Bonne représentation des concentrations et de la dynamique saisonnière (partie 2.3)	Bonne représentation des concentrations et de la dynamique saisonnière (partie 1.4.3)
	large	Bonne représentation des concentrations et de la dynamique saisonnière (partie 2.3)	Bonne représentation des concentrations et de la dynamique saisonnière (partie 2.3)	Bonne représentation des concentrations et de la dynamique saisonnière (partie 2.3)

chlorophylle	côte	-Bonne représentation de la dynamique saisonnière et des concentrations (comparaison avec REPHY partie 1.4.3)	Bonne représentation des concentrations et de la dynamique saisonnière (partie 1.4.2 et partie 2.2).	Bonne représentation des concentrations et de la dynamique saisonnière (partie 1.4.2 ,1.43 et 2.2).
		-Sous-estimation de la chlorophylle en Baie de Somme (comparaison avec l'imagerie satellitaire partie 1.4.1).	sous-estimation hivernale (partie 2.2)	sous-estimation hivernale (partie 2.2)
	large	Bonne représentation des concentrations et de la dynamique saisonnière la saisonnalité (partie 2.2)	Bonne représentation des concentrations et de la dynamique saisonnière la saisonnalité (partie 2.2)	Bonne représentation des concentrations et de la dynamique saisonnière la saisonnalité (partie 2.2)
		sous-estimation hivernale (partie 2.2)	sous-estimation hivernale (partie 2.2)	sous-estimation estivale au-delà du talus (partie 2.2)
oxygène		Concentrations et dynamique saisonnière cohérente	Concentrations et dynamique saisonnière cohérente	Bande anoxique dans la couche de fond irréaliste le long de la côte landaise en été.

Tableau 5: Tableau de synthèse des comparaisons modèle/mesure sur la période 2001-2003.

REFERENCES

- Chapelle, A., Lazure, P., Ménesguen, A., 1994. Modeling eutrophication events in a coastal ecosystem. *Est. Coast. Mar. Sci.* 39, 529–548.
- Geider, R. J., MacIntyre H. L., Kana T. M., 1998. A dynamic regulatory model of phytoplanktonic acclimation to light, nutrients and temperature. *Limnol. Oceanogr.* 43, 679-694.
- Gohin, F., Druon, J. N., Lampert, L., 2002. A five channel chlorophyll algorithm applied to SeaWiFS data processed by SeaDAS in coastal waters. *International Journal of Remote Sensing*, 23, 1639–1661.
- Gohin, F., Saulquin, B., Oger-Jeannere,t H., Lozac'h, L., Lampert, L., Lefebvre, A., Riou, P., Bruchon, F., 2008. Towards a better assessment of the ecological status of coastal waters using satellite-derived chlorophyll-a concentrations,” *Remote Sens. Environ.*, 112(8), 3329–3340.
- Gohin, F., Loyer, S., Lunven, M., Labry, C., Froidefond, J. M., Delmas, D., Huret M., Herbland A., 2005. Satellite-derived parameters for biological modelling in coastal waters: Illustration over the eastern continental shelf of the Bay of Biscay. *Remote Sensing of Environment*, 95(1), 29–46.
- Lazure, P., Dumas, F., 2008. An external-internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS). *Advances in Water resources*, 31 233-250.
- Lazure, P., Garnier, V., Dumas, F., Herry, C., Chifflet, M., 2009. Development of a hydrodynamic model of the Bay of Biscay. Validation of hydrology. *Continental Shelf Research* 29, 985-997.
- Loyer, S., Lampert, L., Menesguen A., Cann P., Labasque T., 2006. Seasonal evolution of the nutrient pattern on Biscay Bay continental shelf over the years 1999-2000. *Scientia Marina*, 70(1), 31-46.
- Ménesguen, A., Dussauze, M., 2011. Calibration/validation du modèle ECO-MARS3D sur la façade française Manche-Atlantique. Rapport Ifremer RST DYNECO/EB, 91p (+annexes).
- Merceron M., 1987. Mortalité de poissons en baie de Vilaine (juillet 1982). Causes, mécanismes, propositions d'action. Rapport IFREMER/DERO 87-14-EL, 100 p.
- O'Reilly, J. E., Maritorena, S., Mitchell, B. G., Siegel, D. A., Carder, K. L., Garver, S. A., Kahru, M., McClain, C. 1998. Ocean color chlorophyll algorithm for SeaWiFS. *J. Geophys. Res.*, 103: 24,937-24,953.
- Pahlow, M., Vezina A.F., Casault, B., Maass, H., Malloch, L., Wright D.G., Lu; Y., 2008. Adaptive model of plankton dynamics for the North Atlantic. *Progress in Oceanography*. 76, 151-191.
- Poole, H. H., Atkins, R. G., 1929. Photoelectric measurements of submarine illumination throughout the year. *J. Marine Biol. Assoc. U.K.*, 16 : 297-324.
- Rogé, M. 2011. Réalisation d'une climatologie pour la zone Manche-Atlantique- Variation spatio-temporelle des nutriments. Rapport Ifremer pour la DCSMM.
- Seitzinger, S.P, Giblin E.G., 1996. Estimating denitrification in North Atlantic continental shelf sediments. *Biogeochemistry*. 35, 235-260.

Sorensen, J. 1978. Denitrification rates in a marine sediment as measured by the acetylene inhibition technique. Applied and Environmental Microbiology. 36, 139-143.

Sourisseau, M., Rogé, M., 2011a. Variation spatio- temporelle des nutriments /SRM GDG (Golfe de Gascogne). Rapport Ifremer pour la DCSMM.

Sourisseau, M., Rogé, M., 2011b. Variation spatio- temporelle des nutriments /SRM MC (Mer Celtique). Rapport Ifremer pour la DCSMM.

Sourisseau, M., Rogé, M., 2011c. Variation spatio- temporelle des nutriments /SRM MMN (Manche Mer du Nord). Rapport Ifremer pour la DCSMM.