Vers une modélisation opérationnelle du devenir des nutriments dans la bande côtière bretonne

Towards operational modelling of the fate of nutrients in the coastal zone off Brittany (France)

CÉDRIC PÉNARD, ALAIN MÉNESGUEN, FRANCK DUMAS, JEAN-FRANÇOIS GUILLAUD

Département DYNECO, IFREMER Brest
Technopôle Brest-Iroise BP 70
29280 Plouzané

Tél : +33 (0)2 98 22 47 58, Fax : +33 (0)2 98 22 45 48, e-mail : cedric.penard@ifremer.fr

Eutrophication of French Brittany coastal shelf is a recurrent problem, more and more worrying. This eutrophication exhibits two main forms :— “green tides”, which are constituted by local proliferations and strandings of green macro-algae (particularly the *Ulva* species) in nitrogen-enriched areas.— phytoplanktonic blooms, which are responsible of coloured water events. Toxic species can be present (*Pseudonitzschia*, *Alexandrium*, *Dinophysis*), and induce banning of shellfish consumption. Several programs and directives compel authorities to initiate actions in order to diminish these problems. (WFD, OSPAR). This implies a better understanding of these phenomena. This work deals with the influences of the plumes of Loire, Vilaine and bay of Brest rivers (Elorn and Aulne) on the nitrate enrichment of the French Brittany coastal shelf. A 3D hydrodynamic model, MARS 3D, is used. The nitrate is considered as a conservative tracer, which is advected and dispersed by the model. Thanks to the introduction of 4 different tracers, we can distinctively follow the nitrate from Loire, Vilaine, Bay of Brest rivers and other rivers. The study shows that the Loire river influences the southern and western parts of coastal shelf of Brittany. The plume propagates up to the north of Iroise sea, and contributes for a large part to its enrichment. On the other hand, the high enrichment of the bay of Brest remains confined and is smoothly dispersed in Iroise sea, except during flood events : in this case, nitrate jets are pulsed into the Iroise sea.

I ■ INTRODUCTION

On considère que le territoire breton reçoit actuellement un excédent annuel de 117000 tonnes d'azote, ce qui, rapporté à la superficie des bassins versants bretons (30000 km²) correspondrait à un apport théorique de 3900 kg/km²/an d'azote. Ce surplus d'azote essentiellement d'origine agricole se retrouve dans les rivières et, finalement, dans la mer. Cet apport enrichit les eaux côtières et favorise le développement algal. On assiste à des proliférations macro-algales qui peuvent être amplifiées lorsqu'elles sont conjuguées à une topologie particulière et/ou à des phénomènes hydrodynamiques [Ménèsguen *et al.*, 2001].

En effet, depuis le début des années 1960, certains sites bretons sont touchés par des proliférations de macro-algues appartenant au genre *Ulva* [Ménèsguen et Piriou, 1995]. Le nombre de sites touchés et l'importance du phénomène ont augmenté ces dernières années, et ceci malgré les efforts entrepris par les collectivités pour diminuer les rejets de nutriments, notamment d'azote, dans les rivières bretonnes. Le Finistère et les Côtes d'Armor sont les départements les plus touchés. L'impact sur l'activité touristique est important ainsi que la gêne pour les conchyliculteurs et pêcheurs dont les engins de pêche sont encombrés par les algues.

A ces problèmes de marées vertes s'ajoutent des proliférations phytoplanctoniques d'espèces diverses, dont certaines peuvent être toxiques. Ces phénomènes peuvent être impor-

tants au printemps et en été. Des épisodes d'hypoxies estivales ont été observés certaines années en Baie de Vilaine. En juillet 1982, on a même constaté un événement d'anoxie exceptionnel qui a entraîné une forte mortalité de poissons et d'invertébrés benthiques [Merceron, 1987] [Chapelle *et al.*, 1994]. De plus, l'augmentation du nombre de cas d'interdiction de la vente et de la consommation de coquillages à cause de la prolifération de phytoplancton toxique provoque un impact non négligeable sur l'économie de la conchyliculture bretonne.

Plusieurs programmes ont pour objectif de diminuer ces problèmes (DCE, OSPAR, directive nitrate). La diminution de l'impact de l'eutrophisation sur les côtes bretonne passe par une meilleure compréhension des phénomènes mis en jeu. Cet article présente une approche de l'enrichissement de la bande côtière bretonne, en prenant appui sur les études précédentes [Ménèsguen *et al.*, 2002].

II ■ APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE ET OUTILS

● II.1 DESCRIPTION DU DOMAINE DE MODÉLISATION

Le domaine de modélisation couvre l'ensemble de la bande côtière bretonne. Il s'étend entre les latitudes 46,8°

et 49,3° nord et entre les longitudes 1,3° et 6° ouest. Un compromis doit être trouvé pour garder une bonne résolution spatiale sur un aussi grand domaine. La figure 1 présente l'emprise du domaine. Chaque maille carrée a un côté de 1 km. Il y a 360 x 273 mailles discrétisées sur 10 niveaux sigma. La bathymétrie provient d'une compilation de divers fichiers du SHOM (Service Hydrographique de la Marine) et de l'IFREMER.

Figure 1 : Emprise du domaine de modélisation.

● II.2 DESCRIPTION DU MODÈLE HYDRODYNAMIQUE

L'outil principal de ce travail est un modèle hydrodynamique en trois dimensions : MARS3D (3D hydrodynamical Model for Application at Regional Scale) développé à IFREMER [Lazure and Jegou, 1998]. C'est un modèle aux différences finies fondé sur la résolution des équations primitives (i.e. Navier Stokes sous les hypothèses de Boussinesq et d'hydrostaticité), inspiré du modèle de Blumberg et Mellor [1987] et basé sur la séparation des modes barotrope et barocline. Les conditions aux limites du modèle sont données par un modèle 2D MARS de plus grande emprise (il couvre toute la zone atlantique nord-ouest et la mer du nord) dont la maille fait 5 km de côté. Les forçages entre l'océan et l'atmosphère sont calculés à l'aide des analyses fournies par le modèle ARPEGE de Météo France (température de l'air, vent, pression, couverture nuageuse, humidité relative). Tous ces paramètres permettent de disposer de forçages météorologiques réalistes.

● II.3 APPORT DE NITRATE

Le modèle MARS3D permet de modéliser le transport et la diffusion de traceur, rendant possible la modélisation différenciée des rejets issus des rivières (eau douce et nutriments). Nous avons ainsi créé quatre traceurs conservatifs et indépendants pour modéliser le devenir du nitrate issu de quatre groupes de rivières : la Loire, la Vilaine, les rivières de la rade de Brest et le reste des rivières bretonnes. Ainsi les rejets de trente huit bassins versants bretons et normands sont pris en compte. Les données de débit sont issues de la banque nationale de données sur l'hydrométrie et l'hydrologie du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable [http://hydro.

Tableau 1. Liste des bassins versants pris en compte dans le modèle.

Bassin versant	Surface (km ²)	Débit moyen (m ³ /s)
Couesnon	1146,25	9,72
Rance	961,06	7,66
Arguenon	590,75	4,82
Gouessant	425,5	3,51
Gouet	251,88	2,95
Trioux	850,69	10,7
Jaudy	380,38	4,43
Leguer	488,31	8,11
Yar	84	1,28
Douron	112,81	1,91
Dourduff	77,44	1,19
Jarlot	228,62	4,49
Penze	205,5	4,09
Elorn	328,25	6,94
Aulne	1709,12	30,4
Goyen	149,44	2,11
Odet	590,37	11,4
Aven	198,62	3,69
Lapic	29,13	0,502
Kerharo	45,31	0,789
Laïta	982,37	18,3
Scorff	399,56	6,50
Blavet	2054,69	28,0
Loc'h	232	3,02
Vilaine	10432,62	63,9
Horn	141,56	2,37
Guillec	141,56	2,37
Guyoult	170,31	1,33
Urne	129,6	1,09
Mignonne	105,31	2,15
Moros	54,44	0,884
Aber wrac'h	128,88	2,22
Aber benoit	155,94	2,67
Aber ildut	138,94	2,38
Sélune	926,5	10,1
Sée	551,2	6,74
Ay	170	0,987
Sienne	585,8	8,31

eaufrance.fr/accueil.html]. Les données de concentration en nitrate ont été extraites du site internet de l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne [http://www.eau-loire-bretagne.fr], en prenant pour chaque rivière le point situé le plus en aval. Le tableau 1 présente la liste des bassins versants pris en compte dans les simulations présentées dans cet article, ainsi que leur débit moyen.

III ■ RÉSULTATS

● III.1 CARTE DE RÉPARTITION DE L'ENRICHISSEMENT DE LA BANDE CÔTIÈRE BRETONNE

En chaque maille du domaine, le modèle fournit la série temporelle de la concentration en nitrate sur l'année 2001.

En un point donné de la zone, si on calcule chaque jour la moyenne de la concentration en nitrate sur la colonne d'eau (figure 2.a), la série temporelle obtenue peut être ordonnée par ordre croissant, de façon à construire la fonction de répartition des valeurs (figure 2.b), dont on déduit la médiane et les percentiles 10 et 90 tracés sur les figures 3 à 5.

Ces trois graphiques nous permettent de visualiser l'extension de l'enrichissement en nitrate sur l'année 2001. La carte représentant la médiane montre les concentrations en nitrate atteintes au moins 50 % du temps de l'année. La carte des percentiles 10 représente les concentrations minimales dépassées 90 % de l'année. La carte des percentiles 90 donne une indication des concentrations maximales (concentrations dépassées uniquement 10 % du temps).

Figure 2 : Série temporelle (a) et fonction de répartition (b) pour un point situé dans l'estuaire de la Vilaine.

Figure 3 : Médiane ($\mu\text{mol/l}$).

Nous pouvons remarquer que la côte sud de la Bretagne est soumise à un enrichissement plus fort et plus étendu que le reste de la zone. La présence des deux grands fleuves que sont la Loire et la Vilaine explique cela. La figure 4 souligne

les fortes concentrations atteintes de manière brève lors des crues. L'ensemble de la côte bretonne est soumise à un enrichissement en nitrate d'au moins $2,5 \mu\text{mol/l}$ et peut dépasser les $10 \mu\text{mol/l}$ plus de la moitié du temps par endroit, notamment le long de la côte sud, dans les baies de Saint Briec et du Mont Saint Michel, ainsi que dans la rade de Brest.

● III.2 ETUDE DE L'INFLUENCE DES APPORTS DE NITRATE DE LA LOIRE

Le 10 février 2003, la Loire a atteint un débit de $3800 \text{ m}^3/\text{s}$. Sans être exceptionnelle, cette crue a eu une influence non négligeable sur l'enrichissement de la bande côtière sud-bretonne 4 jours après (figure 6). Les figures 7 et 8, montrent la concentration en nitrate 15 jours après la crue. La figure 7 prend en compte l'ensemble des rivières bretonnes tandis que la figure 10 représente la contribution de la Loire uniquement.

La comparaison de ces deux cartes montre l'influence significative de la Loire sur l'enrichissement de la bande côtière bretonne. Son panache longe la côte sud de la Bretagne et remonte jusqu'à la mer d'Iroise. Il peut même atteindre le nord de la Bretagne en fonction des vents et

Figure 4 : Percentile 90 ($\mu\text{mol/l}$). Figure 5 : Percentile 10 ($\mu\text{mol/l}$). Figure 6 : Concentration en nitrate total le 14/02/2003 ($\mu\text{mol/l}$). Figure 7 : Concentration en nitrate total le 25/02/2003 ($\mu\text{mol/l}$). Figure 8 : Concentration en nitrate issu de la Loire le 25/02/2003 ($\mu\text{mol/l}$).

des courants. Il est probable que cet azote se retrouve dans cette zone sous une autre forme que le nitrate. En effet, durant son transit depuis l'estuaire de la Loire, le nitrate aura certainement été consommé et reminéralisé plusieurs fois. Néanmoins, quelle que soit sa forme, cet azote en provenance de la Loire enrichit de manière non négligeable le sud et l'ouest de la Bretagne et va influencer la production primaire dans ces zones.

● III.3 ORIGINE DE L'ENRICHISSEMENT DE LA BAIE DE DOUARNENEZ ET LA DE RADE DE BREST

Nous avons effectué une moyenne des teneurs en nitrate issu des quatre groupes de rivières dans deux volumes distincts : la Baie de Douarnenez et la Rade de Brest. La figure 9 présente la situation géographique de la rade de Brest et de la Baie de Douarnenez, ainsi que la délimitation des deux zones. Les figures 10 et 11 montrent l'évolution et l'origine de l'enrichissement dans ces deux zones.

Figure 9 : Situation géographique et découpage de la Baie de Douarnenez et de la Rade de Brest.

Il faut tout d'abord remarquer les différences de concentrations en nitrate entre les deux zones, et surtout les différences d'origine. La Rade de Brest reçoit peu d'apports extérieurs en comparaison à la Baie de Douarnenez, où la majeure partie du nitrate provient de la Loire et de la Vilaine. Les concentrations en nitrate dans la Rade de Brest sont élevées en comparaison de celles atteintes en baie de Douarnenez. Toutefois, notre modèle ne met pas en évidence d'accumulation de nitrate dans la Rade de Brest. L'analyse des simulations montre que le nitrate de la Rade est diffusé progressivement en mer d'Iroise.

IV ■ DISCUSSION ET CONCLUSION

La prise en compte de l'influence des deux grands fleuves que sont la Loire et la Vilaine est indispensable dans l'étude de l'enrichissement de la bande côtière bretonne. Leur impact n'est pas négligeable et leurs apports influen-

cent de manière importante la production primaire dans cette zone. Ces faits ont déjà été mis en évidence dans diverses études : Guillaud *et al.* [2006] montre, par exemple, que la Loire est la principale source de nutriments dans la partie nord du Golfe de Gascogne.

Le Corre et Birrien [1985] avaient remarqué que la Baie de Douarnenez était soumise à des intrusions d'eaux dessalées en provenance du sud Bretagne. Ils avaient émis l'hypothèse que ces apports provenaient probablement de la Loire et de la Vilaine. Nous arrivons à la même conclusion dans cette étude. Les simulations effectuées montrent que le panache de la Loire s'étend jusqu'en mer d'Iroise et qu'il contribue à l'enrichissement de la Baie de Douarnenez.

La prochaine étape de cette étude est d'introduire le modèle biologique et la technique de traçage des éléments chimiques de Ménesguen *et al.* [2006], ainsi que la prise en compte des autres nutriments (phosphate, silicate, ammonium, matières organiques particulaires et dissoutes). Nous pourrions ainsi étudier l'impact de l'enrichissement de la bande côtière bretonne sur la production primaire, et l'origine des apports qui contribuent aux phénomènes d'eutrophisation. Le but est de modéliser les zones touchées par les phénomènes d'eutrophisation et d'en comprendre les processus. Un des objectifs de cet outil est de visualiser l'impact de chaque rivière et de fixer une limite d'enrichissement pour chacune d'entre elles, donnée accessible uniquement par la modélisation. En effet, comme l'a montré Ménesguen [1999], il faut prendre en compte l'ensemble des processus physiques et biologiques pour comprendre et appréhender le fonctionnement de certaines zones. Dans certains cas, la dynamique est complexe et seule la modélisation permet de mieux identifier les processus mis en jeu. De plus, la prise en compte des autres nutriments est indispensable. Le nitrate

Figure 10 : Evolution au cours des 2 années 2001-2002 des teneurs en nitrate de la Baie de Douarnenez ($\mu\text{mol/l}$) issu de diverses sources.

Figure 11 : Evolution au cours des deux années 2001-2002 des teneurs en nitrate de la Rade de Brest ($\mu\text{mol/l}$) issu de diverses sources.

est l'élément limitant pour les macro-algues, mais ne l'est pas toujours pour le phytoplancton, et la présence de certaines espèces pourrait être favorisée par des rapports N/Si et N/P particuliers.

V ■ RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] BLUMBERG A.F., MELLOR G.L. (1987). — A description of a three dimensional coastal circulation model. In : Three dimensional Coastal Ocean Models. *Coastal and Estuarine science*, 41-16.
- [2] CHAPPELLE A., LAZURE P., MÉNESGUEN A. (1994). — Modelling eutrophication events in a coastal ecosystem. Sensitivity analysis. *Estuarine. Coastal and Shelf Science*, 39 529-548.
- [3] GUILLAUD J.F., AMINOT A., DELMAS D., GOHIN F., LUNVEN M., HERBLAND A., LABRY C. (2006). — Trends of riverine nutrient inputs for thirty years in the northern Bay of Biscay, and schemes of phytoplankton responses. *International Symposium on Oceanography of the Bay of Biscay*, 11-14.
- [4] LAZURE P., JEGOU A.M. (1998). — 3D modelling of seasonal evolution of Loire and Gironde plumes on Biscay Bay continental shelf. *Oceanologica Acta*, 21, no. 2 165-177.
- [5] MÉNESGUEN A., CUGIER P., LEBLOND I. (2006). — A new numerical technique for tracking chemical species in a multisource, coastal ecosystem applied to nitrogen causing *Ulva* blooms in the Bay of Brest (France). *Limnology Oceanography*, 51(1, part 2) 591-601.
- [6] MÉNESGUEN A., GUILLAUD J.F., CUGIER P., LE HIR P., LEBLOND I., MORTREUX P., PEETERS P., MAILLARD X., LOYER S. (2002). — Synthèse sur les flux de nutriments apportés par les rivières bretonnes aux eaux côtières. Modélisation de leurs effets sur l'eutrophisation littorale. *Rapport IFREMER*, 119 p.
- [7] MÉNESGUEN A., AMINOT A., BELIN C., CHAPPELLE A., GUILLAUD J.F., JOANNY M., LEFEBVRE A., MERCERON M., PIRIOU J.Y., SOUCHU P. (2001). — L'eutrophisation des eaux marines et saumâtres en Europe, en particulier en France. *Rapport IFREMER*, 59 p.
- [8] MÉNESGUEN A., PIRIOU J.-Y. (1995). — Nitrogen loadings and macroalgal (*Ulva* sp.) mass accumulation in Brittany (France). *Ophelia*, 42 227-237.
- [9] MERCERON M. (1987). — Mortalités de poissons en baie de Vilaine (juillet 1982). Cause, mécanisme, proposition d'action. *Rapport IFREMER*, 99 p.