

Le Mor Braz sous l'influence de deux grands fleuves, la Loire et la Vilaine

Le Mor Braz est une baie relativement confinée, recevant des flux importants de sels nutritifs apportés par la Loire et la Vilaine en provenance de leurs bassins versants. C'est un des sites les plus sensibles de France aux effets de l'accumulation de ces nutriments. Le développement explosif des algues planctoniques qui en résulte peut se manifester par des phénomènes d'eaux brunes, d'eaux rouges, d'eaux vertes, une désoxygénation de l'eau ou le développement de phytoplancton toxique. Les progrès de l'océanographie permettent aujourd'hui de comprendre les enchaînements entre ces étapes de l'évolution des eaux littorales.

*Pierre Aurousseau
Alain Ménesguen
Yves Le Médec*

Le Mor Braz peut être considéré comme une unité marine partiellement fermée, du moins au sens hydrodynamique¹. Ses échanges avec l'océan Atlantique sont en effet limités par la configuration géographique entravant partiellement les courants. On peut le constater visuellement depuis certains sites de la presqu'île de Rhuys : Belle-Île-en-Mer vient s'intercaler dans l'espace laissé libre entre la pointe ouest de l'île de Houat et la pointe du Conguel (pointe sud de la presqu'île de Quiberon).

Pour illustrer ce caractère hydrodynamiquement fermé, on remarquera que le panache de la Vilaine et le panache de la Loire confluent la plupart du temps en mer pour former un panache unique. Le terme panache que l'on utilise pour décrire la forme que prennent les eaux influencées par les apports des fleuves provient de sa forme de plume. Remarquons qu'en anglais, on utilise le terme « plume » pour panache (*river plume*).

En l'absence de force extérieure, le panache d'un fleuve devrait s'éloigner de manière perpendiculaire à la côte. Mais les panaches de nos fleuves sont soumis à des forces extérieures, la plus puissante étant la force de Coriolis. Cette force due à la rotation de la terre est responsable d'une déviation des courants marins et des courants atmosphériques. Dans l'hémisphère nord, la force de Coriolis détourne le sens du courant vers la droite. Les panaches de la Loire et de la Vilaine sont ainsi détournés vers l'ouest-nord-ouest, le long de la côte sud de la Bretagne. Cependant cette dérive vers l'ouest-nord-ouest est contrariée par la présence de la presqu'île de Quiberon.

Cette notion « d'espace hydrodynamiquement fermé » est, depuis quelques années, devenue classique en océanographie. Historiquement elle s'appliquait

1. Dans cet article, nous admettrons comme définition du Mor Braz, l'étendue marine limitée à l'est par l'estuaire de la Vilaine, à l'ouest par la presqu'île de Quiberon et au sud par Belle-Île-en-Mer, les îles d'Houat, Hoedic, les Grands Cardinaux et le plateau du Four.

à des « espaces géographiquement fermés ». La lagune de Thau ou la lagune de Venise en constituent de bons exemples. Cette dernière est fermée par le cordon du Lido qui réduit fortement les échanges entre la lagune et la mer Adriatique. Une des avancées de la science océanographique durant ces dernières décennies est de comprendre que des espaces maritimes peuvent ne pas être fermés physiquement mais l'être hydrodynamiquement.

On a pensé pendant longtemps qu'on ne pouvait observer des espaces hydrodynamiquement fermés que dans des mers dépourvues de marées. L'existence de marées avec des marnages² plus ou moins importants semblait constituer une garantie de renouvellement des eaux et d'échanges importants avec l'océan plus au large. L'observation des marées vertes dans des baies largement ouvertes vers le large comme la baie de Saint-Brieuc ou la baie de Lannion et dans des secteurs de la côte bretonne soumis à des marnages élevés a perturbé les esprits pendant un certain temps. Comment peut-on avoir des eaux fortement concentrées en nitrates dans des baies largement ouvertes ? Comment se fait-il que les algues vertes produites ne soient pas rapidement évacuées vers le large dans de telles baies ? Il a fallu comprendre que ces baies ouvertes n'étaient pas le siège d'un fort renouvellement des eaux. Si à marée haute on jette un bouchon à la mer dans le fond de la baie de Saint-Brieuc, il va s'éloigner vers le large à marée descendante puis remonter très près de sa position d'origine à la marée haute suivante. Le chemin qui sépare la position de départ de la position d'arrivée au bout d'une période de marée, appelé « courant résiduel de marée », est très faible voire nul au fond de certaines baies. C'est ce qui explique pourquoi on peut avoir un espace maritime géographiquement ouvert mais plus ou moins hydrodynamiquement fermé.

D'autres sites dans le monde constituent d'excellents exemples d'espaces hydrodynamiquement fermés. On citera le golfe du Mexique fermé à l'est par la presqu'île de Floride, au sud par la presqu'île du Yucatan et vers le sud-est par les îles de Cuba, Haïti....

Le Mor Braz sous influence de deux grands bassins versants, la Loire et la Vilaine

La Loire et la Vilaine sont deux fleuves dont les exutoires sont peu éloignés l'un de l'autre. Ils sont alimentés par deux grands bassins versants. D'une superficie de 117 500 km², celui de la Loire est le plus grand bassin versant situé sur le territoire français. Il représente à lui seul approximativement 1/5 de la superficie de la France métropolitaine. Le bassin versant de la Vilaine est le plus grand bassin versant de Bretagne avec une superficie de 10 000 km². Il représente à lui seul environ 1/3 de la superficie de la Bretagne. Ces deux grands bassins versants ont obligatoirement un fort impact sur le fonctionnement du Mor Braz³.

2. Amplitude des marées.

3. Baudrier 2002.

Chacun de ces deux fleuves produit en mer un panache de dilution où les eaux marines sont influencées par les apports d'eau douce et de nutriments provenant des bassins versants. Ces nutriments que l'on appelle aussi « sels nutritifs » dans le langage courant sont constitués d'azote, de phosphore, de silice et d'autres éléments (calcium, potassium, etc.). On peut dire que ces fleuves nourrissent le Mor Braz. Sans ces apports, les eaux du Mor Braz seraient « oligotrophes », c'est à dire pauvres en nutriments, comme le sont naturellement les eaux marines du golfe de Gascogne. Pour fixer les idées, les teneurs en azote de l'océan oligotrophe sont de l'ordre de 1 micromole par litre d'azote sous forme nitrique (soit environ 0,06 mg/L de nitrate) à comparer à la teneur des fleuves Vilaine et Loire plutôt aux alentours de 500 micromoles par litre (soit 30 mg/L de nitrate⁴). Ceci signifie que nos deux fleuves ont des concentrations en nitrate environ 500 fois plus élevées que l'océan oligotrophe.

Consécutivement à la proximité entre les exutoires de la Loire et de la Vilaine, les panaches de ces deux fleuves confluent le plus souvent en mer pour ne former qu'un seul panache. Détourné vers la droite par la force de Coriolis, il vient lécher la côte sud de la presqu'île de Rhuys, puis la côte sud de la Bretagne, jusqu'au pays Bigouden (fig. 1). On constate que la presqu'île de Quiberon constitue un obstacle à la libre circulation du panache vers l'ouest. Le panache contourne la presqu'île et vient ainsi baigner les côtes de Belle-Île-en-Mer avec des concentrations de l'ordre de 15 micromoles d'azote. Ensuite, il vient recoller la côte sud de la Bretagne devant la rade de Lorient où il est de nouveau enrichi à des concentrations de l'ordre de 20 micromoles d'azote par litre par les apports du Blavet et du Scorff.

Un modèle numérique hydrodynamique (MARS3D, Ifremer) permet de mettre en évidence le rôle de la force de Coriolis et de la presqu'île de Quiberon. Cette simulation (fig. 2), faite par Morgan Dussauze (société Actimar à Brest) et Alain Ménesguen, a été réalisée en ne prenant en compte que la contribution de la Loire; elle montre qu'en absence de force de Coriolis, le panache de la Loire stagnerait à proximité de l'exutoire de la Loire en s'évasant de manière approximativement symétrique vers l'ouest et vers l'est. Dans la situation réelle, en présence de la force de Coriolis, le panache s'allonge vers l'ouest en direction de l'île de Groix et il y a un impact de la Loire, faible mais sensible, jusqu'en mer d'Iroise et en entrée de Manche⁵. Si l'on réalise une simulation en supprimant virtuellement la presqu'île de Quiberon, le panache va plus intensément vers l'ouest, il colle davantage à la côte sud de la Bretagne et vient moins baigner les côtes de Belle-Île-en-Mer. La côte sud-ouest de Belle-Île est moins sous l'influence du panache de la Loire.

4. Les concentrations en nitrate, silice, etc. sont habituellement exprimées en mg/L dans les eaux douces. Cependant, en océanographie, elles sont exprimées en micromoles par litre, expression permettant de rendre le résultat indépendant de la forme chimique. Ainsi, une eau qui contient 10 micromoles de N sous forme de nitrate contient aussi 10 micromoles de nitrate, or 10 micromoles de nitrate représentent 6,2 mg/L de nitrate et 10 micromoles de N représentent 1,4 mg/L d'azote.

5. Ménesguen, Dussauze 2015.

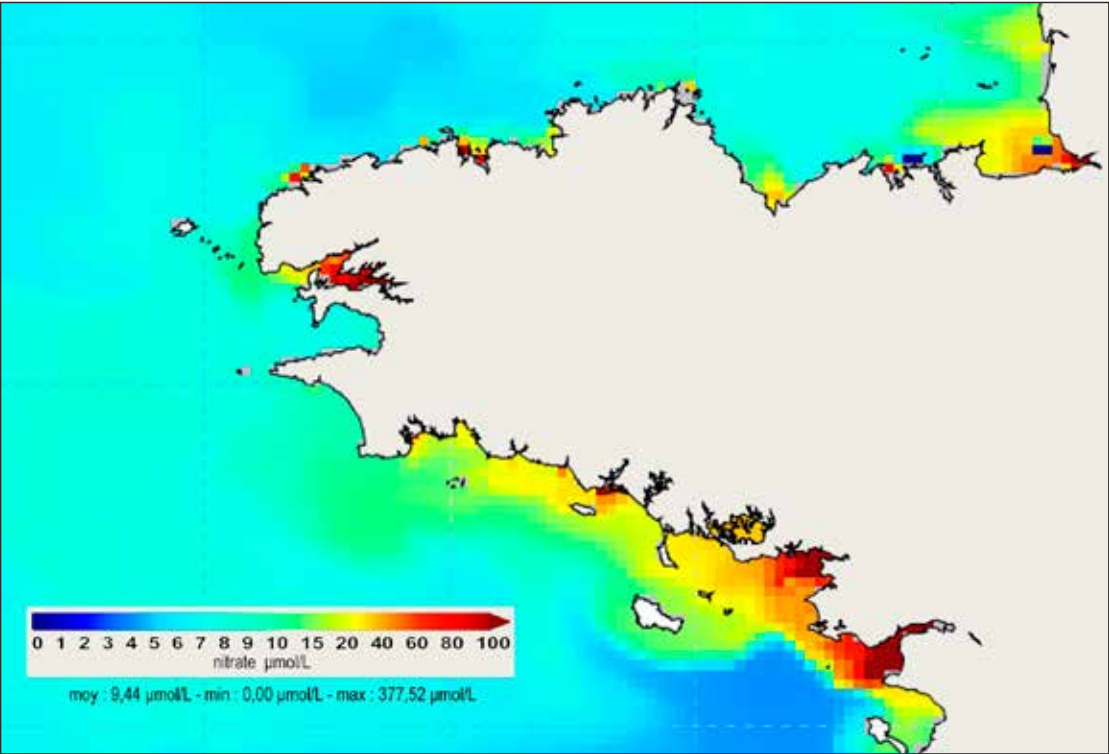
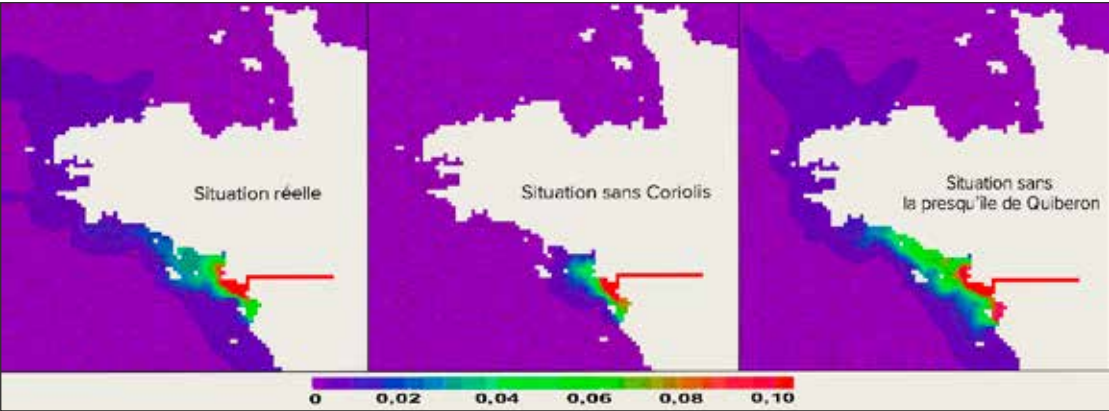


Fig. 1 - Image de la concentration en nitrate modélisée pour le 28 février 2010 (modèle ECO-MARS3D Bretagne previmer.org).

Fig. 2 - Simulation montrant le rôle de la force de Coriolis et de la presqu'île de Quiberon, situation du 2 décembre 2006 (Actimar Ifremer).



Bassin versant		Vilaine - 10 000 km ²			Loire - 117 500 km ²			total
Flux		total t N (x1000)	spécifique kg N/ha	part Vilaine	total t N (x1000)	spécifique kg N/ha	part Loire	t N (x1000)
min		4,3	4	13 %	29,0	2	87 %	33,3
max		38,9	39	14 %	244,9	21	86 %	283,7
moyenne		15,8	16	13 %	106,7	9	87 %	122,5
Années peu arrosées	1983-84	9,3	9	13 %	62,3	5	87 %	71,6
	1991-92	4,4	4	13 %	29,0	2	87 %	33,4
	1996-97	8,1	8	8 %	88,5	8	92 %	96,6
	2001-02	8,4	8	11 %	66,2	6	89 %	74,6
	2001-05	5,0	5	8 %	57,4	5	92 %	62,4
Années très arrosées	1987-88	26,8	27	12 %	194,4	17	88 %	221,2
	1993-94	29,4	29	11 %	244,9	21	89 %	274,4
	1994-95	30,4	30	13 %	208,3	18	87 %	238,8
	1998-88	25,5	25					
	2000-01	38,9	29	16 %	206,3	18	84 %	245,2
	2000-07	25,7	26					

Tab. 1 - Flux totaux et flux spécifiques d'azote sortant de la Vilaine et de la Loire.

Flux d'azote émanant des deux plus gros contributeurs

La Loire et la Vilaine sont les deux plus gros contributeurs au flux d'azote alimentant le Mor Braz. Ils écrasent les autres rivières par la superficie de leurs bassins versants.

Les flux sortants du bassin de la Vilaine varient d'une année à l'autre, de 4 291 tN (tonnes d'azote) pour l'année hydrologique 1988-89 à 38 850 tN pour l'année hydrologique 2000-01 exceptionnellement arrosée. La moyenne des flux sortants du bassin de la Vilaine se situe à 15 833 tN. Sur la période 1980-2012, on a observé plusieurs années très peu arrosées : 1983-84, 1991-92, 1996-97, 2001-02, 2004-05. Les années plus exceptionnellement arrosées ont été les années : 1987-88, 1993-94, 1994-95, 1998-99, 2000-01 et 2006-07. Dans le cas de la Vilaine, les flux varient d'un facteur 9 entre les années les moins arrosées (flux de 4 291 tN) et celles les plus arrosées (flux de 38 850 tN).

En ce qui concerne la Loire⁶, les flux sortants varient d'une année à l'autre de 29 022 tN pour l'année hydrologique 1991-92 à 244 924 tN pour l'année hydrologique 1993-94, année exceptionnellement arrosée. La moyenne des flux sortants du bassin de la Loire se situe à 106 660 tN. Après l'année hydrologique 1983-84 très peu arrosée avec un flux d'azote faible de 62 330 tN, on retrouve les mêmes années très peu arrosées que pour la Vilaine. Les années plus exceptionnellement arrosées ont été : 1987-88, 1993-94, 1994-95, 2000-01.

Le tableau 1 apporte des informations intéressantes : on retrouve les mêmes années peu arrosées dans le bassin de la Vilaine et de la Loire (1983-84,

6. Guillaud *et al.* 2008.

1991-92, 1996-97, 2001-02, 2004-05) et les mêmes années fortement arrosées (1987-88, 1993-94, 1994-95, 1998-99, 2000-2001). On voit aussi que la Vilaine représente selon les années de 8 à 16 % des apports totaux de nitrate, mais que les flux spécifiques par ha sont approximativement deux fois plus élevés dans le bassin de la Vilaine que dans le bassin de la Loire. Dans le cas de la Loire les flux varient d'un facteur (8,3) voisin de celui de la Vilaine entre les années les moins arrosées (flux de 29 022 tN) et les années les plus arrosées (flux de 244 924 tN).

On ne débattera pas ici de l'origine de ces flux de nitrate : on admet qu'en Bretagne, l'agriculture en est responsable en moyenne d'environ 95 %. Dans le cadre du Plan Algues Vertes, les territoires, c'est-à-dire les bassins versants ont dû établir des diagnostics qui ont démontré que les flux de nitrate étaient d'origine agricole de 92 à plus de 95 % selon les cas.

Consécutivement à ces apports provenant des fleuves et de leurs bassins versants, les eaux littorales sont enrichies d'un facteur 100 par rapport à l'oligotrophie à proximité des exutoires. Quand on s'éloigne des exutoires, les eaux enrichies en nitrate sont progressivement diluées dans l'eau de mer pour descendre à des concentrations de 50, puis 20, puis 10 micromoles par litre, voire moins.

Déséquilibre azote/silice

Pour analyser l'impact des apports des fleuves sur les eaux du Mor Braz, il ne convient pas seulement de prendre en compte l'effet des composés azotés mais de considérer aussi deux autres macronutriments⁷. On s'intéressera en premier lieu à la silice. Il pourrait paraître étrange qu'elle soit considérée comme un macronutriment. Cela provient d'une spécificité des premières étapes de la chaîne alimentaire dans les eaux douces et dans les eaux marines. Le plus souvent la première étape de la chaîne alimentaire est tenue dans les eaux par des micro-organismes tout à fait particuliers du phytoplancton⁸ : les diatomées. Elles ont la particularité d'être parmi les rares êtres vivants ayant des besoins substantiels en silice, du fait de leur squelette siliceux (fig. 3). Pour se développer, les diatomées ont besoin de silice (Si), d'azote (N) et de phosphore (P).

La silice présente dans les eaux douces provient de l'altération des roches et de la dégradation de nombreux constituants des sols et du sous-sol, notamment de l'action de l'eau (hydrolyse) sur le quartz présent dans de nombreuses roches et dans les constituants sableux et limoneux des sols. Elle provient aussi de l'hydrolyse de silicates comme les feldspaths, les micas et des argiles des sols. On considère que la silice se trouve dans l'eau sous forme d'acide orthosilicique de formule H_4SiO_4 .

On peut considérer en première approximation que l'action de l'homme dans les bassins versants n'a pas modifié les concentrations et les flux de silice dans la Vilaine et la Loire, même si ce raisonnement n'est pas acceptable pour tous

7. Nutriments nécessaires à la vie en quantités substantielles, qui se mesurent en mg/L dans les fleuves.

8. Le phytoplancton est l'ensemble des organismes microscopiques vivant en suspension dans l'eau et appartenant au règne végétal.

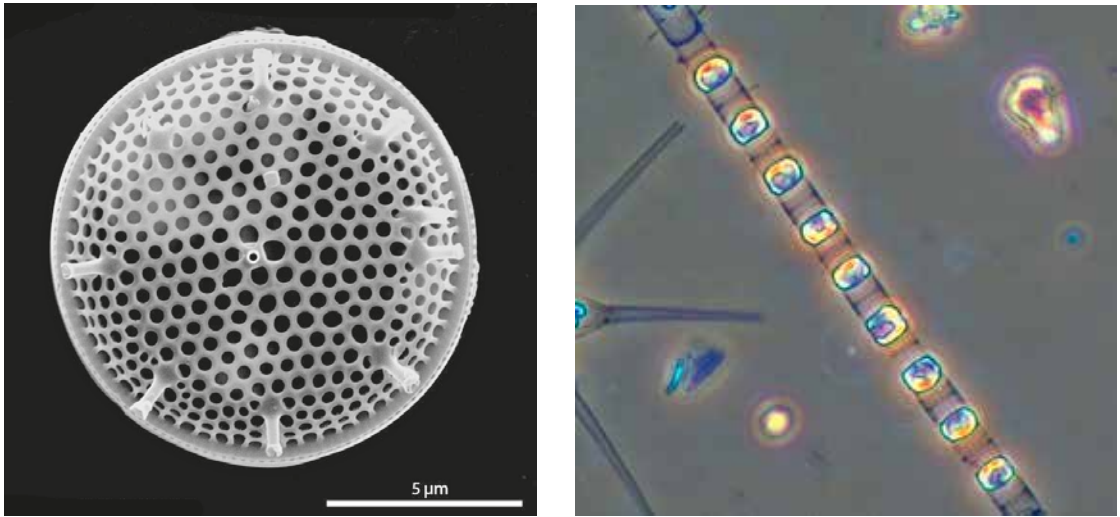


Fig. 3 - Squelette siliceux de diatomées marines du genre *Thalassiosira* sp. à gauche et *Skeletonema* sp. à droite (Ifremer).

les fleuves, car il existe bon nombre de fleuves et de rivières dont la partie aval du cours est lente, ou entravée par des barrages ou des écluses ayant un effet important sur les concentrations et les flux de silice sortants des bassins versants.

Pour la Vilaine, la concentration en silice est de l'ordre de 10 mg/L (exprimé en SiO_2), soit de l'ordre de 170 micromoles par litre. Cette concentration est assez stable tout au long de l'année et, en conséquence, les flux de silice sortant du bassin de la Vilaine dépendent principalement de la lame d'eau écoulee annuelle, donc du caractère plus ou moins pluvieux de l'année.

On observera que les concentrations en silice des eaux des fleuves varient d'un bassin à l'autre. Cette variation dépend de la capacité des constituants des sols et du sous-sol à libérer de la silice en solution par hydrolyse des constituants siliceux. Certains fleuves ont des concentrations en silice plus faibles que la Vilaine et la Loire, d'autres au contraire ont des concentrations plus élevées.

Depuis le début des années 1970, les concentrations en azote et en phosphore ont par contre beaucoup changé dans la Loire et la Vilaine. Les eaux des fleuves qui nourrissent le Mor Braz sont aujourd'hui plus riches en azote (sous forme nitrrique, ammoniacale et organique) qu'en silice. Les concentrations sont de 2 à 3 fois plus élevées en composés azotés qu'en silice (de 400 à 500 micromoles d'azote pour 150 à 200 micromoles de silice). Avant les années 1970, les concentrations en composés azotés étaient plus faibles qu'en silice (moins de 100 micromoles d'azote pour 150 à 200 micromoles de silice).

Les évolutions qui se sont produites dans les fleuves nourrissant le Mor Braz sont donc de deux types : une augmentation des concentrations et des flux de certains macronutriments comme l'azote et le phosphore⁹ et une inversion du

9. Introduire le rôle du phosphore dans le raisonnement compliquerait inutilement cet article. Les stocks de phosphore présents dans les sédiments peuvent intervenir dans les phénomènes d'eutrophisation, du moins tant que les profondeurs sont

rapport en atomes azote sur silice (N/Si), qui était antérieurement inférieur à 1 et à présent compris entre 2 et 3.

Bloom printanier primaire de diatomées

En région tempérée, la fin de l'automne, de l'hiver et le début du printemps correspondent aux périodes de l'année les plus pluvieuses : les débits des rivières sont plus importants et les flux de nutriments plus élevés. Les eaux littorales s'enrichissent alors en macronutriments (azote, silice, phosphore). L'eau étant froide et l'ensoleillement limité, le phytoplancton se développe peu et les apports de macronutriments provenant des bassins versants enrichissent les eaux littorales. Cet enrichissement commence à proximité des exutoires des fleuves mais progressivement il est diffusé vers le large sur des distances de plus en plus considérables (fig. 1).

À partir du printemps, l'ensoleillement augmente progressivement ainsi que la température des eaux littorales. Le phytoplancton commence à se multiplier dans un milieu marin plus riche en nutriments et avec des conditions physiques devenues favorables. Les premières espèces à proliférer sont des diatomées au squelette siliceux. On parle de « *floraison phytoplanctonique* », ou bien de « *développement phytoplanctonique* », ou encore de « *bloom phytoplanctonique* ». D'origine anglaise, le terme « *bloom* » s'est progressivement imposé dans le langage scientifique français, même s'il ne signifie rien de plus à l'origine que « *floraison* ». « *Bloom* » est de même racine que le mot allemand « *blume* » signifiant « *fleur* ». Ce terme a pris dans notre langue une connotation d'explosion, de floraison rapide, soudaine et massive pour décrire les proliférations intenses se produisant dans les eaux eutrophes¹⁰, qui auraient été mal décrites par les mots de « *floraison* » ou de « *prolifération* ».

Si les estuaires de la Loire et de la Vilaine n'étaient pas anormalement enrichis en nutriments, il se produirait bien des proliférations phytoplanctoniques primaires de diatomées au printemps, mais elles resteraient dans certaines limites, peut-être en dessous du seuil du bloom, fixé à 1 million de cellules par litre. Cependant, avec les apports massifs de nutriments, en particulier de composés azotés, au premier rang d'entre eux de nitrate, il se produit des blooms primaires de diatomées de plusieurs millions de cellules par litre se traduisant par des phénomènes d'eaux colorées.

Le bloom illustré en figure 4, observé le 14 mars 2015, couvrait une grande partie de l'estuaire de la Loire et de la Vilaine. Il n'était cependant pas observable depuis la côte où persistait une bande d'eau non affectée d'une largeur d'environ 1 km. Ces eaux brun noir ont été prélevées par Ifremer qui a identifié deux espèces de diatomées : *Skeletonema* sp. (1,4 million de cellules par litre) et *Thalassiosira* sp. (1,7 million de cellules par litre). La couleur sombre résulte de la présence dans les diatomées de deux types de pigments : des pigments verts chlorophylliens et des pigments rouges. Ce sont ces pigments

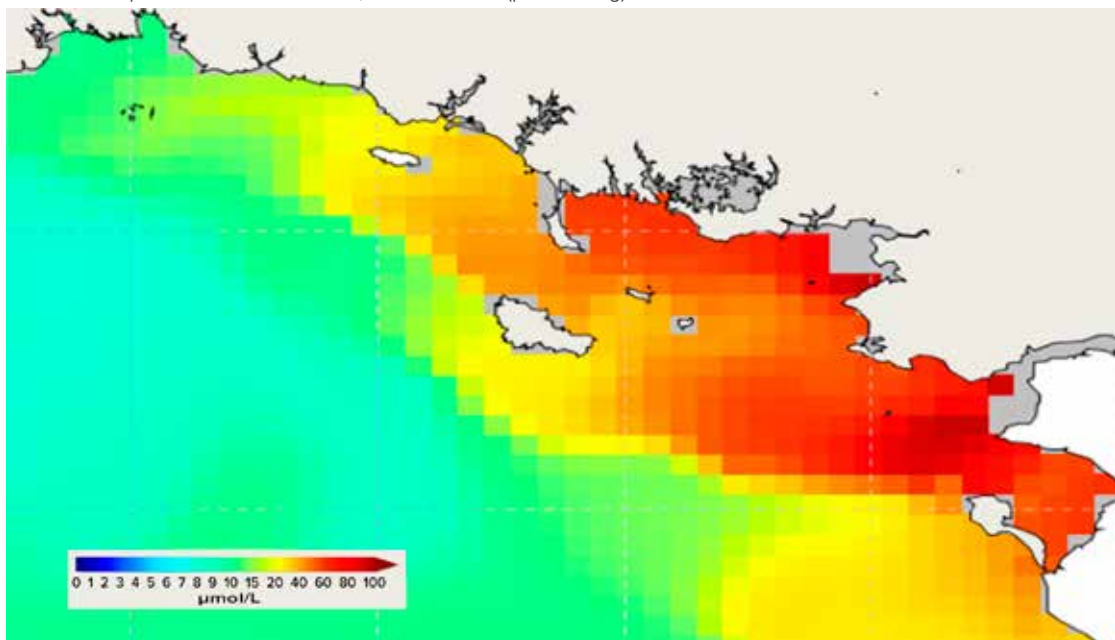
faibles. Par ailleurs, le recyclage du phosphore est très rapide dans les eaux marines et dans les eaux littorales. (Ménèsguen et Dion 2009)

10. Eaux enrichies en éléments nutritifs.



Figure 4 : Eaux brun-noir dues à un bloom de diatomées dans l'estuaire de la Vilaine, le 14 mars 2015 (Y. Le Médec).

Fig. 5 - Panache de nitrate simulé devant les estuaires de la Loire et de la Vilaine dans les jours qui ont précédé le bloom de diatomées responsable des eaux brunes, le 14 mars 2015 (previmer.org).



qui permettent aux diatomées — organismes autotrophes — de synthétiser de la matière organique à partir de macronutriments minéraux, en utilisant l'énergie de la photosynthèse.

Ce phénomène de mars 2015 s'explique par un enrichissement assez exceptionnel du Mor Bras, dans les jours précédents, par des nitrates apportés par la Loire et la Vilaine (fig. 5). Le bloom a duré plusieurs jours puis a été dispersé par les grandes marées d'équinoxe.

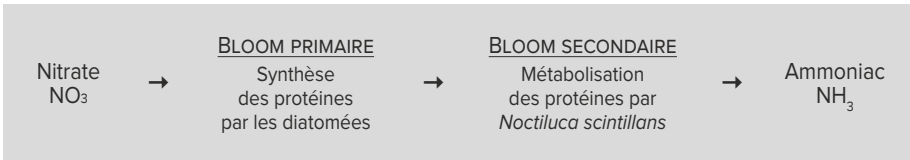
Quand les diatomées meurent (au bout de quelques jours) leurs squelettes plus lourds que l'eau sédimentent en formant une boue noire sur les fonds. Ce type de sédiment est connu des pêcheurs qui remontent parfois leurs dragues engluées dans une boue noire.

Des blooms primaires du même type avaient déjà été observés sur les mêmes sites dans les années antérieures, avec d'autres espèces comme *Cerataulina sp.*, et parfois des densités encore plus élevées, jusqu'à 7 millions de cellules par litre. Mais c'est la première fois que l'on dispose de photos aériennes de ces blooms spectaculaires.

Bloom secondaire de dinoflagellés rouges (*Noctiluca scintillans*)

Après le bloom primaire décrit précédemment, la matière organique des diatomées constitue un aliment pour des espèces hétérotrophes, c'est à dire non capables de synthétiser elles-mêmes de la matière organique et devant se nourrir de matière organique préexistante.

Ces espèces hétérotrophes vont proliférer à leur tour sur cette ressource alimentaire présente en grande quantité, en produisant un bloom que nous appellerons secondaire. Le Mor Braz est périodiquement le siège de blooms secondaires à *Noctiluca scintillans* responsable d'eaux rouges, aussi appelées marées rouges (fig. 6). De telles marées rouges à *Noctiluca scintillans* ont été observées ces dernières années : en été 2013 sur la côte sud de la presqu'île de Rhuys, en été 2014 à la Trinité et en été 2015 sur la côte sud de Belle-Île-en-Mer et devant Étel.



Noctiluca scintillans est un dinoflagellé, algue unicellulaire dépourvu de pigments chlorophylliens mais doté d'un flagelle. La digestion de la part protéique dont il se nourrit fournit de l'ammoniac, qui se concentre dans des vésicules ammoniacales à l'intérieur de la cellule. Le couple diatomées-*Noctiluca scintillans* assure à lui seul un cycle complet de synthèse puis métabolisation des protéines, partant de l'azote minéral (nitrate) et conduisant à l'azote ammoniacal.

Dans le bloom observé au large d'Étel, les effectifs de *Noctiluca scintillans* sont de l'ordre de 1 million de cellules par litre. On connaît de par le monde des blooms qui approchent les 2 millions de cellules par litre. Avec de tels effectifs, les teneurs en ammoniac peuvent monter jusqu'à 400 mg N par litre, ce qui n'est pas très éloigné de la teneur en azote de l'urine. *Noctiluca scintillans* est de ce fait considéré comme « harmful » (dangereux) par les Anglo-saxons.

Noctiluca scintillans a aussi la caractéristique d'être bioluminescent la nuit, quand l'eau est agitée, d'où l'origine de son nom *Noctiluca* pour « lumière dans la nuit » et *scintillans* pour « scintillant ». Les eaux lumineuses sont souvent observées la nuit dans le Mor Braz et dans le golfe du Morbihan (fig. 7).



Fig. 6 - Eaux rouges à *Noctiluca scintillans* devant Étel, le 27 mai 2015 (Y. Le Médec).

Fig. 7 - Eaux lumineuses à *Noctiluca scintillans* à l'île d'Houat au printemps 2015 (Laurent Laveder).





Fig. 8 - Bouée MOLIT dans l'estuaire de la Vilaine (Y. Le Médec).

Bloom secondaire de dinoflagellés verts

Comme nous l'avons vu, les eaux des fleuves sont aujourd'hui plus riches en composés azotés qu'en silice, dans un rapport compris entre 2 et 3. Ce déséquilibre fait que la silice est le facteur limitant du développement et de la prolifération des diatomées à la fin du bloom primaire. Le bloom de diatomées épuise en premier la silice et non les nitrates. Ceci est mis en évidence par les mesures de la bouée MOLIT placée par Ifremer¹¹ dans l'estuaire de la Vilaine (fig. 8). Le taux de silice dans l'eau de mer, qui atteint pendant l'hiver une concentration de l'ordre de 15 micromoles par litre, chute pour tendre vers zéro : c'est l'épuisement en silice. Par contre, comme l'azote est disponible en excès, le bloom de diatomées en consomme une partie, mais il n'y a pas épuisement. Il en résulte un déséquilibre croissant du rapport N/Si qui augmente pour atteindre 10, et jusqu'à 17 en 2003.

Le rapport N/Si mesuré par la bouée MOLIT à la fin de l'hiver est proche de celui mesuré dans les eaux douces, compris entre 2 et 3 (tab. 2). Par contre, compte tenu de la dilution par l'eau de mer, les concentrations mesurées par la bouée sont plus faibles que celles mesurées dans la Vilaine : pour la silice de l'ordre de 15 micromoles par litre à la bouée, pour 150 à 200 micromoles par litre dans la Vilaine, et pour le nitrate de 35 à 55 micromoles par litre à la bouée, pour 400 à 500 micromoles par litre dans la Vilaine. Le taux de dilution de l'eau provenant de la Vilaine est du même ordre de grandeur pour la silice et le nitrate, voisin de 10.

¹¹. Repécaud *et al.* 2009.

	Azote (N) µmole/L	Silice (Si) µmole/L	rapport N/Si
Eaux de la Vilaine - début année 1970	100	150 - 200	0,50 - 0,66
Eaux de la Vilaine - aujourd'hui	400 - 500	150 - 200	2,00 - 2,33
Mesure la bouée Molit	35 - 55	15	2,33 - 3,66

Tab. 2 - Déséquilibre des eaux douces et des eaux du Mor Braz. Dans les années 1970, les eaux étaient plus riches en silice qu'en azote avec un rapport N/Si inférieur à 1. Aujourd'hui, les eaux de la Vilaine et de l'estuaire sont plus riches en azote qu'en silice avec un rapport N/Si supérieur à 2 ou 3. Les eaux de l'estuaire mesurées par la bouée MOLIT ont le même rapport N/Si que celles de la Vilaine; elles résultent simplement d'une dilution d'un facteur 10 des eaux de la Vilaine par l'eau de mer.

L'eau épuisée en silice n'est plus propice au développement des diatomées mais les autres nutriments encore abondants, et notamment l'azote, vont permettre la prolifération d'espèces qui n'ont pas de besoin en silice. Parmi ces espèces dites opportunistes se trouvent couramment des dinoflagellés à croissance plus lente que les diatomées, par exemple *Lepidodinium chlorophorum*, une habitué du Mor Braz depuis quelques années. Sa richesse en chloroplastes et en chlorophylle lui donne une couleur verte soutenue, quasi fluorescente. Quand elle est présente avec de fortes concentrations, elle génère des eaux vertes assez habituelles dans le Mor Braz (fig. 9 et 10).

Sur la figure 10, on voit dans l'axe de l'estuaire de la Vilaine à marée basse les eaux turbides (troubles) contenant une importante quantité de matières en suspension qui ne laisse pas passer la lumière. En conséquence, le phytoplancton ne peut pas s'y développer. Par contre, de part et d'autre de l'axe de l'estuaire, avec des eaux moins turbides, les conditions sont favorables à la prolifération de *Lepidodinium chlorophorum* qui colore les eaux en vert.

Les eaux vertes à *Lepidodinium chlorophorum* sont observées pratiquement chaque année dans l'estuaire de la Vilaine, celui de la Loire et au-delà. Les populations de *Lepidodinium* se mesurent en millions de cellules par litre.

Quand le bloom de *Lepidodinium* se produit, les eaux de surface sont sursaturées en oxygène (c'est-à-dire que la quantité d'oxygène produite par photosynthèse par *Lepidodinium* dépasse la quantité maximale d'oxygène que l'eau peut contenir par simple dissolution physique). La bouée MOLIT a par exemple enregistré (fig. 11) les sursaturations en oxygène causées en surface par trois blooms entre début juin et fin juillet 2009, avec des teneurs en oxygène de l'ordre de 9,5 à 10 mg/l d'oxygène dissous alors que la teneur à saturation était de l'ordre de 7,5 – 8,0 mg/L.

Hypoxie et anoxie des eaux

Dès que l'eau est colorée, elle ne laisse passer la lumière solaire que sur une faible profondeur, ce qui plonge une grande partie des cellules de *Lepidodinium* dispersées sur la colonne d'eau dans l'obscurité permanente, donc dans l'incapacité de photosynthétiser et dans l'obligation de recourir à la respiration,



Fig. 9 - Eaux vertes dues à un bloom de *Lepidodinium chlorophorum* à l'embouchure de la Vilaine, le 3 juillet 2014 (Y. Le Médec)

Fig. 10 - Eaux vertes à *Lepidodinium chlorophorum* de part et d'autre de l'estuaire de la Vilaine, le 11 juillet 2015 (Y. Le Médec)



consommatrice d'oxygène, pour assurer les besoins énergétiques du métabolisme. Après avoir ainsi abaissé la teneur en oxygène des eaux de fond par leur respiration, les cellules de *Lepidodinium* meurent au bout de quelques jours, descendent dans la colonne d'eau et commencent à sédimenter. Les bactéries qui vont intervenir dans la métabolisation de cette matière organique abondante ont des besoins très importants en oxygène pour en assurer la reminéralisation.

On arrive alors à une situation paradoxale avec en surface des eaux saturées en oxygène et en profondeur des eaux appauvries en oxygène, on parle d'hypoxie de fond. Le niveau de l'anoxie, en dessous de 2 mg/L d'oxygène dissous, est parfois atteint quand les eaux sont insuffisamment riches en oxygène pour assurer la vie.

Quand l'hypoxie, éventuellement l'anoxie, s'installe assez progressivement, les animaux marins mobiles comme les poissons ressentent une souffrance physiologique et développent une stratégie d'évitement. Ils désertent ces eaux sans oxygène pour s'enfuir vers des eaux plus propices à la vie. Par

Fig. 11 - Mesures de la teneur en oxygène (mg/L) dans l'estuaire de la Vilaine par la bouée MOLIT au cours de l'année 2009 (Ifremer et previmer.org)

Sur ces graphiques les points bleus représentent la « teneur en oxygène à saturation », c'est-à-dire la teneur maximale en oxygène pouvant se dissoudre naturellement dans une eau de température et salinité données. Si la teneur en oxygène est inférieure à la teneur à saturation, on parle de sous-saturation; si elle est supérieure, on parle de sursaturation. La teneur à saturation décroît quand la température ou la salinité augmentent : par exemple en surface, elle décroît d'environ 9 mg/L d'oxygène vers le 15 mars jusqu'à 7,5 mg/L vers le 15 août, avec le réchauffement des eaux et leur plus forte salinité. L'état de sursaturation observée en surface pendant les mois de juin et juillet est le résultat d'une intense production d'oxygène due à l'activité photosynthétique du phytoplancton. Ce phytoplancton sédimente progressivement dans la colonne d'eau (le squelette siliceux des diatomées rend les diatomées plus denses que l'eau) et se met à respirer quand il ne peut plus assurer la photosynthèse dans l'obscurité du fond, puis il meurt. Des bactéries vont alors métaboliser la matière organique des tissus des diatomées mortes. La consommation d'oxygène par les bactéries pendant ce processus, conduit à un appauvrissement en oxygène en profondeur qui peut conduire à une hypoxie voire à une anoxie des eaux à la verticale des eaux sursaturées de surface. La modélisation de la teneur en oxygène (en rouge) reproduit les oscillations mesurées parfois avec un décalage de quelques jours. Elle permet de compléter des données manquantes début juillet où elle estime un pic d'hypoxie sévère aux alentours de 3 mg/L d'oxygène dissous.

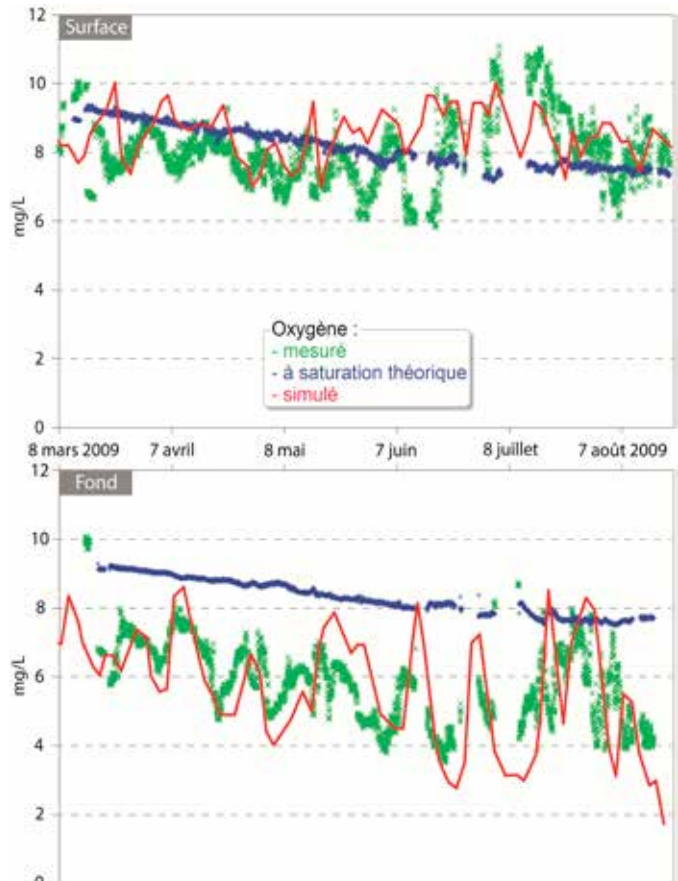




Fig. 12 - Dépôts de boues de *Lepidodinium chlorophorum* et mortalité de poissons par anoxie au sud de l'estuaire de la Loire (P. Arousseau).

contre si la carence en oxygène s'installe brutalement, ils n'ont pas le temps de s'enfuir et meurent sur place. Dans tous les cas, les êtres vivants fixés ou non mobiles sont condamnés, à l'exception des espèces naturellement enfouies profondément dans le sédiment, habituées à survivre dans un milieu très pauvre en oxygène.

Chaque année ou presque, des conditions d'hypoxie sont observées dans l'estuaire de la Vilaine, atteignant parfois le seuil de l'anoxie. La figure 11 montre trois épisodes de forte hypoxie de fond entre début juin et fin juillet 2009, avec des teneurs en oxygène dissous entre 3 et 4 mg/L d'oxygène dissous. En juillet 1982, une grave crise d'anoxie s'est produite dans cet estuaire entraînant la mortalité de plus d'une centaine de tonnes de poissons (fig. 12)¹²

Bloom secondaire de phytoplancton toxique

L'épuisement en silice des eaux littorales est l'un des mécanismes majeurs résultant de l'enrichissement des eaux douces provenant des deux grands fleuves, Loire et Vilaine, nourrissant le Mor Braz. Les eaux vertes à *Lepidodinium chlorophorum* et les éventuelles hypoxie et anoxie des eaux qui en résultent en sont une des conséquences les plus visibles.

Le secteur du Mor Braz est aussi concerné par une autre conséquence de l'épuisement en silice. Avant l'épuisement total, quand la teneur en silice est devenue insuffisante pour permettre le développement des diatomées « classiques » comme celles déjà citées (*Skeletonema sp.*, *Thalassiosira sp.* et *Cerataulina sp.*), des blooms de *Pseudo-nitzschia sp.* se développent dans la bande côtière de Bretagne-sud, et notamment dans le Mor Braz.

Pseudo-nitzschia est une nanodiatomée (diatomée de petite taille : 20 à 130 microns de long pour 1 à 3 microns de large) pauvre en silice. Ses besoins de ce nutriment sont par conséquent inférieurs aux besoins des autres diatomées qualifiées de « classiques ». Les eaux du Mor Braz encore riches en

12. Merceron 1987 et 1989.

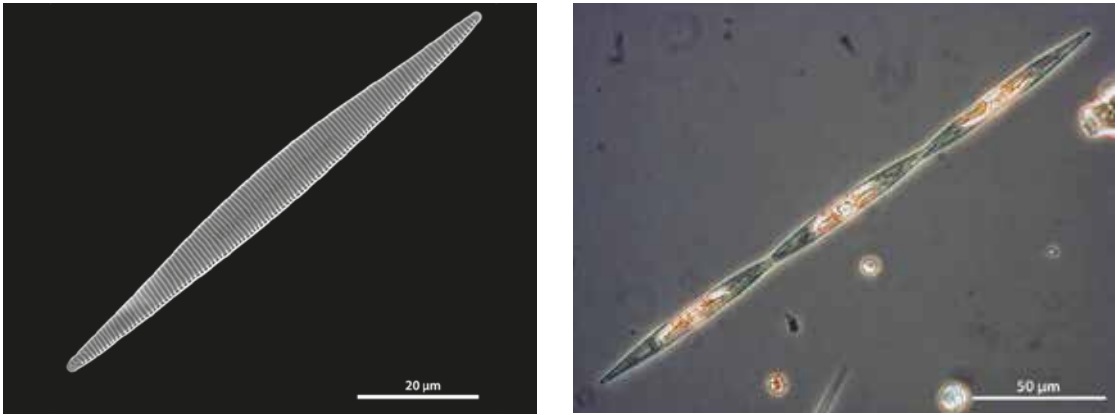


Fig. 13 - Phytoplancton toxique : à gauche *Pseudo-nitzschia australis* , à droite *Pseudo-nitzschia fraudulenta* (Ifremer).

azote et en phosphore mais appauvries en silice deviennent alors propices au développement de *Pseudo-nitzschia* sp.¹³ Les proliférations observées dans le Mor Braz dépassent souvent les 100 000 cellules par litre, jusqu'à 900 000 cellules par litre en baie de Quiberon en 1996.

Plusieurs espèces de *Pseudo-nitzschia* sont connues pour ne pas produire de toxines, c'est le cas de *P. delicatissima*, *P. fraudulenta* et *P. pungens* mais d'autres espèces comme *P. pseudodelicatissima* et surtout *P. australis* sont connues pour produire une neurotoxine : l'acide domoïque qui rentre dans la catégorie des toxines amnésiantes (ASP : Amnesic Shellfish Poisoning). Nous citerons l'Ifremer¹⁴ :

« Ces toxines ont une action amnésiante et elles provoquent chez le consommateur de coquillages contaminés, une intoxication dont les premiers symptômes apparaissent dans un délai de 2 à 24 heures : ceux-ci sont de type gastro-intestinal (vomissements, diarrhées). Puis, entre 24 et 48 heures, ce sont des symptômes neurologiques qui sont observés (maux de tête persistants, troubles de l'équilibre ou de la vue). Dans les cas les plus graves, il apparaît une perte de mémoire, des altérations de la conscience et parfois des convulsions et un coma. Les toxines ASP étant stables à la chaleur, la cuisson des coquillages ne diminue pas leur toxicité ».

Des dinoflagellés ne nécessitant pas de silice peuvent aussi être toxiques, comme les espèces du genre *Dinophysis*, connu pour produire une neurotoxine s'accumulant dans les coquillages et pouvant causer une diarrhée chez leur consommateur (DSP: *Diarrethic Shellfish Poisoning*), comme cela a été le cas en juin 2009 en baie de Vilaine¹⁵.

Eaux limpides automnales

L'automne est habituellement une saison de reprise des précipitations sur les bassins versants. Dans l'ouest de la France, on fixe le début

13. Fontaine 2013.

14. Ifremer (<http://envlit.ifremer.fr/var/envlit/storage/documents/dossiers/toxines10ans/rephy-c4.htm>).

15. Hossen et al. 2011.

de l'année hydrologique au 1^{er} octobre. C'est autour de cette date que l'on observe le plus couramment la reprise des débits des rivières et des fleuves consécutive aux précipitations automnales qui suivent les étiages ou basses eaux de l'été. Les pluies d'automne favorisent une reprise de la pousse des prairies sur les bassins versants et entraînent vers le réseau hydrographique des nutriments, en particulier l'azote présent dans les sols sous forme de reliquats non consommé par les cultures pendant la saison culturale précédente.

Après les blooms printaniers, on peut donc avoir des reprises de marées vertes dans les sites sensibles ou bien une deuxième série de blooms automnaux où l'on observe souvent des eaux colorées vertes et des proliférations de phytoplancton toxiques.

L'automne peut aussi être une période d'été indien avec peu de précipitations, peu de vent, des températures encore assez élevées et un bon ensoleillement. Il est possible qu'avec les changements climatiques, on soit amené à observer de plus en plus souvent et sur des périodes plus longues de tels épisodes. Sans reprise des précipitations, les débits des rivières et des fleuves restent faibles et les flux de nutriments limités. Les conditions de nutriment nécessaires au bloom ne sont pas réunies alors que les conditions physiques de température et d'ensoleillement sont favorables. Le phytoplancton épuise les eaux littorales du peu de nutriments restant après les grandes périodes de prolifération. C'est à cette période que l'on peut observer les eaux les plus limpides (fig. 14).

Macroalgues

Le Mor Braz est un site sensible aux blooms phytoplanctoniques mais n'est pas considéré comme un site majeur de prolifération des macroalgues en thalles, comme *Ulva armoricana* (*lactuca*), ou en filaments¹⁶. Cela tient à la turbidité des eaux des deux grands fleuves, la Loire et la Vilaine, qui alimentent le Mor Braz. Les eaux turbides déjà évoquées sont bien visibles dans l'axe du chenal de la Vilaine sur la photo 10. Cela tient aussi à la topographie des fonds à proximité des exutoires.

Cela n'empêche cependant pas l'existence de développement de macroalgues à proximité des exutoires de petites rivières. La côte sud de la Bretagne est aussi un site de prolifération de macroalgues sur vasières.

Conclusion

Le Mor Braz est un site remarquable, en raison du voisinage des exutoires proches l'un de l'autre de deux grands fleuves, la Loire et la Vilaine, mais aussi parce qu'il est géographiquement et hydrodynamiquement fermé par la

16. Les algues vertes filamenteuses classées antérieurement dans le genre *Enteromorpha* ont été repositionnées suite à des études génétiques dans le genre *Ulva* espèce *prolifera*.



Fig. 14 - Visite, en octobre 2015, de dauphins dans les eaux limpides du Mor Braz. Elles sont transparentes jusqu'à une dizaine de mètres de profondeur (Y. Le Medec).

présence de la presqu'île de Quiberon et des îles de Belle-Île, Houat et Hoedic. Le confinement partiel rend ces eaux particulièrement sensibles aux apports de nutriments de la Loire et de la Vilaine.

Le Mor Braz est de ce fait l'un des sites marins les plus sensibles de France à l'eutrophisation, c'est-à-dire à l'accumulation de nutriments. Cette eutrophisation peut se manifester sous différentes formes : bloom à diatomées avec phénomène d'eaux brunes; bloom à eaux rouges, bloom à eaux vertes, risque d'hypoxie et d'anoxie des eaux, bloom à phytoplancton toxique.

Les progrès de l'océanographie depuis plusieurs dizaines d'années permettent aujourd'hui de comprendre les enchaînements entre ces étapes de l'évolution des eaux littorales, ce que l'on appelle la phénologie. Ce ne sont plus des phénomènes inexpliqués et inexplicables, de survenue aléatoire ou incompréhensible. Les causes de chacune des étapes de l'évolution des eaux littorales sont connues, on en comprend les enchaînements, on peut dorénavant les modéliser¹⁷, prévoir leur survenue comme pour la prévision météorologique. C'est l'un des objectifs d'un outil de prévision développé par Ifremer, Prévimer, dont le site internet est aujourd'hui transféré sur marc.ifremer.fr/resultats/.

Il serait souhaitable que le plus grand nombre d'utilisateurs de la mer ou de voisins de la mer puissent comprendre ces grandes étapes du fonctionnement des eaux littorales, leurs causes et leurs enchaînements. Les eaux limpides observées certains automnes dans le Mor Braz sont là pour nous rappeler que l'objectif d'eaux littorales moins exposées à l'eutrophisation n'est pas inatteignable.

17. Chapelle et al. 1994, Dussauze 2011, Dussauze et Ménesguen 2008.

Les auteurs

Pierre Aourousseau est ingénieur agronome et docteur en sciences de la terre, professeur en sciences de l'environnement à Agrocampus-Ouest et président du Conseil scientifique de l'environnement de Bretagne.

Alain Ménesguen, normalien, agrégé et docteur en océanographie biologique, a développé depuis 1980 à l'Ifremer/Brest des modèles écologiques pour la gestion de la mer côtière, notamment pour lutter contre l'eutrophisation (marées vertes, eaux colorées).

Yves Le Medec, ingénieur agronome, spécialisé dans l'étude des eaux continentales et marines développe une expertise des microalgues à l'aide d'images aériennes.

Bibliographie

- BAUDRIER J., 2002 — *Étude intégrée du secteur Loire Vilaine : synthèse des connaissances, analyse des problématiques*. Mémoire de fin d'études pour l'obtention du certificat d'études supérieures agronomiques spécialisation halieutique. <http://archimer.ifremer.fr/doc/00016/12702/>
- CHAPPELLE A., LAZURE P., MENESGUEN A., 1994 — Modeling eutrophication events in a coastal ecosystem. Sensitivity analysis. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 39, p. 529-548.
- DUSSAUZE M., 2011 — *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*. <http://archimer.ifremer.fr/doc/00061/17207/>;
- 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., http://envlit.ifremer.fr/content/download/40585/319204/version/1/file/Rapport_AELB_Region_Dussauze_AM_version_finale.pdf
- FONTAINE A., 2013 — *Étude des efflorescences de Pseudo-Nitzschia en relation avec les paramètres environnementaux dans le Mor Braz*. Rapport de stage IUT. <http://archimer.ifremer.fr/doc/00172/28373/>
- GUILLAUD J.F., AMINOT A., DELMAS D., GOHIN F., LUNVEN M., LABRY C., HERBLAND A., 2008 — Seasonal variation of riverine nutrient inputs in the northern Bay of Biscay (France), and patterns of marine phytoplankton response. *Journal of Marine Systems*, 72, p. 309-319.
- HOSSEN V., JOURDAN-DA SILVA N., GUILLOIS-BECEY Y., MARCHAL J., KRYS S., 2011 — Food poisoning outbreaks linked to mussels contaminated with okadaic acid and ester dinophysistoxin-3 in France, June 2009. *Eurosurveillance*, 16, p. 15-21.
- MENESGUEN A., DION, P., 2009 — Role of phosphorus in coastal eutrophication, in: Dorioz, J.M., Aourousseau, P., Bourrie, G. (Eds.), *Oceanis*, vol 33, n° 1 - 2, pp. 17-35.
- MENESGUEN A., DUSSAUZE M., 2015 — *Détermination des « bassins récepteurs » marins des principaux fleuves français de la façade Manche-Atlantique, et de leurs rôles respectifs dans l'eutrophisation des masses d'eau DCE et des sous-régions DCSMM*. Phases 1 & 2. <http://archimer.ifremer.fr/doc/00333/44422>
- MERCERON M., 1987 — *Mortalités de poissons en baie de Vilaine (Juillet 1982) Causes - Mécanismes - Propositions d'action*. Rapport Ifremer/ DERO - 87 . 14 — EL. <http://archimer.ifremer.fr/doc/1987/rapport-2836.pdf>
- MERCERON M., 1989 — Baie de Vilaine : juillet 1982 mortalité massive de poissons, l'analyse des causes et des mécanismes du phénomène, les propositions d'action. *Revue Équinoxe*, n° 21, p. 4-8.
- REPECAUD M., DEGRES Y., BERNARD N., ALLENOU J.P., AUSTIN Y., ARRONDEAU J.P., BOUGET J.F., BUCAS K., DANIEL A., GUILLAUD J.F., HAMON M., JEGOU P., LAES A., LE ROUX D., LE PIVER D., QUEMENER L., ROLIN J.F., RUDELLE T., LEGRAND J., VUILLEMIN R., 2009 — New instruments to monitor coastal sea water masses according to European Water Framework Directive, Trophique project. *Oceans - Europe*, vols 1 and 2, p. 1084-1086.