

D

Les mécanismes de perturbation littorale liés aux apports terrestres de nutriments

- Fiche D-1 Les temps de résidence des masses d'eaux côtières
- Fiche D-2 La prolifération des algues vertes
- Fiche D-3 La prolifération du phytoplancton

Voir également les autres fiches disponibles sur les thèmes suivants :

A

Processus hydrologiques dans les bassins versants

B

Rôle, formes et transferts d'éléments intervenant dans la qualité des eaux

C

Temps de réponse des bassins versants

E

Indicateurs pour la représentation des données de suivi et leur méthode de calcul

F

Clés de lecture ou d'interprétation des chroniques de suivi de la qualité des eaux

G

Protocoles de suivi de la qualité de l'eau dans les bassins versants

H

Impacts de la gestion de l'interculture sur la qualité de l'eau

I

Le phosphore dans le sol


J

Rôle des éléments du paysage dans le bassin versant

Glossaire


LES TEMPS DE RESIDENCE DES MASSES D'EAUX COTIERES

DEFINITIONS

 **Le temps moyen de résidence** d'une molécule d'eau ou de soluté dans un volume V d'eau marine, traversé par un débit net d'eau Q, s'obtient, comme pour une masse d'eau continentale (voir fiche C-3), par la formule :

$$T = V/Q$$

La seule différence avec le cas des masses d'eau continentale vient de la difficulté de découper un volume V pertinent dans une masse d'eau unique qui s'étend par continuité à l'océan mondial. Il faut s'appuyer sur des zones de moindre échange horizontal ou vertical appelés fronts pour scinder l'océan mondial en une **mosaïque de masses d'eau partiellement isolées**. Quand l'étendue géographique d'une masse d'eau côtière a été fixée, les modèles hydrodynamiques permettent de calculer de façon très correcte les flux d'eau convectifs et diffusifs qui traversent les frontières de cette masse d'eau, donc de calculer le débit net Q.

 **Hydrodynamique** : Ensemble des caractères ayant trait aux mouvements de l'eau. L'hydrodynamique règle le transport et la dilution des nutriments dissous, des particules et des algues en suspension, conditionnant le temps de résidence moyen de ces dernières dans les eaux enrichies par les apports terrigènes.

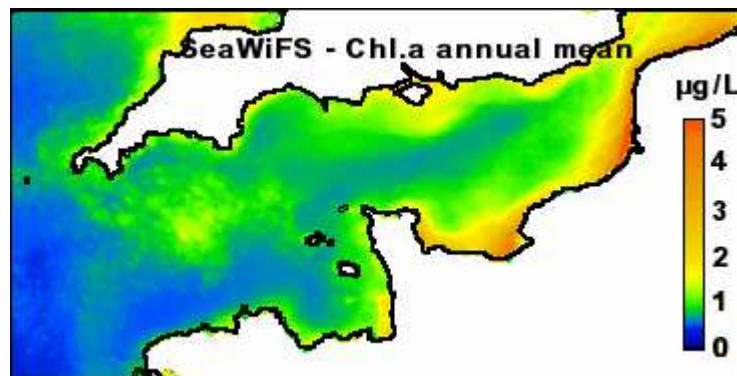
CE QU'IL FAUT RETENIR

L'intensité d'une atteinte quelconque à la qualité d'une masse d'eau côtière dépendra de sa capacité à diluer et à évacuer la masse de matière polluante qui lui a été injectée. Même dans une mer animée en permanence par de forts mouvements comme la mer côtière bretonne, cette capacité dispersive naturelle est très inégalement répartie. On peut donc **identifier des zones potentiellement sensibles aux pollutions**, amenées essentiellement par les eaux continentales.

PROBLEMATIQUE

La répartition annuelle moyenne de la biomasse phytoplanctonique en Manche, récemment obtenue grâce aux mesures journalières effectuées par les capteurs satellitaires SeaWiFS et MODIS de la NASA (Carte 1) montre bien l'intérêt d'étudier les dynamiques côtières : comment expliquer par exemple que la zone côtière de Bretagne-nord, où arrivent pourtant plusieurs petits fleuves côtiers très chargés en nutriments, montre en moyenne une aussi faible biomasse phytoplanctonique, comparée à celle visible entre les îles anglo-normandes et le Cotentin, et surtout à celle visible au plein milieu de l'entrée occidentale de la Manche, loin de tout apport terrigène ?

De même, à échelle plus locale, comment expliquer que les plus importantes marées vertes à ulves de Bretagne (cf. Carte 1 de la fiche D-2) ne se trouvent pas dans des baies où arrivent les plus grandes quantités de nitrate terrigène (rade de Brest et baie de Vilaine), mais parfois dans des baies où les apports annuels de nitrate sont plus faibles (baie de Lannion, baie de Douarnenez) ? En fait, le développement d'algues n'est pas seulement fonction des apports nutritifs terrigènes, il est aussi fonction de la dynamique maritime et de la morphologie côtière. Ce sont elles qui règlent le processus de dispersion des algues ou des nutriments, et qui conditionnent donc la sensibilité d'une côte à la prolifération de micro ou de macro-algues.



Carte 1 : Répartition moyenne annuelle de la chlorophylle phytoplanctonique en Manche (données SeaWiFS traitées par l'algorithme IFREMER OC5)

● LA MER EN MOUVEMENT

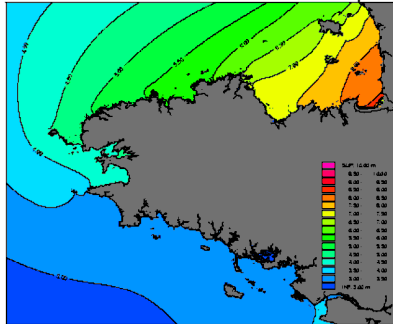
La mer est en continuel mouvement (hydrodynamique). Ces mouvements sont générés par plusieurs causes naturelles : marée, houle, vent, gradient horizontal de pression atmosphérique, gradient horizontal de densité de l'eau de mer (dépendant de la température et de la salinité).

● **Les courants de marée**

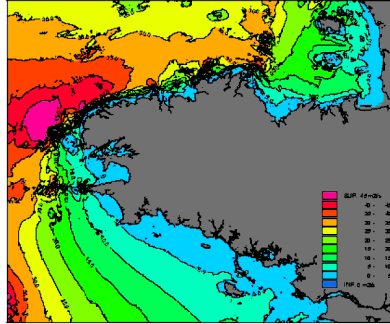
En Bretagne, les marées engendrent d'importants déplacements de masses d'eau en peu de temps. Les marées sont de type semi-diurne, c'est-à-dire qu'elles comptent deux pleines mers et deux basses mers en un peu plus de 24 heures (24h50mn exactement).

Le phénomène de marée n'est pas homogène sur l'ensemble du littoral breton, ce qui peut s'apprécier par divers paramètres :

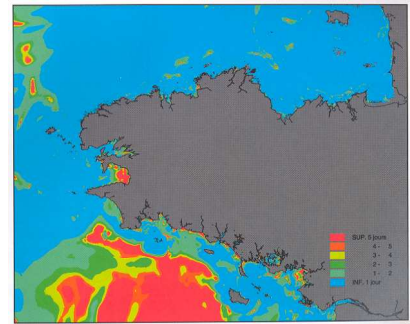
- **Le marnage** (soit la différence entre les hauteurs de pleine mer et de basse mer) est compris, pour une marée de coefficient moyen 70, entre 3 et 9 m sur l'ensemble du littoral : au sud, il est de l'ordre de 3 m ; au nord, le marnage est plus important et augmente d'ouest en est (Carte 2). L'onde de marée se propage en tournant autour de la Bretagne du sud vers le nord.
- **Le coefficient de dispersion** (soit le coefficient de proportionnalité entre le flux de dispersion d'une solution et le gradient de concentration de cette solution) est également hétérogène sur l'ensemble des côtes bretonnes (Carte 3). Pour les petites valeurs du coefficient de dispersion (couleur verte et bleue), la colonne d'eau a tendance à se déplacer " en bloc" (de 5 à 20 m²/s) ; il y a peu de dispersion. En revanche, pour les valeurs élevées (couleur rouge > 35 m²/s), le haut et le bas de la colonne d'eau peuvent avoir des vitesses différentes, la dispersion de la colonne d'eau est importante.
- **La vitesse résiduelle** : au cours d'un cycle de marée, les particules d'eau ont un mouvement de va et vient. A la fin du cycle de marée, les particules n'ont généralement pas retrouvé exactement leur emplacement initial, mais se sont déplacées. A ce mouvement est associée une vitesse qualifiée de "résiduelle". On peut en déduire une estimation très locale du temps de résidence (qui ne prend pas en compte les recirculations éventuelles après des parcours fermés de plusieurs dizaines de km) : on prendra par exemple le temps nécessaire à une particule d'eau pour parcourir 500 m (Carte 4).



Carte 2 : marnage (m)
(lfremer)



Carte 3 : capacité de dispersion (m²/s)
(lfremer)



Carte 4 : temps de résidence sur 500m
(jours) (lfremer)

L'hydrodynamique d'une marée moyenne est donc différente sur les côtes sud et nord de la Bretagne, ce qui engendrera de grandes disparités de dispersion des éléments dissous (nutriments, polluants solubles dans l'eau) et en suspension (plancton, algues vertes non fixées...)

Sur le littoral sud, les vitesses maximales sont peu élevées (comprises entre 20 et 40 cm/s), ce qui conduit à une **faible dispersion des colonnes d'eau et à un possible réchauffement des couches d'eau superficielles** (stratification) durant l'été. Les vitesses résiduelles sont faibles et en conséquence, le temps de résidence sur 500 m est important (> 5 jours). Ainsi, après un cycle de marée, **la masse d'eau n'est pas, ou seulement peu, renouvelée**.

Sur le littoral nord, les vitesses maximales (comprises entre 80 et 130 cm/s) sont en moyenne 4 fois supérieures à celles rencontrées sur le littoral sud. Il s'ensuit que la dispersion des colonnes d'eau est plus importante et que **la masse d'eau reste bien mélangée** sur la verticale tout au long de l'année (pas de stratification). Les vitesses résiduelles sont élevées, induisant des temps de résidence sur 500 m courts (< 1 jour) ; **la masse d'eau est donc entièrement renouvelée après un cycle de marée**.

● Les courants dus au vent et la houle

Le vent en frottant sur la surface de la mer entraîne partiellement les eaux superficielles dans sa direction ou légèrement à droite de celle-ci ; ce courant généré par le vent se compose donc vectoriellement à celui généré par la marée. Le courant résultant sera alors peu sensible au vent dans les zones à forts courants de marée (Bretagne nord), mais très sensible dans les zones à plus faibles courants de marée (baies de Douarnenez et de Vilaine), surtout en périodes de mortes eaux.

La houle, par les vagues qu'elle engendre, est le facteur majeur de turbulence sur le littoral. La Bretagne est directement exposée aux houles créées dans l'Atlantique nord-est par le passage des dépressions. Leur influence est notable sur les sédiments jusqu'à une profondeur de 30 m et s'intensifie sur les petits fonds. Elle devient prépondérante sur la zone intertidale et à proximité du trait de côte.

L'impact de la houle à la côte est fonction de son origine (direction, période) ainsi que de la morphologie du littoral. La houle est la plus forte sur la pointe ouest de la Bretagne (16 m maximum) et sa hauteur décroît au fur et à mesure qu'elle se dirige en Manche orientale (7 à 8 m).

La houle provoque des remises en suspension des sédiments et des déplacements de matériaux et une homogénéisation de la colonne d'eau. Ainsi, plus un site est exposé à de fortes houles, plus sa capacité de dispersion des nutriments (nitrate, phosphate) est importante. Dans ces sites, les proliférations algales et phytoplanctoniques sont plus rares ; on signale cependant des épisodes hivernaux d'eaux colorées brunes (entre novembre et mars) dans les rouleaux de la baie d'Audierne : elles sont causées par la diatomée de « surf zone » *Attheya armatus*.

● La température et la salinité des eaux littorales

La température de la mer côtière suit, de façon amortie et retardée d'environ un mois, la courbe annuelle de la température de l'air. Ayant moins d'inertie thermique, les zones très peu profondes bordant le littoral montreront une amplitude plus forte (s'étendant d'environ 6°C en février à 19°C en août) que la haute mer (de 8°C à 16°C). Par ailleurs, dès que la profondeur dépasse la trentaine de mètres en Bretagne sud, la soixantaine en Bretagne nord, si la capacité de mélange vertical liée au courant de marée et au vent est insuffisante, la colonne d'eau va se stratifier du printemps au début de l'automne, avec une couche chaude de surface d'une vingtaine de mètres surmontant une couche plus froide de fond. Le phénomène est particulièrement net au nord-ouest de la Manche occidentale et sur la Grande Vasière au sud de la Bretagne.

La salinité de la mer côtière s'abaisse localement au débouché des fleuves côtiers, dont l'eau douce, plus légère que l'eau salée, a tendance à s'écouler à la surface de la mer et à ne se mélanger que progressivement sur la verticale. Les panaches de dilution des fleuves s'étendront et resteront stratifiés plus ou moins loin en mer selon le débit du fleuve. Pour la Bretagne, seules la Vilaine et surtout la Loire produisent des panaches d'étendue importante, s'étendant parfois sur plusieurs centaines de km, se terminant parfois au dessus du talus continental nord-Gascogne, ou à l'entrée de la Manche.

Quelle que soit son origine, la stratification auto-entretient la faiblesse du mélange vertical, et favorise donc la prolifération du phytoplancton dans la couche éclairée de surface, tant que la teneur en nutriments reste suffisante : c'est le cas dans les panaches de fleuve ou dans les zones d'érosion estivale continue de la couche pauvre de surface au profit de la couche profonde riche (expliquant la prolifération estivale de dinoflagellés au centre et au nord-ouest de la Manche occidentale).

● L'HETEROGENEITE MORPHOLOGIQUE DU LITTORAL BRETON ENGENDRE DES PARTICULARITES HYDRODYNAMIQUES

● Les baies

Certaines baies en zone côtière macrotidale ont la particularité de piéger momentanément les masses d'eau et leur contenu, en raison de l'absence locale de dérive résiduelle de marée. Ainsi, certaines baies ont des temps de résidence moyen de l'eau très élevés, malgré un intense balancement des marées, et sont naturellement propices à la prolifération littorale des ulves (baies de Saint-Brieuc ou de Lannion) et/ou à celle plus étendue du phytoplancton (baies de Vilaine et de Douarnenez), selon l'intensité des apports terrigènes de nutriments.

● Les estuaires

La dilution en mer d'apports fluviaux d'eau douce se caractérise par une stratification haline s'estompant progressivement vers le large, pour redonner une masse d'eau bien mélangée sur la verticale. Cette stratification facilite le démarrage de prolifération phytoplanctonique printanière en bloquant les cellules dans une couche de quelques mètres sous la surface, bien éclairée et riche en nutriments. La turbidité élevée près de l'estuaire limite cependant cet effet propice à l'eutrophisation.

 **RÉFÉRENCES**

Ifremer, 2001. L'eutrophisation des eaux marines et saumâtres en Europe, en particulier en France. Rapport Ifremer pour la Commission Européenne, 59p.

Ménesguen A., 2003. Les "marées vertes" en Bretagne, la responsabilité du nitrate. Rapport Ifremer, 11p.

Obaton D., Garreau P., 1999. Modélisation numérique des courants de la côte bretonne. Actes du Colloque "Pollutions diffuses : du bassin versant au littoral", Ispaia-Zoopôle, Saint-Brieuc-Ploufragan, 23-24 septembre 1999, éditions IFREMER, 95-103.

Sites web :


<http://www.bretagne-environnement.org/article/la-mer-en-mouvement>


<http://www.ifremer.fr/delao/francais/hydrodynamique/bretagne/index.htm>

http://www.shom.fr/fr_page/fr_act_oceano/courant/courant_f.htm

LA PROLIFERATION DES ALGUES VERTES

DEFINITIONS

 **Algues vertes** : Macrophytes marines de type chlorophycées (ulves, monostromes, entéromorphes) qui se révèlent les plus aptes à profiter d'eaux à salinité variable très enrichies en nutriments. On parle souvent de "marée verte" à propos de ces accumulations estivales de biomasse macroalgale (Photo 1).

 **Les marées vertes** : constituent une forme d'eutrophisation côtière, c'est-à-dire de développement excessif d'algues par rapport aux capacités d'assimilation physique et biologique de l'écosystème.

En milieu lagunaire, elles peuvent causer en été la mort par anoxie de l'écosystème (malaïgue). En milieu ouvert, elles perturbent les équilibres écologiques et causent des nuisances au tourisme, à la pêche et à la conchyliculture.



Photo 1 : Le phénomène de marée verte (Menesguen A.)

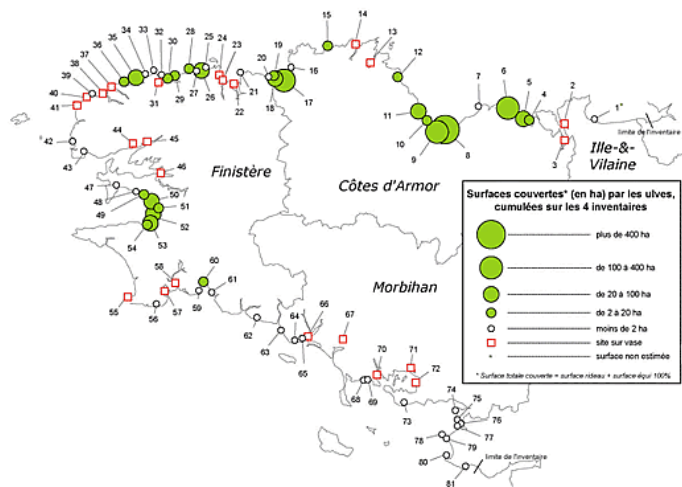
CE QU'IL FAUT RETENIR

- En Bretagne, les sites les plus gravement touchés par les marées vertes sont les littoraux des Côtes d'Armor et du Finistère. Les premiers blooms d'algues vertes sont apparus dans les années 1960 et le phénomène n'a cessé de s'accroître au cours des décennies suivantes.
- Les flux massifs d'azote en provenance des rivières et arrivant au printemps dans les eaux littorales sont à l'origine de la prolifération des algues vertes et conditionnent leur ampleur sur les côtes bretonnes.
- Dans un objectif de reconquête de la qualité des eaux littorales et donc de diminution des proliférations algales, il faudrait faire baisser les teneurs en nitrate dans les eaux des rivières de manière substantielle et variable selon les zones côtières et par exemple à moins de 10 mg/l dans un site particulièrement sensible.
- Le seul facteur nitrate ne peut être à l'origine d'un bloom d'algues vertes. Un ensemble de conditions environnementales et géographiques doit aussi être réuni :
 - Une intensité et une durée d'éclairement importante : optimum au printemps
 - Une température de l'eau de mer entre 17 et 23°C
 - Des fonds sableux fins (sablons) et une grande transparence de l'eau
 - Une turbulence suffisamment forte pour maintenir les algues en suspension
 - Un confinement des masses d'eau et des sels nutritifs propice au confinement de la biomasse.

LE CONTEXTE BRETON

En Bretagne, les premières "marées vertes" ont fait leur apparition dans les années 1960 et le phénomène n'a cessé de s'accroître au cours des décennies suivantes. Les côtes bretonnes sont un des secteurs les plus touchés par les marées vertes en Europe.

C'est surtout le littoral nord de la Bretagne et plus particulièrement celui des Côtes d'Armor et du Finistère qui est touché. Les premiers sites touchés dans les années 1960 sont à présent ceux qui le sont le plus gravement et le plus régulièrement (Baie de Saint Brieuc, Baie de Lannion, Baie de Concarneau-la-Forêt). De nouveaux sites apparaissent chaque année mais ne sont pas systématiquement touchés chaque année (48 sites touchés en 1999, 71 en 2002, 60 en 2003, source : CEVA, 2004).



Carte 1 : Localisation des sites à marées vertes en 2003 (CEVA, 2004)

En Bretagne, les algues impliquées sont principalement les macroalgues chlorophycées de type *Ulva* : les *Ulva armoricana* (Photos 1) sont présentes sur l'ensemble des côtes bretonnes et les *Ulva rotundata* sont uniquement présentes sur les côtes sud de la Bretagne.



Photos 1 : *Ulva armoricana* (clichés Ifremer.)

LES FACTEURS DE PROLIFERATION DES ALGUES VERTES

Les études menées notamment par l'Ifremer et le Centre d'études et de valorisation des algues ont montré que plusieurs facteurs interviennent dans l'apparition des marées vertes en Bretagne :

- Un facteur nutritif modifié par l'activité humaine : l'azote
- Des facteurs géographiques et environnementaux naturels

● Le facteur azote

C'est l'intensification récente des activités humaines (élevage, agriculture, rejets urbains...) sur les bassins versants littoraux qui est à l'origine d'un apport excessif de sels nutritifs (phosphate, nitrate) ou de matières organiques minéralisables dans les eaux littorales et, par voie de conséquence, de l'augmentation de la biomasse végétale.

Une étude sur la Baie de Saint Brieuc de 1986 à 1992 a montré que les valeurs maximales annuelles de la biomasse présentes sur les plages sont corrélées avec le flux moyen d'azote apporté par les rivières en juin alors qu'aucune relation ne se dégage avec les flux de phosphore.

L'élément limitant est donc avant tout l'azote, qui contrôle la croissance et la prolifération des algues vertes.

L'azote, naturellement présent dans le milieu marin, en zone littorale, est indispensable au cycle de la production primaire. L'accroissement de sa concentration dans l'eau peut favoriser le développement algal et être bénéfique dans certains cas, mais dans certaines limites. En conditions naturelles, les flux spécifiques provenant des bassins versants sont modérés (de l'ordre de 5 à 6 kg/ha/an ou en tout cas inférieurs à 10 kg/ha/an). Les apports continentaux d'azote au milieu marin se font surtout sous forme soluble dans l'eau (NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+), directement assimilable pour la végétation marine. En Bretagne, ce sont plus spécifiquement les flux de nitrate NO_3^- en provenance des rivières et arrivant au printemps dans les eaux littorales qui conditionnent l'ampleur des marées vertes.

La sensibilité des bassins versants émetteurs

En Bretagne, les débits des cours d'eau se déversant sur les sites où se développent les marées vertes sont en général peu élevés. Les concentrations moyennes de nitrate varient entre 23 et 88 mg/l.

Les bassins versants ont des comportements différents vis-à-vis des transferts de l'azote vers les eaux côtières en fonction de la nature du sous-sol et du type d'occupation des terres.

A charge azotée égale :

- Les bassins versants très sensibles sont ceux situés sur terrain granitique et possédant donc une nappe phréatique. Ils présentent des concentrations en nitrate plutôt stables et des débits d'étiage soutenus au printemps ; leurs flux d'azote exportés en été sont donc relativement élevés.
- Les bassins versants à sensibilité modérée sont situés sur terrain de nature schisteuse, c'est-à-dire plus ou moins imperméable. Ayant des débits peu régulés, ils produisent en année pluviométrique normale, des flux azotés qui chutent après les crues de printemps et sont minimums en été.

Mais la variabilité des charges azotées introduit un autre facteur de différence de comportement des bassins versants entre eux.

La nécessaire réduction des apports de fertilisants azotés

La gestion de l'azote apportée aux cultures est un paramètre déterminant. La charge d'azote apportée et sa période d'épandage sont des facteurs souvent mal contrôlés et mal adaptés aux besoins agronomiques des sols et des cultures et aux caractéristiques du bassin versant, ce qui engendre des excès de nutriments dans les rivières et par voie de conséquence dans le milieu littoral récepteur.

Les objectifs de qualité d'eau, concernant les marées vertes, sont plus sévères que la valeur limite de qualité en matière d'eau potable : pour réduire notablement la prolifération d'ulves, il faudrait dans de nombreux secteurs descendre significativement en dessous de 50 et même 25 mg/l de nitrate dans l'eau des rivières. Pour les milieux littoraux récepteurs les plus sensibles, comme la Baie de Lannion, il faudrait même descendre en dessous de 10 mg/l.

➔ Si les teneurs en azote de l'eau sont le facteur premier qui détermine les proliférations d'algues vertes sur les côtes bretonnes, le phénomène de marée verte se développe uniquement si les conditions environnementales et géographiques sont réunies.

● Les facteurs géographiques et environnementaux propices à la croissance des macroalgues

La température et la lumière

La lumière est nécessaire à la **croissance des ulves par photosynthèse**. D'octobre à février, l'intensité et la durée d'éclairement sont insuffisantes pour permettre la photosynthèse. La reprise de la croissance a lieu chaque année **au printemps** et s'intensifie quand la température atteint **17 à 23°C**, devenant extrêmement forte **pour des macrophytes** quand **l'intensité et la durée d'éclairement** sont satisfaisantes.

Cette grande photophilie des ulves explique qu'elles ne peuvent proliférer vraiment qu'une fois libérées de leur attache au domaine benthique, devenant ainsi capables d'occuper, en suspension dans la zone de déferlement des vagues, un volume important bien éclairé. Fixées aux substrats marins trop profonds ou déposées en couches épaisses sur les fonds, elles arrêtent vite de croître par manque de lumière.

Les sablons de fonds

Les sablons (sables à grains fins) constituent pour une large part les fonds des zones de prolifération des algues vertes. Si les vases sont importantes et sont régulièrement remises en suspension, comme en baie du Mont Saint-Michel, la turbidité engendrée nuit à la croissance des ulves. Si le sédiment est plus grossier et donc plus filtrant, le réapprovisionnement de la colonne d'eau par diffusion depuis le stock sédimentaire de nutriments est alors insuffisant en été.

La turbulence du milieu

Les ulves ont une vitesse de chute importante dans l'eau. Ainsi, le déferlement des vagues sur les estrans favorise une turbulence suffisamment forte **pour maintenir les ulves en suspension** dans une colonne d'eau bien éclairée.

En Bretagne, une extension géographique du site de croissance vers les fonds côtiers allant jusqu'à 15 m de fond a été observée, en baie de Douarnenez notamment. Elle s'explique par l'orientation plein ouest des plages, face à la houle, les fonds de sables purs, très réverbérants et la grande transparence de l'eau.

Le confinement de la masse d'eau et des sels nutritifs

Différentes configurations géographiques (topographie du fond et forme générale de la côte) sont propices au confinement de la biomasse permettant une **accumulation visible d'algues**. Ces différences font que la capacité dispersive (houle ou courant) et le temps de séjour des masses d'eau sont variables d'un site à l'autre, rendant ceux-ci plus ou moins sensibles à l'accumulation d'algues.

- **Les lagunes**, du fait qu'elles communiquent peu avec la mer et qu'elles sont peu profondes, réunissent toutes les conditions favorables à la prolifération des algues vertes.
- **Sur certains estrans macrotidaux très ouverts vers le large** (en contraste avec les lagunes) on peut observer un confinement dynamique par la marée. Il s'agit de zones où la dérive résiduelle de marée (*cf. fiche D-1*), c'est-à-dire la dérive nette au bout d'une période de marée (12h25mn), est quasi nulle en raison de la **topographie du fond**.
- **Certaines baies manquant de chasse des nutriments vers le large** se transforment ainsi en gigantesques bacs de culture malgré un enrichissement parfois modeste (ex. la Baie de Lannion (Figure 1), Côtes d'Armor) alors que certains sites fortement enrichis mais dotés d'une forte dérive résiduelle vers le large voient se disperser au fur et à mesure nutriments et algues produites (ex. la Baie de Goulven, Finistère-nord).

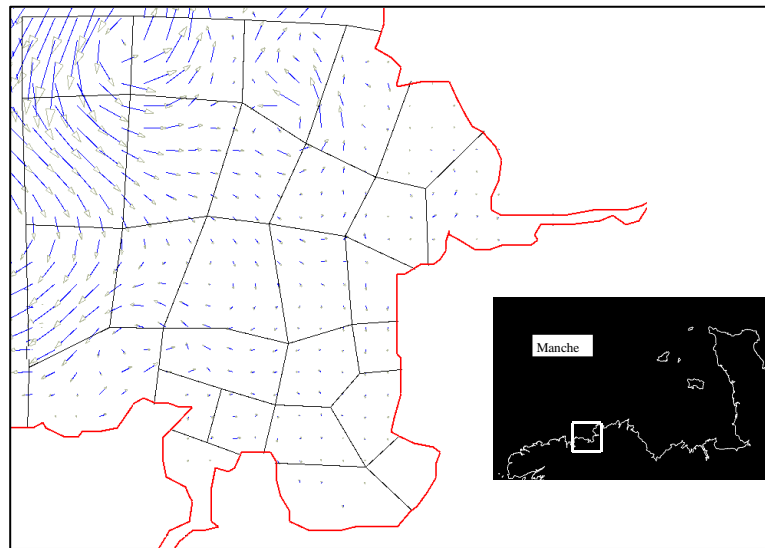


Figure 1 : Exemple de la Baie de Lannion où les eaux sont très confinées et où les faibles courants ne permettent pas de chasser les nutriments vers le large (Ifremer)

➔ En Bretagne, les zones à marées vertes sont dans tous les cas des sites très côtiers avec des fonds de baies à estran sableux étendu mais de faible pente, où l'eau est peu profonde et facilement réchauffée et où la lumière pénètre bien. Ainsi, d'une façon globale, **le nord et le sud de la Bretagne sont plus sensibles aux proliférations d'ulves** (Carte 1).

LES NUISANCES CAUSEES PAR LES MAREES VERTES EN BRETAGNE

Sur le littoral breton, les proliférations d'algues vertes sont plus **néfastes pour les diverses activités humaines** littorales que véritablement à l'écosystème lui-même, dès lors qu'en mer, la turbulence est suffisante pour éviter les anoxies mortelles.

La gêne créée par les proliférations macroalgales est essentiellement d'ordre touristique du fait des désagréments causés aux touristes en mer (baignade, nautisme) et sur les plages. En effet, les algues vertes s'échouent en grandes quantités sur les plages (Photo 2), lieu où s'opère leur dégradation, d'où **les odeurs de putréfaction** engendrées. De plus, par la gêne occasionnée et par leur **impact médiatique**, les marées vertes peuvent remettre en cause l'image de la Bretagne et déstabiliser une activité économique importante pour la région. Ainsi, pour remettre les plages en état, les collectivités territoriales organisent des **ramassages mécaniques des algues** au fur et à mesure des dépôts (Photo 3) mais qui engendre un **coût non négligeable** pour les communes concernées et les départements : entre 400 000 et 500 000 euros par an pour la Bretagne.



Photo 2 : Les dépôts d'algues vertes sur les plages
(cliché Ifremer)



Photo 3 : Ramassage mécanique des algues sur la plage
(cliché Ifremer)

De plus, les algues constituent localement une entrave croissante aux **activités de conchyliculture** (recouvrement de bouchots) et **de pêche** (colmatage des filets et des chaluts de petits navires côtiers).

D'autre part, une certaine **contamination atmosphérique** est constatée dans les secteurs où les algues se décomposent (émanation de sulfure d'hydrogène). Par ailleurs, des risques de contamination bactérienne **des sites conchylicoles et des eaux de baignade** existent : les ulves auraient la particularité d'émettre dans le milieu marin une substance osmoprotectrice pour les bactéries fécales, augmentant ainsi la durée de vie de ces dernières.

Mais, en Bretagne, on n'observe pas de modification généralisée de l'écosystème due aux marées vertes grâce au remaniement régulier opéré par la marée. Dans les lagunes méditerranéennes par contre, la décomposition brutale d'une grande biomasse d'ulves peut consommer tout l'oxygène dissous dans l'eau, causant la mort de la faune par asphyxie (phénomène de malaïgues).

REFERENCES

CSEB, 1998. Les apports de nitrates aux eaux littorales bretonnes : caractérisation et évolution des flux ; rôle dans les proliférations algales (macroalgues et phytoplanctons). 24p.

Ménesguen A., 2003. Les "marées vertes" en Bretagne, la responsabilité du nitrate. Rapport Ifremer, 11p.

Sites web :


<http://www.bretagne-environnement.org/rubrique310/rubrique423/>

<http://www.ifremer.fr/envlit/documentation/documents.htm#6>

http://www.bretagne-environnement.gouv.fr/Eau/Tableaux_Bord/Tab-Bord_2003/Eaux_littorales/baignade.htm

LA PROLIFERATION DU PHYTOPLANCTON

DEFINITIONS

 **Le phytoplancton** : Ensemble des algues microscopiques unicellulaires en suspension dans l'eau. C'est le premier maillon de la chaîne alimentaire dans l'écosystème marin et aquatique en général. Le phytoplancton marin se compose de plus de 6 000 espèces d'algues unicellulaires. Parmi elles, près de 600 espèces sont connues pour provoquer occasionnellement, par leur prolifération, une modification de la couleur de l'eau responsable du phénomène appelé "eaux colorées". D'autre part, une quarantaine d'espèces provoquent des nuisances diverses telles que des intoxications pour l'homme ou même la mort de la faune marine ; on parle alors de **phytoplancton toxique**.


 Le phénomène d'**eaux colorées** correspond à des proliférations phytoplanctoniques denses aussi appelées "blooms" ou "efflorescences" phytoplanctoniques. La couleur de l'eau de mer (photo 1) est due aux pigments des cellules de micro-algues (eaux rouges, vertes ou brunes). **Les espèces impliquées sont souvent anodines.**



Photo 1 : Eau colorée à Noctiluque (IFREMER.)

CE QU'IL FAUT RETENIR

- Les conditions propices au déclenchement du phénomène de bloom phytoplanctonique non toxique sont aujourd'hui relativement bien connues. En revanche, le déterminisme de l'apparition et de la croissance d'une population particulière (telle que celle d'une espèce productrice de toxines) reste à élucider.
- Les conditions optimales pour une production intense de phytoplancton sont réunies au printemps avec des eaux côtières enrichies en **sels nutritifs** combinées à des conditions de **température** et de **lumière** idéales.
- Cependant, les variables influençant le développement phytoplanctonique sont nombreuses : température, salinité, lumière, sels minéraux, broutage par les herbivores, courants, brassage des eaux, accroissement des échanges maritimes internationaux avec éventuellement introduction de nouvelles espèces de plancton, etc.
- Les phénomènes de blooms phytoplanctoniques sont plus fréquents sur les côtes sud et ouest de la Bretagne que sur la côte nord.
- Il faut distinguer les blooms dus au développement des dinoflagellés (espèces phytoplanctoniques le plus souvent associées à une colonne d'eau stratifiée) des blooms de diatomées qui se produisent plutôt dans une colonne d'eau bien brassée. Les espèces flagellées sont plus souvent à l'origine de nuisances écologiques que les diatomées.
- Le développement d'une biomasse importante de phytoplancton (bloom) peut être suivi par une **baisse considérable des concentrations en oxygène dissous dans l'eau** due à une consommation d'oxygène supérieure aux apports au milieu par ces espèces. Cette consommation accrue d'oxygène peut se traduire par une **hypoxie** voire une **anoxie** avec **mortalité d'animaux benthiques**.

● LE CONTEXTE BRETON

Parmi les espèces d'algues microscopiques répertoriées en Bretagne, on distingue les **espèces anodines** qui provoquent des phénomènes visibles d'**eaux colorées** et les **espèces toxiques** qui provoquent des nuisances diverses telles que des **intoxications pour l'homme** ou **même la mort de la faune marine**.

● **Les espèces phytoplanctoniques impliquées**

Deux familles phytoplanctoniques sont les plus représentées dans des phénomènes d'eaux colorées et de prolifération micro-algale en général:



Photo 2 : Diatomées

- les **diatomées** : algues microscopiques à coque siliceuse (photo 2).
- les **dinoflagellés** : algues microscopiques non-siliceuses, avec ou sans coque organique.

Le phénomène d'eau colorée apparaît lorsque la prolifération de ces espèces phytoplanctoniques devient dense (se produisant surtout au printemps et en été) ce qui donne une coloration de l'eau de mer due aux pigments des cellules (eaux rouges, vertes ou brunes).

Le recensement des phénomènes de proliférations algales est relativement récent. Des observations d'eaux colorées effectuées entre 1975 et 1984 ont montré que les dinoflagellés sont responsables ou présents dans plus de 75% des cas d'apparitions d'eaux colorées. Dans 9,5% des cas seulement, des espèces toxiques sont impliquées (1,5% toxiques pour l'homme).

En Bretagne, les apparitions de blooms phytoplanctoniques sont des phénomènes plus **fréquents sur les côtes sud et ouest** que sur la côte nord. La zone côtière sud connaît des successions d'eaux colorées par diverses espèces phytoplanctoniques.

En juillet 1982 par exemple, suite à une forte pluie sur le bassin de la Vilaine suivie de beau temps, l'apport de nutriments et la création d'une stratification des eaux marines de la baie de Vilaine ont favorisé la prolifération très rapide du phytoplancton, puis sa dégradation par des bactéries consommant en quelques jours l'oxygène dissous dans l'eau de mer, surtout près du fond. L'asphyxie causée à la faune a provoqué la mort d'une grande partie des invertébrés inféodés au fond, mais aussi celle de poissons pourtant capables de fuite. C'est un exemple d'effets délétères causés par la biomasse trop abondante, sans présence de toxicité algale directe.

● **Les espèces toxiques**

Parmi les 6 000 espèces de phytoplancton connues dans le monde, une quarantaine sont connues pour provoquer des nuisances diverses telles des intoxications pour l'homme ou des mortalités vis-à-vis de la faune marine. Parmi ces espèces toxiques, 90% sont des flagellés et plus particulièrement des dinoflagellés.

La toxicité de ces espèces phytoplanctoniques est due à la production de **phycotoxines**.

Certaines phycotoxines sont libérées dans l'eau et sont directement nocives, voire mortelles, pour les animaux qui vivent dans le milieu marin. C'est le cas par exemple de l'espèce *Karenia mikimotoi* (= *Gymnodinium nagasakiense*), produisant des substances cytotoxiques et hémolytiques, et qui, lors d'efflorescences de grande ampleur en été 1995, a provoqué de très importantes mortalités de poissons, coquillages, oursins, et divers invertébrés, sur l'ensemble du littoral atlantique.

D'autres phycotoxines, qui restent à l'intérieur des cellules algales, peuvent s'accumuler dans les animaux marins qui se nourrissent de phytoplancton, par exemple les coquillages : alors que ceux-ci n'en sont pas affectés, ils deviennent cependant toxiques pour qui les consomme.

Il existe actuellement en Bretagne (comme en France) trois genres phytoplanctoniques produisant des toxines dangereuses pour les consommateurs de coquillages :



Photo 1 : Dinophysis (Nézan E., Ifremer)

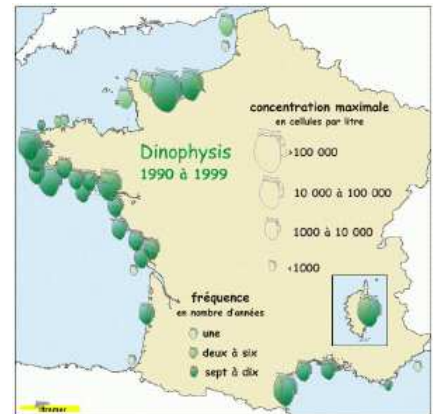
Dinophysis (photo 1) est un dinoflagellé pouvant être responsable de toxicité dans les coquillages (toxines diarrhéiques DSP pour l'homme).

Le genre *Dinophysis* est observé tous les ans sur une grande partie du littoral français (carte 1) toutes espèces confondues y compris les non toxiques. Les épisodes de toxicité les plus fréquents ont notamment été recensés

en Bretagne sud et ouest (mer d'Iroise, baie de Douarnenez, de Concarneau et de Vilaine).

Il est présent surtout au printemps et en été sur la côte atlantique et en été et en automne en Manche. De faibles concentrations suffisent à rendre les coquillages toxiques : les concentrations maximales observées sont généralement comprises entre 1000 et 10 000 cellules/litre. La présence de *Dinophysis* dans le milieu, même à faible concentration, entraîne presque systématiquement la présence de toxines dans les coquillages.

Dinophysis étant une espèce qui ne peut se cultiver en laboratoire, son cycle biologique ainsi que ses conditions optimales de développement sont mal connus.



Carte 1 : Répartition des *Dinophysis* sur les côtes françaises (Ifremer)

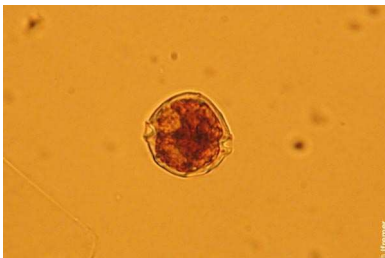


Photo 2 : *Alexandrium minutum* (Nézan E., Ifremer)

Alexandrium : (dinoflagellé) parmi les espèces de ce genre (photo 2) deux sont connues pour produire des toxines paralysantes (PSP) :

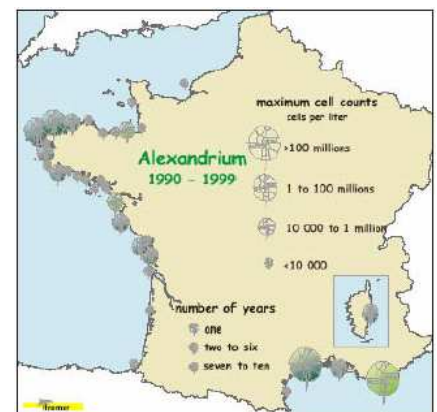
A. minutum et *A. tamarensense*.

A. minutum a été observé pour la première fois en France à des concentrations élevées dans les abers bretons (Aber-Wrach et Aber-Benoît) où il a provoqué une "eau rouge". Il y prolifère régulièrement depuis cette date dans plusieurs

zones de Bretagne nord : fortes concentrations en baie de Morlaix, concentrations plus variables dans les abers et dans l'estuaire de la Rance et plus épisodiquement et à faible concentration sur les côtes de Bretagne sud et ouest (carte 2). Cette espèce prolifère principalement dans les baies semi-fermées et les estuaires et son apparition en été semble liée à l'enrichissement des eaux en sels nutritifs.

Les concentrations susceptibles de conduire à une accumulation de toxines dans les coquillages sont comprises entre 10 000 et 100 000 cellules/litre, concentrations très importantes qui conduisent à la formation d'eaux rouges.

Les cellules d'*Alexandrium* ont la particularité de se transformer en kystes, forme de résistance qui leur permet de passer l'hiver enfouis dans les sédiments ; le redémarrage des blooms est dû à la ré-inoculation des kystes dans la colonne d'eau et leur germination lorsque les conditions environnementales sont favorables.



Carte 2 : Répartition des *Alexandrium* sur les côtes françaises (Ifremer)

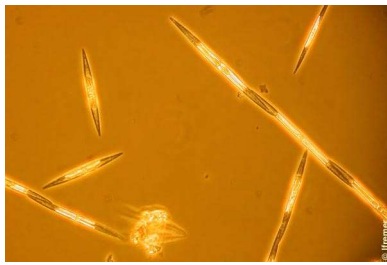
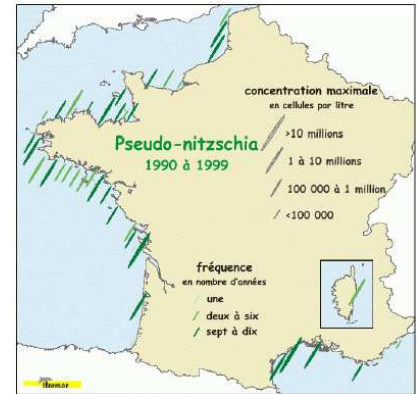


Photo 3 : Pseudo-nitzschia
(Nézan I., Ifremer)

Pseudo-nitzschia :

(diatomées) parmi les espèces de ce genre (photo 3), deux sont connues pour produire des **toxines amnésiantes** (ASP) : *P. pseudodelicatissima* et *P. multiseries*. Après avoir été toutes deux détectées durant plusieurs années à de faibles concentrations (carte 3), l'une d'elles a proliféré de façon

significative en **mer d'Iroise et en baie de Douarnenez** (Finistère) au printemps 2000, conduisant au premier arrêté préfectoral de fermeture de la pêche et du ramassage de coquillages pour risque d'intoxication amnésiante. En fin 2004, la toxicité présente dans les coquilles Saint-Jacques de la Rade de Brest et de la Baie de Seine a entraîné durant plusieurs mois la fermeture totale ou partielle des pêcheries correspondantes. Selon les connaissances actuelles sur ces espèces, la concentration minimale susceptible de conduire à une accumulation de toxines dans les coquillages serait de l'ordre de 100 000 cellules/litre.



Carte 3 : Répartition des Pseudo-nitzschia sur les côtes françaises (Ifremer)

LES FACTEURS DE PROLIFÉRATION DU PHYTOPLANCTON

Les développements phytoplanctoniques sont des **phénomènes naturels qui participent aux transferts d'énergie et de matière dans les écosystèmes marins**. Ces phénomènes se produisent tous les ans quand les conditions du milieu deviennent favorables. Cependant, ces développements phytoplanctoniques deviennent néfastes pour le milieu lorsqu'ils deviennent trop importants (bloom).

Les conditions optimales pour une production intense de phytoplancton sont des eaux côtières enrichies en **sels nutritifs** combinées à des conditions de **température** et de **lumière** idéales. Cependant, les variables influençant le développement phytoplanctonique sont nombreuses : température, salinité, lumière, sels minéraux, broutage par les herbivores, courants, brassage des eaux, accroissement des échanges maritimes internationaux avec éventuellement introduction de nouvelles espèces de plancton, etc.

Si l'on envisage uniquement la production de biomasse résultant des blooms, les conditions propices au déclenchement du phénomène sont aujourd'hui relativement bien connues, en revanche le déterminisme de l'apparition et de la croissance d'une population particulière (telle que celle d'une espèce productrice de toxines) reste à élucider.

Les facteurs naturels

Un rayonnement solaire suffisant permet une floraison printanière avec un développement important de diatomées et de quelques dinoflagellés.

Le recyclage des éléments nutritifs, très appauvris après le premier bloom phytoplanctonique printanier, rend possible l'apparition de **floraisons secondaires** (en été et en automne). Au cours du printemps et de l'été, la population s'adapte donc aux conditions du milieu, par une **succession des espèces répondant le mieux aux variations physiques et à la qualité nutritionnelle des eaux**.

La turbulence : le développement des dinoflagellés est le plus souvent associé à une colonne d'eau stratifiée alors que la croissance des diatomées est plutôt associée à une colonne d'eau bien brassée.

● Les facteurs anthropiques

Les apports en éléments nutritifs (azote, phosphore) d'origine terrestre ont un rôle important dans la prolifération de phytoplancton. L'augmentation des apports terrigènes d'azote et de phosphore alors que l'apport en silicium ne change pas (provenant de l'érosion naturelle des sols), provoque une baisse des rapports silicium/azote et silicium/phosphore. Ceci induit une **situation de dystrophie** (déséquilibre) favorable au phytoplancton non siliceux (flagellés) par rapport aux diatomées (à coque siliceuse), ce qui augmente les risques de nuisances écologiques dans le milieu aquatique.

L'implication de l'augmentation de sels nutritifs dans la prolifération du phytoplancton toxique, est controversée. Certains auteurs pensent que les proliférations d'espèces phytoplanctoniques toxiques, en particulier les dinoflagellés, ont vu leur abondance augmenter, surtout au niveau des eaux côtières soumises à un enrichissement en sels nutritifs par les eaux douces ; alors que d'autres pensent que rien ne prouve que l'événement toxique soit lié à l'augmentation des concentrations en sels nutritifs.

● IMPACTS SUR LE MILIEU

● Dystrophie

L'augmentation des apports en sels nutritifs (surtout azotés) par rapport aux teneurs en silice qui restent constantes crée une situation de déséquilibre (dystrophie) favorable aux espèces flagellées (sans coques) au détriment des diatomées qui sont, elles, plus rarement à l'origine de nuisances écologiques dans le milieu aquatique.

● Hypoxie/anoxie

Le phénomène d'eaux colorées est le plus **souvent bénéfique et sans conséquences néfastes sur les niveaux trophiques supérieurs**. Cependant, dans des conditions météorologiques spécifiques (calmes et stratification de l'eau) et en milieu eutrophisé, en fin de bloom, une **hypoxie** voire une **anoxie** peut apparaître.

Hypoxie : Condition dans laquelle la teneur en oxygène est inférieure à sa teneur normale.

Anoxie : Absence d'oxygène. Dans un milieu anoxique, le maintien de la respiration aérobie est impossible, par conséquent, la vie se limite à la présence d'organismes dont le métabolisme est assuré par d'autres mécanismes (fermentation, respiration, chimiosynthèse bactérienne ...).

Le développement d'une biomasse importante de phytoplancton peut être suivi, dans certaines conditions hydrodynamiques, par une **baisse considérable des concentrations en oxygène dissous dans l'eau**, notamment **près des fonds**. En effet, lors de la mort, puis de la dégradation bactérienne de cette biomasse phytoplanctonique, la consommation en oxygène dissous peut dépasser les apports au milieu. Cette **consommation accrue d'oxygène** peut se traduire par une hypoxie voire une anoxie avec **mortalité d'animaux benthiques** comme les coquillages, les crustacés, les poissons. Cette mortalité d'organismes marins touche surtout les espèces sédentaires qui ne peuvent pas fuir les zones à déficit d'oxygène.

En Bretagne, les eaux littorales nord sont en zone macrotidale, c'est-à-dire fortement brassées par les marées. Il en résulte un potentiel important de réoxygénation. Ainsi, dans ces eaux côtières, peu de cas d'eutrophisation avec hypoxie ou anoxie sont observés, sauf en cas de circonstances climatiques particulières (fort réchauffement saisonnier en mortes eaux avec stratification de la colonne d'eau isolant la couche d'eau de fond du contact avec l'atmosphère).

Des phénomènes importants d'hypoxie et anoxie sont surtout constatés dans les bouchons vaseux des estuaires, qui empêchent les espèces migratrices de remonter.

● Mortalité d'organismes marins

Les blooms de phytoplancton toxique peuvent engendrer des mortalités de poissons ou d'invertébrés marins. Elles sont généralement consécutives à la production de toxines directement libérées dans le milieu. Mais des lésions mécaniques peuvent également être engendrées comme le colmatage des branchies par la production de mucus ou l'altération des branchies par les excroissances de certaines espèces phytoplanctoniques.

● Maladies chez l'homme consommateur de coquillages

Le REPHY (REseau national PHYtoplanctonique) est un réseau de surveillance d'IFREMER qui effectue des surveillances régulières sur de nombreux sites bretons afin de détecter les proliférations d'algues et intervenir dès qu'une espèce toxique apparaît.

● REFERENCES

CSEB, 1998. Les apports de nitrates aux eaux littorales bretonnes : caractérisation et évolution des flux ; rôle dans les proliférations algales (macroalgues et phytoplanctons). 24p.

Gailhard I., 2003. Analyse de la variabilité spatio-temporelle des populations microalgales côtières observées par le "REseau de surveillance de Phytoplancton et des phycotoxines" (REPHY). Thèse de l'université de la Méditerranées, Aix-Marseille II, 187 p.

Ménesguen A. (coord) et al., 2001. L'eutrophisation des eaux marines et saumâtres en Europe, en particulier en France. Rapport Ifremer pour la Commission Européenne, 59p.

Sites web :

<http://www.bretagne-environnement.org/rubrique310/rubrique422/>

<http://www.ifremer.fr/envlit/documentation/dossiers/toxines10ans/rephy-c4.htm>



GLOSSAIRE (FICHES D)

A

ALGUES VERTES

Macrophytes marines de type chlorophycées (ulves, monostromes, entéromorphes) qui se révèlent les plus aptes à profiter d'eaux à salinité variable très enrichies en nutriments. On parle souvent de "marée verte" à propos de ces accumulations estivales de biomasse macroalgale.

ANOXIE

Absence d'oxygène. Dans un milieu anoxique, le maintien de la respiration aérobie est impossible, par conséquent, la vie se limite à la présence d'organismes dont le métabolisme est assuré par d'autres mécanismes (fermentation, respiration anaérobie comme la sulfato-réduction, la photosynthèse bactérienne ...). Un milieu toxique est au contraire un milieu bien oxygéné.

C

COEFFICIENT DE DISPERSION

En mer, coefficient de proportionnalité entre le flux de dispersion d'une solution et le gradient de concentration de cette solution.

D

DIATOMEES

Algue microscopique marine ou lacustre à coque (test) siliceuse. Cette coque est souvent finement ornementée.

DINOFLAGELLEE

Groupe d'espèces d'algues unicellulaires ayant en commun l'existence de deux flagelles leur permettant une relative mobilité.

DINOPHYSIS

Dinoflagellé pouvant être responsable de toxicité dans les coquillages (toxines diarrhéiques).

DYSTROPHIE

Fonctionnement anormal du milieu se traduisant par exemple par des efflorescences algales, toxiques ou non, conduisant à des mortalités massives.

E

EAU COLOREE

Dans les eaux littorales, le phénomène d'eaux colorées correspond à une prolifération phytoplanctonique dense aussi appelée "bloom" ou "efflorescence" [phytoplanctonique](#). La couleur de l'eau de mer est due aux pigments des cellules de micro-algues (eaux rouges, vertes ou brunes).

H

HYDRODYNAMIQUE

Ensemble des caractères ayant trait aux mouvements de l'eau. En milieu marin, l'hydrodynamique règle le transport et la dilution des nutriments dissous, des particules et des algues en suspension, conditionnant le temps de résidence moyen de ces dernières dans les eaux enrichies par les apports terrigènes

HYPOXIE

Condition dans laquelle la teneur en oxygène est inférieure à sa teneur normale.

K

KYSTE

Forme que peuvent prendre certaines espèces de phytoplanctons (Alexandrium, par ex.) qui leur permet de passer l'hiver en s'enfouissant dans les sédiments. Les kystes se présentent alors comme des particules sédimentaires inertes, qui peuvent de concentrer et se disperser sous l'action de la houle et des courants. Au printemps ils peuvent se revivifier. Leur domaine géographique peut donc s'agrandir compte tenu de la dispersion.

M

MAREE VERTE

Constitue une forme d'eutrophisation côtière, c'est à dire de développement excessif d'algues par rapport aux capacités d'assimilation physique et biologique de l'écosystème.

MARNAGE

Différence entre les hauteurs de pleine mer et de basse mer.

N

NORTH ATLANTIC OSCILLATION

Oscillation barométrique qui a une grande influence sur le climat et les précipitations de l'Europe occidentale.

P

PHYCOTOXINES

Toxines produites par les espèces de phytoplanctons toxiques.

PHYTOPLANCTON

Ensemble des algues microscopiques unicellulaires en suspension dans l'eau.

T

TEMPS MOYEN DE RESIDENCE

Temps moyen qu'une molécule d'eau ou de soluté passe dans le bassin versant. En supposant que l'écoulement est homogène dans le temps et dans l'espace, le temps moyen de résidence de l'eau dans un réservoir est donné par la formule théorique suivante :

$$T = \frac{V}{Q}$$

avec, T temps moyen de résidence
 V volume du réservoir
 Q débit du réservoir

Cette notion est aussi utilisée en océanographie.

V

VITESSE RESIDUELLE

Au cours d'un cycle de marée, les particules d'eau ont un mouvement de va et vient. A la fin du cycle de marée, les particules n'ont généralement pas retrouvé exactement leur emplacement initial, mais se sont déplacées. A ce mouvement est associé une vitesse qualifiée de "résiduelle".