

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

Alain MÉNESGUEN

Date : 03/12/2007

R.INT.DYNECO/EB/07-03/AM

Ifremer

## Simulation de l'effet de 3 scénarios de réduction des teneurs de l'Elorn en nitrate sur l'eutrophisation de la Rade de Brest



Cliché Parrot-Coquil (BMO)



Rapport pour Brest-Métropole Océane (commande du Sage de l'Elorn du 22/08/2007 sur devis Ifremer DPS/CB 07-01)

## Fiche documentaire

<b>Numéro d'identification du rapport</b> : RST.DYNECO n° 07-03		<b>date de publication</b> : 03/12/2007
<b>Diffusion</b> : libre <input type="checkbox"/> restreinte: <input checked="" type="checkbox"/> interdite : <input type="checkbox"/>		<b>nombre de pages</b> : 12
<b>Validé par</b> : BACHER Cédric (responsable de programme Ifremer)		<b>bibliographie</b> : 4 références
		<b>illustration(s)</b> : 15 figures
		<b>langue du rapport</b> : français
<b>Titre et sous-titre du rapport</b> :		
Simulation de l'effet de 3 scénarios de réduction des teneurs de l'Elorn en nitrate sur l'eutrophisation de la Rade de Brest		
Contrat n° DPS/CB 07-01	Rapport intermédiaire <input type="checkbox"/>	Rapport définitif <input checked="" type="checkbox"/>
N°		
<b>Auteur(s) principal(aux)</b> : nom, prénom MÉNESGUEN Alain	<b>Organisme / Direction / Service, laboratoire</b> IFREMER	
Coordination - composition- édition:	Département « DYNamiques de l'Environnement CÔtier" Laboratoire « Ecologie Benthique »	
<b>Cadre de la recherche</b> :		
Programme : DYSCO	Convention :	
Projet : MODECOGEN	Autres (préciser) : Commande du Syndicat de l'Elorn et de la Rivière de Daoulas	
Campagne océanographique : (nom de campagne, année, nom du navire)		
<b>Résumé</b> :		
L'étude commandée par le Syndicat de l'Elorn et de la Rivière de Daoulas visait à déterminer, par modélisation mathématique, les effets escomptés de 3 scénarios de réduction de la teneur en nitrate de l'Elorn (teneurs imposées : 20, 15 et 10 mg/L NO <sub>3</sub> ) sur la réduction de la marée verte à ulve située dans l'anse du Moulin Blanc (Rade de Brest). Un modèle mathématique 3D des cycles de l'azote, du phosphore et du silicium en Rade de Brest a été appliqué à l'année météorologique de référence 2004 mais en prenant en compte les rejets actuels de la nouvelle STEP de Brest (année 2006). L'application de ce modèle a mis en évidence :		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• un faible effet des 3 scénarios sur l'intensité de la marée verte du Moulin Blanc en début d'été, mais toutefois un abaissement de la biomasse moyenne de juin à septembre, atteignant 20% dans le scénario 10 mg/L NO<sub>3</sub>. Un scénario théorique à 0 mg/L NO<sub>3</sub> ne fait pas disparaître la marée verte, qui, même amoindrie, persiste grâce aux apports de nitrate non-issus de l'Elorn.</li> <li>• un effet de réduction quasi proportionnel des 3 scénarios sur l'intensité des blooms de dinoflagellés créant des eaux colorées estivales dans l'estuaire de l'Elorn.</li> </ul>		
<b>Abstract</b> :		
This study commissioned by the Syndicat de l'Elorn et de la Rivière de Daoulas aimed at assessing on a mathematical modelling basis the impact of 3 scenarios of reduction of the loadings of Elorn river (imposed concentrations : 20, 15 et 10 mg/L NO <sub>3</sub> ) on the status of ulva mass proliferation in the Moulin Blanc cove (Bay of Brest). An ecological 3D model of N, P and Si cycling in the bay of Brest has been applied to a "reference situation": 2004 meteorological forcing combined to recent loadings of the new sewage plant. This model showed that:		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• the 3 reduction scenarios did not reduce significantly the early summer biomass of ulvae, but allowed to slightly reduce the subsequent summer and autumn levels of biomass (up to 20% reduction for 10 mg/L NO<sub>3</sub>). The theoretical total removal of nitrate in the Elorn river does not suppress the ulva gree tide, which maintains at a lower biomass feeding on nitrate brought by sources different from Elorn river.</li> <li>• every nitrate reduction scenario brings a quasi-proportional reduction of summer dinoflagellate bloom intensity in the Elorn estuary.</li> </ul>		
<b>Mots-clés</b> : Rade de Brest, Elorn, anse du Moulin Blanc, nitrate, marée verte, ulve, diatomée, dinoflagellé, modèle mathématique.		
<b>Keywords</b> : Bay of Brest, Elorn river, Moulin Blanc cove, nitrate, green tide, ulva, diatom, dinoflagellate, mathematical model.		
<b>Rédacteur</b>	<b>Vérificateur</b>	<b>Approbateur</b>
Nom : MÉNESGUEN Alain Date : 03/12/2007	Nom : DE ROECK Yann-Hervé Date : 03/12/2007	Nom : BACHER Cédric Date : 03/12/2007
Visa	Visa	Visa

## **I. Rappels préliminaires sur le modèle utilisé**

La présente étude, commandée par le Syndicat de l'Elorn et de la Rivière de Daoulas, vise à déterminer, par modélisation mathématique, les effets escomptés de 3 scénarios de réduction de la teneur en nitrate de l'Elorn (teneurs imposées : 20, 15 et 10 mg/L NO<sub>3</sub>) sur la réduction de la marée verte à ulve située dans l'anse du Moulin Blanc (Rade de Brest). Pour ce travail, l'Ifremer a donc réemployé le modèle écologique 3D spécialement bâti en 2001 (Leblond et al., 2001) pour répondre à une demande contractuelle de la CUB concernant plus généralement l'origine de l'azote alimentant la marée verte de la plage du Moulin Blanc. Ce modèle mathématique de la rade de Brest est spécifiquement adapté à l'étude précise de l'embouchure de l'Elorn (zone où la maille est carrée, de 150 m de côté), et permet non seulement une étude hydrodynamique, mais aussi une étude du devenir des rejets d'azote ou de phosphore dans cette zone.

En ce qui concerne la partie hydrodynamique, ce modèle fondé sur le code IFREMER SiAM3D (Cugier et Le Hir, 2002), reproduit une propagation de marée validée par des mesures, en vive-eau comme en morte-eau, tant en terme d'élévation de la surface que de champ de vitesses, ainsi que les panaches de dessalure de l'Elorn et de l'Aulne variant selon les cycles vive-eau morte-eau, avec stratification en morte-eau et colonne d'eau quasi-homogène en vive-eau.

En ce qui concerne la partie biogéochimique, ce modèle a initialement été validé sur l'année 1999 grâce aux mesures disponibles, de façon à reproduire sur l'ensemble de la Rade de Brest les deux grandes formes d'algues éventuellement impliquées dans les phénomènes d'eutrophisation : le phytoplancton (scindé en algues unicellulaires siliceuses : les diatomées, et non-siliceuses : les dinoflagellés) et les macrophytes chlorophycées (ulves en suspension et ulves en dépôt), dont on prend ainsi en compte l'éventuelle compétition pour l'utilisation de la lumière et des sels nutritifs. Ce modèle est capable de simuler des cycles spatio-temporels assez réalistes pour l'azote et le silicium, mais sous-estime apparemment les concentrations en phosphate dans l'estuaire de l'Elorn. En ce qui concerne les ulves, les processus pris en compte sont l'effet de la température et de la lumière sur la croissance, ainsi que la capacité de l'ulve à stocker temporairement dans ses tissus, et de façon indépendante, les nutriments azotés et phosphorés puisés dans l'eau ambiante. L'effet des nutriments sur la croissance est donc contrôlé par ces quotas variables en azote et en phosphore. Enfin, pour l'ulve, le modèle simule l'échange permanent, sous l'effet des courants et des vagues induites par le vent local, entre la phase en dépôt sur le fond et la phase remise en suspension dans l'eau, donc transportable. A partir d'un dépôt initial volontairement irréaliste de 10g/m<sup>2</sup> d'ulves sur tout le fond de la Rade, ce modèle est également capable de s'auto-organiser de façon réaliste, ne laissant subsister et proliférer les ulves que dans certaines anses du rivage, la plus favorable de toute la Rade s'avérant bien être l'anse du Moulin Blanc. L'ensemble du modèle et, plus précisément, sa composante « ulves », ont fait l'objet d'une publication scientifique détaillée (Méneguen et al., 2006).

Pour les besoins de cette étude, une année plus récente a été simulée, de façon à tenir compte de l'évolution des flux d'éléments nutritifs. L'année 2004 a été choisie car étant l'année la plus récente pour laquelle l'Ifremer disposait de l'ensemble des forçages nécessaires : débit et concentrations en nutriments des principales rivières, mesures de divers paramètres météorologiques faites à Guipavas par Météo-France. Pour prendre en compte la diminution importante des rejets de stations d'épuration brestoises intervenue en 2006, les rejets respectifs des STEP de la Zone Industrielle Portuaire et de Maison-Blanche ont été imposés à leurs valeurs annuelles moyennes estimées sur les mesures journalières d'auto-surveillance faites en 2006 par l'exploitant des stations. Enfin, par rapport au modèle précédemment publié, un flux permanent de phosphate allant du sédiment vers la colonne d'eau a été rajouté, de façon uniforme sur l'ensemble de la Rade et de valeur 300 μmol.m<sup>-2</sup>.j<sup>-1</sup>, en s'inspirant des mesures faites dans les eaux côtières bretonnes par Lerat (1990). Ceci permet de moins limiter les ulves en phosphore et d'obtenir des quotas en phosphore plus conformes aux mesures du CEVA. L'ensemble de ces forçages constituera ce qui sera appelé situation « actuelle » dans la suite du rapport.

Toutes les simulations ont été menées sous l'environnement logiciel ELISE, développé à l'IFREMER pour faciliter la mise en place et l'exploitation de modèles écologiques.

## **2. Caractérisation de l'état d'eutrophisation nominal simulé en 2004 dans l'estuaire de l'Elorn et la Rade-nord**

2004 est une année climatiquement plutôt sèche, avec des débits inférieurs à la moyenne (Elorn-aval à la station de jaugeage Plouédern :  $\sim 4.7 \text{ m}^3/\text{s}$  en 2004,  $\sim 5.5 \text{ m}^3/\text{s}$  en moyenne sur la période 1975-2005), l'insolation mensuelle est forte au printemps et en été : on peut donc considérer que le forçage climatique de 2004 est plutôt favorable à la prolifération des ulves dans l'anse du Moulin Blanc. Pour s'affranchir du biais introduit par la situation initiale de dépôt homogène sur toute la Rade de Brest, le modèle a tourné 2 ans d'affilée (forçage 2004 répété) ; seule la seconde année a été conservée, et on a vérifié sur le cas le plus potentiellement pour l'ulve (le cas où la concentration de l'Elorn en nitrate est imposée à zéro) que l'on retrouvait bien lors d'une troisième année soumise au forçage météorologique 2004 une évolution saisonnière des ulves du Moulin Blanc équivalente à celle de la seconde année.

### **2.1 Ulves dans l'anse du Moulin Blanc**

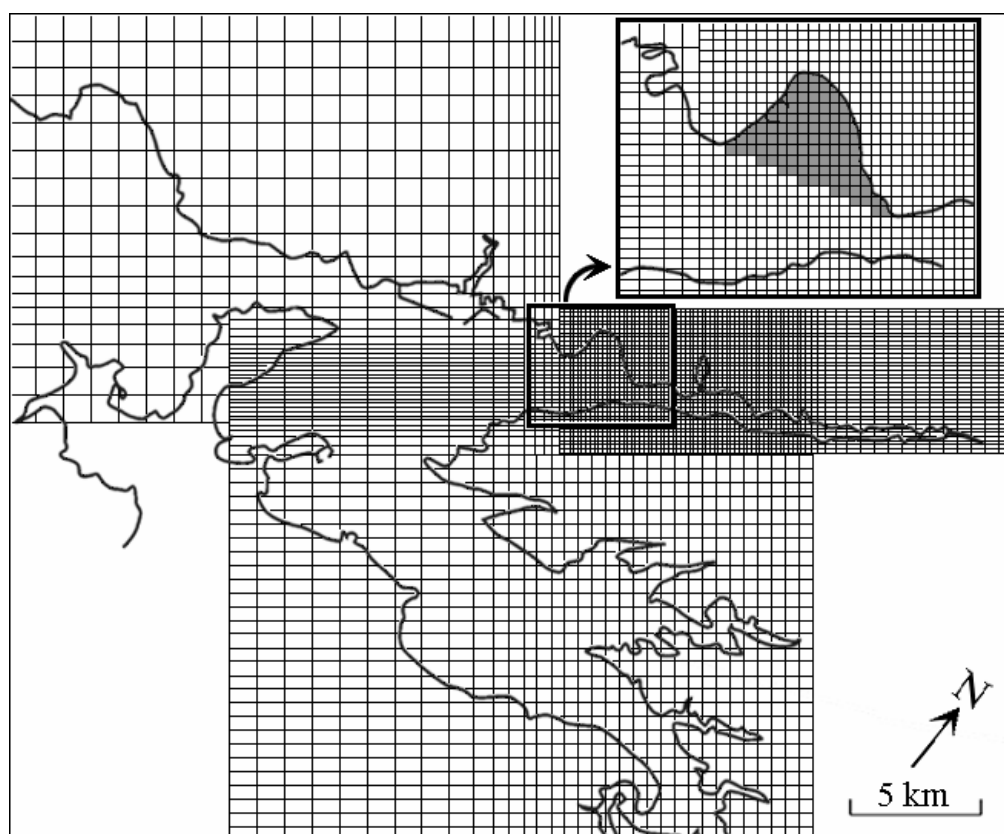


Figure 1. Maillage du modèle « Rade de Brest » ;  
en encart, la zone définie comme « Anse du Moulin-Blanc » dans la suite du texte.

Pour 2004, dans l'anse du Moulin Blanc (voir Figure 1), le modèle a donné une biomasse maximale d'ulves égale à 247 tonnes de poids frais égoutté, ce qui peut paraître un peu faible par rapport aux 400 tonnes estimées en juin 2000 par l'échantillonnage en plongée du CEVA, et plus proche de la biomasse hivernale d'environ 200 tonnes estimée par le CEVA en janvier 2005. Sans prétendre au réalisme des valeurs absolues de biomasse simulées, on se focalisera donc sur les effets visibles en valeur relative.

On voit sur les Figures 2 et 3 que les berges nord de l'estuaire de l'Elorn et de la baie de Daoulas rassemblent l'essentiel des sites de dépôt d'ulves, l'anse du Moulin Blanc étant le site le plus touché.

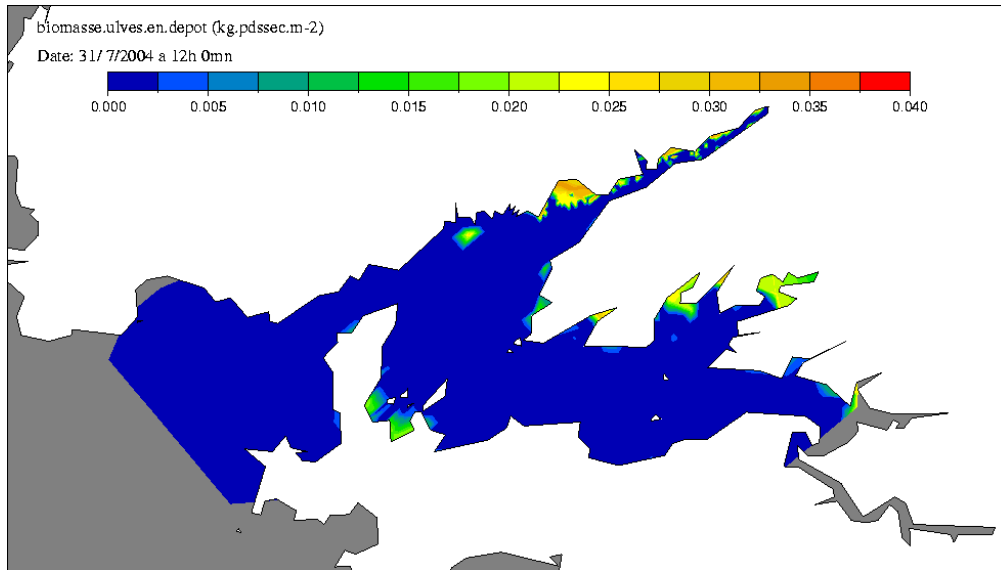


Figure 2. Répartition « actuelle » des ulves en dépôt lors du maximum de biomasse dans la zone du Moulin Blanc : vue générale de la Rade de Brest.

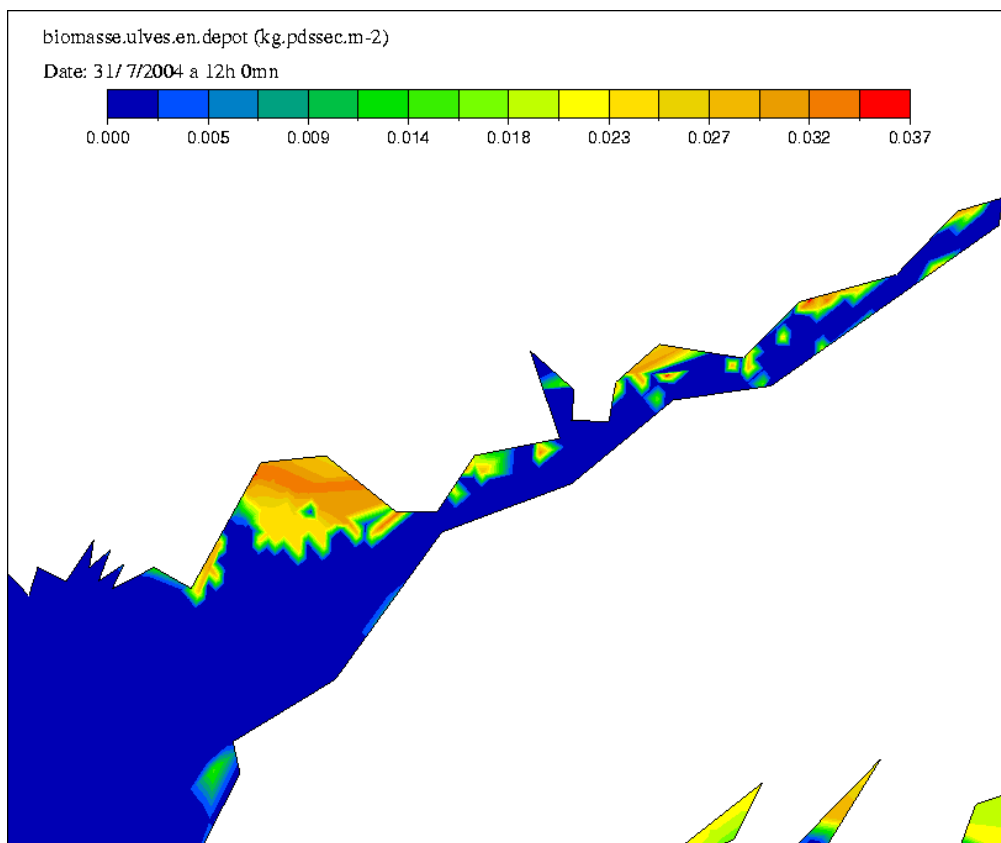


Figure 3. Répartition «actuelle» des ulves en dépôt lors du maximum de biomasse dans la zone du Moulin Blanc : zoom sur l'estuaire de l'Elorn.

Si l'on se focalise plus spécifiquement sur l'anse du Moulin Blanc définie par la Figure 1, on voit sur la Figure 4 que, dans le modèle, la biomasse totale d'ulves passe en 4 mois d'un minimum annuel de 100 tonnes (fin février) à un maximum annuel de 250 tonnes (fin juin). Les ulves se révèlent carencées d'abord en phosphore au printemps, puis en azote de juillet à octobre.

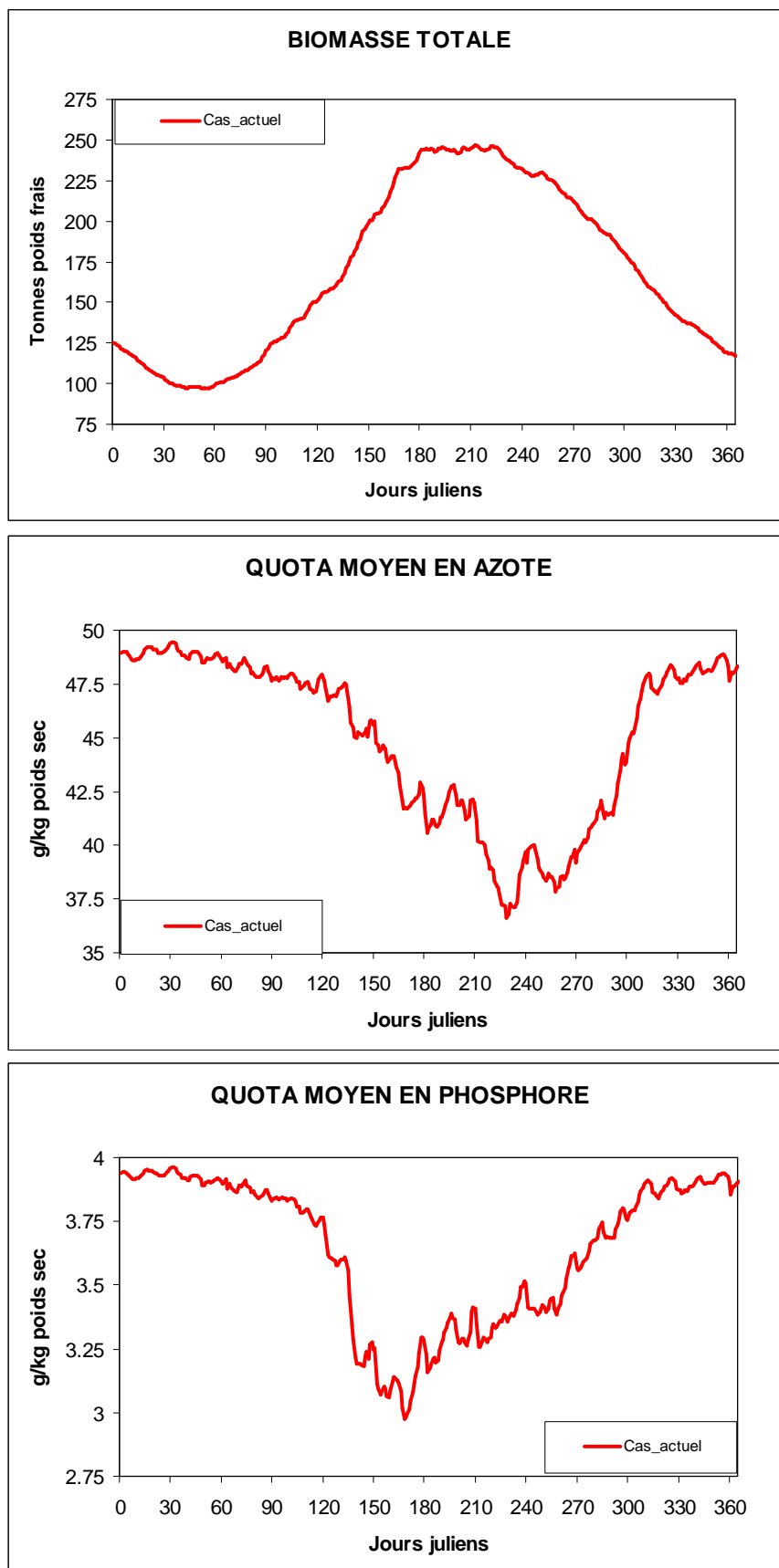


Figure 4. Evolution annuelle de la masse totale et des quotas moyens en azote et phosphore des ulves situées dans l'anse du Moulin Blanc

## 2.2 Phytoplancton siliceux (diatomées) en Rade de Brest

Comme le montre la Figure 5, la partie proximale des panaches de dilution de l'Aulne et de l'Elorn est très propice au développement saisonnier des diatomées. Mais la consommation rapide du silicate fait que l'effet fertilisant des 2 fleuves ne se fait plus sentir dès le centre de la rade. On notera les valeurs élevées ( $>30 \mu\text{mol/L N}$ , donc  $>30 \mu\text{g/L}$  de chlorophylle) simulées dans l'Elorn, en amont du pont de l'Iroise, qui sont franchement caractéristiques d'une eutrophisation de l'estuaire de l'Elorn. Ceci se vérifie sur l'évolution temporelle des diatomées dans la zone du pont de l'Iroise (voir Figure 6), où se succèdent, du printemps à l'automne, des blooms importants coïncidant avec les marées de mortes eaux. L'évolution concomitante des diatomées au centre de la rade, donnée à titre de comparaison, montre la nette diminution de la concentration en diatomées dès après le bloom printanier d'avril-mai, classique en mer côtière non-eutrophisée.

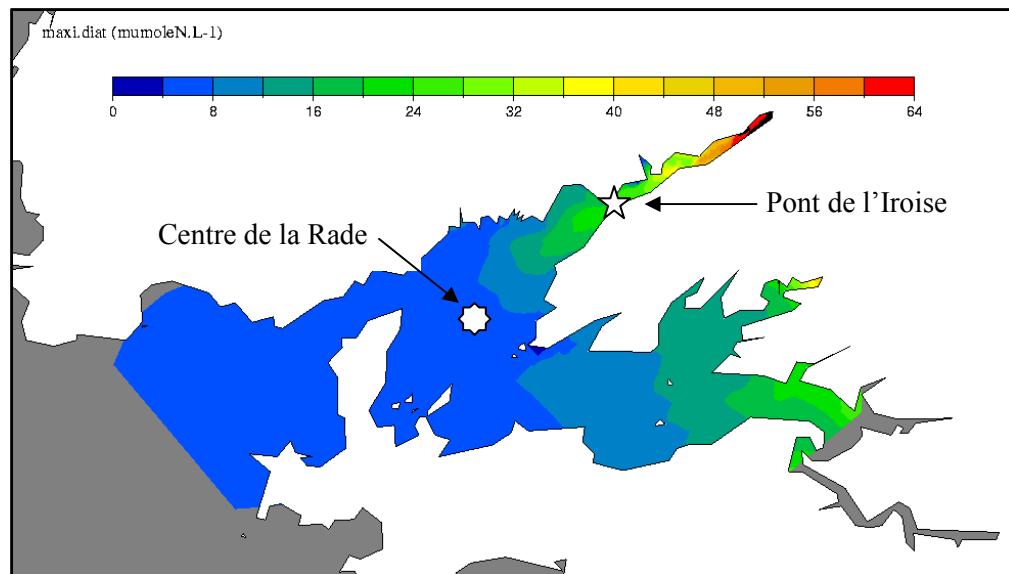


Figure 5. Carte du maximum annuel de **diatomées** en Rade de Brest.

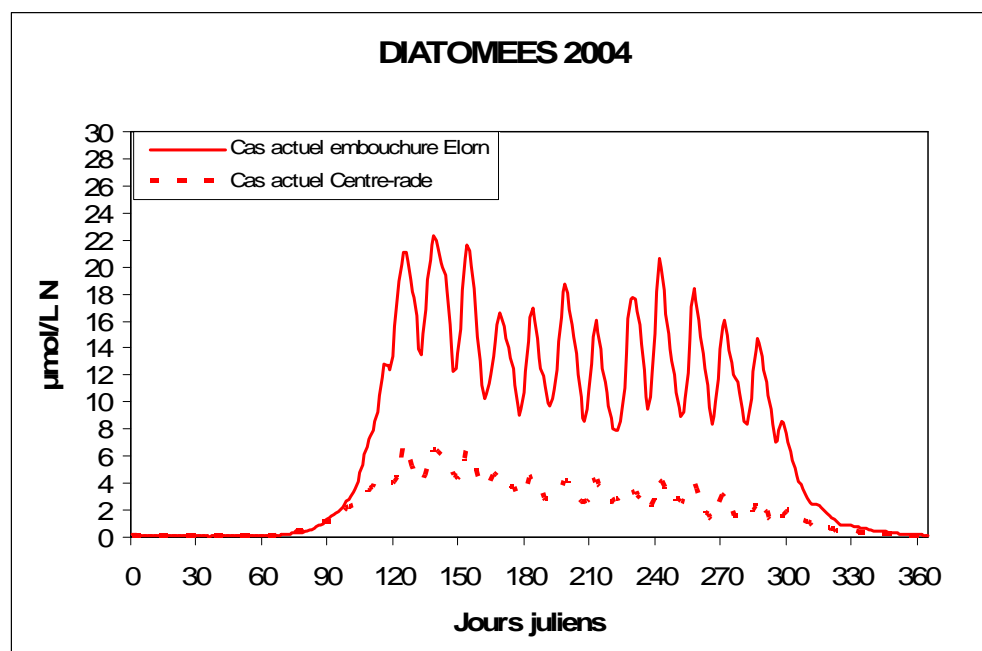


Figure 6. Evolution annuelle de la concentration en **diatomées** dans le chenal de l'Elorn au niveau du Pont de l'Iroise (en continu) et au centre de la Rade de Brest (en tiretés).

### 2.3 Phytoplancton non-siliceux (dinoflagellés) en Rade de Brest

Pour les dinoflagellés, la Figure 7 montre une distribution légèrement différente de celle des diatomées. L'estuaire de l'Elorn reste un site très favorable au développement des dinoflagellés, mais celui de l'Aulne ne l'est pas spécialement ; par contre, la baie de Daoulas apparaît comme le site le plus favorable au développement estival des dinoflagellés : ceci est dû à la conjonction d'un certain confinement physique et d'un enrichissement très prononcé en azote. La Figure 8 montre bien la spécificité estivale des dinoflagellés, avec un bloom plus intense dans l'Elorn qu'au centre de la rade.

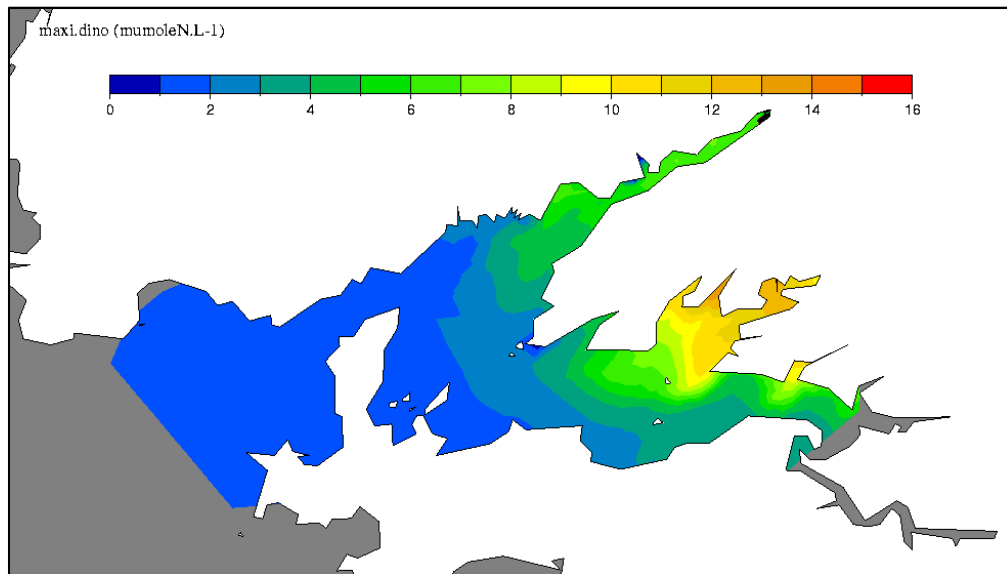


Figure 7. Carte du maximum annuel de **dinoflagellés** en Rade de Brest

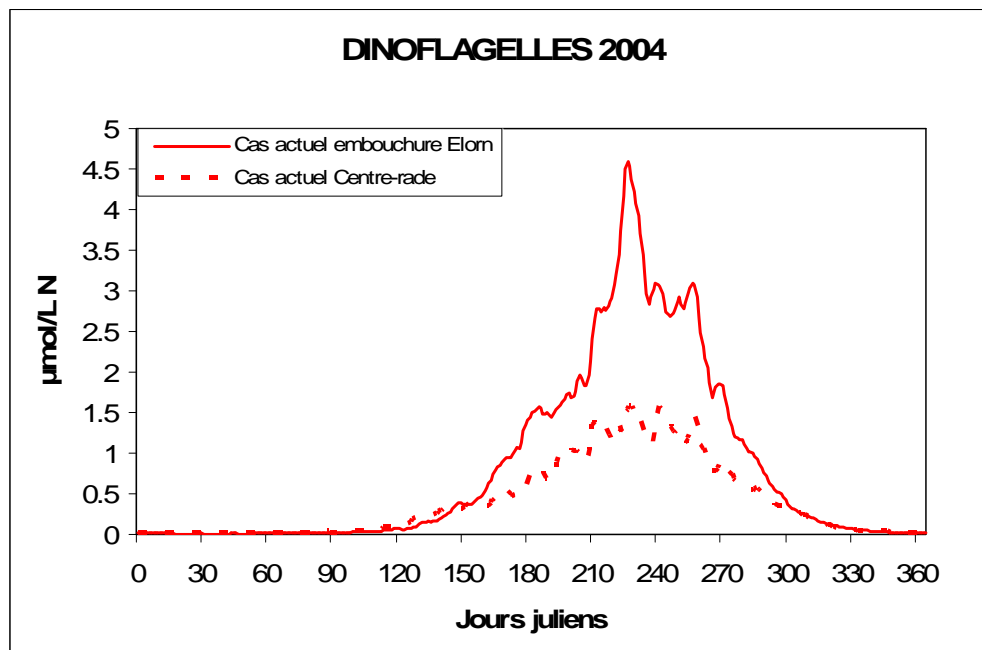


Figure 8. Evolution annuelle de la concentration en **dinoflagellés** dans le chenal de l'Elorn au niveau du Pont de l'Iroise (en continu) et au centre de la Rade de Brest (en tiretés).



### 3. Effets de scénarios de réduction du nitrate dans l'Elorn sur l'état d'eutrophisation simulé dans l'estuaire de l'Elorn et la Rade-nord

Quatre scénarios de réduction du nitrate dans l'Elorn ont été simulés : les concentrations dans l'Elorn ont été considérées comme constantes au cours de l'année, avec les valeurs respectives de 20, 15, 10 et 0 mg/L NO<sub>3</sub>.

#### 3.1 Ulves dans l'anse du Moulin Blanc

Comme le montre la Figure 9, aucune de ces réductions ne parvient à diminuer l'emprise de la marée verte dans l'anse du Moulin Blanc.

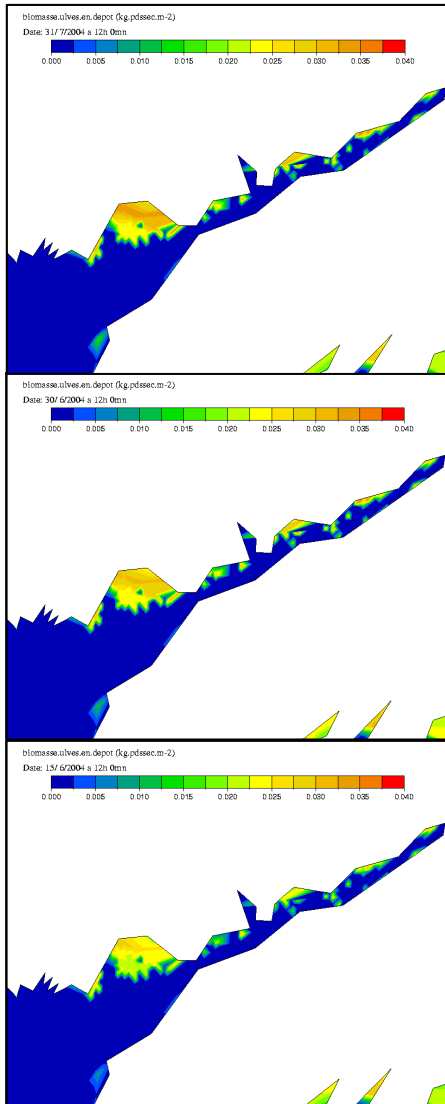


Figure 9.  
Répartition des ulves en dépôt lors du maximum de biomasse dans la zone du Moulin Blanc : en haut, situation «actuelle» ; au centre, situation pour [NO<sub>3</sub>]<sub>Elorn</sub>=15 mg/L ; en bas, situation pour [NO<sub>3</sub>]<sub>Elorn</sub>=0 mg/L.

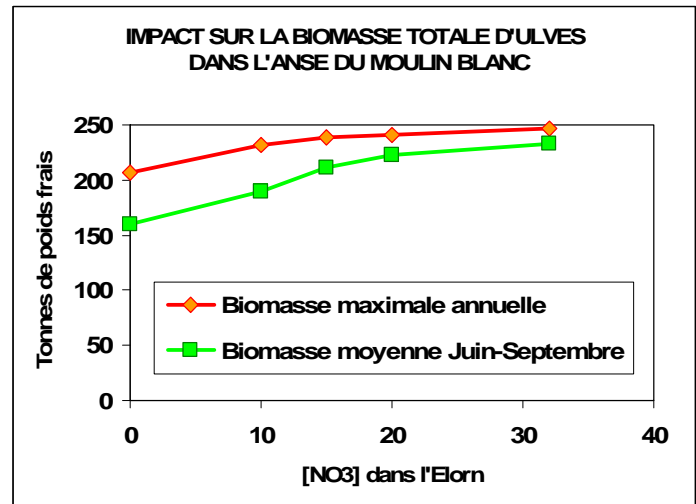


Figure 10.  
Impact du baïssement de la teneur de l'Elorn en nitrate sur la marée verte du Moulin Blanc.

La Figure 11 montre cependant que dès qu'on abaisse la concentration de nitrate dans l'Elorn à 15 mg/L ou moins, on observe un raccourcissement du plateau estival de biomasse. Mais la Figure 10 montre que seuls les scénarios [NO<sub>3</sub>]<sub>Elorn</sub> ≤ 10 mg/L parviendraient à faire baisser sensiblement la biomasse estivale. A noter que même la concentration nulle, purement théorique puisqu'on estime à au moins 1,5 mg/L NO<sub>3</sub> la teneur naturelle «pristine» des rivières européennes, ne parvient pas à éradiquer la marée verte, qui se maintient grâce aux apports d'azote inorganique dissous des sources plus distantes (Aulne, Daoulas, STEP de la ZIP...). Plus la teneur de l'Elorn en nitrate est basse, plus les ulves sont franchement et longtemps appauvries en azote, et moins longtemps dure leur carence en phosphore.

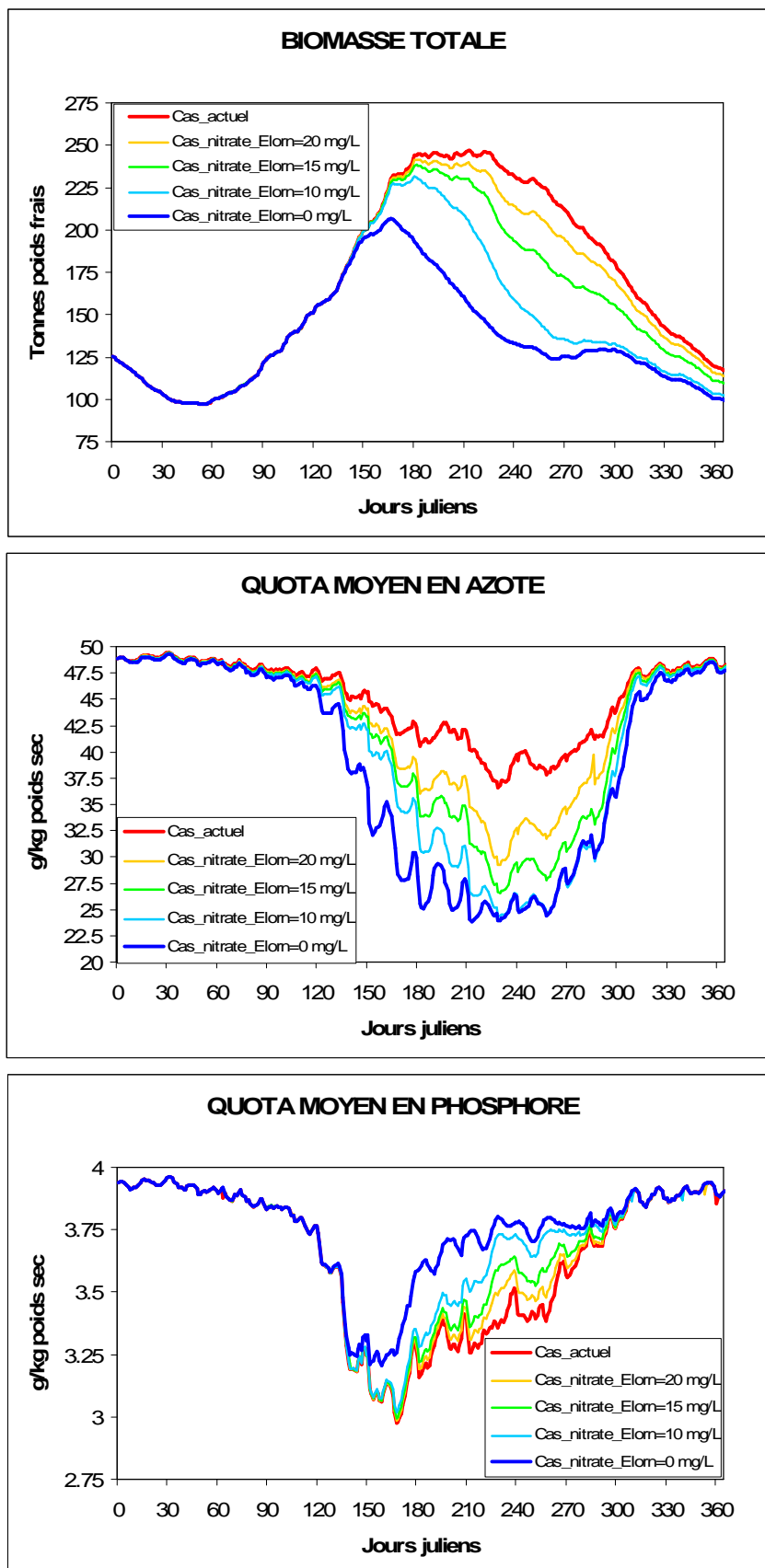


Figure 11. Evolution annuelle de la masse totale et des quotas moyens en azote et phosphore des ulves situées dans l'anse du Moulin Blanc sous différents scénarios de nitrate dans l'Elom.

### 3.2 Phytoplancton siliceux (diatomées) en Rade de Brest

Tant la Figure 12 que la Figure 13 montrent que ce n'est pas le nitrate de l'Elorn qui contrôle la biomasse de diatomées dans la rade nord-est : c'est le silicate. Seule la suppression totale du nitrate dans l'Elorn parvient à diminuer la hauteur des blooms estivaux de mortes eaux au niveau du Pont de l'Iroise, sans affecter ce qui se passe au centre de la rade.

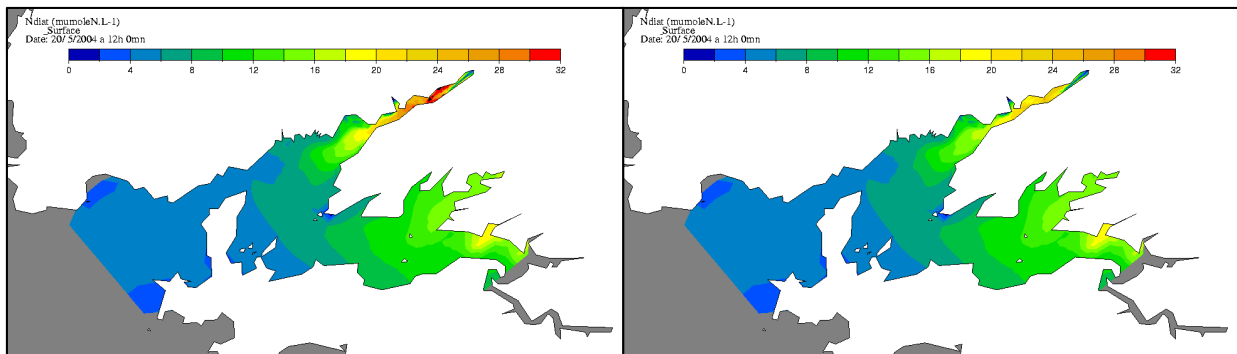


Figure 12. Carte du maximum annuel de **diatomées** en Rade de Brest ; à gauche, situation «actuelle» ; à droite, situation pour  $[\text{NO}_3]_{\text{Elorn}}=0$  mg/L.

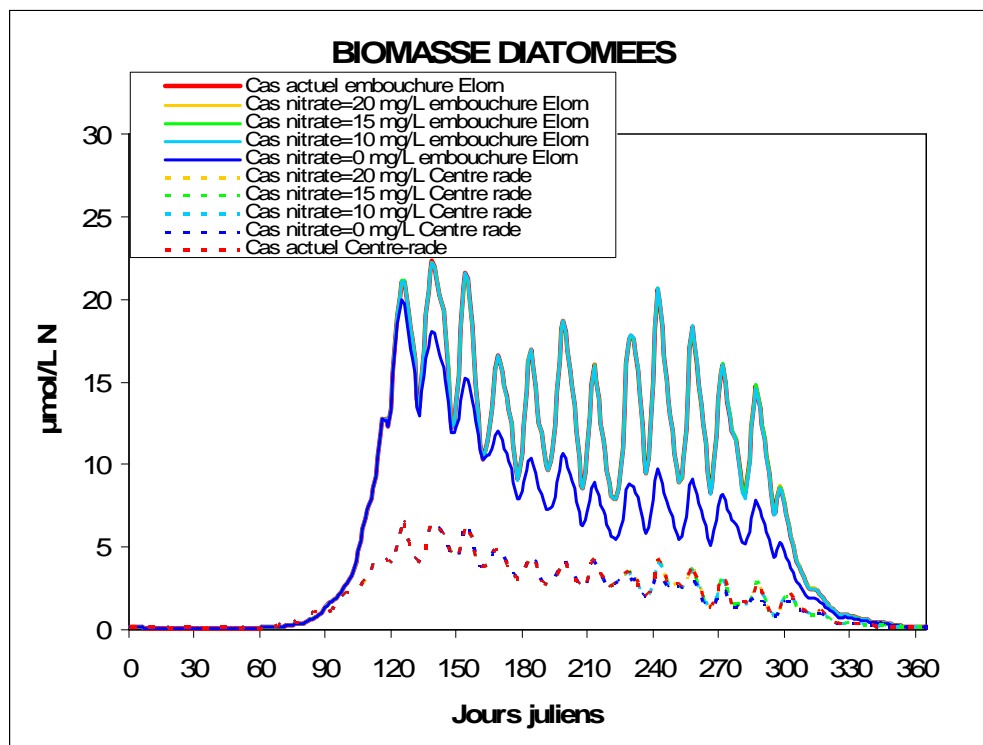


Figure 13. Evolution annuelle de la concentration en **diatomées** dans le chenal de l'Elorn au niveau du Pont de l'Iroise (en continu) et au centre de la Rade de Brest (en tiretés), sous différents scénarios de nitrate dans l'Elorn.

*(Les courbes de tous les scénarios se recouvrent, sauf celle correspondant à  $\text{NO}_3=0$  dans l'Elorn)*

### 3.3 Phytoplancton non-siliceux (dinoflagellés) en Rade de Brest

Contrairement aux diatomées, les dinoflagellés sont très contrôlés par la teneur des eaux en sels azotés. Aussi, toute diminution de la teneur de l'Elorn en nitrate se révèle bénéfique (Figure 15), et la quasi-suppression du nitrate dans l'Elorn supprimerait les floraisons abondantes de dinoflagellés en été dans l'estuaire de l'Elorn (Figure 14).

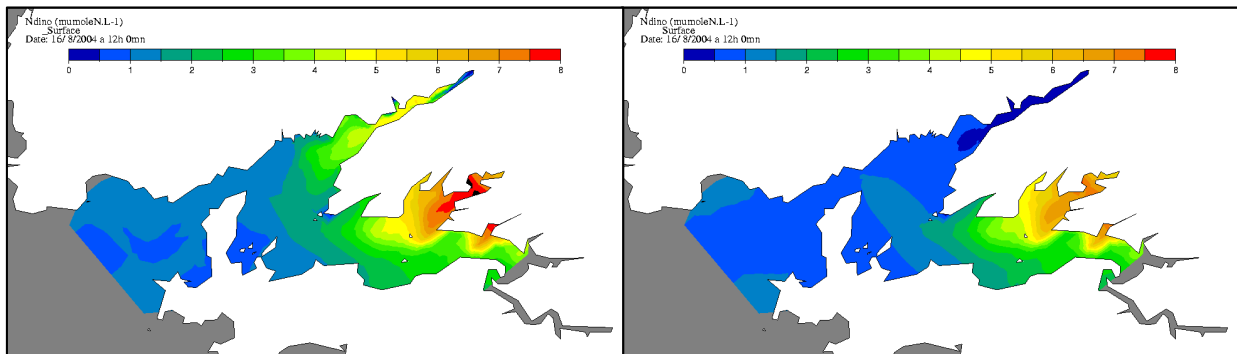


Figure 14. Carte du maximum annuel de **dinoflagellés** en Rade de Brest ; à gauche, situation «actuelle» ; à droite, situation pour  $[\text{NO}_3]_{\text{Elorn}}=0 \text{ mg/L}$ .

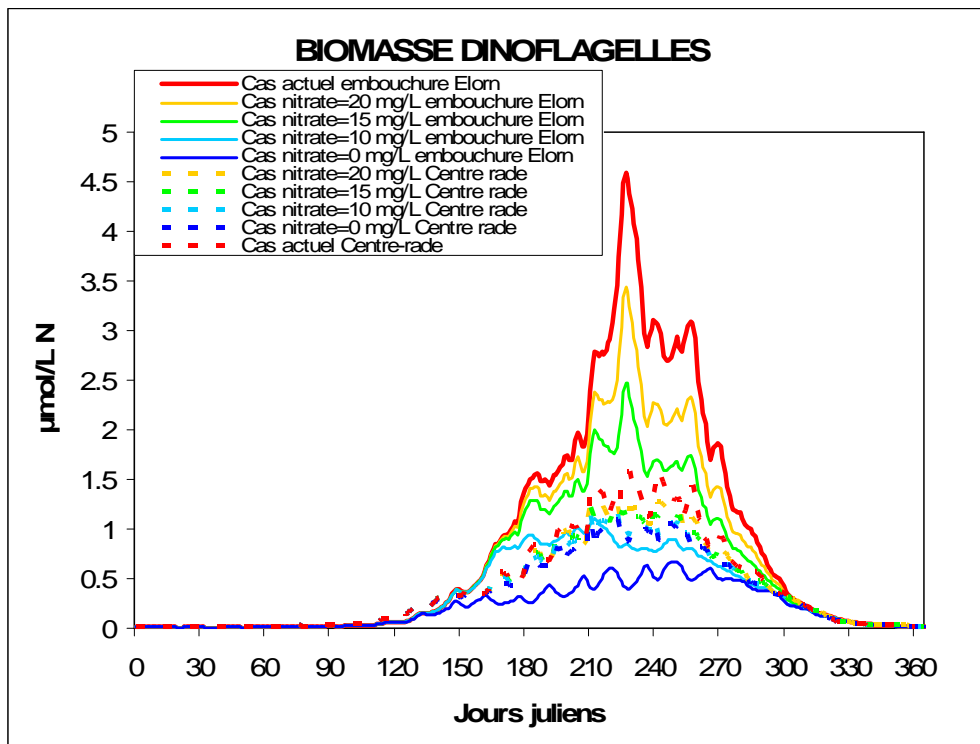


Figure 15. Evolution annuelle de la concentration en **dinoflagellés** dans le chenal de l'Elorn au niveau du Pont de l'Iroise (en continu) et au centre de la Rade de Brest (en tiretés), sous différents scénarios de nitrate dans l'Elorn.

#### **4. Conclusion et recommandations**

La teneur actuelle moyenne de l'Elorn en nitrate (32 mg/L NO<sub>3</sub>), sans être la plus forte des rivières de Bretagne, représente quand même 20 fois la teneur d'origine purement naturelle qu'on peut attribuer à ce genre de bassin versant tempéré. Il n'est donc pas surprenant que même une division par 2 de cette teneur actuelle ne parvienne pas à supprimer les phénomènes d'eutrophisation localisés, mais intenses, visibles depuis plusieurs décennies dans la zone estuarienne de l'Elorn. Cette étude montre que :

- il ne faut sans doute pas attendre grand-chose de visible si l'on ne parvient à abaisser la teneur de l'Elorn qu'à 20 mg/L NO<sub>3</sub>
- en raison de l'arrivée dans l'anse du Moulin-Blanc de nitrate issu d'autres sources que l'Elorn, certes moins concentrées, on ne peut escompter éradiquer la marée verte à ulves par un abaissement de la teneur en nitrate du seul Elorn. Même la rénovation de la STEP de la ZIP, qui a considérablement réduit les rejets azotés urbains à partir de 2006 et a donc augmenté la part de l'azote issu de l'Elorn dans les ulves, n'a pas suffi à tarir les sources d'azote autres que l'Elorn.
- en dessous de 15 mg/L NO<sub>3</sub>, l'abaissement de la teneur en nitrate du seul Elorn aura toutefois un effet de raccourcissement de la période fortement productive en ulves, diminuant ainsi les coûts de ramassage. Durant l'été, les ulves fortement carencées en azote peuvent se maintenir mais pas créer de nouvelle biomasse, ce qui rendrait un ramassage en début d'été très efficace.
- toute diminution de la teneur en nitrate du seul Elorn aura par contre des effets bénéfiques sur la diminution des blooms estivaux de dinoflagellés dans l'estuaire de l'Elorn, comme par exemple les eaux brun-rouge à *Prorocentrum micans* observées depuis plusieurs années au niveau du pont de l'Iroise au mois d'août ou septembre et qui, en raison de l'anoxie provoquée lors de leur décomposition, s'avèrent délétères pour les cultures de moules et d'huîtres.

#### **Bibliographie citée**

CUGIER, P., LE HIR, P., 2002. Development of a 3D hydrodynamical model for coastal ecosystem modelling. Application to the plume of the Seine River. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 55, 673-695.

LEBLOND I., MÉNESGUEN A., LE HIR P., CUGIER P., L'YAVANC J., 2001. Modélisation mathématique de la production micro- et macro-algale en Rade de Brest. Application à l'étude de scénarios de réduction de la marée verte à ulves de l'Anse du Moulin Blanc. Rapport IFREMER DEL/EC 01.03 pour la Communauté Urbaine de Brest, Janvier 2001, 122 p.

LERAT Y, 1990. Cycles annuels de la matière organique et des éléments nutritifs dans les sédiments d'un écosystème côtier (baie de Morlaix, France), interactions avec le compartiment pélagique. Thèse 3<sup>ème</sup> cycle, Univ. de Bretagne Occidentale, 212 p.

MÉNESGUEN A., CUGIER P., LEBLOND I., 2006. A new numerical technique for tracking chemical species in a multi-source, coastal ecosystem, applied to nitrogen causing *Ulva* blooms in the Bay of Brest (France). *Limnol. Oceanogr.*, 51, 591-601.

([http://aslo.org/lo/toc/vol\\_51/issue\\_1\\_part\\_2/0591.pdf](http://aslo.org/lo/toc/vol_51/issue_1_part_2/0591.pdf))