

Département : Dynamiques de l'Environnement Côtier
Laboratoire : Ecologie Benthique

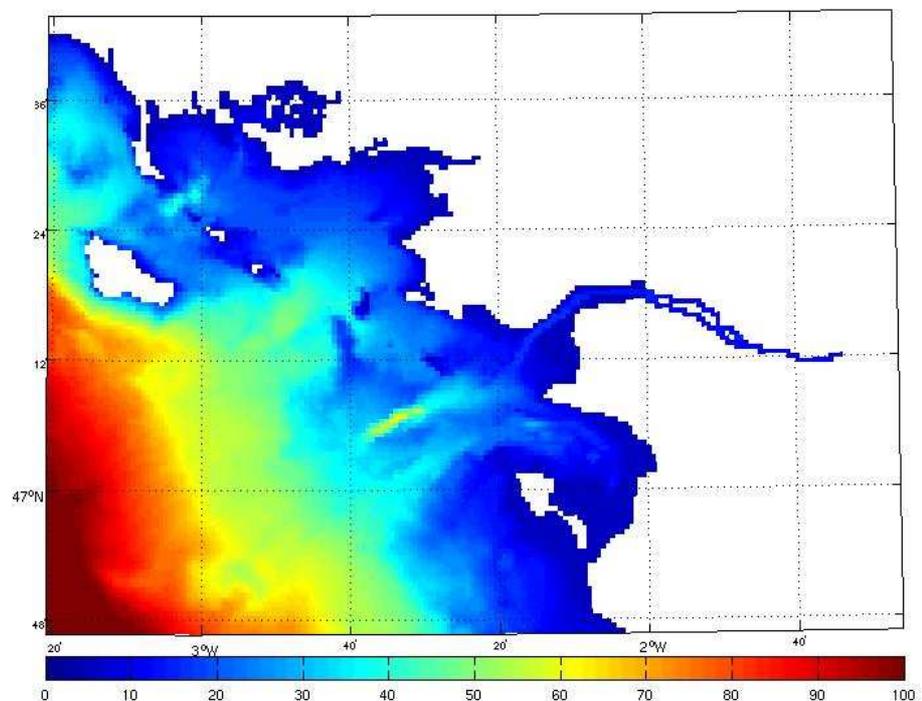
Morgan DUSSAUZE

Date : décembre 2011

RST DYNECO/EB/11- 05/AM

ifremer

Simulation de l'effet d'une variation réaliste des apports azotés et phosphorés de la Loire et de la Vilaine sur la production primaire dans la zone Loire/Vilaine.



SOMMAIRE

Introduction	1
1 Contexte DCE de la zone Loire/Vilaine	2
2 Description du modèle	5
2.1 Emprise du modèle	5
2.2 Description du modèle biogéochimique	6
2.3 Forçages	8
3 Description des mesures	8
3.1 Données in situ.....	8
3.2 Données satellitaires	9
4 Comparaison modèle-mesures	10
4.1 Méthodologie retenue	10
4.2 Température/Salinité.....	10
4.3 Chlorophylle totale de surface	11
4.3.1 Répartition spatiale moyenne par an.....	11
4.3.2 Variation temporelle de la chlorophylle de surface par strate bathymétrique	13
4.4 Nutriments et chlorophylle à quelques stations ponctuelles	16
4.5 Evolution de l’oxygène dissous en baie de Vilaine	18
5 Scénarios de réduction ou augmentation des apports azotés et phosphorés de la Loire et de la Vilaine	21
5.1 Situation de référence.....	21
5.2 Synthèse des résultats	27
5.2.1 Réduction de 20% et 50% des apports de la Loire et de la Vilaine	31
5.2.2 Réduction de 20% et 50 % des apports de la Loire	35
5.2.3 Réduction de 20% et 50 % des apports de la Vilaine	39
5.2.4 Augmentation de 20% des apports de la Loire et de la Vilaine.....	43
5.2.5 Augmentation de 20% des apports de la Loire	45
5.2.6 Augmentation de 20% des apports de la Vilaine.....	47
Conclusion	49
Références	50

Introduction

La zone Loire/Vilaine est une des zones les plus enrichies en nutriments du littoral français et, en raison de conditions hydrodynamiques particulières (forte stratification thermohaline et faible circulation résiduelle), une des zones les plus soumises aux proliférations phytoplanctoniques. Ces proliférations phytoplanctoniques d'espèces diverses (dont certaines peuvent être toxiques : *Pseudo-Nitzschia*, *Dinophysis*) sont recensées chaque année par le réseau de surveillance REPHY de l'Ifremer. Cette eutrophisation à phytoplancton peut également provoquer dans des zones stratifiées des phénomènes d'hypoxie auxquels est sujette de manière récurrente la baie de Vilaine; celle-ci a même connu en 1982 un épisode de totale anoxie qui a provoqué la mort de nombreux poissons et invertébrés (Merceron, 1987).

La Directive Cadre sur l'Eau (DCE) impose un bon état écologique des masses d'eaux, ce qui implique une diminution des apports en nutriments de la Loire et de la Vilaine. Dans ce contexte, une première étude pour le compte de l'AELB a été effectuée dans le but d'évaluer par la modélisation l'effet d'une diminution des apports azotés de la Loire et de la Vilaine sur les proliférations phytoplanctoniques (Dussauze, 2008).

Après un nouveau travail de calibration du modèle Ifremer ECO-MARS 3D, cette étude se propose d'évaluer, toujours par la modélisation, l'effet d'une variation réaliste (augmentation ou diminution de l'ordre de 20%) des apports en azote et phosphore de la Loire et/ou de la Vilaine sur les proliférations phytoplanctoniques de la zone Loire/Vilaine et également sur les teneurs en oxygène dissous. Les scénarios de réductions sont effectués à partir d'une simulation de référence calibrée sur les années 2001 (année humide), 2002 (année sèche) et 2009 (année pour laquelle des mesures à haute fréquence d'oxygène dissous ont été effectuées par la bouée MOLIT, opérationnelle depuis 2008). Après une présentation du modèle et de sa validation, les différents scénarios seront présentés.

1 Contexte DCE de la zone Loire/Vilaine

La Directive Cadre sur l'Eau se base sur des éléments biologiques et des paramètres physico-chimiques afin de déterminer l'état écologique des masses d'eaux. Parmi ces paramètres, les plus souvent utilisés sont la température, la salinité, la turbidité, la concentration en nutriments, la concentration en chlorophylle *a* et la concentration en oxygène dissous. Cette étude se focalisera sur les deux derniers paramètres.

Des évaluations préliminaires à partir des données disponibles sur la période 2003-2008 ont permis de réaliser un premier classement des masses d'eaux suivant l'élément de qualité 'phytoplancton' (Soudant et Belin, 2010), l'élément de qualité 'nutriments–azote inorganique dissous' (Daniel et Soudant, 2010) et l'élément de qualité 'oxygène dissous' (Daniel et Soudant, 2009). L'étude sur l'élément de qualité 'phytoplancton' a été complétée par un travail sur la classification des masses d'eaux suivant l'indice 'biomasse' à partir de l'imagerie satellitaire (Gohin et al, 2010).

La zone d'étude Loire/Vilaine (figure 1) contient plusieurs masses d'eaux côtières DCE (voir tableau 1). En ce qui concerne l'indice 'biomasse phytoplanctonique', les classements in situ (Soudant et Belin, 2010) et satellitaire (Gohin et al, 2010) donnent des résultats assez similaires et mettent particulièrement en évidence deux masses d'eaux mal classées au regard de la classification DCE (tableau 2). Ces masses d'eaux sont la GC44 (baie de Vilaine côte) classée en état moyen par les classements in situ et satellitaire; et la GC46 (Loire large) classée en état moyen par le classement in situ, mais en bon état par le classement satellitaire. Les autres masses d'eaux de la zone sont en « bon état » voire « très bon état » suivant les classements (figures 2 et 3). La masse d'eau GC46 est classée en état moyen « phytoplancton » sur la série de données 2003_2008. Sur les séries suivantes elle est en bon état.

Pour le critère oxygène dissous (tableau 3), le rapport sur la première évaluation des masses d'eaux de la zone les classe toutes en « bon état » ou « très bon état » sur la période 2003-2008.

Ces classements sont toutefois préliminaires et sont à considérer prudemment en raison du faible nombre de mesures à partir desquelles ont été effectuées les statistiques.

code	Nom de la masse d'eau
FRGC36	Baie de Quiberon
FRGC38	Golfe du Morbihan (large)
FRGC39	Golfe du Morbihan
FRGC42	Belle-île
FRGC44	Baie de Vilaine (côte)
FRGC45	Baie de Vilaine (large)
FRGC46	Loire (large)
FRGC48	Baie de Bourgneuf

Tableau 1 : Masses d'eaux présentes complètement dans la zone d'étude.

		Percentile 90 chlorophylle <i>a</i> ($\mu\text{g.L}^{-1}$)				
	période productive	très bon	bon	moyen	médiocre	mauvais
manche atlantique eaux côtières et de transition sauf grands estuaires	mars – octobre	0 - 5	5 - 10	10 - 20	20 - 40	> 40

Tableau 2 : Grille de classement sur l'indice biomasse en phytoplancton des masses d'eaux DCE pour la zone Manche/Atlantique.

		Percentile 10 oxygène dissous (mg.L^{-1})				
	période	très bon	bon	moyen	médiocre	mauvais
Toutes zones	juin – septembre	≥ 5	$\geq 3 - < 5$	$\geq 2 - < 3$	$\geq 1 - < 2$	< 1

Tableau 3 : Grille de classement pour l'indice « oxygène dissous » (eaux côtières).

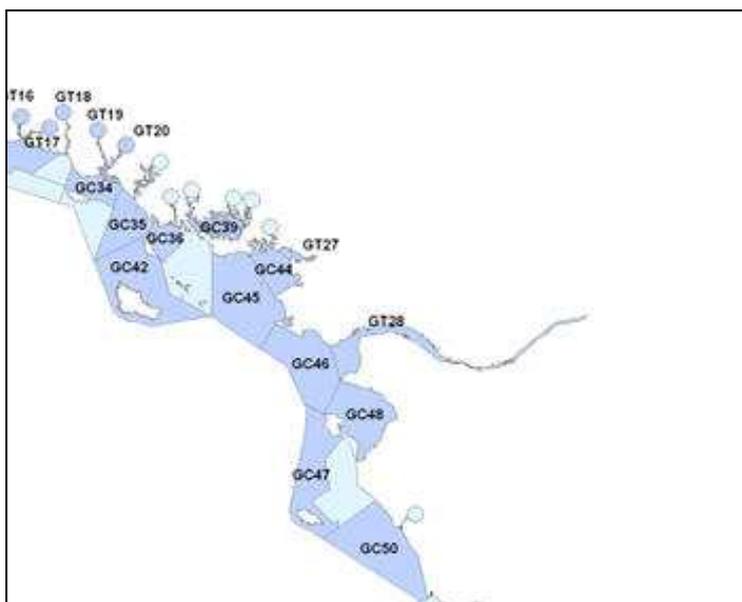


Figure 1: Zoom sur la zone Loire/Vilaine de la carte des masses d'eaux DCE au 31/12/2008 (élaborée par Ifremer LER/MPL à partir des données issues du groupe de travail DCE-littoral du Bassin Loire Bretagne).

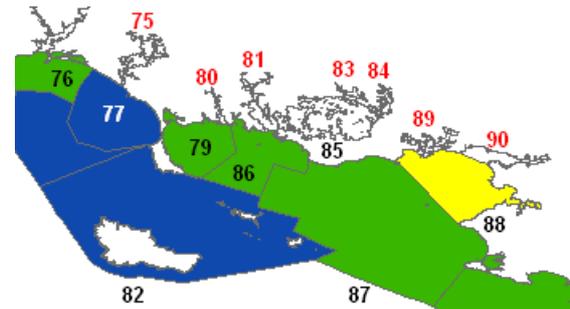
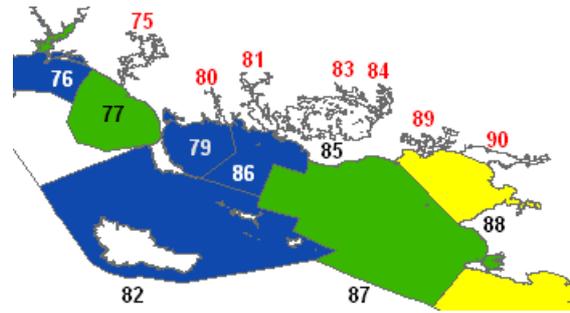


Figure 2 : Classification du risque d'eutrophisation masses d'eaux côtières pour la zone Vilaine suivant l'indice DCE 'biomasse phytoplanctonique' (haut in situ/ bas satellitaire) sur la période 2003-2008.

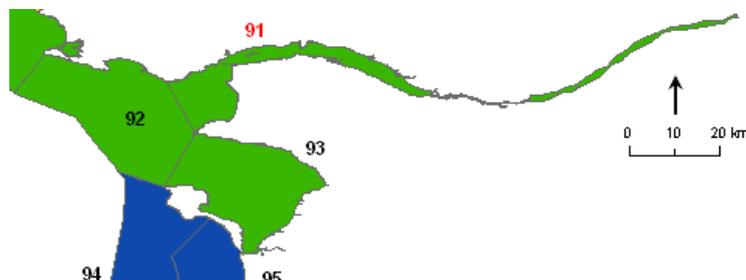
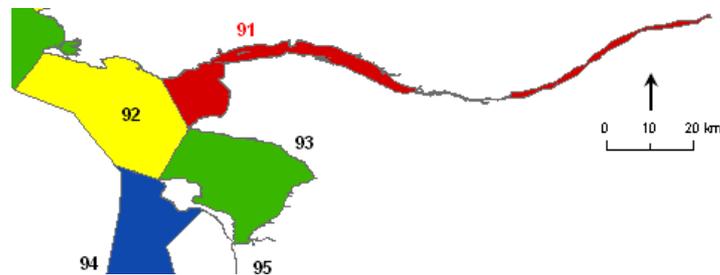


Figure 3: Classification du risque d'eutrophisation masses d'eaux côtières pour la zone Loire suivant l'indice DCE 'biomasse phytoplanctonique' (haut in situ/ bas satellitaire) sur la période 2003-2008.

2 Description du modèle

2.1 Emprise du modèle

L'emprise Loire-Vilaine, utilisée dans l'étude, couvre la zone 46°47'N à 47°44'N, 3°20'W à 1°26'W qui englobe la baie de Quiberon, le Mor-Bras, l'estuaire de la Loire et la baie de Bourgneuf. La résolution horizontale du maillage est de 800m.

L'emprise Loire/Vilaine est emboîtée dans une autre plus vaste (MANGA : Manche et Golfe de Gascogne) qui couvre la zone 43°12'N à 52° 45'N, 8°05'W à 5°E (figure 4) à 4km de résolution. Elle englobe 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 ≤ 200 m), tandis que la partie sud-ouest est située au-dessus de la plaine abyssale (profondeurs ≥ 4000 m).

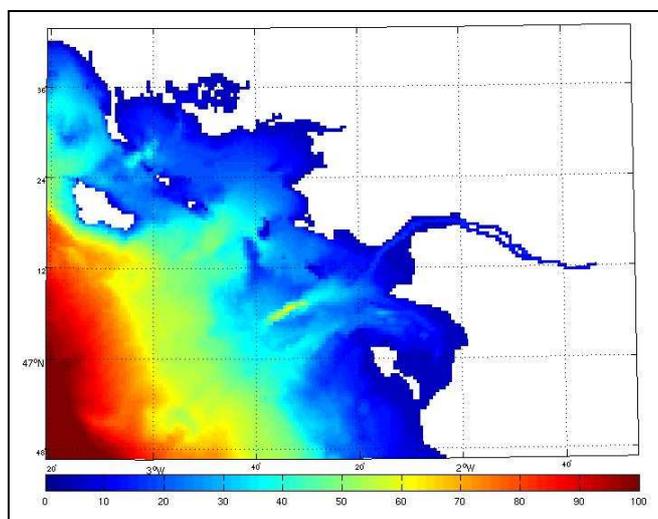
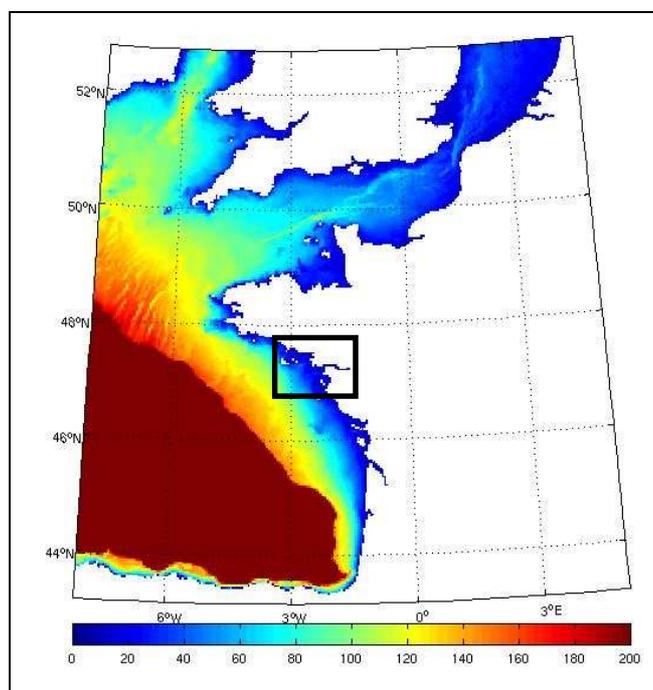


Figure 4: Bathymétrie des emprises de la zone MANGA (en haut) et Loire/Vilaine (en bas).

L'emprise Loire/Vilaine a été mise en place dans le cadre du projet Interreg EASYCO. Un des objectifs de ce projet est de mettre en ligne sur Internet, de façon opérationnelle (dans le cas de la France sur www.previmier.org) des informations sur des zones identifiées comme étant sensibles. Cette modélisation opérationnelle est faite en utilisant le mode AGRIF (Adaptative Grid Refinement In Fortran). En quelques mots, le principe de l'AGRIF est de permettre les échanges de traceurs entre la grille mère et la grille fille durant une même simulation. Cette méthode facilite la mise en place de la chaîne opérationnelle.

Dans cette étude cependant, le maillage est utilisé dans le mode gigogne, moins gourmand en temps de calcul car une première simulation sur la grande emprise fournit les conditions aux limites à la petite emprise, qui peut ensuite s'effectuer seule.

2.2 Description du modèle biogéochimique

Les processus et leurs équations sont largement décrits dans l'étude effectuée par Ménesguen et Dussauze (2011) dans le cadre du projet PREVIMER. Le but de cette étude était de calibrer le modèle sur l'emprise Manche/Golfe de Gascogne. Seule une rapide description du modèle (extraite de Ménesguen et Dussauze (2011)) est présentée dans ce rapport.

Parmi les éléments majeurs de la matière vivante, le carbone n'est pas considéré comme limitant et, donc, seuls l'azote, le silicium et le phosphore seront considérés, à la fois sous leur forme minérale, leur forme incluse dans la matière vivante et leur forme détritique. Le modèle biogéochimique est donc un modèle de type NPZD (NUTRIMENT > PHYTOPLANCTON > ZOOPLANCTON > DETRITIQUE). Dans l'azote minéral dissous, on distinguera 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.

Le modèle de base fournit aussi le cumul (depuis le 1^{er} janvier de chaque année) de la production primaire des 3 groupes phytoplanctoniques

On rappelle qu'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 5.

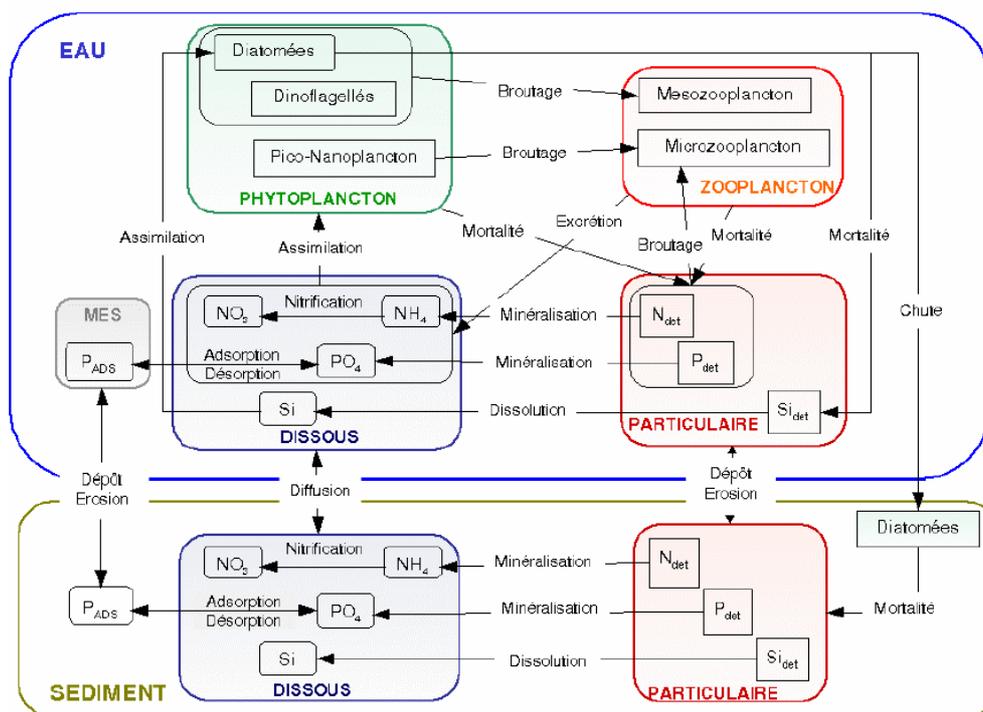


Figure 5: Schéma conceptuel du modèle biogéochimique.

2 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.

2.3 Forçages

Les données de débits et de concentrations en azote et en phosphore de la Loire et de la Vilaine proviennent de mesures fournies par l'Agence de L'eau Loire/Bretagne et par l'Institution d'Aménagement de la Vilaine.

Les données de vent, de couverture nuageuse et d'humidité sont issues du modèle de Météo France ARPEGE (données toutes les 6 heures).

Le modèle n'étant toujours pas muni d'un module de gestion du sédiment, il ne prend en compte, pour la variable "Matières en suspension", que ce qui est rejeté par les rivières, et il est par ailleurs forcé par des images satellitaires de matières en suspension. Pour les calculs d'extinction lumineuse, la valeur maximum entre les MES simulées et les MES satellitaires est prise en compte.

3 Description des mesures

3.1 Données in situ

Les données in situ disponibles pour valider le modèle proviennent principalement des mesures effectuées par les réseaux REPHY, MAREL et RNO (figure 6). Le tableau 4 récapitule les informations relatives à chaque point.

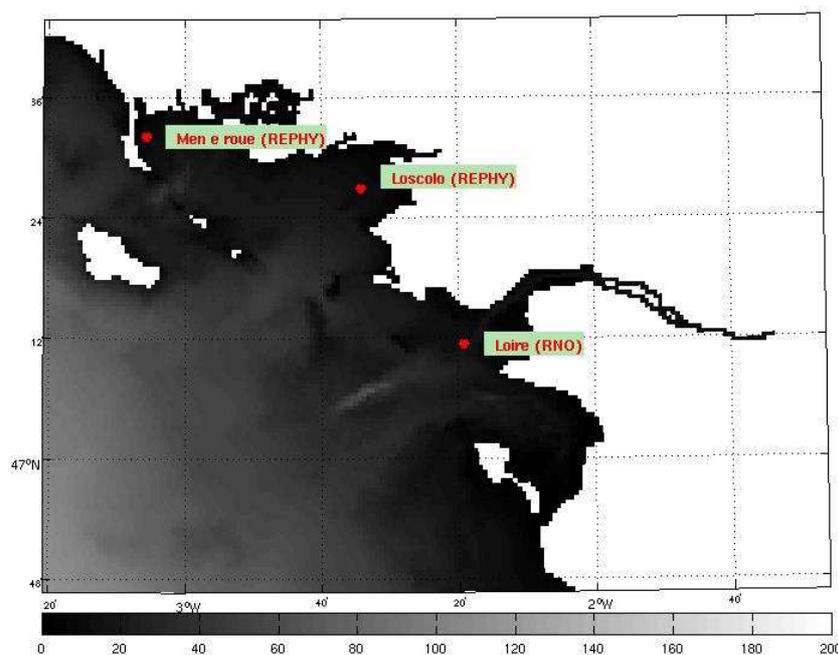


Figure 6: Emplacement des différents points de mesure utilisés pour la validation du modèle.

	latitude	longitude	période	mesures	réseau
Ouest Loscolo	47.45	-2.56	2000-2008	T, S, nutriments, chlorophylle	REPHY
Men e roue	47.53	-3.09	2000-2004	T, S, nutriments, chlorophylle	REPHY
Loire estuaire	47.2	-2.3	2000-2008	nutriments	RNO

Tableau 4: Informations relatives aux points de mesures.

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 7) 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 suspension minérales (qui absorbent également dans le bleu comme la chlorophylle).

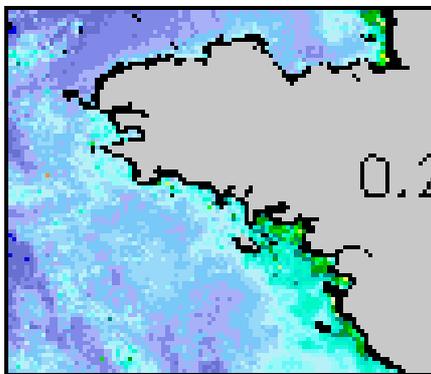


Figure 7: Chlorophylle SeaWifs ($\mu\text{g/L}$) pour la quinzaine 8 de l'année 2002 au niveau de la Bretagne.

4 Comparaison modèle-mesures

4.1 Méthodologie retenue

La validation du modèle de base s'est faite en 3 étapes :

La première étape 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 un second temps, afin d'évaluer les caractéristiques temporelles du modèle, l'emprise a été divisée en 3 strates bathymétriques (0-25 m, 25-50m, 50-100m). Cette séparation, effectuée de manière arbitraire, permet d'avoir une vue synoptique du comportement du modèle sur différentes zones de l'emprise allant des panaches de fleuves très eutrophisés aux zones du large moins impactées par la Loire et la Vilaine.

La troisième étape a consisté à comparer plus en détail le modèle aux mesures de diverses variables effectuées à quelques stations.

4.2 Température/Salinité

La validation de la température et de la salinité dans MARS 3D a déjà été réalisée sur le Golfe de Gascogne pour la période allant de 1999 à 2004 (Lazure et al., 2009). Pour la salinité, cette étude a montré que le modèle représentait correctement l'hydrologie dans le Golfe avec un biais et une erreur-type (RMSE) inférieurs respectivement à 0.1 et 0.6 psu, et que la température était globalement surestimée avec un biais d'environ 0.8°C. Les figures 8 et 9 présentent les comparaisons de la salinité et de la température simulées avec les mesures à Men e roue et à Ouest Loscolo. Le modèle reproduit de manière correcte l'évolution de la température et de la salinité sur les 2 sites. On remarque qu'en 2001 le modèle sous-estime fortement la salinité de surface vers le mois de mars. Cela peut être expliqué par la faible fréquence des mesures REPHY qui peut faire que la mesure passe à côté d'événements de crues. Cela a été vérifié à « Sainte-Anne du Portzic » en rade de Brest qui possède un point REPHY (mesure tous les 15 jours) et une bouée MAREL (mesures hautes fréquences). La comparaison du modèle avec les mesures REPHY montrait une sous-estimation de la salinité par le modèle ; la même comparaison avec les données MAREL montrait que le modèle reproduisait les dessalures mesurées.

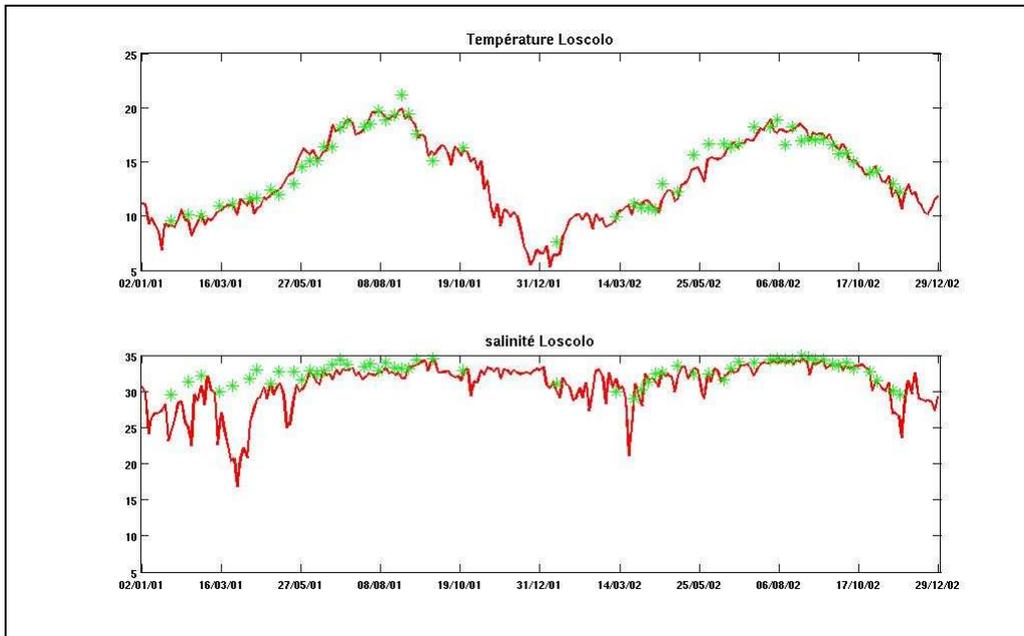


Figure 8: Température (en haut) et salinité (en bas) de surface à Ouest Loscolo en 2001 et 2002 (en rouge : modèle, en vert : mesure).

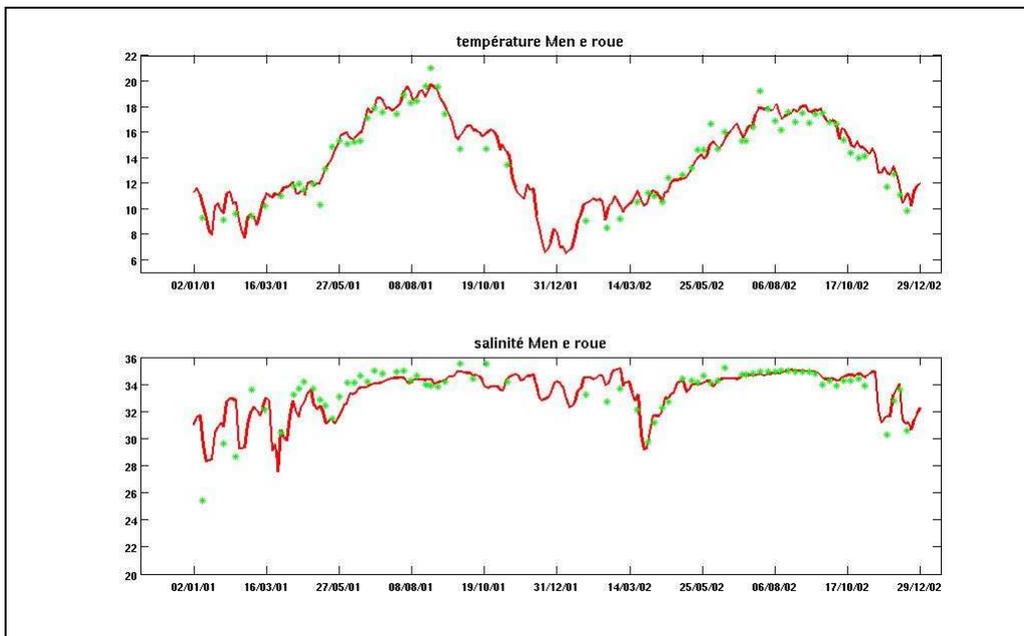


Figure 9: Température (en haut) et salinité (en bas) de surface à Men e roue en 2001 et 2002 (en rouge : modèle, en vert : mesure).

4.3 Chlorophylle totale de surface

4.3.1 Répartition spatiale moyenne par an

Trois années ont été simulées pour cette étude : tout d'abord, les années 2001 et 2002 correspondant respectivement à l'année la plus humide et la plus sèche de la période 2000-2010 ; ensuite, l'année 2009, pour laquelle des données à haute fréquence d'oxygène dissous ont été acquises par la bouée MOLIT. Chaque période étudiée est précédée d'une année de spin-up (par analogie avec la phase de mise en rotation d'un disque dur, ce terme désigne la période de régime transitoire nécessaire à un modèle pour oublier sa condition initiale trop schématique et se mettre à l'équilibre) : les années 2000 et 2008 de spin-up

respectives ne sont donc pas retenues ensuite dans l'étude. Les figures 10, 11 et 12 présentent les moyennes de chlorophylle de surface simulées et satellitaires sur les périodes productives (mars à octobre) de 2001, 2002 et 2009. Le modèle réussit à reproduire le gradient côte/large observé par le satellite pour les trois années. Il reproduit également une certaine variabilité inter-annuelle avec une année 2001 plus productive que l'année 2002. On observe notamment une bande productive plus large en 2001 qu'en 2002 et avec des valeurs moyennes plus fortes.

On note cependant que le modèle a tendance à sous-estimer la moyenne de la chlorophylle devant les estuaires lors de l'année pluvieuse 2001. Durant les 8 premiers mois de l'année, les flux de nitrate amenés par la Loire sont de 2 à 6 fois plus forts en 2001 qu'en 2002, et les flux de phosphate 1,5 à 2 fois plus forts (Tableau 5). Alors que la chlorophylle annuelle moyenne mesurée par satellite semble bien traduire cette richesse beaucoup plus forte en 2001 qu'en 2002, le modèle ne montre pas une année 2001 beaucoup plus productive que 2002.

Mois	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
flux NO3-2001	822.61	643.10	982.61	581.10	671.23	129.76	120.39	90.50	90.48	153.09	143.36	219.29
flux NO3-2002	322.96	428.24	460.69	146.19	107.51	86.44	34.01	39.09	94.29	110.27	373.84	725.16
flux PO4-2001	0.73	0.63	0.77	0.53	0.55	0.20	0.19	0.18	0.18	0.25	0.24	0.34
flux PO4-2002	0.43	0.51	0.51	0.25	0.20	0.15	0.08	0.09	0.19	0.20	0.41	0.67

Tableau 5: Flux mensuels moyens de nitrate et phosphate de la Loire en 2001 et 2002 (kg/jour)

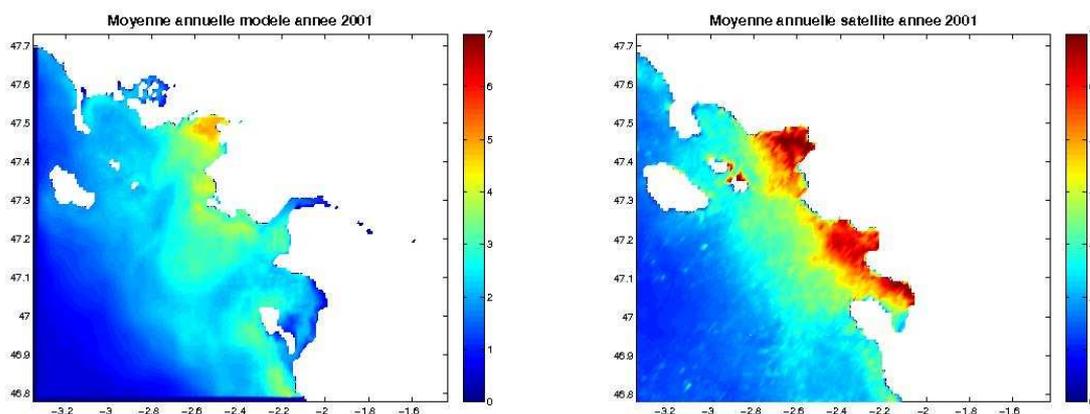


Figure 10: Moyenne de la chlorophylle a sur la période productive en 2001 (mars à octobre) (à gauche : modèle nouvelle version, à droite : satellite).

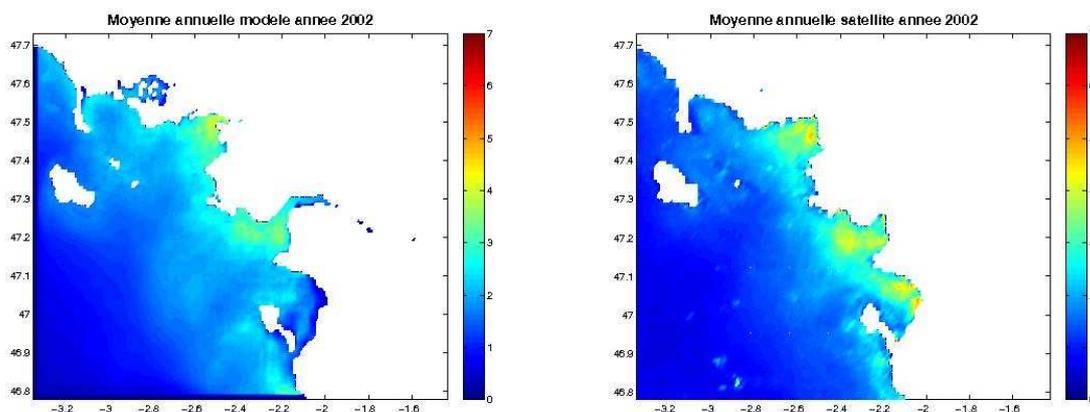


Figure 11: Moyenne de la chlorophylle a sur la période productive en 2002 (mars à octobre) (à gauche : modèle nouvelle version, à droite : satellite).

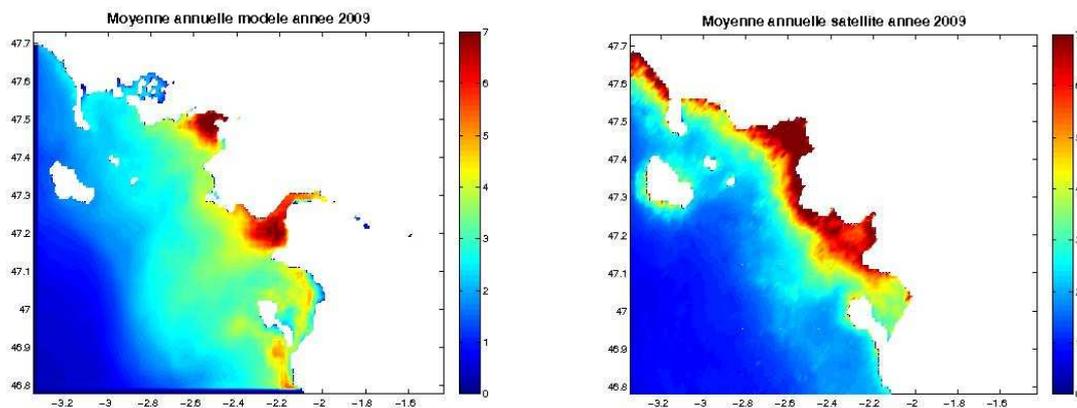
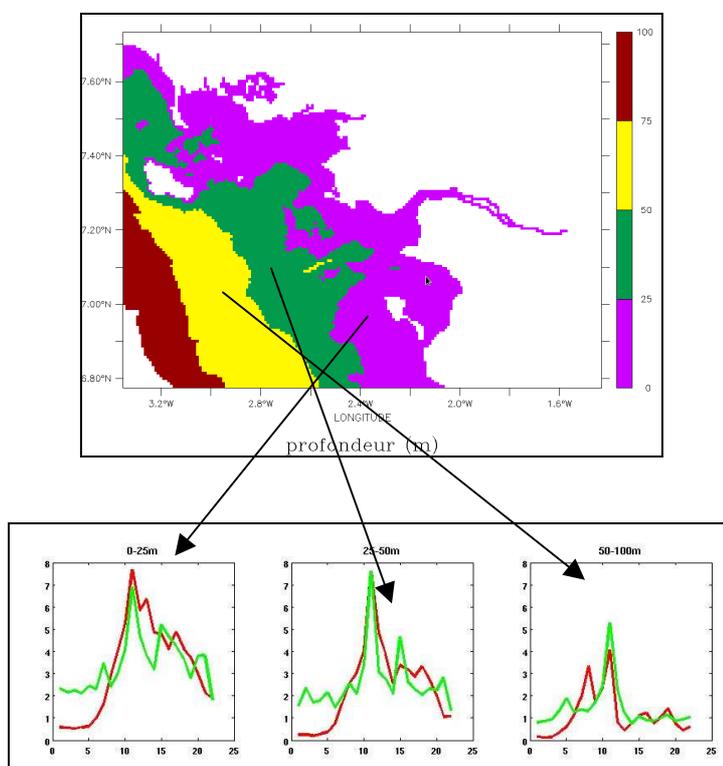


Figure 12: Moyenne de la chlorophylle a sur la période productive en 2009 (mars à octobre) (à gauche : modèle, à droite : satellite).

En 2009 le modèle montre une biomasse trop faible entre la baie de Vilaine et la Baule, mais un peu trop forte au sud de la Loire, contrairement au satellite qui montre une production intense au nord de la Loire.

4.3.2 Variation temporelle de la chlorophylle de surface par strate bathymétrique

Afin d'avoir une vue générale du comportement temporel du modèle (phasage et amplitude du bloom), l'emprise a été divisée en 3 zones, correspondant aux strates bathymétriques 0-25 m, 25-50m, 50-100m, c'est à dire les zones regroupant respectivement les pixels pour lesquelles la hauteur totale de la colonne d'eau est comprise entre 0 et 25m, 25 et 50m, 50 et 100m. A partir des pixels de chaque strate, la moyenne de chlorophylle a été calculée par quinzaine pour le modèle et pour le satellite. Pour le modèle, cette moyenne n'a été calculée que pour la couche de surface.



D'une manière générale, les comparaisons (figures 13, 15 et 17) mettent en évidence un bon phasage du bloom printanier sur quasiment toute la zone. Le modèle reproduit également de manière correcte le gradient côte/large qui est assez marqué en 2001 et 2009, beaucoup moins en 2002.

Même si le niveau hivernal est sous-estimé, l'amplitude du bloom est plutôt bien représentée en 2001, 2002 et 2009. La variabilité interannuelle au printemps et en été est donc bien simulée

En ce qui concerne la sous-estimation des valeurs hivernales, deux remarques peuvent être faites :

1) Le modèle sous-estimerait la chlorophylle à la côte en automne/hiver lorsque de forts débits entraînent une dilution du plancton marin par apport d'eau douce dépourvue de ce plancton.

2) Le satellite surestimerait les valeurs de chlorophylle pour ces mêmes périodes lorsque les fleuves apportent de grandes quantités de matières en suspension. Cela semble d'autant plus plausible que les valeurs hivernales de chlorophylle simulées en 2001 à Ouest Loscolo et Men e roue (voir 4.4 figures 19 et 20) sont très proches des mesures REPHY. La sur-estimation satellitaire des chlorophylles de mars contribue donc à élever artificiellement la moyenne satellitaire de la période productive mars-octobre précédemment cartographiée sur les figures 10, 11 et 12.

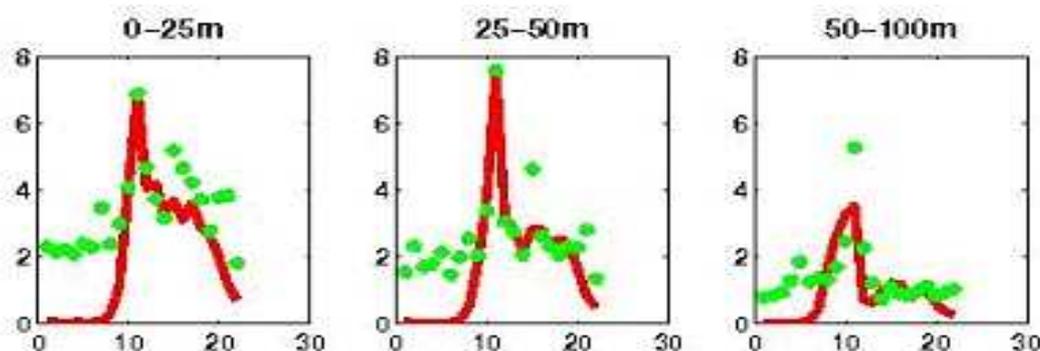


Figure 13: Chlorophylle par quinzaine ($\mu\text{g/L}$) simulée en surface (en rouge) et satellitaire (en vert) par strates bathymétriques et pour l'année 2001.

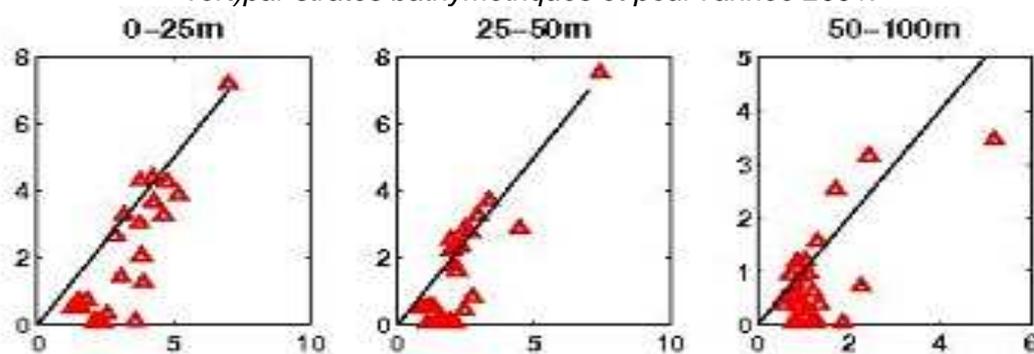


Figure 14: Scatterplot de la moyenne de chlorophylle par quinzaine ($\mu\text{g/L}$) simulée en surface (en ordonnée) vs satellitaire (en abscisse) pour l'année 2001.

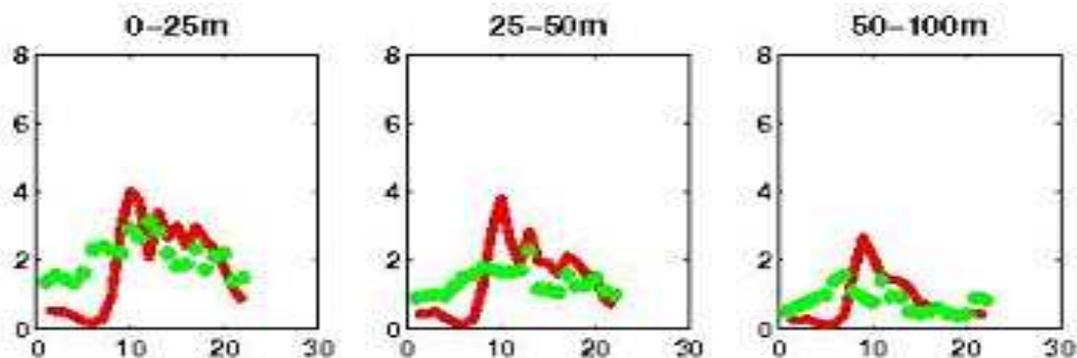


Figure 15: Chlorophylle par quinzaine ($\mu\text{g/L}$) simulée en surface (en rouge) et satellitaire (en vert) par strates bathymétriques et pour l'année 2002.

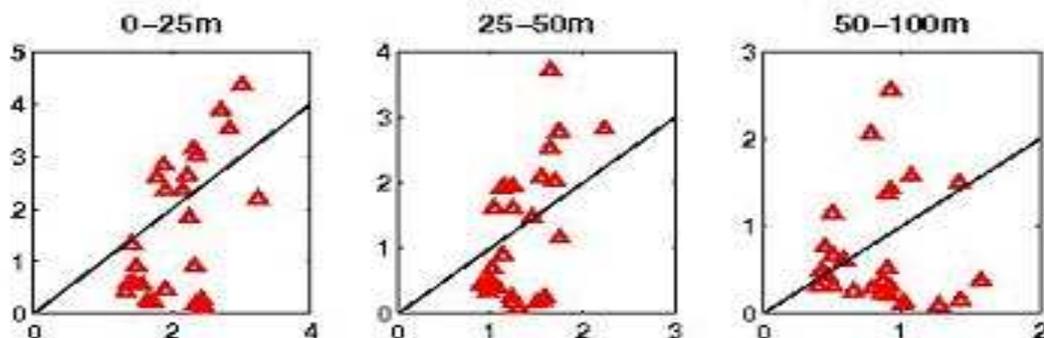


Figure 16: Scatterplot de la moyenne de chlorophylle par quinzaine ($\mu\text{g/L}$) simulée en surface (en ordonnée) vs satellitaire (en abscisse) pour l'année 2002.

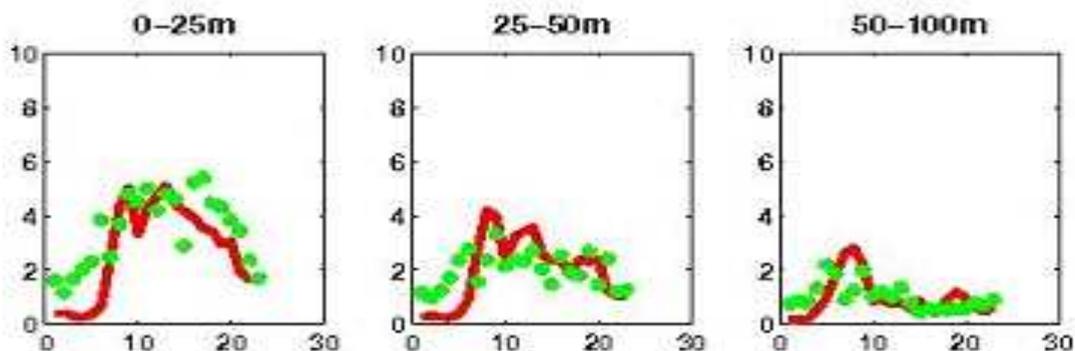


Figure 17: Chlorophylle par quinzaine ($\mu\text{g/L}$) simulée en surface (en rouge) et satellitaire (en vert) par strates bathymétriques et pour l'année 2009.

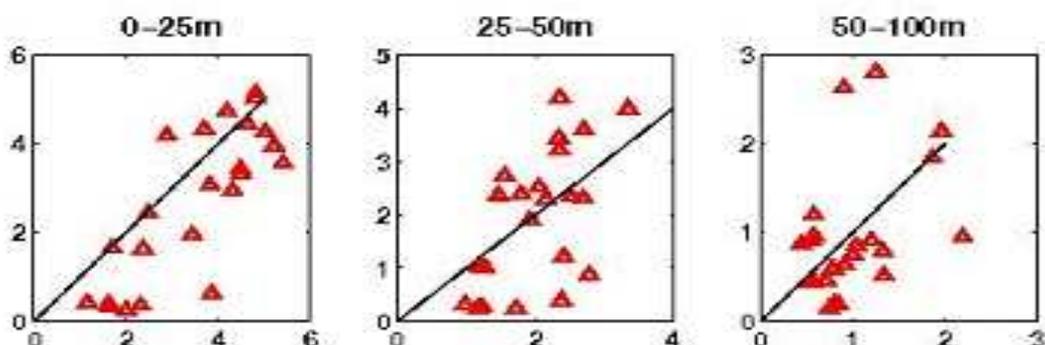


Figure 18: Scatterplot de la moyenne de chlorophylle par quinzaine ($\mu\text{g/L}$) simulée en surface (en ordonnée) vs satellitaire (en abscisse) pour l'année 2009.

4.4 Nutriments et chlorophylle à quelques stations ponctuelles

La validation des nutriments (nitrate, silicate, phosphate) a été réalisée au cours du temps aux différentes stations présentées dans la partie 2.1.

D'une manière générale, le modèle réussit à reproduire le cycle saisonnier des 3 nutriments ainsi que les concentrations mesurées (figure 19 à 21). Leur évolution est en phase avec la mesure que ce soit en hiver au moment des forts débits ou durant le printemps au moment du bloom.

En ce qui concerne la chlorophylle, le modèle réussit à reproduire le bloom printanier (phasage et amplitude) à Loscolo mais semble toutefois le surestimer à Men e roue. Cette différence est peut-être due à la prise en compte très schématique de la pression de filtration du benthos qui est assez importante dans cette zone notamment en raison d'activités conchylicoles. Il ne reproduit également pas les blooms fugaces de fin de printemps/début été à Loscolo.

Pour Loscolo (fig 19), le modèle surestime les concentrations de nutriments durant l'hiver 2001, mais pas en 2002 ; il est bien calé en chlorophylle. Pour Men e roue (fig 20), le modèle estime correctement les nutriments mais surestime un peu la chlorophylle.

Pour le débouché de la Loire (figure 21) la comparaison n'a pu être faite pour les silicates, non mesurés à ce point RNO. Contrairement au nitrate, bien simulé, le phosphate est souvent surestimé par le modèle. Ceci est peut-être lié à la donnée de flux qui est donnée à Montjean sur Loire (110 KM en amont) qui ne prend pas en compte l'adsorption sur les particules du bouchon vaseux.

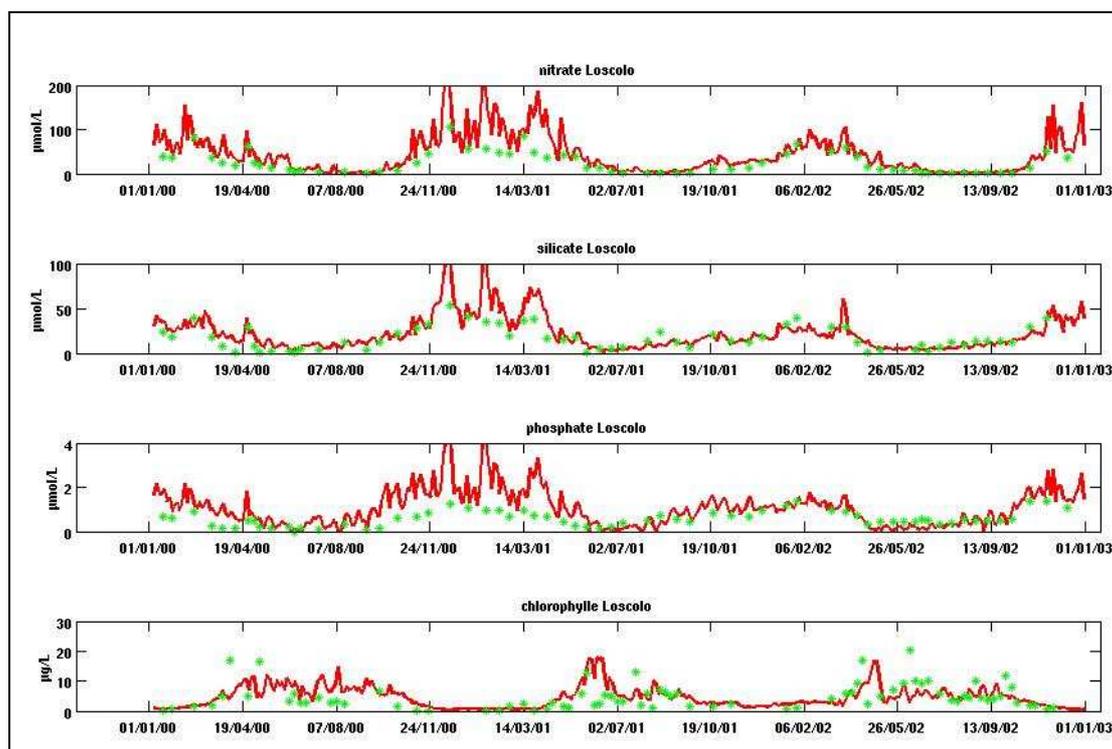


Figure 19: Nitrate, silicate, phosphate et chlorophylle de surface à Loscolo (en vert : mesure ; en rouge : modèle).

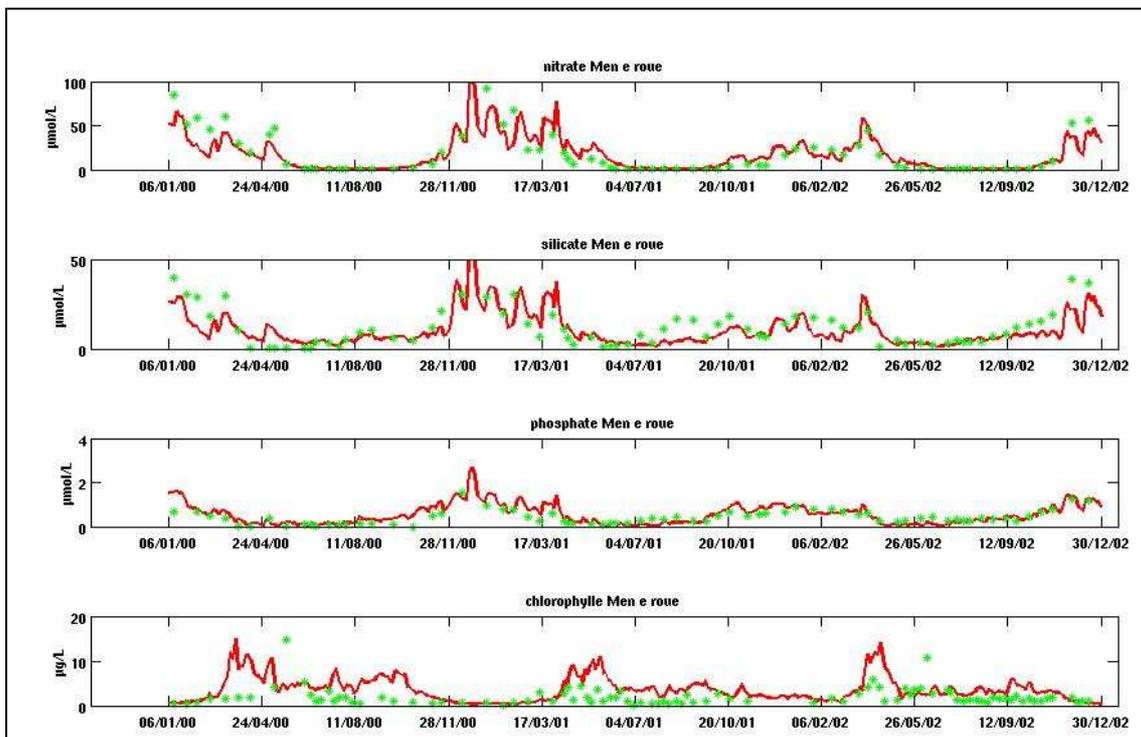


Figure 20: Nitrate, silicate, phosphate et chlorophylle de surface à Men e roue (en vert : mesure ; en rouge : modèle).

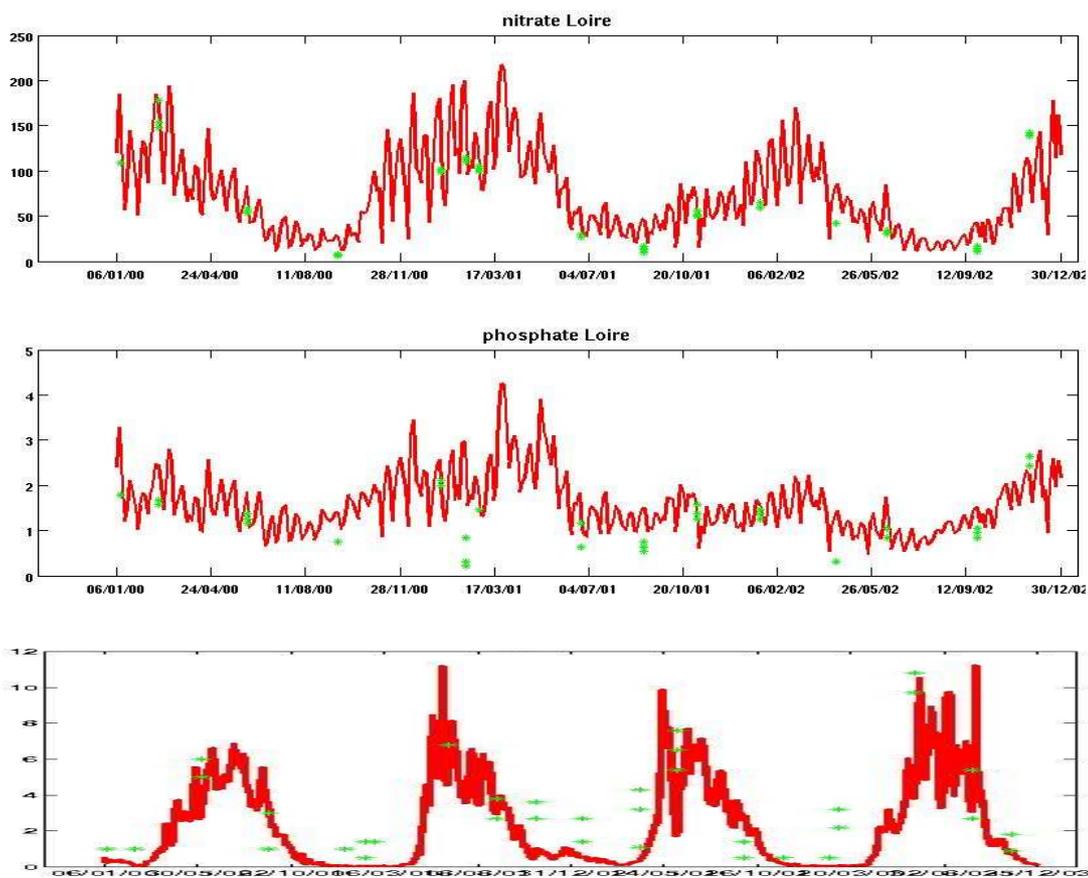


Figure 21: Nitrate, phosphate et chlorophylle devant l'estuaire de la Loire (en vert : mesure ; en rouge : modèle).

Unité : micromoles / L pour les nutriments, microgrammes/L pour la chlorophylle

4.5 Evolution de l'oxygène dissous en baie de Vilaine

Les commentaires suivants sont extraits de Menesguen et Dussauze (2011).

Dans les zones enrichies à confinement horizontal efficace et forte stratification verticale, les intenses productions phytoplanctoniques de surface peuvent induire au fond, après sédimentation, une forte baisse des teneurs en oxygène dissous. Ce phénomène a lieu lorsque la consommation d'oxygène par dégradation bactérienne est supérieure aux apports par la photosynthèse et par la réoxygénation physique du milieu. Cela a été le cas durant l'été 1982 en baie de Vilaine où l'on a observé une grande mortalité de poissons et d'invertébrés benthiques due à un phénomène d'asphyxie (Chapelle, 1991).

Depuis 2008, la bouée MOLIT mesure en continu les teneurs en oxygène dissous en surface et au fond au large de l'estuaire de la Vilaine (figure 22). Les premiers traitements des données ont mis en évidence une sous-saturation en oxygène de l'eau de fond, pouvant atteindre 40% de mai à août. De fortes sur-saturations (> à 120%) de l'eau de surface y sont également mesurées au printemps (figure 23)



Figure 22: Localisation de la bouée MOLIT en baie de Vilaine.

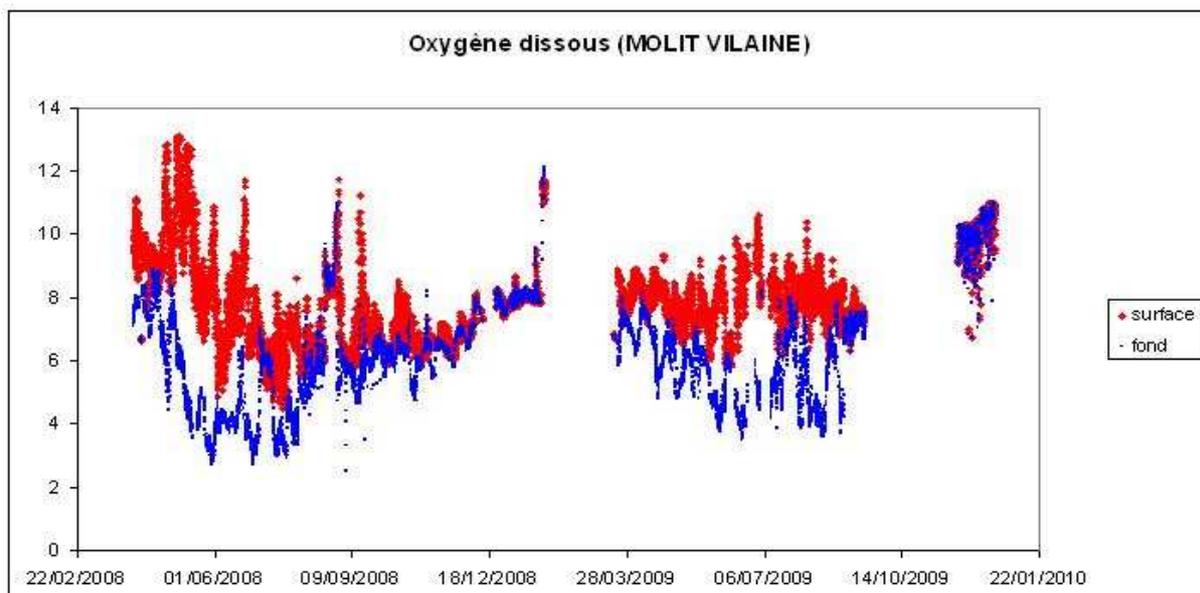


Figure 23: Concentration en oxygène dissous en 2008 et 2009 (mg/L) en surface (en rouge) et au fond (en bleu) (bouée MOLIT).

Les mesures d'oxygène dissous à MOLIT mettent en évidence des années 2008 et 2009 très différentes. L'année 2008 est marquée par un bloom printanier très intense (jusqu'à 30 µg/L de chlorophylle mesurés par le REPHY mi-avril) qui provoque une forte sursaturation avec des teneurs en oxygène de surface atteignant 14 mg/L durant environ 10 jours. Cette production importante entraîne une rapide diminution de l'oxygène de fond qui décroît en 1 mois de 8 mg/L à 4 mg/L (mi-avril à mi-mai). En 2009, au contraire, le bloom est moins important qu'en 2008, plus tardif et l'augmentation est plus graduelle (jusqu'à 20 µg/L de chlorophylle mesurés par le REPHY mi-juin). Par conséquent, la sursaturation en oxygène de surface est enregistrée au mois de juin et les teneurs sont moins importantes qu'en 2008 (jusqu' à 11 mg/L). Le bloom étant moins brutal qu'en 2008, l'oxygène de fond diminue moins rapidement qu'en 2009 avec un passage de 8 mg/L à 4 mg/L en 2 mois (mi-avril à mi-juin). La simulation sur les années 2008 et 2009 (figure 24) a montré au niveau de la bouée MOLIT une assez bonne représentation de l'oxygène dissous (sursaturation en surface due au maximum du bloom printanier en avril/mai pour l'année 2008 et en juin pour l'année 2009; variations dues aux cycles ME-VE). On note cependant que le modèle n'arrive pas à représenter de manière plus correcte l'intensité du bloom printanier de 2008 ce qui explique que la diminution des teneurs oxygène dissous au fond n'est pas aussi rapide que celle enregistrée par MOLIT. On note également à partir d'août 2009 un décrochage du modèle par rapport à la mesure. A partir de cette date, le modèle s'éloigne de la mesure, qui reste à la saturation. Cette différence est probablement explicable par un artefact intervenu dans la mesure : une ré-oxygénation de l'eau prélevée, tant de surface que de fond, avant mesure, générée par une défectuosité du pompage de l'eau de fond, a en effet justifié une intervention sur MOLIT en fin d'automne 2009. La défaillance de la mesure en 2009 est d'autant plus plausible qu'en automne 2008, le modèle et la mesure sont parfaitement en accord, aussi bien en surface qu'au fond.

L'application du module oxygène à l'emprise met en évidence une zone sensible à l'hypoxie située en baie de Vilaine et devant l'estuaire de la Loire avec des concentrations minimales pouvant atteindre 4 mg/L en été (figure 25).

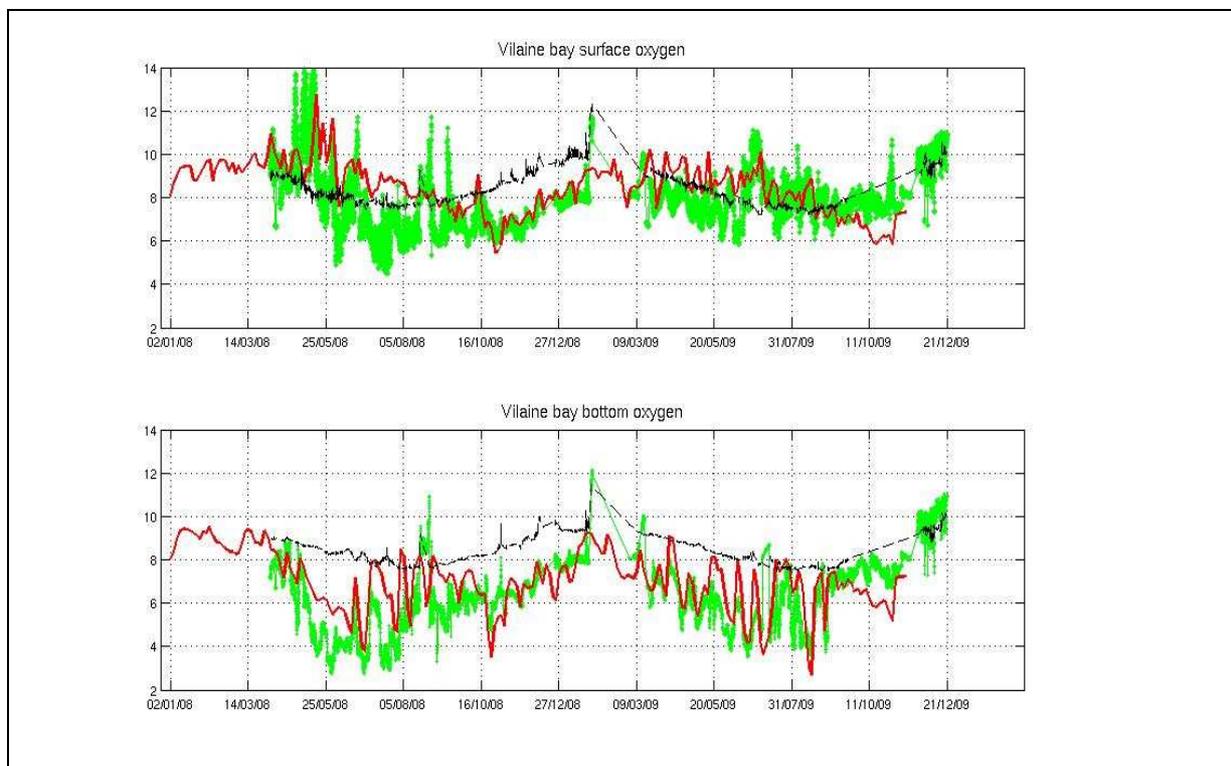


Figure 24: Concentration en oxygène dissous mesurées (en vert) et simulées (en rouge) en surface (en haut) et au fond (en bas) au niveau de la bouée MOLIT en 2008-2009

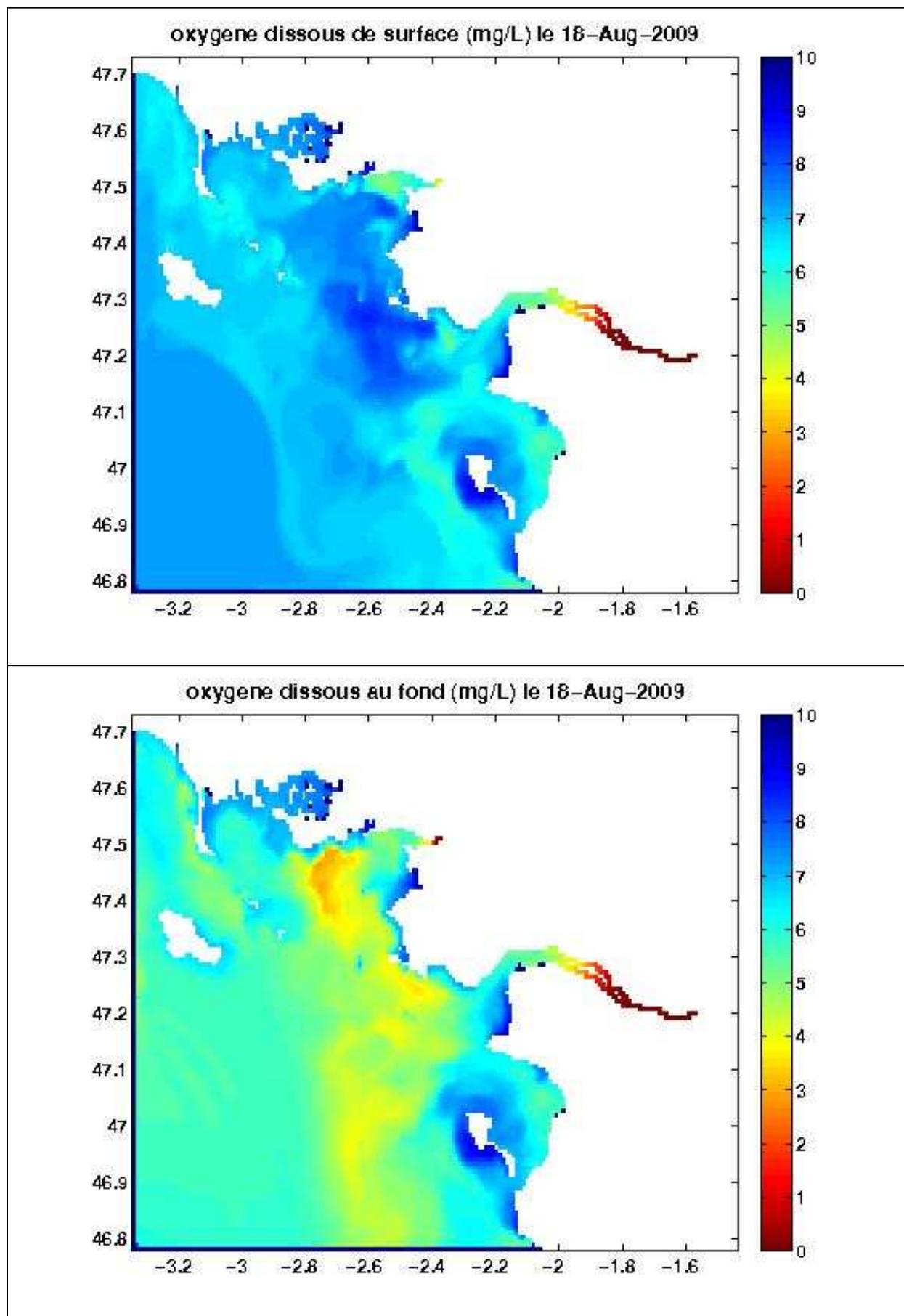


Figure 25: Concentration simulée en oxygène dissous (mg/L) le 18 août 2009 (en haut : surface, en bas : fond).

5 Scénarios de réduction ou augmentation des apports azotés et phosphorés de la Loire et de la Vilaine

5.1 Situation de référence

La situation de référence est résumée d'une part, par les cartes des percentiles 90 de chlorophylle obtenues en surface par simulation pour les années 2001 et 2002 et la carte de percentile 10 d'oxygène dissous obtenue au fond pour l'année 2009 ; d'autre part, par la classification des masses d'eaux DCE de la zone pour les critères 'biomasse phytoplanktonique' et 'oxygène dissous' pour ces mêmes années.

La qualité annuelle à l'aide de la grille DCE a été réalisée à partir des sorties du modèle (tous les 3 jours) pour chaque année. Même si elle n'est pas directement comparable avec le classement DCE qui se calcule sur 6 années de mesures (Soudant et Belin, 2010 et Gohin et al., 2010) à partir des données disponibles sur la période 2003-2008, elle donne tout de même des résultats similaires. Pour l'obtenir, nous avons utilisé la méthode de Gohin et al. (2011) consistant à calculer la moyenne des percentiles des mailles contenues à l'intérieur de chaque polygone. Les masses d'eau 'Baie d'Étel' et 'île d'Yeu' incomplètes dans la zone ne sont pas présentées.

On note une différence sensible entre la carte du percentile 90 de chlorophylle en 2001 et 2002 avec pour l'année 2002 (sèche) des valeurs beaucoup moins élevées qu'en 2001 (humide) notamment en baie de Vilaine (figure 26). Cette différence semble plus plausible que la faible différence des moyennes de chlorophylle sur 8 mois (figures 10 et 11), mais n'a toutefois pas d'effet notable sur la qualité annuelle au sens de la grille DCE. .

Les résultats de la classification pour le critère 'biomasse phytoplanktonique' se rapprochent plus de la classification obtenue par Gohin et al. (2010), qui classe toutes les masses d'eaux de la zone en « bonne qualité » sauf la masse d'eau « Vilaine côte » classée en qualité moyenne et la masse d'eau « Belle-Île » classée en très bon état. A noter que le modèle classe pour 2002 la masse d'eau « Vilaine côte » en « bonne qualité » (figure 27).

Pour le critère 'oxygène dissous', la classification obtenue sur l'année 2009 est proche du classement in situ, excepté pour la masse d'eau 'Baie de Vilaine (côte)' qui est curieusement classée en « très bon état » (figure 28).

Le modèle donne les maximums de diatomées devant l'estuaire de la Vilaine et de la Loire et au large de l'estuaire de la Loire (figure 29). On observe une grande différence entre les 2 années avec des maximums beaucoup plus forts en 2001 (entre 13 et 15 $\mu\text{molN/L}$) qu'en 2002 (inférieurs à 10 $\mu\text{molN/L}$). Là encore, cette différence de résultats entre une année pluvieuse et sèche semble plus plausible que la faible différence des moyennes de chlorophylle sur 8 mois (figures 10 et 11). En ce qui concerne les maximums de dinoflagellés, le modèle produit des valeurs plus fortes à la côte en 2001 qu'en 2002, mais l'inverse au large, où apparaît un bloom de dinoflagellés fort en 2002.

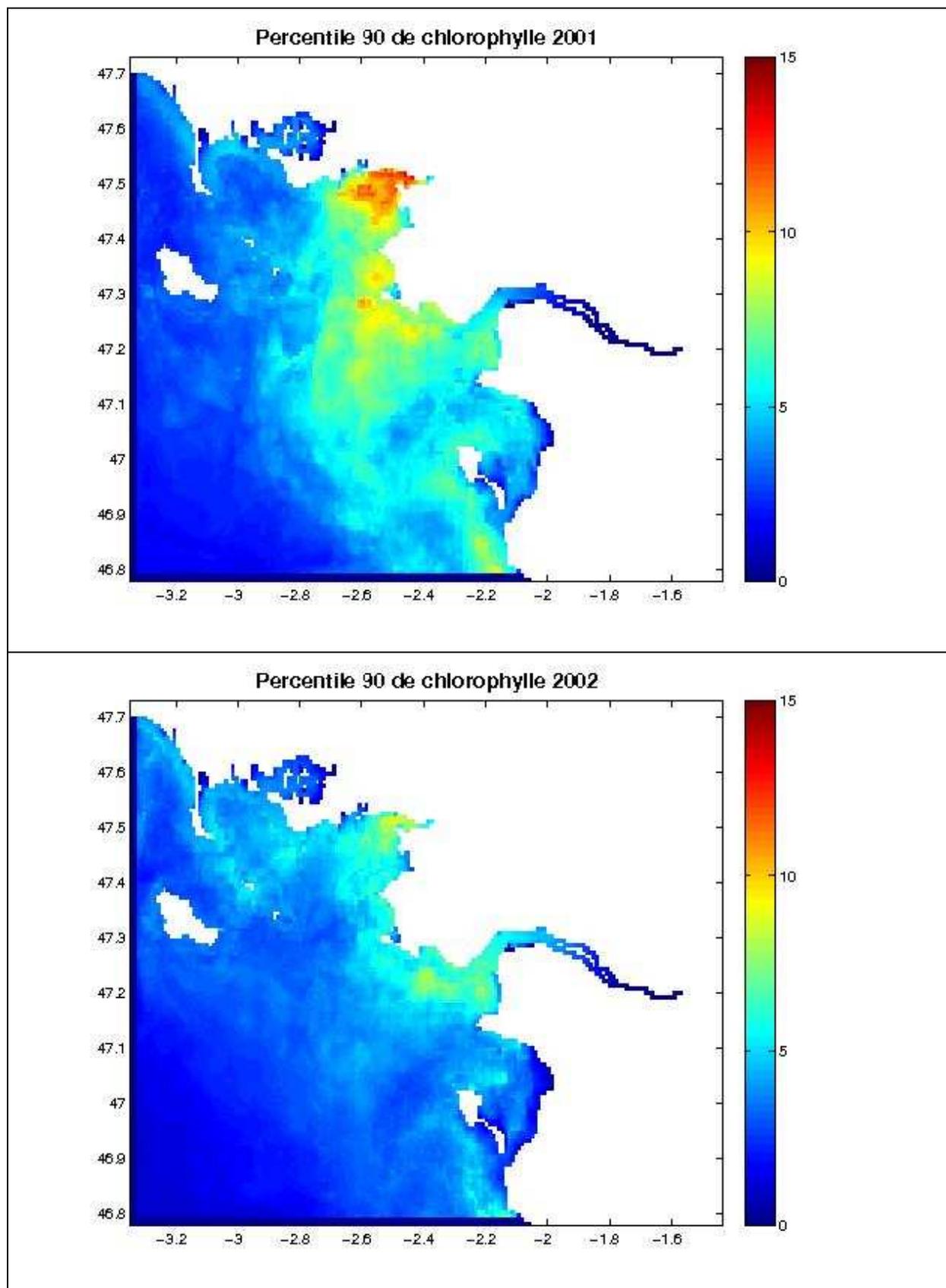


Figure 26: Percentile 90 de chlorophylle ($\mu\text{g/L}$) en surface sur la période productive (mars-octobre) pour les années 2001 (en haut) et 2002 (en bas).

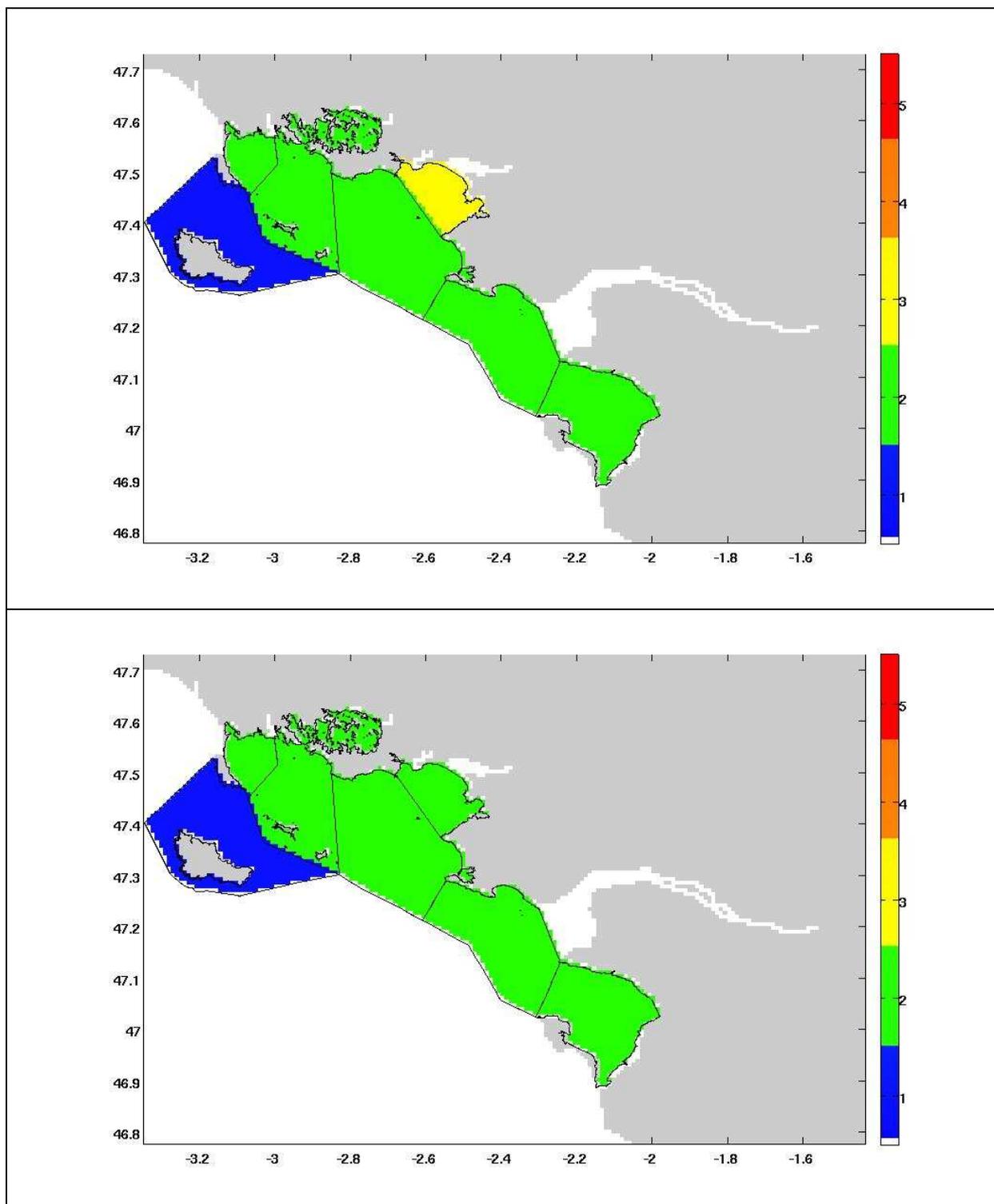


Figure 27: Qualité annuelle au sens de la grille DCE pour le critère 'biomasse phytoplanktonique' pour les années 2001 (en haut) et 2002 (en bas).

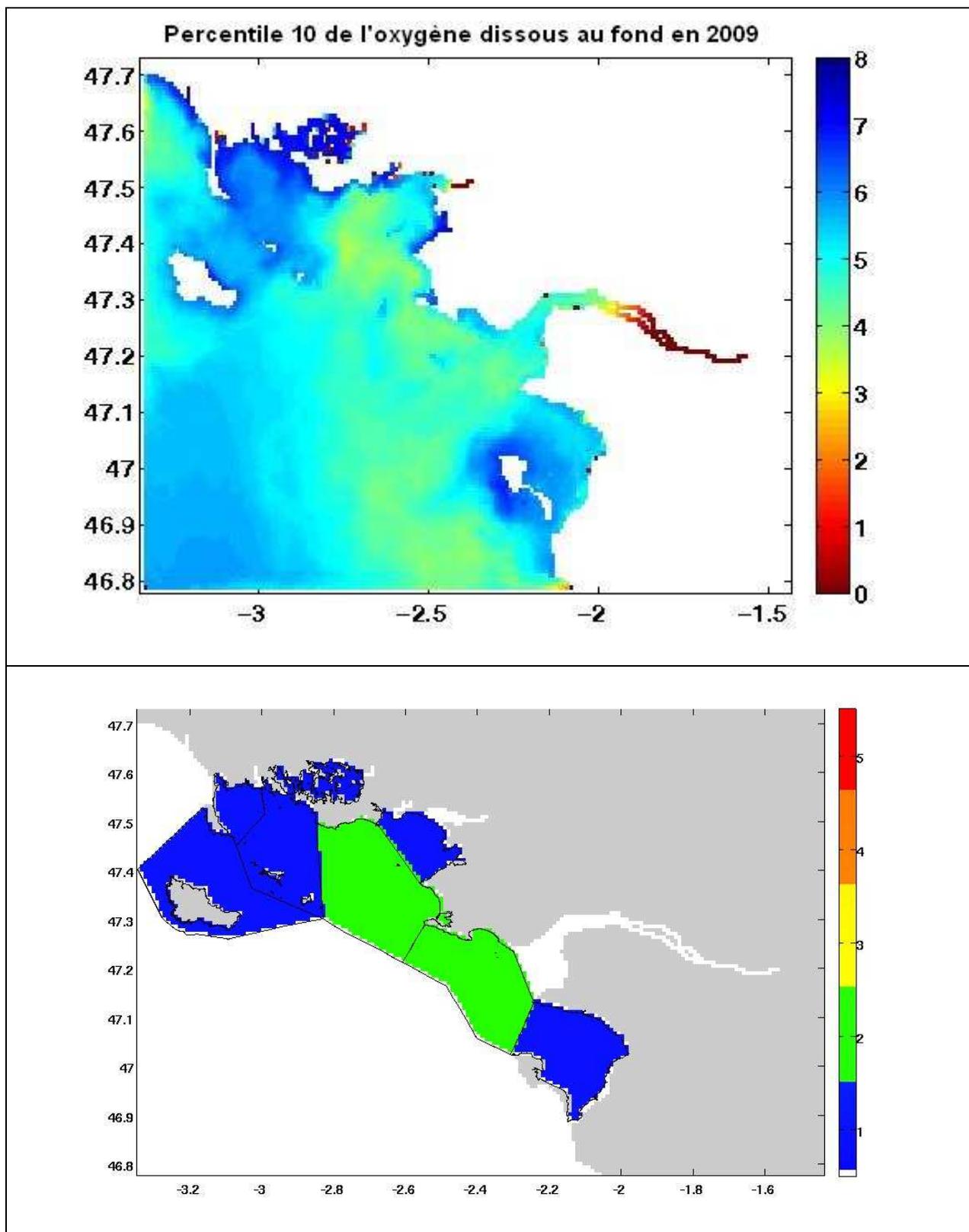


Figure 28: Percentile 10 de l'oxygène dissous au fond (mg/L) sur la période septembre-juin (en haut) et classification DCE pour le critère 'oxygène dissous' pour l'année 2009.

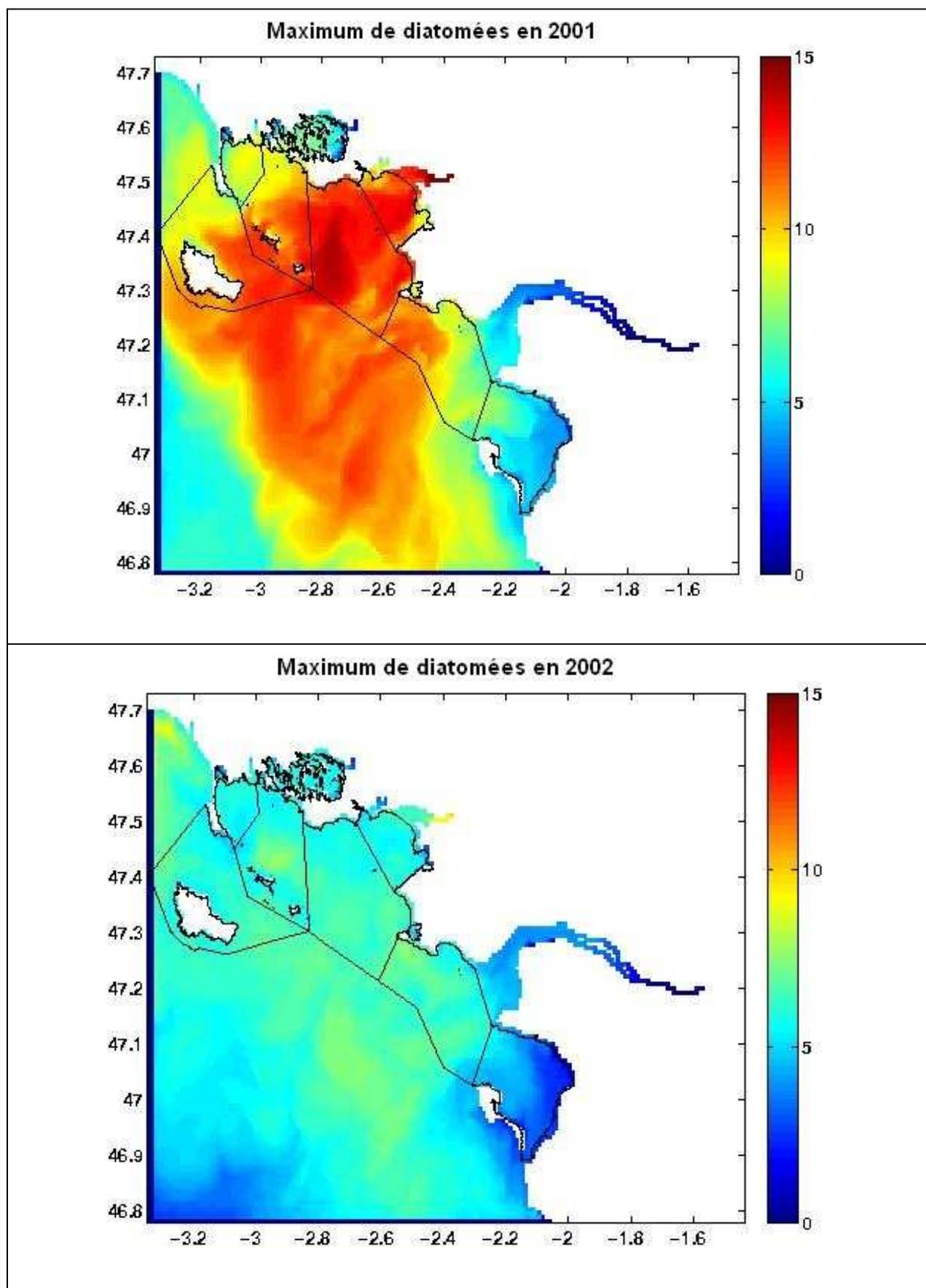


Figure 29: Maximum de diatomées ($\mu\text{mol/L}$) pour l'année 2001 (en haut) et 2002 (en bas).

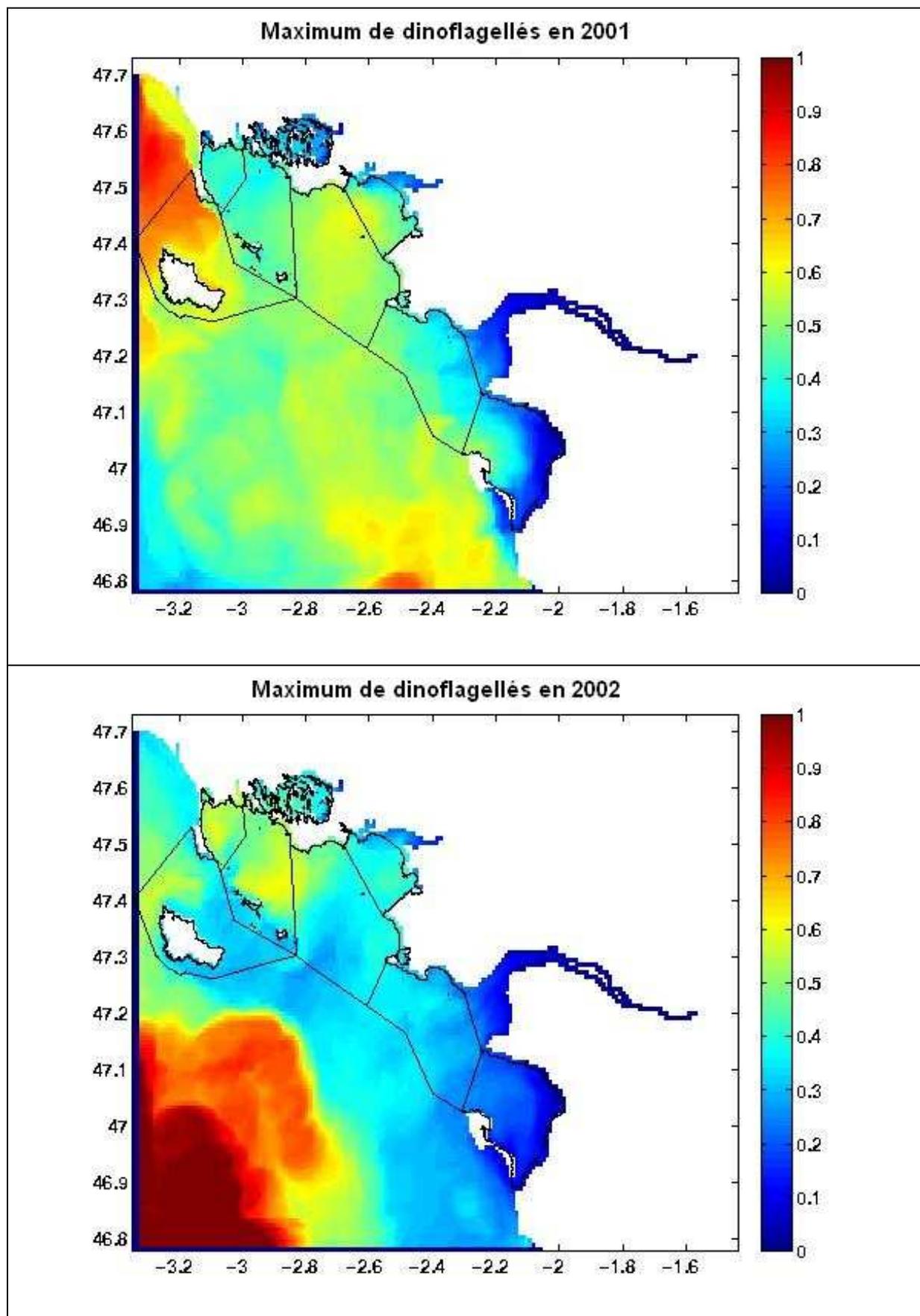


Figure 30: Maximum de dinoflagellés ($\mu\text{molN/L}$) pour l'année 2001 (en haut) et 2002 (en bas).

5.2 Synthèse des résultats

Les scénarios de variations (-50%, -20% et +20%) ont été appliqués quotidiennement sur les années 2001 et 2002. **Les scénarios consistent en une variation des apports azotés et phosphorés** de la Loire seule, de la Vilaine seule et de la Loire et la Vilaine ensemble.

Dans un premier temps, plutôt que de déterminer un effet des scénarios sur la chlorophylle, il a été choisi de déterminer l'effet, d'une part, sur les diatomées et, d'autre part, sur les dinoflagellés, qui ont un comportement différent (la croissance des diatomées dépend entre autres des teneurs du milieu en silice, azote et phosphore, celle des dinoflagellés dépend des teneurs en azote et phosphore). Une indication sur les dinoflagellés peut être intéressante d'autant plus que la baie de Vilaine est particulièrement sensible aux épisodes de toxicités dues notamment à des proliférations de *Dinophysis*. Dans les cartes sont présentés les effets relatifs du scénario par rapport à l'année de référence, c'est à dire des abattements de biomasse phytoplanctonique en cas de scénario de réduction d'apports, et des accroissements en cas de scénario d'augmentation d'apports. Plus la couleur tire sur le rouge, plus l'effet du scénario est sensible.

Dans un deuxième temps l'effet des variations sur la classification DCE sera présenté.

Réduction des apports

Effet sur les diatomées

Une réduction des apports a peu d'effet sur les maximums de diatomées. On observe qu'une réduction de 20 % des apports de la Loire et de la Vilaine entraîne seulement un abattement d'à peine 10% du maximum au large et de moins de 5% dans les zones estuariennes de la Loire et de la Vilaine (figures 31 et 33). Une réduction de 50% des apports de la Loire et de la Vilaine a un effet un peu plus sensible en année humide avec des abattements de l'ordre de 15-20% au large, mais presque pas d'effet dans les zones estuariennes (figure 31); en année sèche, même une réduction de 50% des apports conjointement dans les deux fleuves ne produit aucun abattement sensible des diatomées (figure 33).

Une réduction des apports de la Loire seule donne des résultats quasi-similaires à ceux obtenus précédemment, excepté dans la zone proche de l'estuaire de la Vilaine (qui correspond plus ou moins aux masses d'eaux DCE Vilaine large et Vilaine côte) (figures 35 et 37).

En revanche, une réduction des apports de la Vilaine seule n'a quasiment aucun effet sur les maximums de diatomées, sauf très légèrement dans la bande côtière voisine de Pénérf, au nord de la baie de Vilaine (figures 39 et 41).

Ce manque de sensibilité des diatomées à la réduction des apports azotés et phosphorés est dû au fait que la croissance des diatomées est de manière générale contrôlée par la silice. Par conséquent, les teneurs en azote et phosphore doivent être vraiment très faibles pour pouvoir observer un effet sensible, ce qui explique que les abattements sont plus élevés au large. En revanche, les zones estuariennes de la Loire et de la Vilaine sont tellement enrichies en azote et phosphore que même une réduction des apports de 50% ne change quasiment rien.

En revanche, à la différence des diatomées, une réduction des apports a un effet très sensible sur la biomasse en dinoflagellés.

On observe que pour l'année 2001, une diminution de 20% des apports de la Loire et de la Vilaine entraîne un abattement d'environ 20% du maximum de dinoflagellés en baie de Vilaine (figure 32) et qu'une diminution de 50 % des apports entraîne un abattement compris entre 40 et 50% du maximum de dinoflagellés en baie de Vilaine et un abattement d'environ 25% dans la zone proche de l'estuaire de la Loire (figure 32). En 2002 (figure 34), l'effet est un petit peu moins sensible, mais tout de même notable (abattement de 15% pour une diminution des apports de 20%, abattement de 20 à 30% pour une diminution de 50% des apports).

Une réduction des apports de la Loire seule a également un effet sensible sur le maximum de dinoflagellés. Pour une diminution de 20% des apports, on observe un abattement du maximum d'environ 15-20% en 2001 et un abattement quasiment nul en 2002 (figures 36 et 38) ; pour une diminution de 50% des apports, le maximum est diminué d'au maximum 40% en 2001 et 25% en 2002.

Comme pour les diatomées, une réduction des apports de la Vilaine seule n'a quasiment aucun effet sur le maximum de dinoflagellés (figures 40 et 42).

L'analyse des résultats indique que les dinoflagellés sont limités en azote à la fin de l'été et qu'une diminution des apports accentue cette limitation à cette période.

En ce qui concerne l'oxygène dissous, une diminution de 50% des apports de la Vilaine et de la Loire semble avoir peu d'effet sur les teneurs dans la Baie de Vilaine. (les résultats ne sont pas présentés)

Augmentation des apports

Une augmentation des apports de 20% ne semble avoir qu'un effet minime (environ 10%) sur les maximums de diatomées (figures 43,45 et 47) mais augmente d'environ 25% le maximum de dinoflagellés, soit dans les zones ' Baie de Vilaine côte' et 'Baie de Vilaine large' en cas d'année humide, et plus au sud, face à l'embouchure de la Loire en cas d'année sèche, ceci pour des augmentations des apports de la Loire (figure 46) ou Loire et Vilaine (figure 44).

Effet sur la classification DCE

Les variations des apports ont très peu d'effet sur la classification DCE. Toutefois, l'effet sur les percentiles 90 de chlorophylle sur la période productive n'est pas négligeable avec des abattements pouvant atteindre 2 µg/L dans la masse d'eau "Baie de Vilaine côte" pour une diminution conjointe des apports de 50% (tableau 8): en 2001, la masse d'eau serait toujours classée en « état moyen » avec un percentile 90 maximum égal à 10.4 µg/L mais cette valeur serait plus proche du seuil permettant le classement en « bon état » (10 µg/L). Pour la masse d'eau "Baie de Vilaine large", la réduction des apports de la Loire seule suffirait à faire passer la masse d'eau sous la barre des 10 µg/L. La masse d'eau "Loire large", actuellement classée en état "Bon", passerait en état "Moyen" suite à une augmentation de 20% des apports de la Loire.

En ce qui concerne l'oxygène dissous, seul un scénario d'abattement de 50% des apports azotés et phosphorés a été réalisé pour l'année 2009 et n'a pas entraîné une remontée sensible du percentile 10 entre juin et septembre.

Les tableaux suivant récapitulent les variations des maximums de diatomées et de dinoflagellés ainsi que les percentiles 90 de chlorophylle pour les différents scénarios.

		Vilaine -20%	Vilaine -50%	Vilaine +20%	Loire -20%	Loire -50%	Loire +20%	Vil/Loi -20%	Vil/Loi -50%	Vil/Loi +20%
Baie de Vilaine (côte)	2001	<3	<5	<5	<5	13	<5	6	19	<5
	2002	<3	<5	<5	<5	<5	<5	<5	10	<5
Baie de Vilaine (large)	2001	<3	<5	<5	7	18	6	8	22	7
	2002	<3	<5	<5	<5	<5	<5	<5	6	<5
Loire (large)	2001	<3	<5	<5	<5	12	<5	<5	12	<5
	2002	<3	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Bourgneuf	2001	<3	<5	<5	<5	8	<5	<5	8	<5
	2002	<3	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Belle-île	2001	<3	<5	<5	8	20	7	9	22	8
	2002	<3	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Quiberon	2001	<3	<5	<5	<5	11	<5	6	16	7
	2002	<3	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Houat/Hoedic	2001	<3	<5	<5	8	20	8	10	23	9
	2002	<3	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Golfe du Morbihan	2001	<3	<5	<5	<5	11	<5	7	18	7
	2002	<3	<5	<5	<5	<5	<5	<5	7	<5

Tableau 6: Pourcentage de variation du maximum de diatomées par rapport à la situation de référence sur les différentes masses d'eaux DCE de la zone (en noir diminution de la valeur de référence, en rouge augmentation de la valeur de référence).

		Vilaine -20%	Vilaine -50%	Vilaine +20%	Loire -20%	Loire -50%	Loire +20%	Vil/Loi -20%	Vil/Loi -50%	Vil/Loi +20%
Baie de Vilaine (côte)	2001	<3	8	<5	14	37	13	17	43	16
	2002	<3	<5	<5	11	26	12	12	28	14
Baie de Vilaine (large)	2001	<3	6	<5	15	36	15	17	40	19
	2002	<3	<5	<5	11	26	14	12	27	15
Loire (large)	2001	<3	<5	<5	9	25	9	10	26	10
	2002	<3	<5	<5	13	27	16	15	29	18
Bourgneuf	2001	<3	<5	<5	6	17	<5	6	18	6
	2002	<3	<5	<5	9	19	11	10	21	12
Belle-île	2001	<3	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
	2002	<3	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Quiberon	2001	<3	<5	<5	6	11	12	7	13	15
	2002	<3	<5	<5	12	29	13	14	32	15
Houat/Hoedic	2001	<3	6	<5	12	21	16	13	23	19
	2002	<3	<5	<5	12	28	13	14	30	15
Golfe du Morbihan	2001	<3	7	<5	14	26	17	16	29	21
	2002	<3	<5	<5	12	29	13	13	32	15

Tableau 7: Pourcentage de variation du maximum de dinoflagellés par rapport à la situation de référence sur les différentes masses d'eaux DCE de la zone (en noir diminution de la valeur de référence, en rouge augmentation de la valeur de référence).

	Réf 2001	Vilaine -20%	Vilaine -50%	Vilaine +20%	Loire -20%	Loire -50%	Loire +20%	Vil/Loi -20%	Vil/Loi -50%	Vil/Loi +20%
Baie de Vilaine (côte)	12,4	11,7	10,9	12,8	12,1	12,1	12,7	11,5	10,4	13
Baie de Vilaine (large)	10,6	10,5	10,2	10,7	9,9	9,2	11,2	9,8	8,4	11,2
Loire (large)	9,8	9,8	9,8	9,9	9,5	8,8	10,3	9,5	8,8	10,3
Bourgneuf	6,7	6,7	6,6	6,7	6,4	6,1	6,9	6,4	6,1	7
Belle-île	4,7	4,7	4,7	4,7	4,4	4,1	5	4,4	4	5
Quiberon	5,1	5	4,9	5,1	4,8	4,5	5,3	4,8	4,3	5,4
Houat/Hoedic	5,4	5,4	5,3	5,5	5	4,4	5,6	5	4,3	5,6
Golfe du Morbihan	4,2	4,1	4	4,2	4	3,8	4,3	4	3,7	4,3

Tableau 8: Valeur maximale du percentile 90 de chlorophylle sur les différentes masses d'eaux DCE de la zone et couleur de classement DCE suivant la grille rappelée ci-dessous.

		Percentile 90 chlorophylle a ($\mu\text{g.L}^{-1}$)				
	période productive	très bon	bon	moyen	médiocre	mauvais
manche atlantique eaux côtières et de transition sauf grands estuaires	mars – octobre	0 - 5	5 - 10	10 - 20	20 - 40	> 40

5.2.1 Réduction de 20% et 50% des apports de la Loire et de la Vilaine

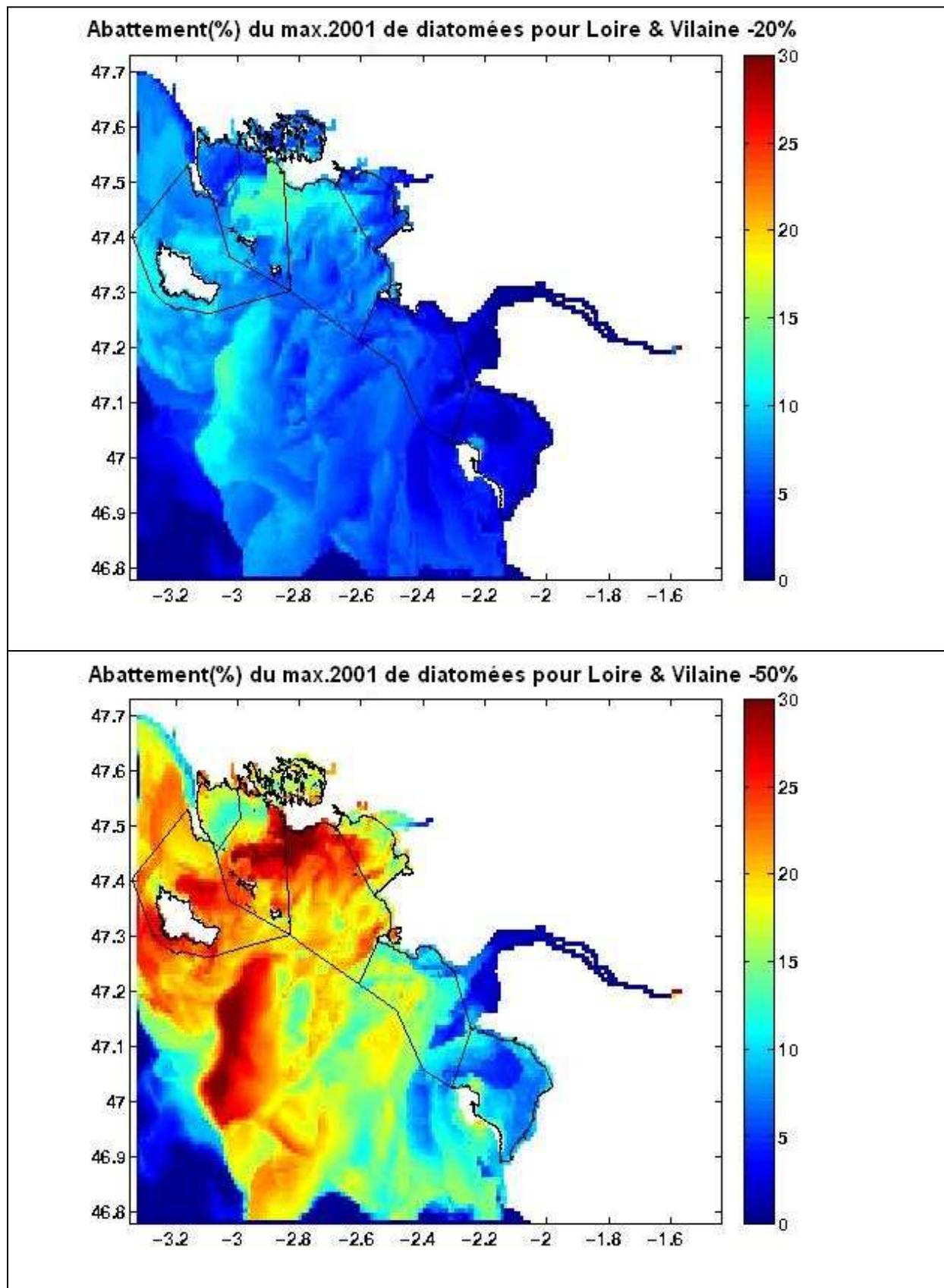


Figure 31 : Abatement (en %) du maximum de diatomées pour l'année 2001 après une réduction des apports en nitrate et phosphate de la Loire et de la Vilaine de 20% (en haut) et 50% (en bas).

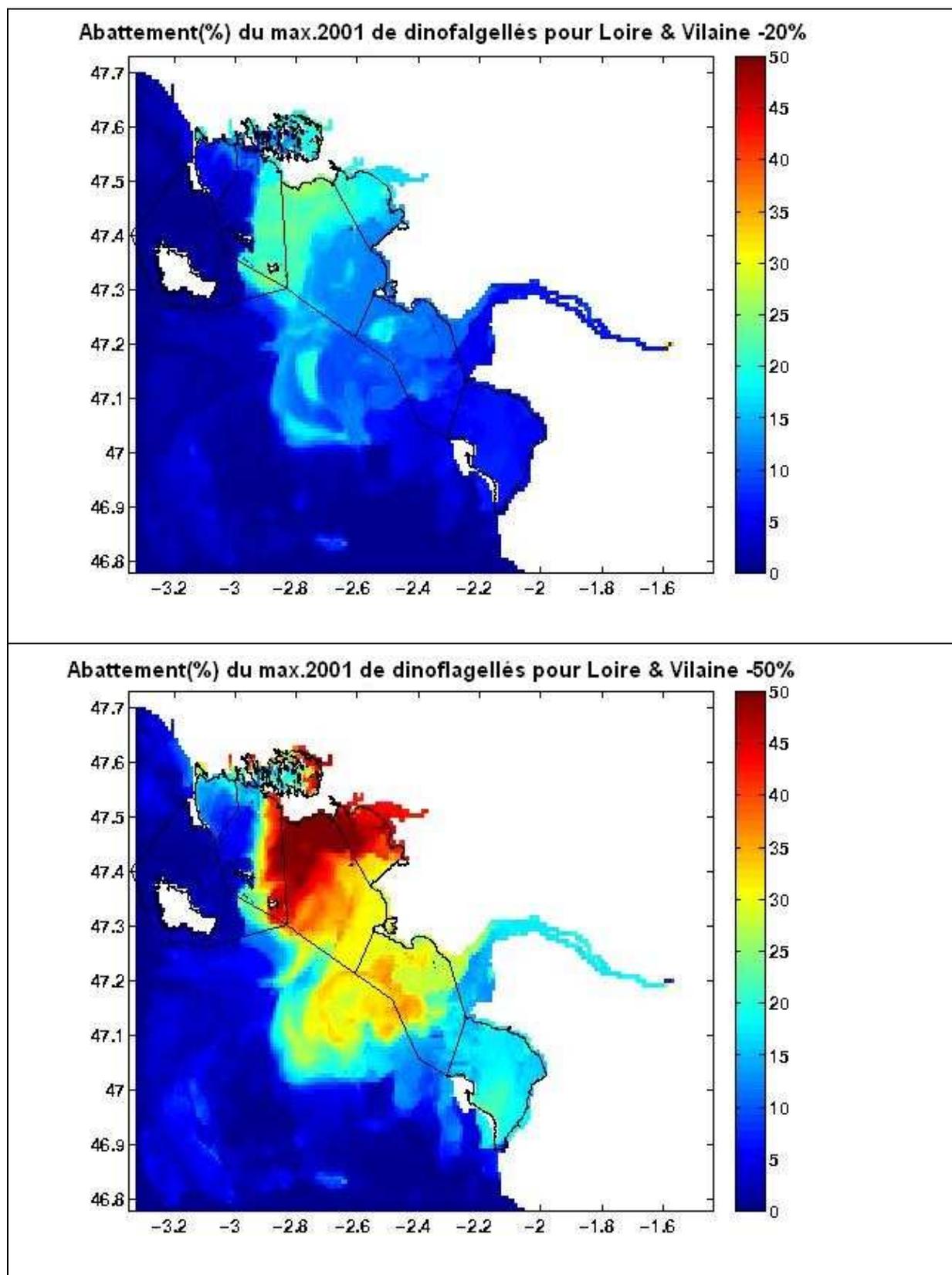


Figure 32: Abatement (en %) du maximum de dinoflagellés pour l'année 2001 après une réduction des apports en nitrate et phosphate de la Loire et de la Vilaine de 20% (en haut) et 50% (en bas).

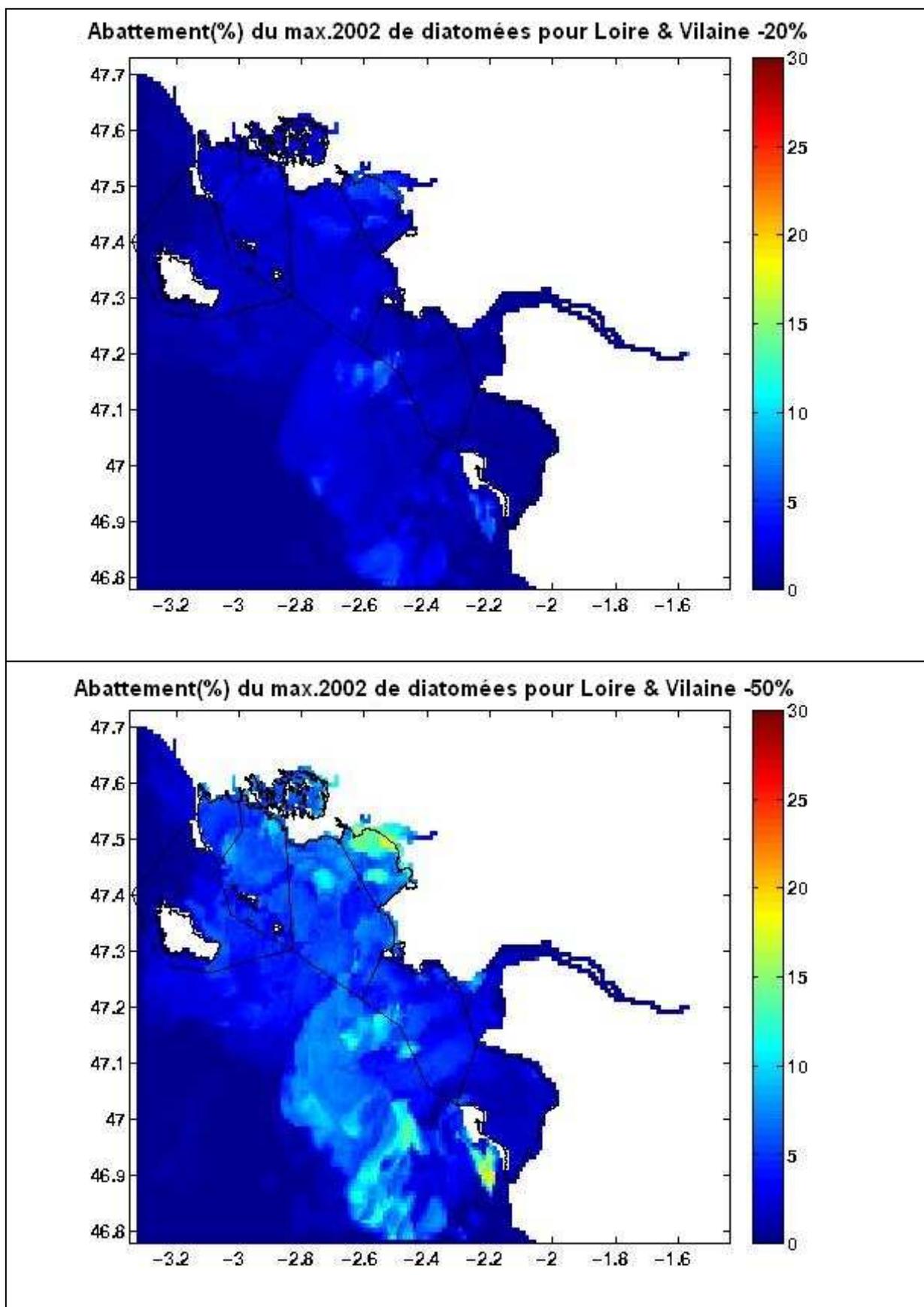


Figure 33: Abatement (en %) du maximum de diatomées pour l'année 2002 après une réduction des apports en nitrate et phosphate de la Loire et de la Vilaine de 20% (en haut) et 50% (en bas).

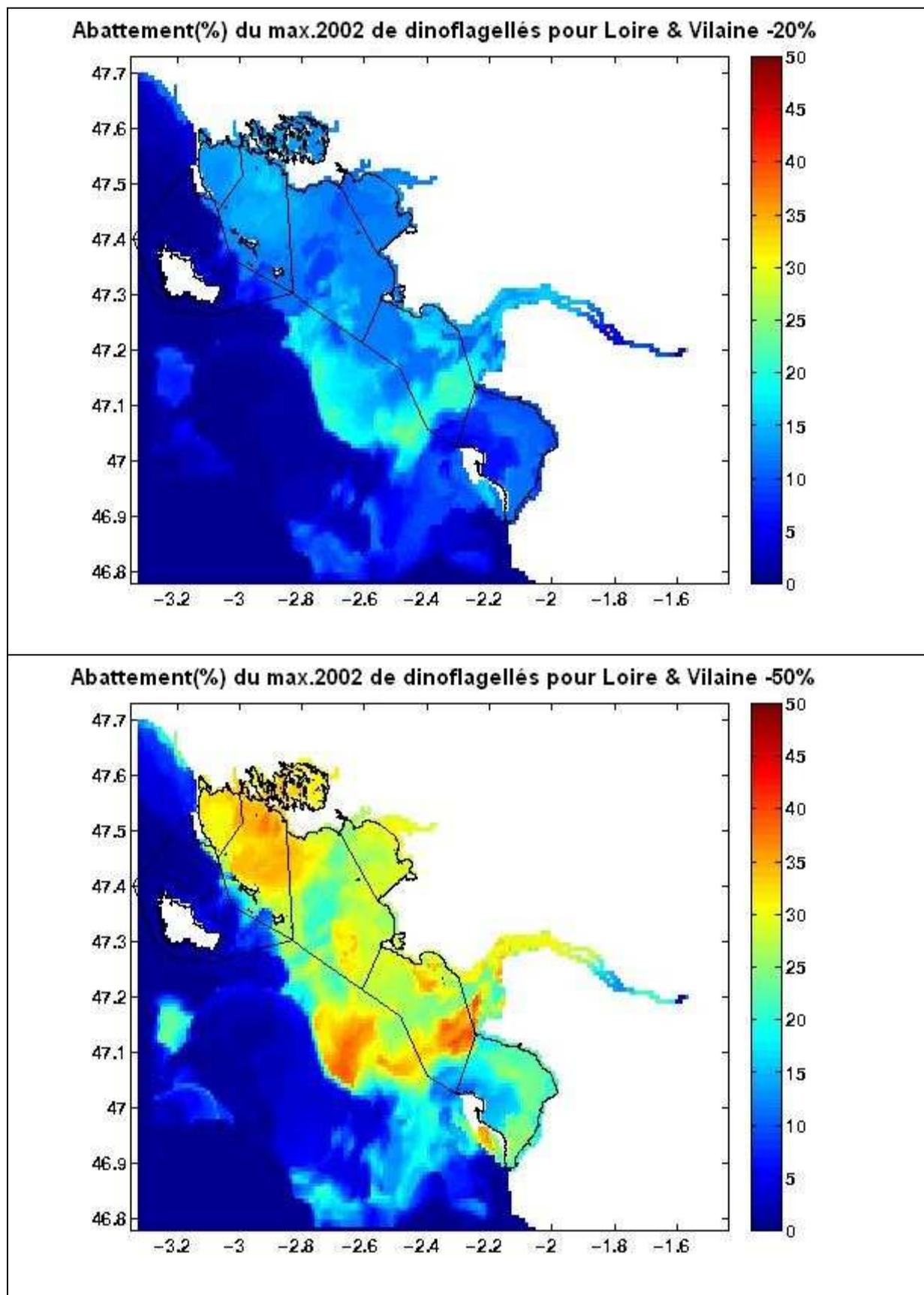


Figure 34: Abatement (en %) du maximum de dinoflagellés pour l'année 2002 après une réduction des apports en nitrate et phosphate de la Loire et de la Vilaine de 20% (en haut) et 50% (en bas).

5.2.2 Réduction de 20% et 50 % des apports de la Loire

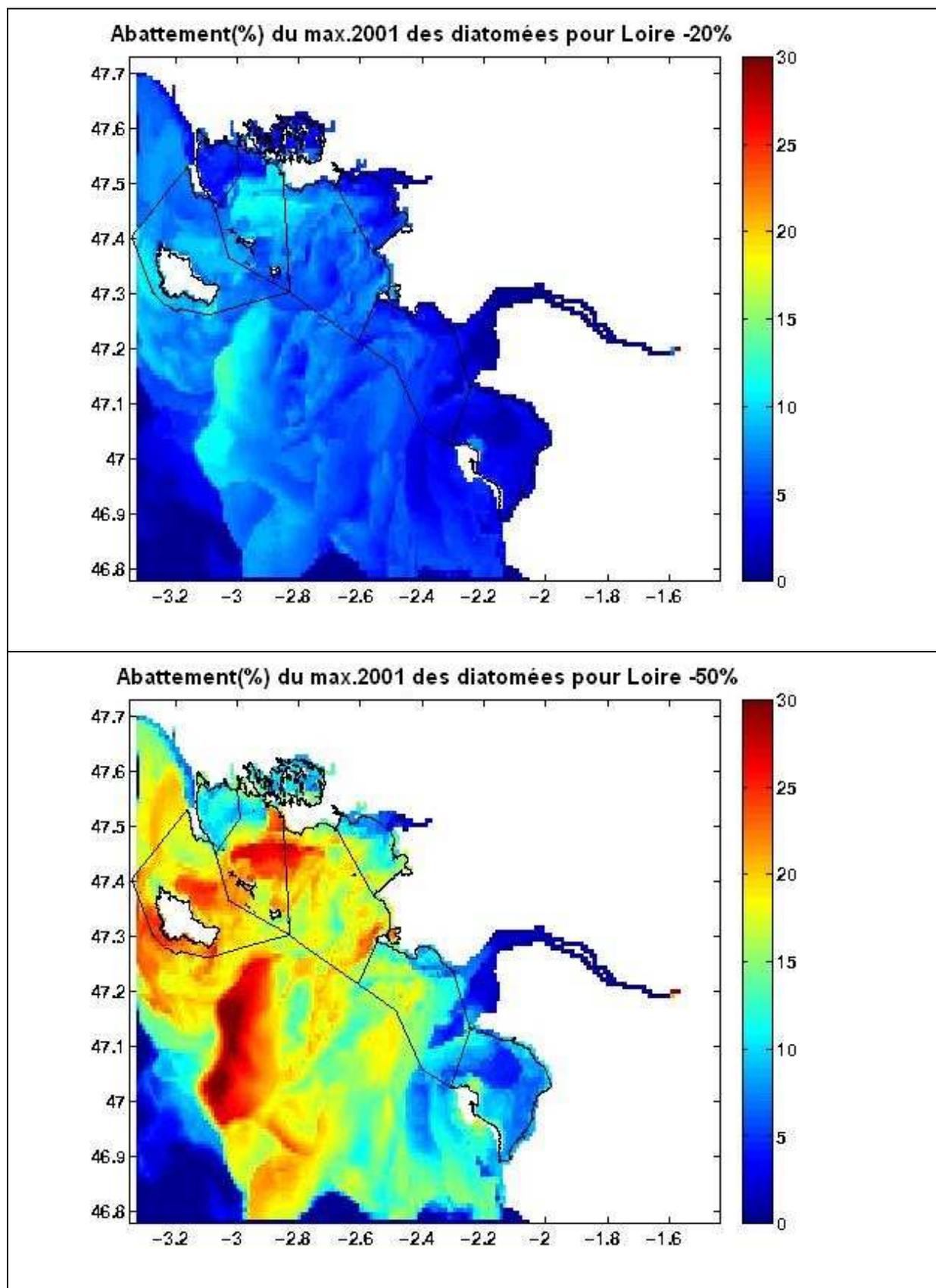


Figure 35: Abatement (en %) du maximum de diatomées pour l'année 2001 après une réduction des apports en nitrate et phosphate de la Loire de 20% (en haut) et 50% (en bas).

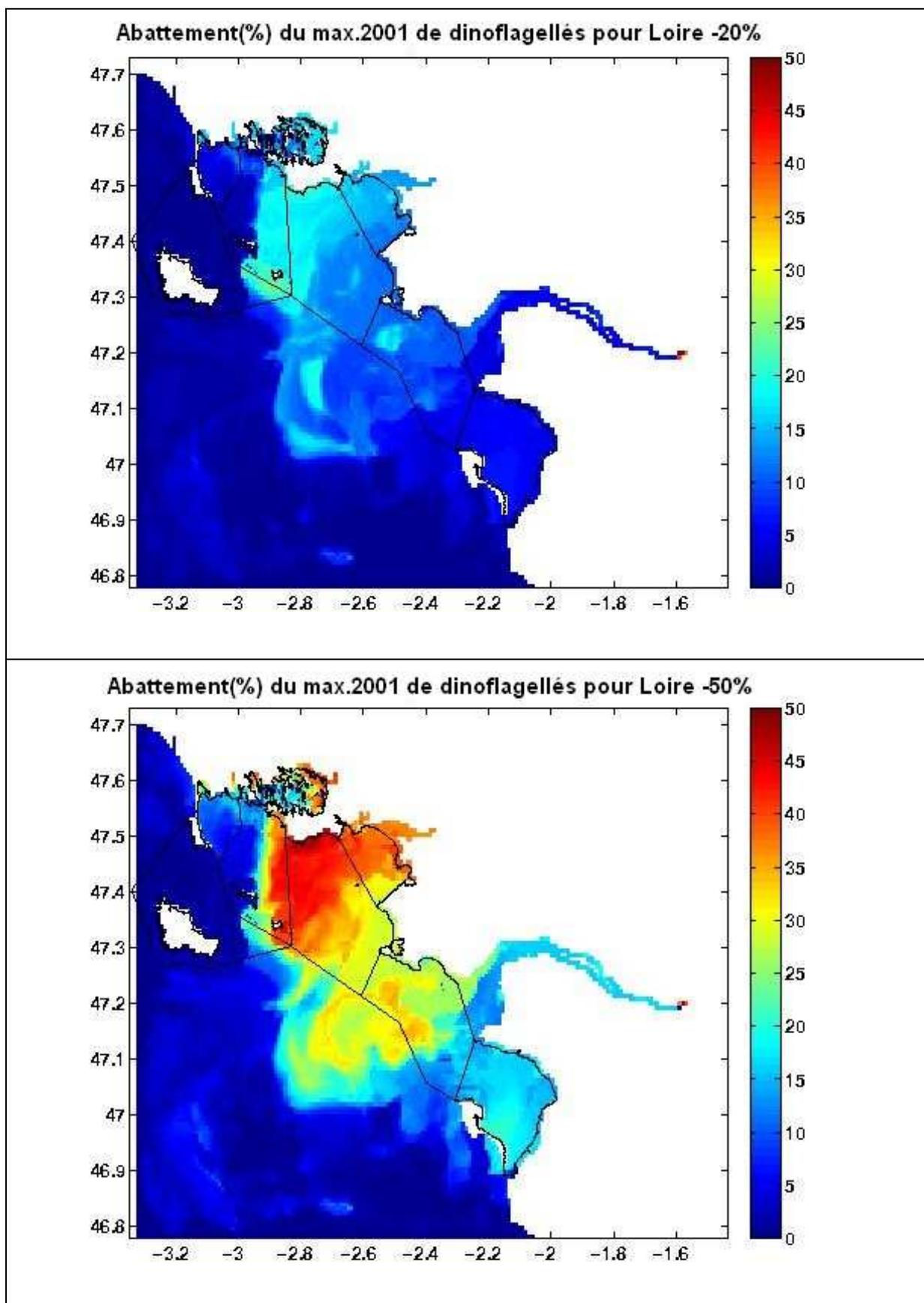


Figure 36: Abatement (en %) du maximum de dinoflagellés pour l'année 2001 après une réduction des apports en nitrate et phosphate de la Loire de 20% (en haut) et 50% (en bas).

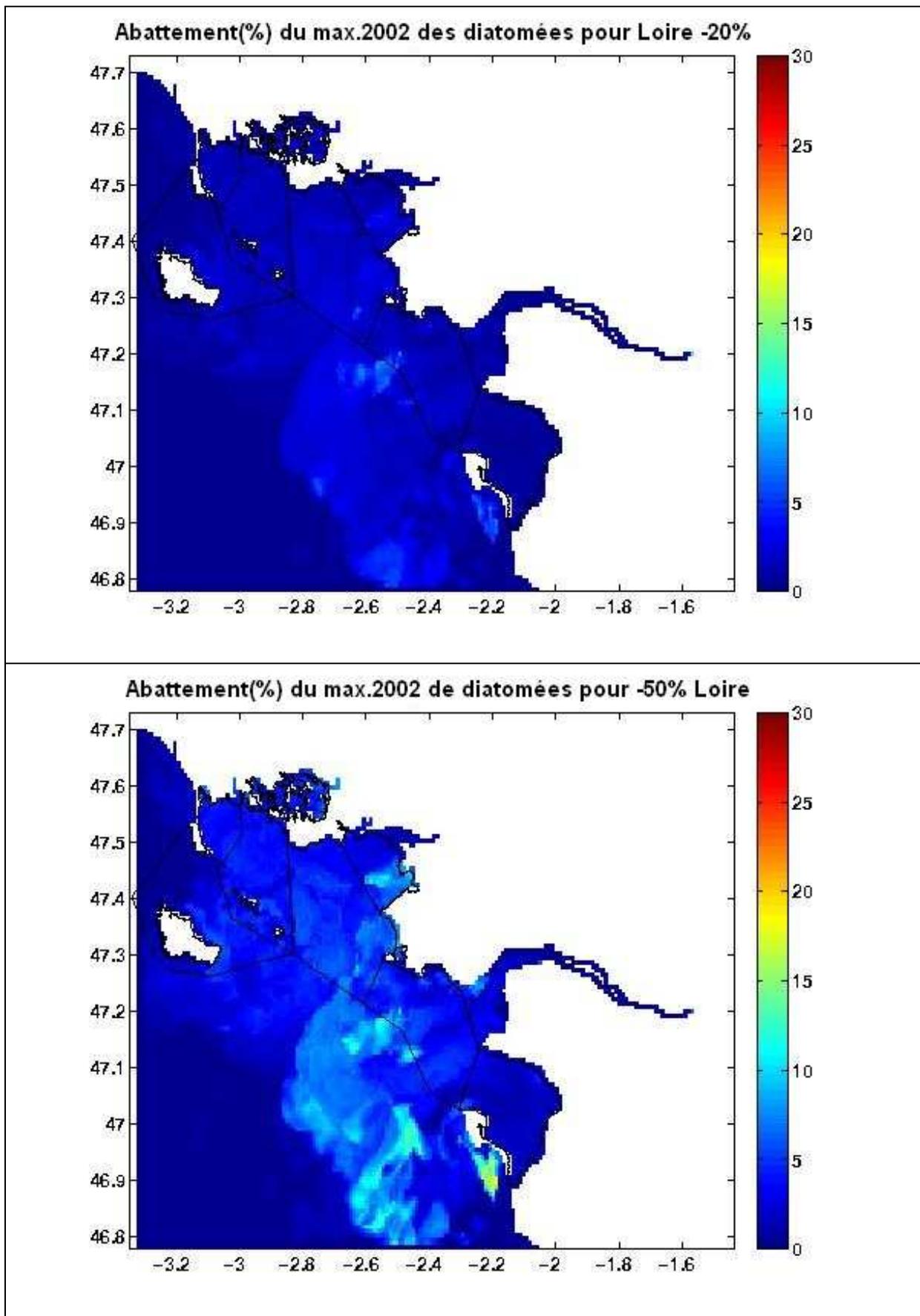


Figure 37: Abatement (en %) du maximum de diatomées pour l'année 2002 après une réduction des apports en nitrate et phosphate de la Loire de 20% (en haut) et 50% (en bas).

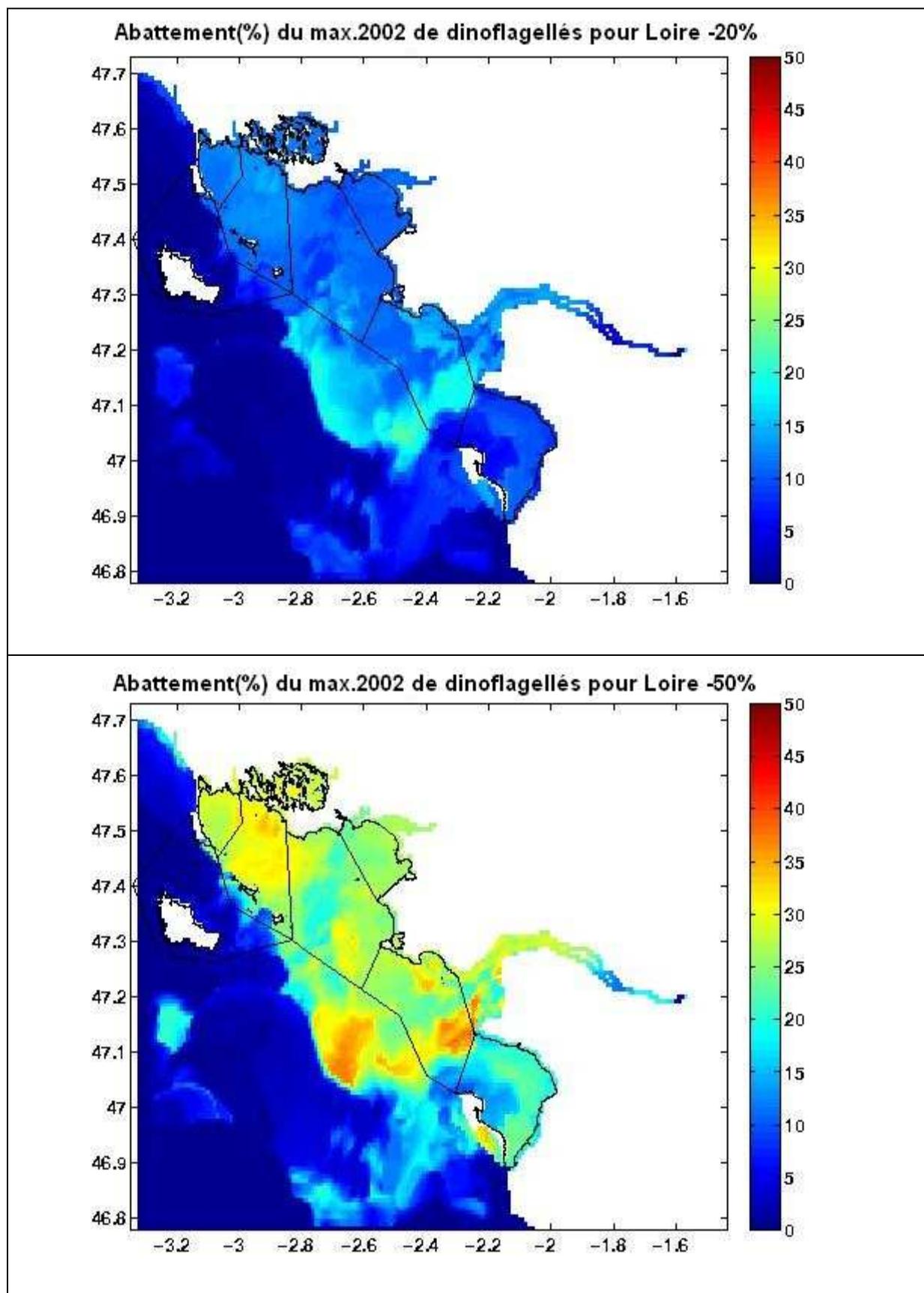


Figure 38: Abatement (en %) du maximum de dinoflagellés pour l'année 2002 après une réduction des apports en nitrate et phosphate de la Loire de 20% (en haut) et 50% (en bas).

5.2.3 Réduction de 20% et 50 % des apports de la Vilaine

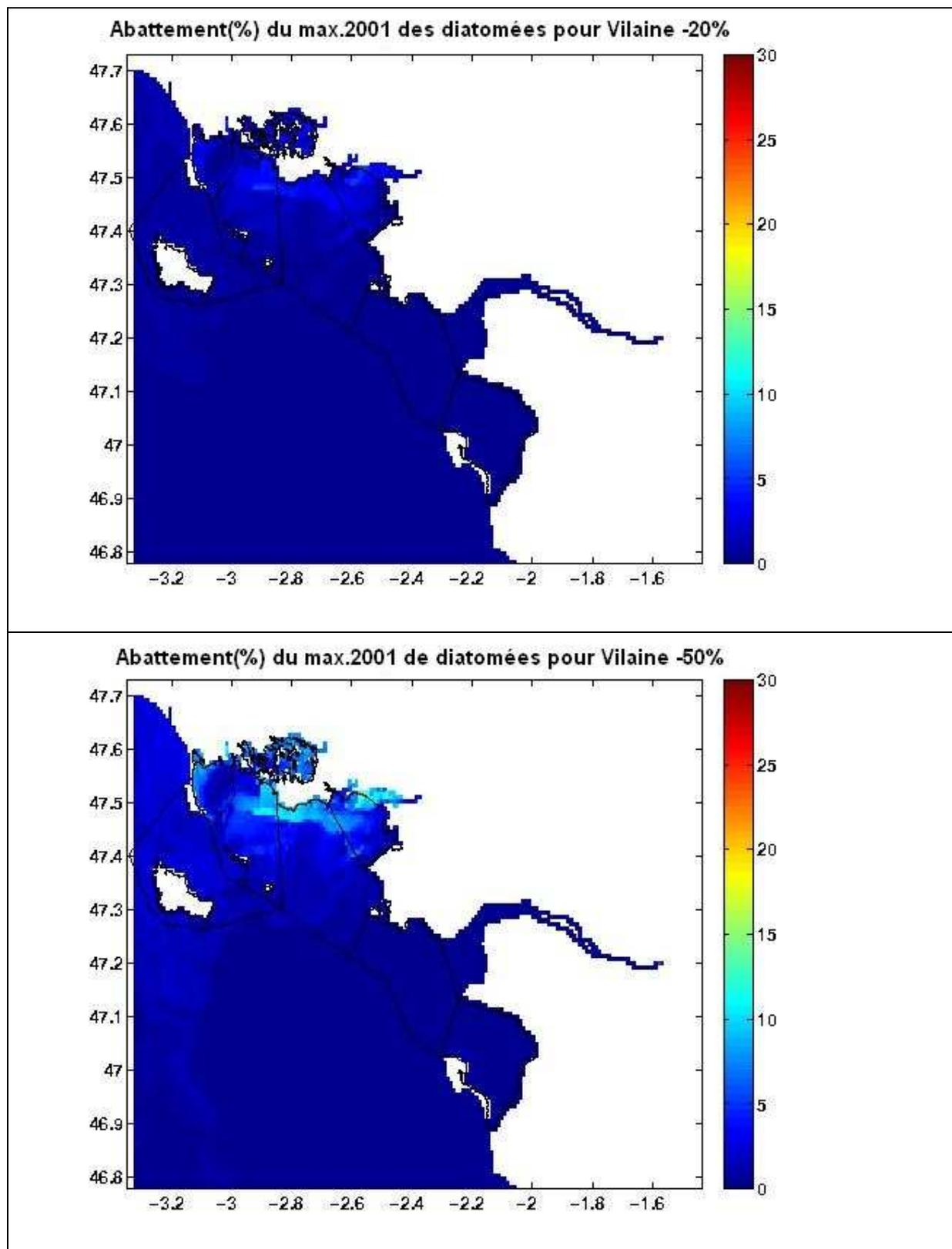


Figure 39: Abatement (en %) du maximum de diatomées pour l'année 2001 après une réduction des apports en nitrate et phosphate de la Vilaine de 20% (en haut) et 50% (en bas).

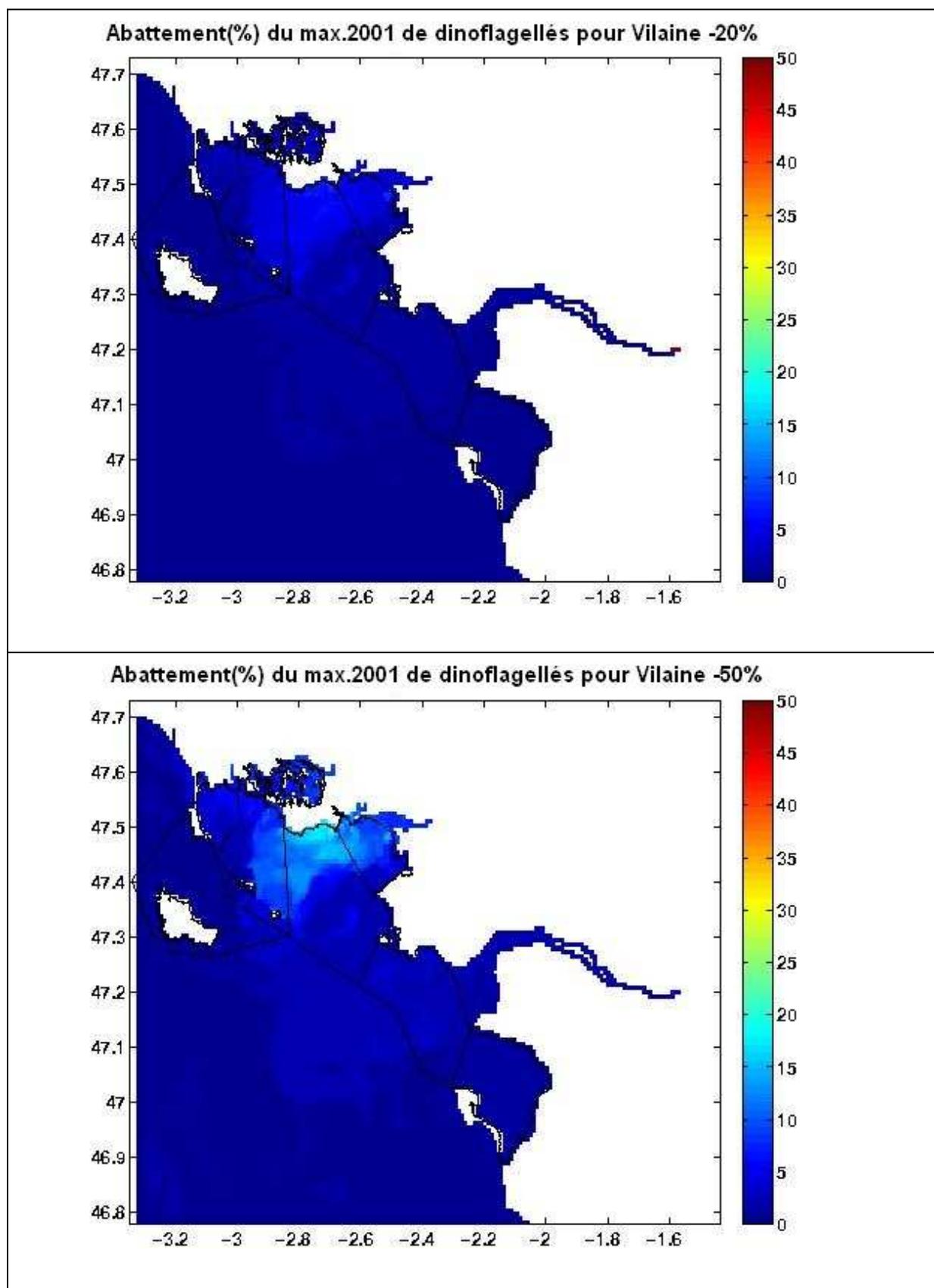


Figure 40: Abatement (en %) du maximum de dinoflagellés pour l'année 2001 après une réduction des apports en nitrate et phosphate de la Vilaine de 20% (en haut) et 50% (en bas).

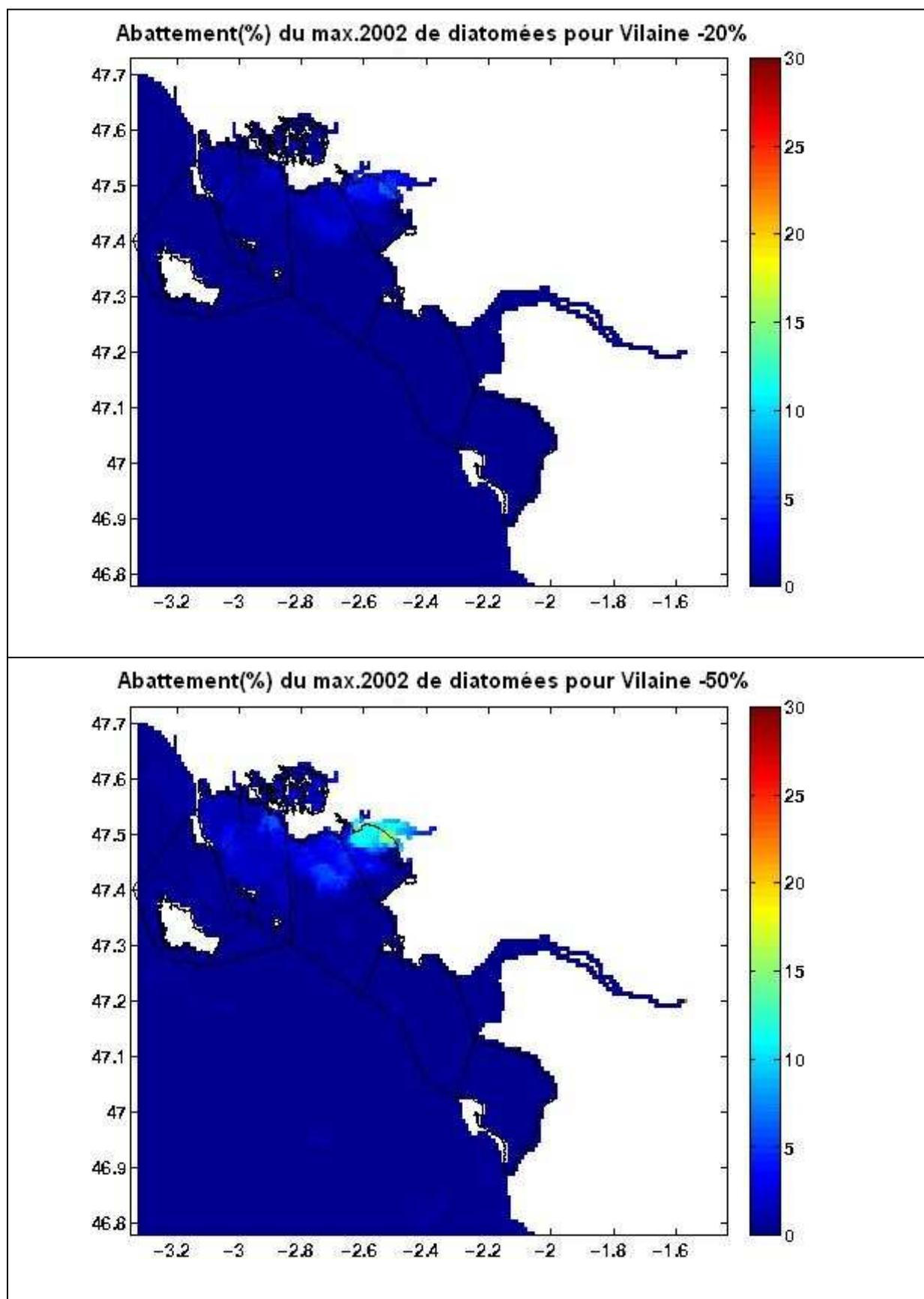


Figure 41: Abatement (en %) du maximum de diatomées pour l'année 2002 après une réduction des apports en nitrate et phosphate de la Vilaine de 20% (en haut) et 50% (en bas).

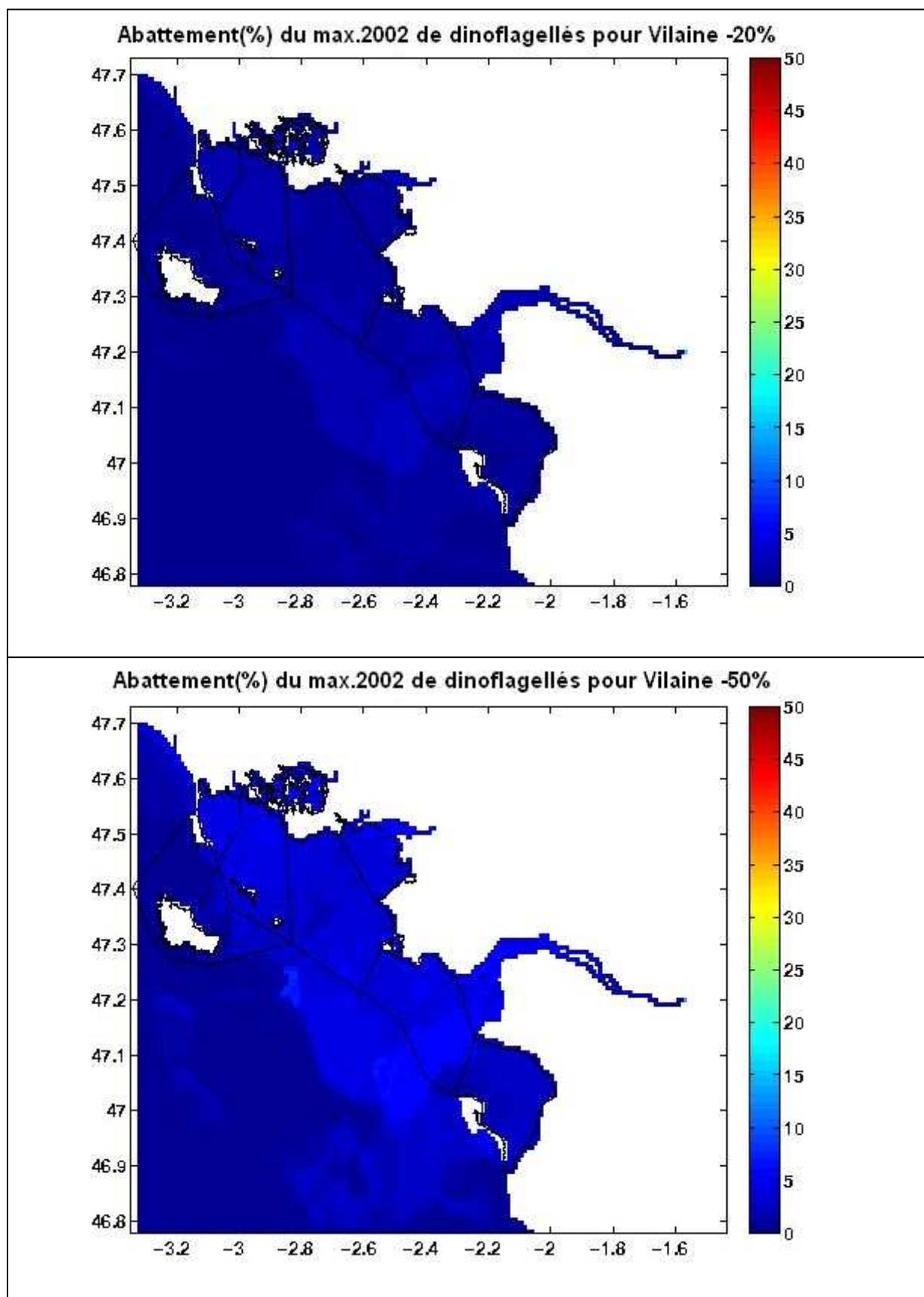


Figure 42: Abatement (en %) du maximum de dinoflagellés pour l'année 2002 après une réduction des apports en nitrate et phosphate de la Vilaine de 20% (en haut) et 50% (en bas).

5.2.4 Augmentation de 20% des apports de la Loire et de la Vilaine

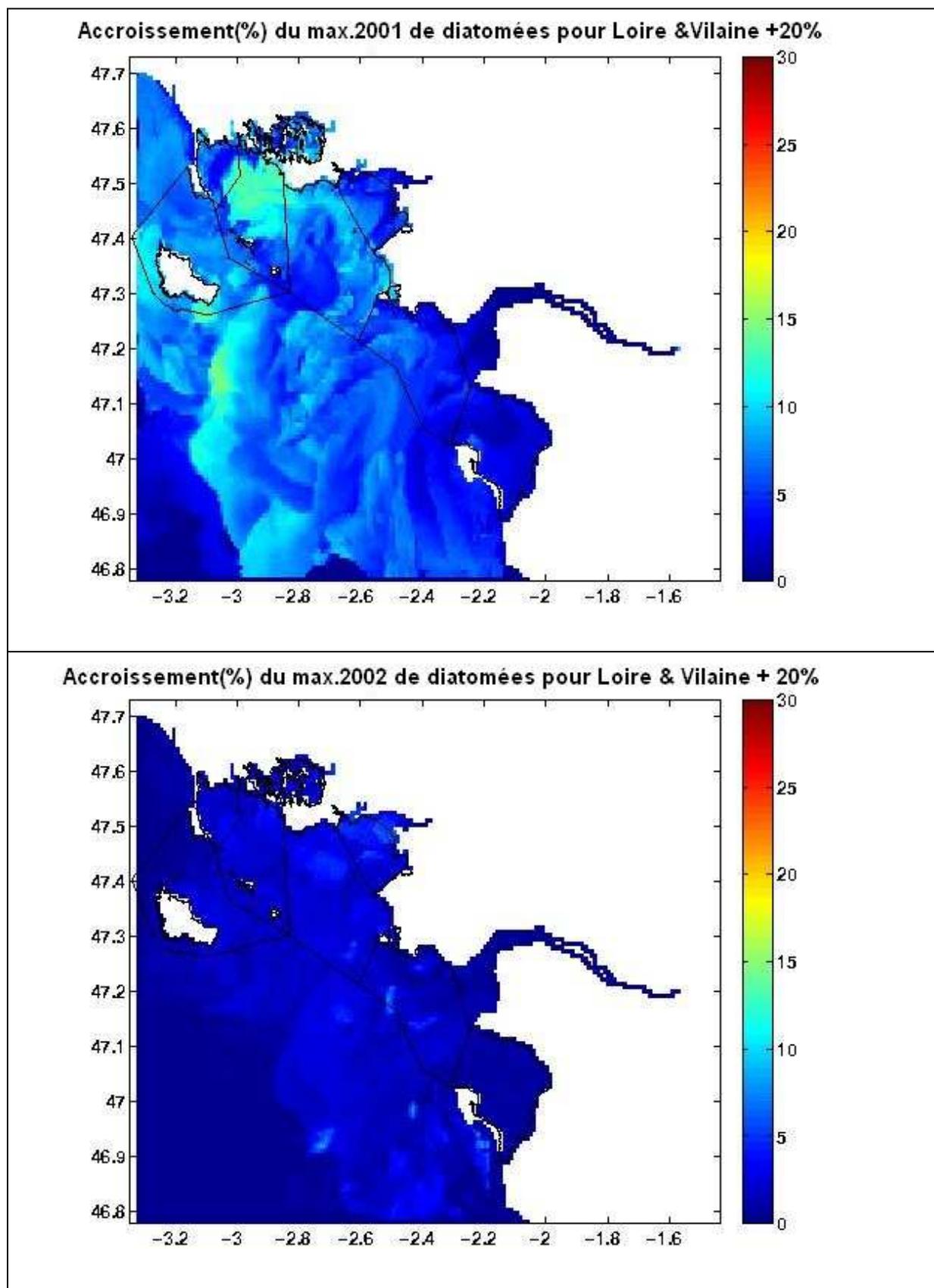


Figure 43: Accroissement (en %) du maximum de diatomées après une augmentation de 20% des apports en nitrate et phosphate de la Loire et de la Vilaine en 2001 (en haut) et en 2002 (en bas).

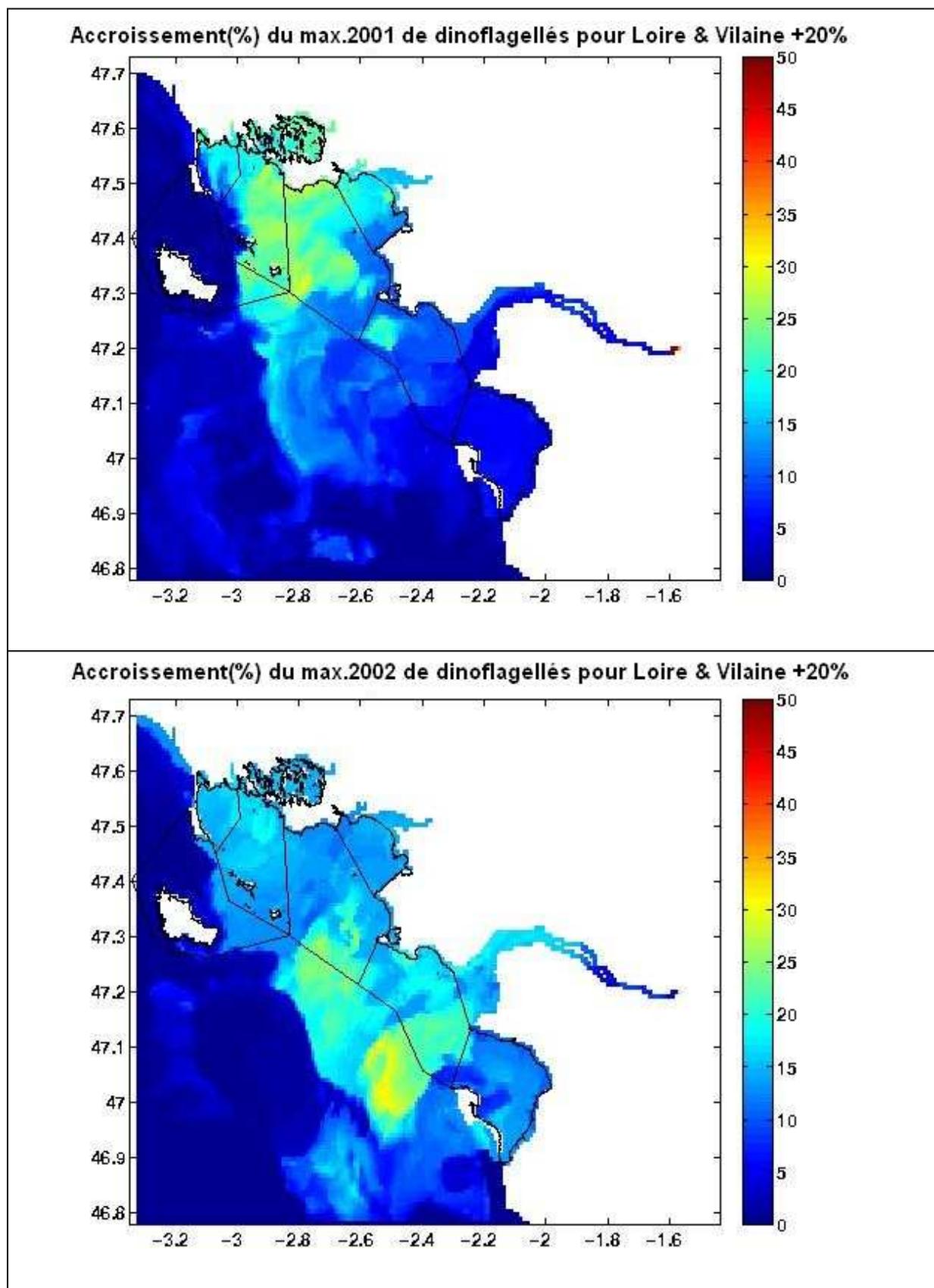


Figure 44: Accroissement (en %) du maximum de dinoflagellés après une augmentation de 20% des apports en nitrate et phosphate de la Loire et de la Vilaine en 2001 (en haut) et en 2002 (en bas).

5.2.5 Augmentation de 20% des apports de la Loire

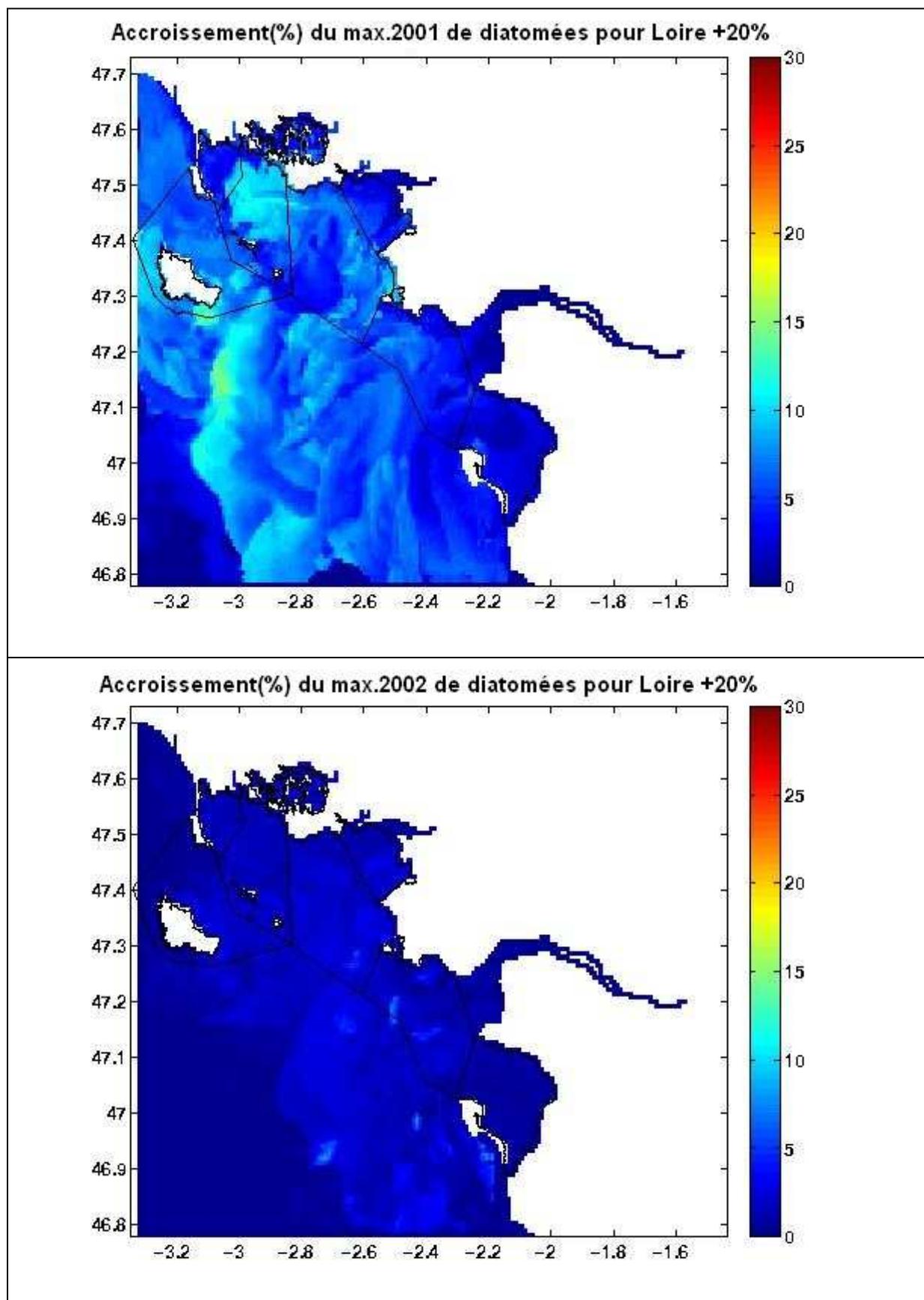


Figure 45: Accroissement (en %) du maximum de diatomées après une augmentation de 20% des apports en nitrate et phosphate de la Loire en 2001 (en haut) et en 2002 (en bas).

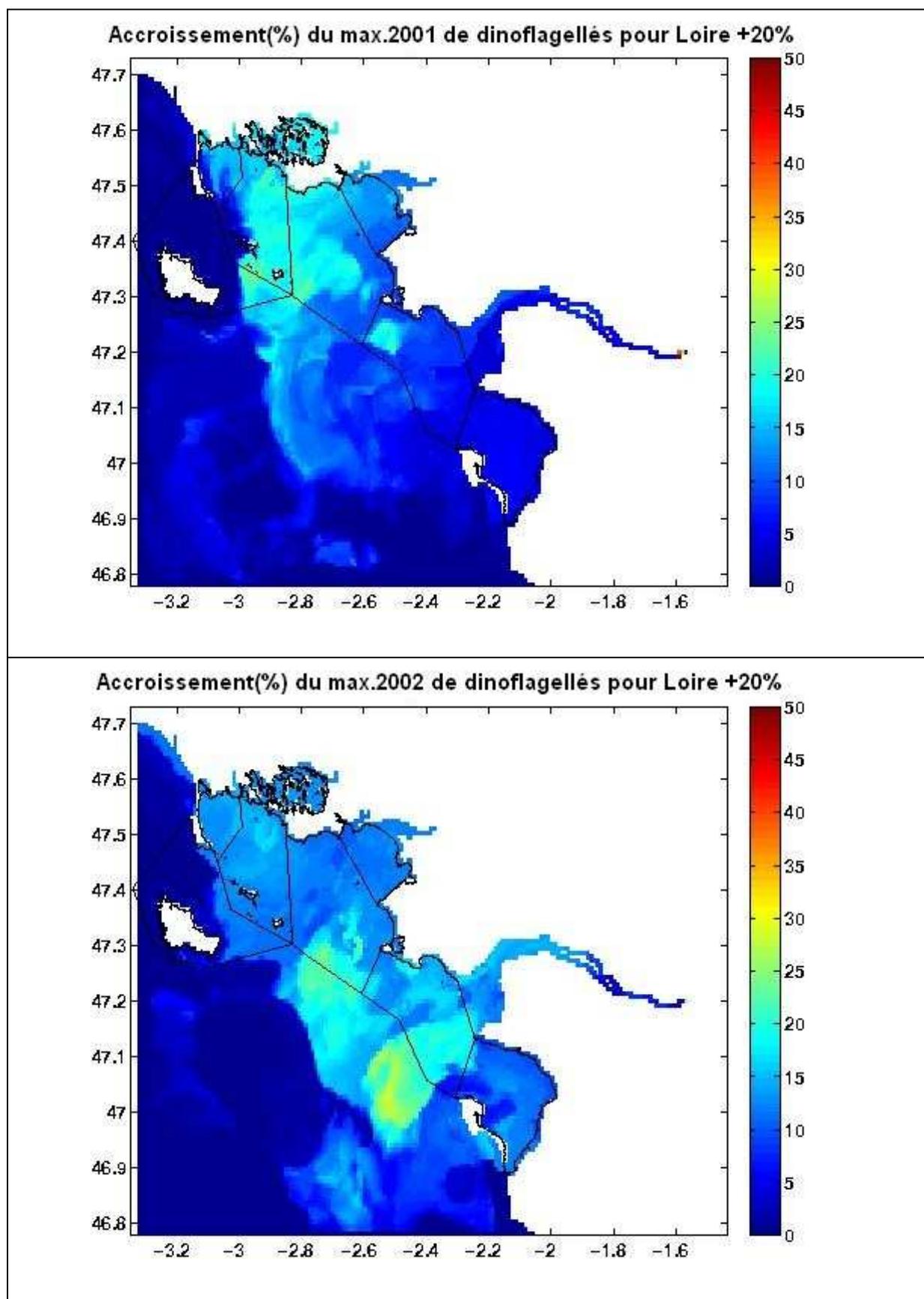


Figure 46: Accroissement (en %) du maximum de dinoflagellés après une augmentation de 20% des apports en nitrate et phosphate de la Loire en 2001 (en haut) et en 2002 (en bas).

5.2.6 Augmentation de 20% des apports de la Vilaine

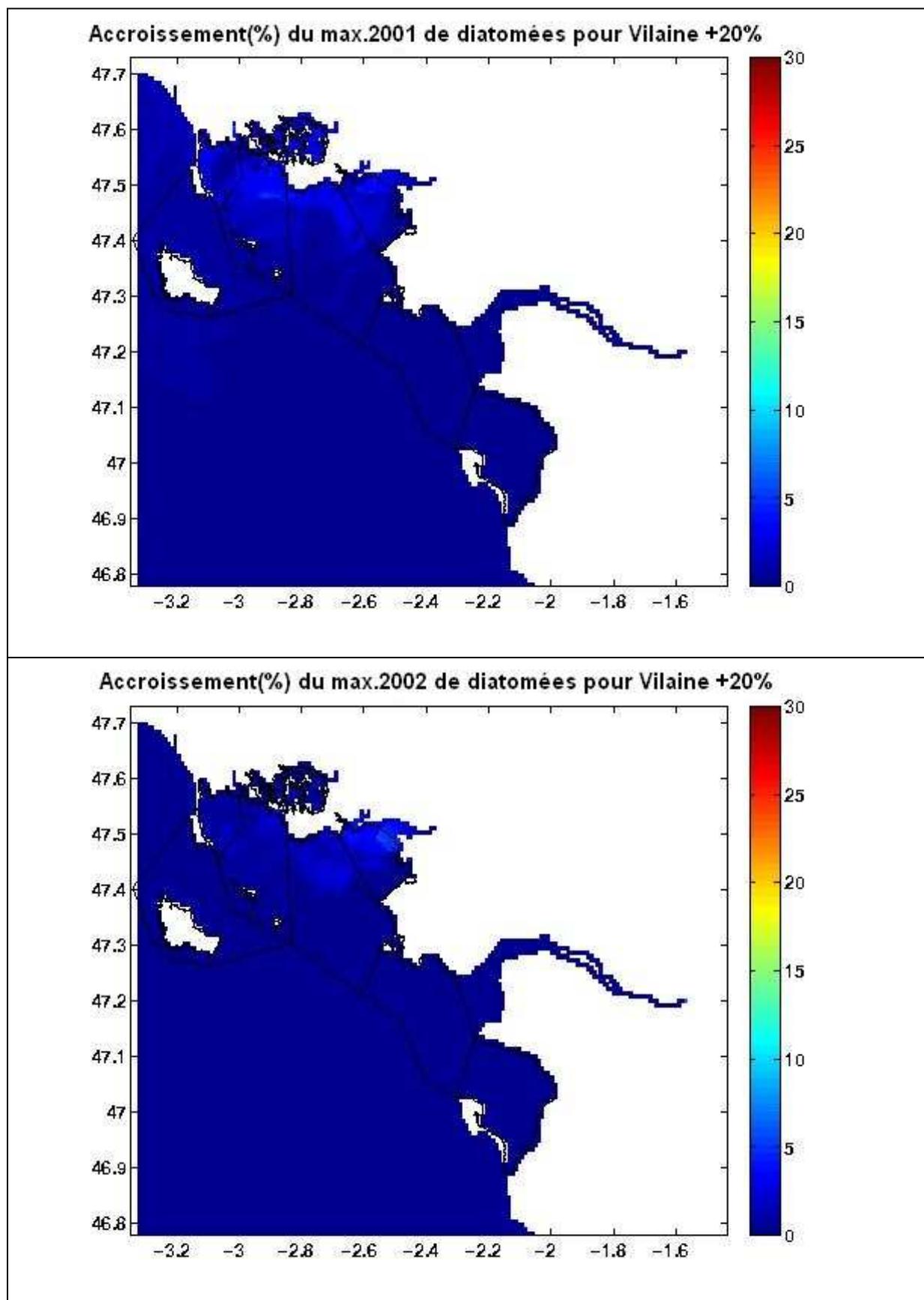


Figure 47: Accroissement (en %) du maximum de diatomées après une augmentation de 20% des apports en nitrate et phosphate de la Vilaine en 2001 (en haut) et en 2002 (en bas).

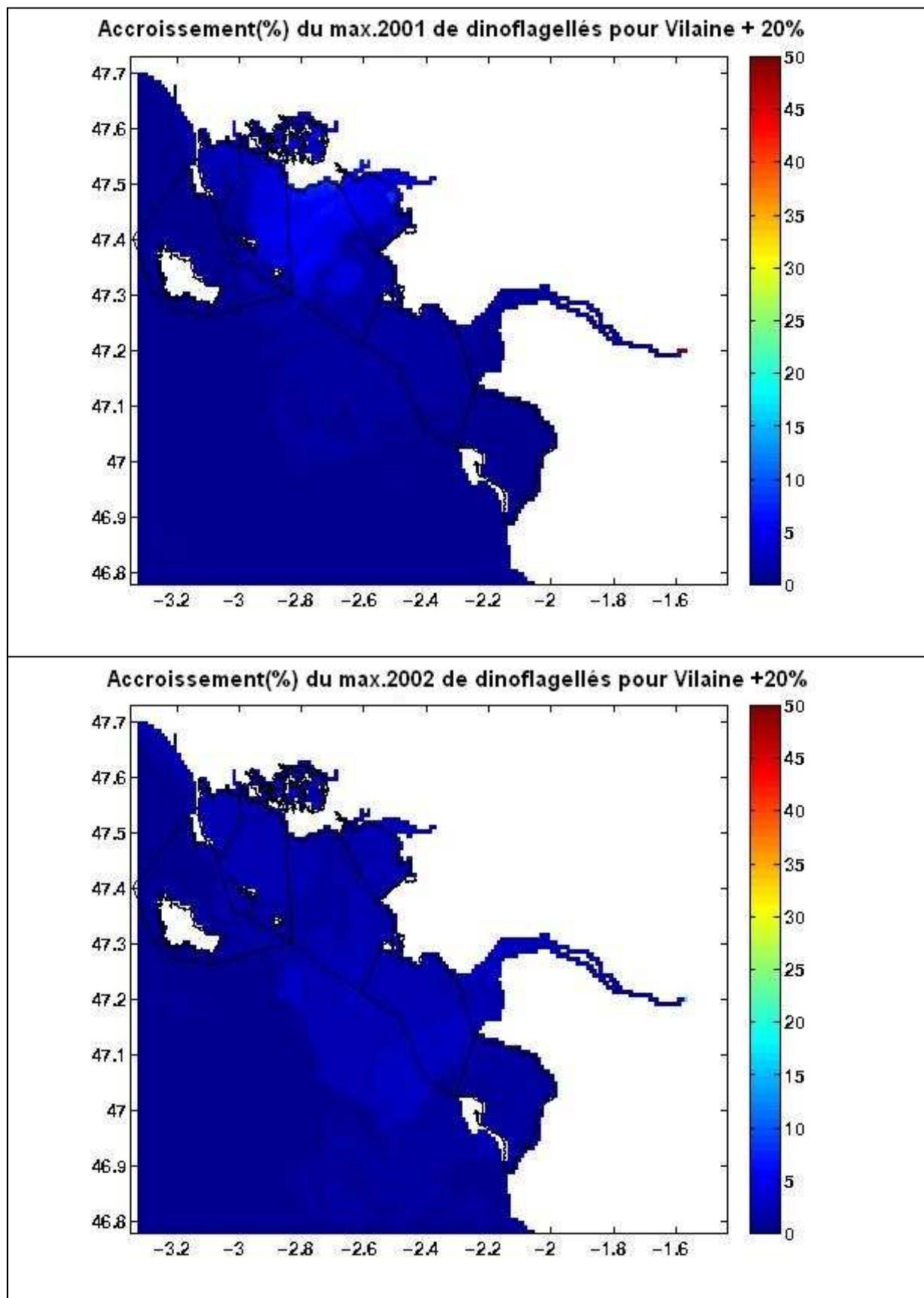


Figure 48: Accroissement (en %) du maximum de dinoflagellés après une augmentation de 20% des apports en nitrate et phosphate de la Vilaine en 2001 (en haut) et en 2002 (en bas).

Conclusion

Une nouvelle calibration du modèle biogéochimique ECO-MARS 3D, validée par des mesures satellites et in situ, a permis de bien représenter l'évolution de la chlorophylle *a* et de l'oxygène dissous dans la zone Loire/Vilaine pour une année humide (2001), sèche (2002) et une année pour laquelle des mesures à haute fréquence d'oxygène dissous devant l'estuaire de la Vilaine ont été acquises (2009). La succession diatomées/dinoflagellés en baie de Vilaine est également bien représentée.

A partir de ces résultats, des cartes de percentiles 90 de chlorophylle *a en surface* et de percentiles 10 d'oxygène dissous au fond ont été obtenues et la classification des masses d'eaux DCE suivant les critères 'biomasse phytoplanctonique' et 'oxygène dissous' ont été établies.

Les classifications obtenues par modélisation sont très proches de celles établies à partir des mesures in situ (biomasse phytoplanctonique et oxygène) et satellitaires (biomasse phytoplanctonique). Parmi toutes les masses d'eaux DCE présentes dans la zone, seule la masse d'eau « Baie de Vilaine côte » est classée en « qualité moyenne » pour le critère 'biomasse' phytoplanctonique. Les autres sont classées en « bonne qualité », voire en « très bonne qualité ». En ce qui concerne l'oxygène dissous, toutes les masses d'eaux sont classées en excellente qualité sauf les masses d'eau « Baie de Vilaine large » et « Loire large ».

Sur préconisation de l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne, des scénarios de variations réalistes des apports azotés et phosphorés de la Loire et de la Vilaine ont été réalisés (-20%, -50% et +20% des apports de la Loire et/ou de la Vilaine). Les différents scénarios semblent montrer que :

- les diatomées sont assez peu sensibles aux différentes diminutions des apports.
- une diminution des apports de la Vilaine seule n'a pratiquement aucun effet sur les maximums de diatomées et dinoflagellés.
- une diminution des apports de la Loire a un effet sensible sur le maximum de dinoflagellés dans toute la zone d'étude.
- l'effet d'abattement sur le maximum de dinoflagellés est accentué si la diminution des apports est effectuée sur la Loire et la Vilaine en même temps.
- une augmentation des apports de 20% semble avoir peu d'effets sur les diatomées mais un effet un peu plus sensible sur les dinoflagellés.
- une diminution des apports de 50% des apports de la Loire et de la Vilaine ne semble pas avoir un effet sensible sur les teneurs en oxygène dissous en Baie de Vilaine.
- la classification DCE pour les paramètres 'biomasse phytoplanctonique' et 'oxygène dissous' sur les différentes années est peu sensible aux variations des apports. Toutefois, les valeurs de percentiles 90 de chlorophylle varient sensiblement (jusqu'à 1 µg/L d'abattement dans la masse d'eau 'Baie de Vilaine côte' pour une diminution de 50% des apports de la Loire et de la Vilaine).

Références

- Chapelle, A. 1991, Modélisation d'un écosystème marin côtier soumis à l'eutrophisation, la baie de Vilaine (Sud Bretagne): étude du phytoplancton et du bilan en oxygène. Thèse Université Paris VI. 208 p.
- Chapelle, A., Lazure, P., Ménesguen, A., 1994. Modeling eutrophication events in a coastal ecosystem. *Est. Coast. Mar. Sci.* 39, 529–548.
- Daniel A., Soudant D., 2009. Évaluation DCE - Élément de qualité : bilan d'oxygène 2003-2008. R.INT.DIR/DYNECO/PELAGOS/09.02, 74 p.
- Daniel A., Soudant D., 2010. Évaluation DCE - Élément de qualité : nutriments. R.INT.DIR/DYNECO/PELAGOS/10.03, 109 p.
- Dussauze M., Menesguen A., 2008. Simulation de l'effet sur l'eutrophisation côtière bretonne de 3 scénarios de réduction des teneurs en nitrate et phosphate de chaque bassin versant breton et de la Loire. Rapport Ifremer pour la Région Bretagne et l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne, 160 p.
- 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-Jeanneret 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.
- Gohin, F., Trabelsi A., S., Danielou, MM., Bryère, P., Saulquin, B., 2010. Mise au point de méthodes pour la surveillance du phytoplancton. Convention Onema-Ifremer année 2009.
- 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.
- 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.
- Soudant D., C. Belin, 2010. Évaluation DCE - Élément de qualité : phytoplancton/Période 2003-2008. R.INT.DIR/DYNECO/VIGIES/10-03/DS, 199 p.