avis sur les questions ou assertions posées par l'Institut de l'environnement et par les syndicats agricoles (FDSEA, CDJA) au sujet des marées vertes

Collectif scientifique[1]

NDLR : La préfecture de la région Bretagne a demandé une expertise des documents relatifs aux algues vertes diffusés par la fédération départementale des syndicats d'exploitants agricoles (FDSEA) et le centre départemental des jeunes agriuculteurs (CDJA) du Finistère. Pour l'organisation de la réponse, coordonnée par l'Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (IFREMER) et élaborée par des scientifiques de l'IFREMER, du Centre d'étude et de valorisation des algues (CEVA), d'Agrocampus Ouest et de l'Institut national de la recherche agronomique (INRA), ont été identifiées des questions et des assertions posées par ces syndicats et par l'association nommée « Institut de l'environnement ». À chacune de ces questions, ou assertions, une réponse est donnée par un ou plusieurs organismes rédacteurs dont nous indiquons, à la fin de chaque réponse, le principal (voir note 1).

En ce qui concerne la compréhension globale du phénomène

• Les échouages d'algues vertes auraient toujours existé, et étaient valorisés comme goémon par les agriculteurs dès le début du XXe siècle. Les photos IGN de 1952 montreraient des rideaux d'ulves déjà sur tous les grands sites.

Des photos aériennes en noir et blanc datant du début des années 1950 sur la baie de Lannion et la baie de Douarnenez montrent des petites taches sombres au bas de l'eau de mer ressemblant à la configuration des proliférations d'algues vertes d'aujourd'hui. D'une part, il n'est pas possible de certifier qu'il s'agit d'algues vertes. D'autre part, si ce sont des algues vertes, elles ne sont qu'en petite quantité, indiquant une simple présence (non assimilable à une prolifération), que les modèles scientifiques de l'IFREMER et du CEVA reproduisent d'ailleurs dans les simulations réalisées avec de faibles apports de nitrate. En réalité, les échouages d'algues vertes utilisés par les agriculteurs (« goémon vert ») provenaient probablement d'arrachages de populations colonisant naturellement les substrats durs au printemps et s'échouant de manière temporaire à cette saison tout le long du littoral. Ces algues se retrouvaient aussi probablement transportées au fond des grandes baies où elles persistaient dans un rideau de bas de plage avant de disparaître faute de nutriments. Elles ont par la suite survécu de mieux en mieux, puis prospéré grâce à la disponibilité croissante de ces nutriments en période estivale *(rédaction principale : CEVA).*

1. Ce collectif est formé de quatre rédacteurs principaux : Alain Ménesguen (IFREMER), Pierre Aurousseau (Agrocampus Ouest), Patrick Dion (CEVA) et Patrick Durand (INRA), avec la contribution et la relecture de : Jean-Yves Piriou (IFREMER), Loïc Antoine (IFREMER), Chantal Gascuel (INRA) et Laurent Ruiz (INRA).

• La marée verte serait un phénomène compliqué qu'on ne comprend pas bien, sur lequel il faudrait développer de la recherche, notamment sur des voies inexplorées ne faisant pas intervenir l'azote. D'ailleurs, les marées vertes dans le monde ne seraient pas systématiquement associées à des bassins d'agriculture intensive.

La prolifération d'algues vertes (ulves, entéromorphes, *etc.*) relève d'un mécanisme bien connu qui est celui de l'eutrophisation, « surproduction » végétale aquatique en lien avec une augmentation des apports en sels nutritifs (eutrophe signifie « bien nourri »). D'une façon générale, azote et phosphore sont nécessaires au développement d'une eutrophisation mais l'un ou l'autre de ces éléments sera généralement apporté en quantité moindre par rapport à l'équilibre N/P de la plante et cet élément jouera un rôle de facteur minimum ou limitant pour sa croissance.

La question est donc de comprendre pourquoi ce sont les ulves qui profitent spécifiquement de l'enrichissement des eaux littorales en azote inorganique, qu'il soit sous forme ammonium (NH_4) ou nitrate (NO_3), d'origine plutôt urbaine (au débouché de rejets urbains non-traités) ou franchement agricole (cas de la Bretagne).

Ceci s'explique d'abord par une raison propre aux algues vertes : comme les orties, ronces, sureaux, oseilles et pissenlits sur la terre ferme, plusieurs genres de chlorophycées *(Ulva, Enteromorpha, Monostroma, Cladophora, etc.)* sont des végétaux nécessitant, pour se développer, de fortes concentrations d'azote dans le milieu environnant, et ces algues nitrophiles peuvent donc être considérées comme des indicateurs de milieux riches en azote (Ho, 1987). Cette constatation est bien établie, et aucune recherche supplémentaire ne pourra enlever aux ulves leur prédilection pour les endroits peu profonds très riches en azote. Letts et Richards (1911) signalaient déjà l'abondance des ulves devant l'exutoire des rejets urbains anglais, à l'époque non-traités et donc riches en ammonium et nitrate; la même cause était invoquée dans les ports de Boston (Sawyer, 1965) comme de Portsmouth (Soulsby *et al.,* 1978). Dans les années 1980 et début 1990, des proliférations de l'algue verte *Enteromorpha* ont été repérées et analysées devant des rejets azotés de stations d'épuration en Martinique (Piriou, 1993).

Si des apports concentrés d'origine urbaine et domestique peuvent constituer des foyers côtiers de prolifération d'algues vertes, il faut toutefois rappeler que depuis la mise en place, dans les pays occidentaux, de réseaux d'assainissement collectif et de traitement dénitrifiant dans les stations d'épuration, les rejets domestiques, notamment en France, ont considérablement diminué, alors même qu'augmentaient considérablement les apports d'origine agricole (lessivage du nitrate de sols excessivement fertilisés). Plusieurs grandes marées vertes dans le monde sont actuellement situées au débouché de bassins versants très agricoles : lagune de Venise, où 65% des apports d'azote sont d'origine agricole (Burigana *et al.,* 2003), lagune Sacca di Goro au débouché du Pô (Viaroli *et al.,* 2006), Bretagne (Piriou *et al.,* 1991). Toutefois, dans la baie de Jiaozhou/Qingdao, où s'est développée la plus grande marée verte jamais observée – environ un million de tonnes d'*Ulva prolifera* en 2008 selon Leliaert *et al.,* 2009 – ce phénomène est probablement causé par des apports d'origine mixte : urbaine, industrielle et agricole (Shen, 2001).

L'accumulation d'algues proliférant en pleine eau s'explique, quant à elle, par des raisons externes aux algues vertes : un déficit de consommation par des herbivores, et une évacuation insuffisante par les courants de la biomasse hors de la zone de production. En effet, comme les chlorophycées sont originellement des algues fixées, leurs prédateurs naturels sont des brouteurs inféodés aux substrats durs (rochers), notamment des gastéropodes (bigorneaux, patelles, *etc.*). Or ces animaux ne peuvent pas vivre dans deux biotopes devenus récemment propices aux chlorophycées depuis que les rivières y ont amené de l'azote concentré : les vases estuariennes et portuaires et la zone de déferlement des petites vagues sur les plages. Dans ces endroits, le contrôle de la pousse des jeunes thalles par le broutage n'existe plus, faute de brouteurs naturellement adaptés à évoluer en suspension dans la zone de déferlement des vagues.

Les ulves libres déposées sur les fonds de quelques mètres sont par contre accessibles et grignotées (Geertz-Hansen *et al.,* 1993) par des petits crustacés isopodes (*Idothea baltica*) ou amphipodes (*Gammarus* sp.), mais Kamermans *et al.* (2000) ont démontré l'effet paradoxalement stimulant sur la croissance des ulves de ces brouteurs : plus que des ulves elles-mêmes, ces petits crustacés sont friands des algues poussant en épiphytes sur les ulves, notamment des diatomées unicellulaires ; en nettoyant les thalles d'ulves de leurs salissures, elles leur redonnent un meilleur accès à la lumière et aux sels nutritifs.

Pour ce qui est du confinement physique, il est évident que les lagunes peu profondes (étangs palavasiens, lagunes de Venise ou de Tunis, *etc.*) ont toujours pu retenir naturellement des algues en dérive, du fait de la très faible circulation des eaux. Par contre, en mer à marée, il a fallu attendre la réalisation de modèles numériques de courants pour visualiser les zones naturellement rétensives sur les côtes de Bretagne (Ménesguen et Salomon 1988 ; Garreau 1993) : jusqu'alors, l'accumulation d'algues croissant en suspension dans l'eau apparaissait comme paradoxale sur des plages largement ouvertes sur le large, et balayées deux fois par jour par un ample balancement des marées.

Finalement, on peut dire que le phénomène de marée verte n'est plus, ni le plus compliqué, ni le moins étudié des phénomènes d'eutrophisation côtière. Les causes majeures en sont connues, et ne nécessitent plus de recherche importante pour élaborer des stratégies de remédiation *(rédaction principale : IFREMER et CEVA).*

• La modélisation des marées vertes ne pourrait rien prouver en l'état actuel des connaissances car elle ne prend en compte que le rôle de l'azote.

Il est parfaitement erroné de prétendre que le modèle développé par l'IFREMER pour simuler les marées vertes de Bretagne ne prend en compte que l'effet de l'azote sur la croissance de la biomasse. En effet, en plus de l'effet de la concentration de l'eau de mer en azote inorganique dissous (ammonium et nitrate), les différentes versions du modèle (Ménesguen et Salomon, 1988 ; Ménesguen, 1992 ; Ménesguen *et al.,* 2006 ; Dussauze et Ménesguen, 2008) ont toujours pris en compte l'effet de la température et de la transparence de l'eau, ainsi que ceux de la concentration de l'eau de mer en phosphate dissous sur la croissance de l'ulve. Outre la mortalité naturelle, le modèle a aussi toujours pris en compte l'effet d'évacuation de la biomasse par les courants. Sur les versions d'avant les années 2000, les courants étaient simulés par un champ de courants résiduels horizontaux modulé dans le temps par le coefficient de marée, mais depuis 2006, le modèle calcule les courants instantanés en 3D, et prend donc en compte l'effet variable du vent et des apports d'eau douce. Cette version est celle désormais utilisée par le CEVA pour ses études de sites à marées vertes (Perrot *et al.,* 2007 ; CEVA, 2009a).

Ces modèles tridimensionnels sont initiés volontairement avec une situation irréaliste (des ulves partout, posées sur le fond, quelle que soit la profondeur), et montrent leur robustesse en se calant d'eux-mêmes, au bout de quelques mois, sur la distribution observée des marées vertes. Quand ils comprennent en plus la composante phytoplanctonique (Ménesguen *et al.,* 2006 ; Dussauze et Ménesguen, 2008), ils montrent leur capacité à générer des marées vertes même en présence de compétition par le phytoplancton pour les nutriments et la lumière. L'IFREMER a été pionnier en ce qui concerne la modélisation des proliférations d'ulves, car des modèles de marée verte similaires à ceux de l'IFREMER ont été réalisés à partir de la fin des années 1990 par des scientifiques danois (Salomonsen *et al.,* 1999), hollandais (Hulsbergen, 2006), portugais (Trancoso *et al.,* 2005), italiens (Coffaro et Sfriso, 1997) et américains (Brush et Nixon, 2010). Seuls des modèles mathématiques peuvent prendre en compte simultanément la variabilité des grandes composantes du phénomène *(rédaction principale : IFREMER).*

En ce qui concerne la responsablité de l'azote

• Il n'y aurait pas de problème d'azote en Bretagne puisque quasiment plus aucun cours d'eau ne dépasse la teneur-limite officielle de 50mg/l dans plus de 5% du temps.

En premier lieu le fait que la norme « eaux distribuées » ou « eaux brutes » de 50 mg/l soit respectée dans bon nombre de prises d'eau tient en partie à la fermeture des prises d'eau qui ne respectaient pas cette norme. Les dernières fermetures résultent du contentieux « Eaux brutes » qui a conduit la France à fermer de manière autoritaire plusieurs prises d'eau potable. D'autre part, les données de qualité des eaux de surface et souterraines publiées régulièrement par les autorités françaises et européennes montrent que les eaux bretonnes, malgré les progrès accomplis ces dernières années, se situent toujours parmi les eaux les plus riches en azote de France et d'Europe (Gascuel *et al.,* 2010). Il faut rappeler ici que les teneurs en nitrates de cours d'eau indemnes de toute pollution, en région tempérée, sont de l'ordre de quelques mg/l tout au plus (Meybeck et Helmer, 1989 ; Topcu *et al.,* 2011 ; Durand *et al.,* 2011)

Par ailleurs, il faut souligner que la norme de 50 mg/l est une norme réglementaire dont le respect ne garantit en aucun cas que l'on soit à l'abri des impacts environnementaux de la dégradation de la qualité des eaux, notamment de l'eutrophisation des eaux douces ou littorales (Durand *et al.,* 2011, Billen *et al.,* 2011). Les scientifiques savent depuis des décennies que le respect des normes de potabilité est beaucoup moins contraignant que les objectifs environnementaux de qualité des eaux. Cela montre d'ailleurs qu'il est aberrant, d'un point de vue environnemental, de vouloir remettre en cause ces normes. En substance, les objectifs de qualité des eaux qu'il est nécessaire de se fixer pour observer une réduction importante des marées vertes sont bien inférieurs à 50 mg/l (moins de 10 mg/l de nitrate, voire moins dans certains sites dits sensibles) *(rédaction principale : Agrocampus-INRA).*

• L'azote accessible aux ulves vient de très nombreuses sources (atmosphère, sédiment, stock marin, fixation symbiotique, apports de STEP... agriculture), donc il ne viendrait pas massivement de l'agriculture ; l'été, l'azote viendrait massivement des rejets urbains. D'ailleurs, il n'y aurait pas eu d'accroissement significatif de l'agriculture depuis les années 1950 sur le bassin versant du Yar.

Dans leur diagnostic les auteurs des deux premiers projets de territoire à algues vertes fournissent des estimations de la part de l'azote non agricole dans les flux arrivant à la côte par le réseau hydrographique (Lannion-Trégor Agglomération, 2010). Cette part de l'azote non agricole rassemble l'azote provenant de l'assainissement collectif et de l'assainissement non collectif. Pour les territoires de la Lieue de Grève et de la baie de Saint-Brieuc, cette part de l'azote non agricole est estimée par les auteurs à respectivement moins de 2% et 7% (soit 98% et 93% d'azote d'origine agricole). D'une manière générale, on peut estimer en Bretagne la part de l'azote non agricole à 5% en moyenne, cette part pouvant dans certains cas monter entre 5 et 10% du flux sortant. Certes, cette part non agricole augmente en proportion durant la période estivale, du fait principalement de la baisse du débit des rivières et secondairement de l'augmentation de la population sur la côte.

Cependant, l'arrêt du lessivage des sols en été ne signifie pas que les nitrates d'origine agricole cessent d'arriver à la mer : en effet, les rivières sont alimentées essentiellement par l'eau des nappes souterraines chargées de nitrate provenant des lessivages hivernaux accumulés au cours des années, voire décennies précédentes : les mécanismes de transfert de nitrates des parcelles agricoles vers les rivières ont été longuement étudiés, décrits et modélisés notamment à partir de suivi de bassins versants bretons très instrumentés (Legout *et al.,* 2007 ; Martin *et al.,* 2004, 2006 ; Molenat *et al.,* 2002a et b, 2008 ; Rouxel *et al.,* 2010 ; Ruiz *et al.,* 2002a et b). Dans le cas du Yar, les compartiments souterrains qui contribuent à l'alimentation de la rivière en été sont relativement plus concentrés que ceux qui y contribuent en hiver. L'origine agricole des nitrates reste donc largement prépondérante, même en été.

Concernant les apports atmosphériques, il faut en premier lieu rappeler qu'ils résultent eux-mêmes majoritairement des émissions d'origine agricole. La méthode CITEPA conduit à estimer à 112 000 tonnes les émissions d'azote sous forme ammoniacale d'origine agricole en Bretagne (pour un total d'émission sur le territoire métropolitain de 576 000 tonnes environ). Ces émissions se produisent au niveau des bâtiments d'élevage, du stockage et de l'épandage. On estime que la moitié retombe à courte distance c'est-à-dire sur le territoire breton lui-même (voir le bilan pour les Pays-Bas par Leip *et al.,* 2011, et les estimations régionales de De Vries *et al.,* 2011). Localement, dans les sites sous le vent des sites d'émission, ces retombées atmosphériques peuvent être assez importantes et se mesurer en quelques dizaines de kg N à l'hectare. Il existe d'ailleurs un gradient régional de dépôt atmosphérique d'azote entre le sud-ouest (moins de 5 kg/ha) et le nord-est (plus de 40 kg/ha) de la Bretagne. Sur les bassins versants alimentant les baies, ces apports ne sont pas négligeables et doivent être pris en compte dans les calculs de bilan. Mais comme la plupart des sites à marées vertes ne se situent pas à courte distance et sous le vent de sites d'émission et comme les dépôts ammoniacaux sont surtout importants sur les surfaces végétales « rugueuses » (forêts en particulier), on peut considérer que les apports atmosphériques directs sur la zone côtière sont nettement inférieurs et se situent plus vraisemblablement autour de 10 kg d'azote /ha sur la côte nord et négligeables sur la façade ouest. En conséquence, compte tenu de la faible surface relative des sites d'échouage des algues vertes, les apports atmosphériques directs sur la zone côtière ne représentent qu'une part infime de l'azote absorbé par les algues vertes (quelques dizaines de kilogrammes par rapport à des tonnes ou des dizaines de tonnes d'azote absorbées par les algues vertes).[2]

Concernant l'azote d'origine marine, rappelons qu'en conditions naturelles, c'est-à-dire quand le milieu océanique n'est pas enrichi en azote par les apports terrigènes, les teneurs en nitrate de l'eau océanique sont de l'ordre de la micromole par litre (c'est-à-dire de 0,062 mg/l de nitrate). En hiver ou à la fin de l'hiver, la concentration en nitrate de l'eau océanique à proximité des côtes peut atteindre sous l'effet des apports continentaux des niveaux aux alentours de 10 micromoles par litre (soit 0,62 mg/l de nitrate). Compte tenu du volume d'eau, cela représente des masses très importantes de nitrate, mais les algues vertes et les ulves en particulier sont des végétaux assez primitifs adaptés aux biotopes très riches en azote, qui ne disposent donc pas de pompes enzymatiques ultra-performantes leur permettant de s'alimenter en azote à partir d'eaux faiblement concentrées en nitrate ou ammonium. Le long des côtes non encore enrichies par des rivières, et plus généralement dans les eaux côtières bretonnes très peu enrichies des années 1950, les ulves ne peuvent donc pas s'alimenter correctement en azote à partir de l'eau faiblement concentrée dans laquelle elles baignent. Par contre, quand la concentration en nitrate est élevée dans l'eau marine environnante en raison de la dilution d'une eau de rivière très enrichie, le fort gradient de concentration entre cette eau et leurs propres tissus permet aux algues vertes d'absorber cet azote en grande quantité. Enfin il convient de noter que la fixation symbiotique d'azote en milieu côtier est faible au regard des apports terrigènes (Conley *et al.,* 2009).

Concernant le Yar, qui se jette sur la plage de Saint-Michel en Grève, force est de reconnaître que la qualité des eaux en nitrate de cette rivière n'est pas une des plus dégradées de Bretagne. Mais elle se situe dans la moyenne tant au niveau breton – le flux spécifique du Yar se situe aux alentours de 24-25 kg d'azote par hectare de bassin versant alors que la moyenne bretonne est à 25 kg d'azote par hectare de bassin versant – qu'au niveau européen pour des bassins versants comparables sur le plan de la taille, du climat et de l'occupation du sol (Billen *et al.,* 2011). Considérant les flux très faibles observés dans les zones d'agriculture extensive, et sachant que la moyenne des premières mesures systématiques de nitrate faites dans les rivières de Bretagne s'établit à 4,4 mg/l de nitrate en 1971, on peut estimer que dans le cas d'une activité agricole sans intrants telle qu'elle se pratiquait avant le milieu du XXe siècle, ce flux spécifique serait inférieur à 5 kg d'azote par hectare de bassin versant. Même si le bassin du Yar apparaît comme modérément impacté, le fait que son

2. Voir la carte des émissions d'ammoniac d'origine agricole en Europe (en anglais et en couleurs). *Source :* The European Pollutant Release and Transfer Register, *http://prtr.ec.europa.eu/*

flux spécifique soit au moins cinq fois plus élevé que les niveaux d'avant l'intensification agricole montre bien que la pression azotée agricole a malgré tout bien augmenté au cours des dernières décennies *(rédaction principale : Agrocampus-INRA-IFREMER)*.

• Les biomasses d'algues vertes ne sont pas proportionnelles aux apports azotés des rivières locales, ni annuellement, ni sur le mois de juin ; donc l'azote ne serait pas le facteur-clé des marées vertes.

L'IFREMER a été le premier, dans son rapport de 1986 (Piriou, 1986) et sa publication de 1991 (Piriou *et al.,* 1991) à signaler l'apparent paradoxe de la Bretagne, où l'importance des échouages d'ulves ne semble absolument pas corrélée à l'importance des flux annuels d'azote déversés par les rivières sur les sites à marées vertes, alors que l'on sait que les ulves sont très avides d'azote (nitrophiles). Dès 1986, l'IFREMER signalait d'abord que la partie hivernale (majoritaire) du flux annuel de nitrate amené par une rivière n'est pas utilisable par les ulves en raison de l'arrêt de croissance des algues par insuffisance de lumière en hiver. En revanche, Ménesguen et Piriou (1995), sur l'exemple de la baie de Saint-Brieuc, puis le CEVA (2008a) à l'échelle de la Bretagne, ont pu mettre en évidence que la couverture algale cumulée des sites lors du maximum estival de prolifération montrait bien une bonne corrélation avec les flux d'azote de la saison de croissance printanière (variables de 1 à 3 à 1 à 10 selon les sites et années). Mais surtout, la résolution de cet apparent paradoxe a motivé la recherche d'une condition «cachée» de la marée verte qui vienne s'ajouter aux causes connues, lumière et azote inorganique, et puisse expliquer la présence de marée verte sur certains estrans et pas d'autres, malgré l'arrivée de flux azotés comparables.

Dès 1988, l'IFREMER a mis en évidence, comme troisième condition à l'accumulation de biomasse sur les plages, le confinement hydraulique de certains fonds de baie, par absence locale de dérive résiduelle de marée (Ménesguen et Salomon, 1988). Depuis 1988, l'explication par l'IFREMER de la genèse de marées vertes fait donc intervenir impérativement et simultanément une cause anthropique et deux conditions naturelles :
– un enrichissement conséquent en azote inorganique dissous ;
– un bon éclairement (donc un vaste estran en pente douce) ;
– un bon confinement des eaux à la côte.

Alors que les deux conditions naturelles existent quasiment inchangées depuis des milliers d'années en Bretagne, la cause anthropique a vu son niveau, naturellement faible, décupler en vingt ans en raison de l'activité humaine. À partir du moment où l'on sait qu'un phénomène est dépendant de plusieurs facteurs, c'est une erreur scientifique (ou une malhonnêteté) de ne considérer que la relation statistique entre le phénomène et une seule de ses causes, quelles que soient les valeurs prises par les autres causes. En agronomie, personne n'irait soutenir que l'azote n'a aucun rôle en s'appuyant sur des expériences faites en milieu carencé en potassium ou en phosphore : la loi du minimum, ou loi de Liebig, permet de bien résumer ces interactions entre facteurs de croissance *(rédaction principale : IFREMER)*.

• La quantité d'azote contenue dans la biomasse d'ulve est très petite par rapport à celle déversée dans les baies par les rivières, et pourrait être fournie par le stock naturel purement marin ; donc les marées vertes ne seraient pas causées par les apports des rivières et il serait inutile d'abaisser même très fortement les teneurs des rivières en nitrate. D'ailleurs, la baisse des teneurs moyennes des rivières bretonnes en nitrate observée depuis 1995 n'a pas fait diminuer les marées vertes.

D'une façon générale, l'importance d'un élément nutritif pour la survie et la croissance d'un être vivant ne peut pas être déduite de sa simple teneur dans l'organisme, même rapportée à son abondance dans le monde environnant. Ce n'est pas parce que la quantité d'oxygène respirée par la population d'un village est infime par rapport à la quantité d'oxygène contenue dans l'atmosphère surplombant le village, et plus encore par rapport au flux d'oxygène transitant par unité de temps au-dessus de ce village, que l'oxygène de l'air peut être considéré comme négligeable ou inutile à la vie des villageois ! De plus, quantité présente ne veut pas dire quantité accessible au vivant, ou

biodisponible : les plaines océaniques abyssales sont remplies en permanence de quantités astronomiques de sels nutritifs, et pourtant la végétation des zones centrales des océans est très pauvre, tout simplement parce que le mélange des eaux profondes avec la couche des 100 premiers mètres sous la surface, seule éclairée et donc propice à la photosynthèse, ne se fait pratiquement pas pendant le printemps et l'été, en raison de la stratification thermique.

En ce qui concerne plus précisément l'ulve, sa réponse à de l'azote inorganique dissous dans l'eau de mer environnante n'est pas linéaire (ou proportionnelle) : répondant à une cinétique enzymatique basique, dite de Michaelis-Menten, la courbe donnant l'absorption de nitrate par l'ulve en fonction de la concentration du nitrate dans l'eau de mer est une hyperbole, qui part de zéro aux faibles concentrations, croît un temps quasi proportionnellement, puis s'incurve vers une valeur limite formant plateau. La demi-saturation pour l'absorption d'azote est atteinte à environ 25 micromoles par litre d'azote nitrique (valeurs mesurées de 12 à 46 sur *Ulva rigida* par Naldi et Viaroli, 2002 et de 18 à 33 par Lavery et McComb, 1991). Dans l'eau de mer océanique, surtout en fin de printemps et en été, la concentration en nitrate « marin » est si basse (environ 1 micromole/l de mai à septembre) que son absorption par l'ulve est infime, insuffisante pour assurer une bonne croissance à l'algue ; même si un renouvellement rapide de l'eau par les courants amène un flux (débit x concentration) important de nitrate à l'ulve, celle-ci se révèle incapable de pomper ce nitrate à si faible concentration, pour les raisons évoquées plus haut.

Au contraire, en eau côtière suffisamment enrichie par des apports de rivière (l'eau douce d'une rivière contenant 30 mg/l de nitrate correspond à une concentration de 484 micromole/l d'azote nitrique), l'absorption par l'ulve va devenir très importante, autorisant une croissance rapide : la marée verte devient possible. Mais si les apports terrigènes deviennent encore plus importants, ils en arrivent à dépasser les capacités d'absorption de l'ulve : au niveau de l'individu d'abord, parce que l'absorption ne peut plus augmenter au-delà de sa valeur plateau ; au niveau de la population ensuite, car la biomasse totale des ulves arrive à obscurcir la lame d'eau et à ainsi priver les individus d'éclairement : la lumière devient ainsi le facteur limitant des très fortes marées vertes bien établies. Les flux nitriques des rivières bretonnes avant l'intensification agricole (voir ci-dessus) ne causaient pas de marée verte gênante, car la zone fortement enrichie par leur dilution dans la bande côtière restait très peu étendue. Actuellement, au contraire, depuis la fin des années 1980 et dans de nombreuses baies, l'apport de nitrate par les rivières a créé des auréoles très étendues d'enrichissement des eaux côtières, où l'apport d'azote a largement dépassé les capacités de production d'ulves : c'est pour cette raison qu'une baisse de 35 mg par litre à 30 mg par litre de nitrate dans une rivière responsable de marée verte ne diminue aucunement la biomasse d'algues produite. Depuis longtemps, la biomasse d'ulves maximale pouvant être produite sur un site ne permet plus d'utiliser tout le nitrate amené d'avril à septembre par les rivières. Pour une année hydrologique moyenne, il faudra redescendre en-dessous de 15 mg/l de nitrate pour entrer à nouveau dans une situation où la marée verte baisse proportionnellement à la baisse des teneurs en nitrate. Avec les teneurs actuelles en nitrate, seules les années à printemps et été très secs – 1989 (Ménesguen et Piriou, 1995), 2003 (CEVA, 2008a) – ont réussi jusqu'à présent à diminuer sensiblement les marées vertes en abaissant suffisamment les débits, donc les flux nitriques terrigènes, sortant durant la belle saison des bassins versants schisteux à faible volume d'eaux souterraines *(rédaction principale : IFREMER)*.

En ce qui concerne la responsabilité du phosphore

• Ce ne serait pas l'azote, mais le phosphore qui serait naturellement limitant ; les marées vertes seraient dues au déstockage de phosphore sédimentaire, devenu plus intense du fait de l'accumulation de phosphore amené récemment par les rivières.

Comme l'azote, le phosphore est nécessaire à la croissance des ulves, mais quand on « interroge » les algues elles-mêmes en mesurant leurs teneurs internes en azote et phosphore, on constate que le phosphore est pratiquement toujours en excès par rapport aux besoins de la croissance des algues, alors que l'azote atteint en été sa valeur-plancher dans le tissu algal dans la plupart des sites. Ceci prouve qu'au cours de la phase printanière où se constitue l'essentiel de la biomasse d'une marée verte, c'est bien l'azote qui reste l'élément que les ulves ont le plus de mal à se procurer. Cette limitation azotée peut être directe (par exemple lors d'un étiage sévère des rivières, il n'y a plus assez d'apport de nitrate en été, alors que les besoins de la biomasse algale constituée sont énormes). Elle peut aussi devenir indirecte, car, comme rappelé plus haut, dans beaucoup de sites actuellement, c'est l'éclairement qui devient limitant en été dans la suspension d'ulves : ne pouvant plus effectuer la photosynthèse, les ulves ne peuvent plus ni créer de la biomasse supplémentaire ni pomper rapidement le nitrate nécessaire à combler leur déficit azoté causé par la période précédente de croissance rapide. Le phosphore semble ne jouer un véritable rôle de limitation de la croissance que de manière occasionnelle et/ou temporaire sur certains sites, comme montré récemment par le CEVA en baie de Concarneau où azote et phosphore apparaissent co-limitants à certaines périodes (CEVA 2008b, 2009b).

Par ailleurs, il ne faut pas oublier qu'en milieu côtier, les comportements des deux nutriments azote et phosphore sont différents : quand il arrive en mer, l'azote inorganique dissous est instantanément dilué vers le large alors que le phosphore précipite et tend à se concentrer dans les sédiments côtiers. Ce phosphore, ainsi piégé en quantité, est au moins pour partie facilement biodisponible (voir plus loin), ce qui explique sa disponibilité particulière pour les ulves. Non limitant pour les ulves et doté d'un stock important accumulé dans le sédiment côtier, le phosphore se retrouve en situation défavorable comme facteur de maîtrise par rapport à l'azote, qui ne présente pas de stockage dans le milieu côtier et s'avère encore limitant ou proche de la limitation pour la croissance des ulves *(rédaction principale : CEVA-IFREMER)*.

• Le phosphore amené par les rivières et stocké dans les sédiments côtiers viendrait principalement des rejets domestiques, et seulement de façon infime des terres agricoles.

Le stockage du phosphore dans les sédiments estuariens est un phénomène qui se produit à l'échelle géologique : les rivières de Bretagne suivent dans leur majorité le même lit depuis des millions d'années. On connaît quelques cas assez rares de modification de cours comme l'aval de la Vilaine, un des affluents du Scorff : le ruisseau de Pontcallec... En dehors de ces cas, cela fait donc des millions d'années que les rivières et les fleuves de Bretagne ont le même exutoire, même s'il s'est déplacé longitudinalement en fonction des fluctuations du niveau de la mer au gré des glaciations et des interglaciaires au quaternaire. Au cours des périodes interglaciaires, le phosphore transporté par les rivières et les fleuves de Bretagne était majoritairement sous forme particulaire en suspension dans l'eau issu de la décomposition des débris végétaux provenant de la végétation rivulaire (feuilles, aiguilles, écailles de bourgeons, brindilles, *etc.*). En arrivant dans les estuaires, l'essentiel de ces flux de phosphore flocule et vient chaque année grossir les stocks de phosphore estuariens.

Actuellement, les flux minimaux de phosphore, observés dans des bassins versants boréaux non habités sont d'environ 5 kg par km² et par an (Howarth *et al.*, 1996 ; Billen et Garnier, 2007). D'après Topcu *et al.* (2011), les flux de phosphore total des rivières tempérées non polluées seraient de l'ordre de 0,2 millimoles par m² et par an. Si l'on accepte ces chiffres et qu'on les applique au bassin versant du Yar, cette rivière aurait amené plusieurs dizaines de tonnes à l'estuaire du Yar aux cours des derniers millénaires, avant l'intensification agricole.

En résumé et à l'échelle de l'homme, il y a probablement depuis longtemps des stocks importants de phosphore dans les sédiments estuariens et on peut penser qu'à cette échelle le phosphore n'a jamais été limitant pour les algues vertes, car une partie de ce phosphore stocké est facilement mobilisable et assez biodisponible, comme le montre une abondante littérature tant dans le cas breton (Andrieux Loyer *et al.,* 2001, 2008) qu'un peu partout dans le monde (Maher et Devries, 1994 ; Jensen *et al.,* 1995 ; Guillaud *et al.,* 2000, Pant et Reddy, 2001 ; Coelho *et al.,* 2004 ; Canton, 2009, Conley *et al.,* 2009 ; Monbet *et al.,* 2010, Rydin *et al.,* 2011). Ces études montrent aussi que la mobilisation du phosphore des sédiments devient plus intense en été, donc au moment où les algues en ont besoin pour leur croissance.

Il est certain que le développement des villes en particulier après la seconde guerre mondiale et l'absence de traitement de déphosphatation pendant des décennies ont contribué à des flux de phosphore plus importants, mais il en est de même de l'intensification agricole, notamment en Bretagne. Les flux actuels issus de petits bassins versants bretons (source agricole diffuse) sont de l'ordre de 50 kg par km^2 et par an. En extrapolant, cela conduit à 800 tonnes par an pour l'ensemble de la SAU bretonne, avec du phosphore sans doute plus mobile que précédemment. Ce flux représente environ 1/1000e du stock accumulé.

La durée de cette période (quelques décennies) avec des flux phosphatés supérieurs doit être mise en comparaison avec les milliers d'années au cours desquels les stocks de phosphore se sont constitués. On peut donc considérer que le stockage du phosphore dans les sédiments estuariens est un phénomène naturel qui s'est fortement amplifié dans la deuxième moitié du XXe siècle, pour décroître ensuite du fait de l'amélioration du traitement des eaux résiduaires, celui-ci atteignant d'ailleurs des niveaux élevés en Bretagne.

Il convient aussi de noter que l'alimentation en phosphore soluble ou en orthophosphates des eaux du large est un tout autre phénomène car dans les eaux plus profondes le stock sédimentaire n'intervient plus : dans ce cas le phosphore agricole, domestique et industriel a joué un rôle significatif dans le développement du phytoplancton. D'une manière très générale, c'est en particulier la modification des ratios N/P/Si, du fait de l'augmentation des flux anthropiques d'azote dans les flux apportés par les eaux continentales qui est à l'origine de ces blooms dans les eaux littorales (Billen et Garnier, 2007), d'où l'importance de limiter à la fois les pertes en phosphore et celles en azote, quelles que soient leurs origines.

En conclusion sur ce point, la forte augmentation du phosphore réactif dans l'environnement doit certes faire l'objet d'une attention particulière, et tout particulièrement celle du phosphore d'origine agricole dans le cas de la Bretagne ; il est toutefois clair qu'une baisse des flux de phosphore à la côte n'aurait aucune chance d'avoir des effets notables sur les blooms d'algues vertes *(rédaction principale : Agrocampus-INRA).*

En ce qui concerne d'autres causes que les nutriments

• Ce seraient les caractéristiques physiques des baies qui seraient la cause des proliférations d'ulves. L'implantation de bouchots à moules ralentiraient les courants, d'où accumulation d'ulves.

Les caractéristiques physiques de la plupart des baies bretonnes à marées vertes n'ont pas changé depuis des siècles. Or, les marées vertes dans leur extension actuelle n'ont jamais existé avant les années 1960. L'introduction récente de bouchots à moules a pu ralentir localement les courants en baie de Saint-Brieuc, mais de façon infime par rapport au confinement naturel déjà fourni par l'interaction de l'onde de marée avec la topographie du fond (Ménesguen et Salomon, 1988 ; Garreau, 1993). De plus, aucune implantation conchylicole ne s'est faite sur les autres grands sites à marée verte (plage de Saint-Michel en Grève, plages du Porzay en baie de Douarnenez, baie de la Forêt-Fouesnant), et il faut donc trouver une autre cause qui soit commune à toutes ces marées vertes.

Celle-ci est l'augmentation généralisée des apports terrigènes d'azote à la mer bretonne, décrite plus haut *(rédaction principale : IFREMER)*.

• Les marées noires auraient entraîné l'apparition des marées vertes par destruction des brouteurs naturels de l'ulve.

Les algues vertes étant des algues originellement fixées aux rochers, leurs brouteurs naturels le sont aussi. Mais alors qu'un morceau d'ulve détaché du rocher peut continuer à vivre en suspension dans l'eau, et même à croître si lumière et sels nutritifs dissous lui sont accessibles en quantité suffisante, un gastéropode benthique ne peut pas demeurer en suspension dans la colonne d'eau (il coule), et il est inadapté à survivre en étant charrié sur un fond sableux par les courants et le déferlement des vagues : en colonisant la lame d'eau en bordure des plages et sur les vasières, l'ulve échappe à ses prédateurs naturels benthiques. Ceux-ci restent d'ailleurs bien présents sur les rochers voisins des plages à marées vertes, évidemment quand aucune marée noire n'est jamais venue les éradiquer momentanément (plages du Moulin Blanc en rade de Brest, de la baie de Douarnenez et de la baie de Concarneau), mais même également sur les côtes de Bretagne-Nord terriblement polluées en 1978 par l'Amoco Cadiz ! Les marées vertes sont un phénomène annuel, forcé par des causes périodiques (éclairement et apports terrigènes d'azote), et totalement indépendant des marées noires d'occurrence fort heureusement rare et aléatoire.

Le flux annuel moyen de nitrates déversé par les bassins versants sur les côtes de Bretagne (75 000 t d'azote pour la moyenne 2005-2007) correspondrait à 225 000 tonnes d'ammonitrate. Ces flux annuels de nitrate pourraient donc être comparés aux conséquences réitérées chaque année de l'échouage sur les plages de Bretagne d'un navire minéralier transportant 225 000 tonnes d'ammonitrate *(rédaction principale : IFREMER)*.

En ce qui concerne le traitement des marées vertes

• Il suffirait de ramasser les algues en mer et de les valoriser pour réduire considérablement les marées vertes et même en tirer parti ! Un marché mondial pour l'amadéite d'Olmix pourrait rapporter gros !

Une industrie de transformation spécifique souhaiterait se développer et fonctionner avec des approvisionnements réguliers et prévisibles, ce qui est peu compatible avec les besoins de ramassage qui sont ponctuels et doivent être massifs. Par ailleurs, cette « ressource » est de qualité variable, et son avenir paraît incertain puisque l'on cherche plutôt à la faire disparaître, ne serait ce que pour des raisons réglementaires liées à l'application de la directive cadre Eau.

Dans ce contexte, seules des entreprises de valorisation de déchets disposant déjà d'équipements de base pour le traitement de matières organiques humides pourraient (et même prévoient déjà de) s'adapter pour conditionner une partie des algues et pour les proposer à des transformateurs capables d'écouler leurs produits sur les marchés. Ces solutions sont déjà envisagées en complément des filières classiques d'épandage et de compostage, seules capables aujourd'hui de traiter de grands volumes d'algues à coût minimum.

L'émergence d'entreprises intermédiaires capables de stabiliser (par le séchage essentiellement) et de conditionner des quantités d'algues vertes, à la fois correspondant aux besoins de ramassage des collectivités et répondant à diverses spécifications de volume, qualité et coût des matières de base exigées pour différentes filières de transformation, constitue donc un premier verrou central pour une utilisation industrielle des algues vertes en mesure de prévenir à elle seule les atteintes à l'environnement et les risques sanitaires liés aux échouages. Peu de grands opérateurs intervenant dans le domaine du traitement des déchets semblent actuellement prêts à prendre des risques sur les investissements à réaliser, d'autant plus que la mise en place d'un réseau organisé de collecte resterait aussi à concevoir en partenariat avec de multiples compétences locales.

Un second verrou se situe bien sûr au niveau des possibilités de mise au point technique, par les différentes filières possibles de transformation, de produits finaux capables de satisfaire des marchés importants. Aujourd'hui les débouchés les plus immédiats en agroalimentaire concernent des compléments alimentaires qui n'utiliseraient pas beaucoup de matière première. Seule la filière piscicole, envisagée par Olmix représenterait des grands volumes mais elle concerne des poissons produits en Extrême-Orient où des gisements importants d'algues vertes existent déjà. Certaines applications à basses valeurs ajoutées sont encore possibles en agroalimentaire mais nécessiteraient, pour occuper le marché, de très grandes quantités d'algues (100 000 t sèches) qui cette fois-ci ne sont pas disponibles dans nos sites à marées vertes.

Concernant l'amadéite d'Olmix, la réalisation des débouchés envisagés en emballages alimentaires et carrosserie automobile n'a jamais été atteinte techniquement (contraintes de process, température trop forte pour des extraits d'algues vertes), même sur des essais au laboratoire. Le seul débouché réel, mais qui reste encore à expliciter au niveau des mécanismes en jeu et à stabiliser en terme de procédé d'obtention, concerne actuellement l'utilisation en tant qu'épaississant ou émulsifiant ou photofiltre dans des formulations cosmétiques (projet NanoMerc, proposé à la Région et à Oséo par le consortium UBS Lorient/EPhyla/CEVA/GEPEA (CNRS-université de Nantes) / Olmix). Ainsi les valorisations possibles se cherchent et certaines pourraient aboutir un jour, mais ne concerneraient probablement dans un premier temps qu'une partie seulement des biomasses d'ulves, en raison des difficultés prévisibles à lever le premier verrou concernant la production de matière de base utilisable de manière régulière par les chaînes de transformation.

Le seul avantage environnemental à court terme qui pourrait être lié à une récolte industrielle partielle de la biomasse des marées vertes serait la substitution de farines d'algues brunes (dont les ceintures paraissent en régression dans beaucoup d'endroits) par des farines d'ulves issues de sites à marées vertes *(rédaction principale : CEVA)*.

• Il faudrait lancer des expérimentations « grandeur nature » sur tous les autres leviers que l'agriculture (suppression des rejets domestiques, introduction de brouteurs d'ulves, *etc.)*.

Même si les rejets domestiques méritent d'être toujours mieux maîtrisés, nous avons vu plus haut qu'ils ne constituent pas en Bretagne la principale source d'azote responsable des marées vertes. Les interventions directes dans l'écosystème, comme créer de la turbidité dans le milieu ou introduire des herbivores dans les systèmes à marées vertes (herbivores probablement exotiques puisque les nôtres ne se plaisent pas dans ces systèmes) sont par nature à risques pour l'environnement marin et devraient, en toute logique, ne jamais bénéficier d'autorisation administrative *(rédaction principale : CEVA et IFREMER)*.

• Le tonnage aurait été divisé par deux entre 1996 et 2006, et le coût annuel ne serait que de 300 à 500 000 € pour la Bretagne.

Les tonnages ramassés annuellement sont stables depuis le milieu des années 1990 (50 à 70 000 m^3 par an). Les coûts de ramassage en 2009 ont quand même atteint 1 100 000 euros, pour un record d'algues ramassées cette année là de 90 000 m^3. Les besoins de ramassage des communes ne sont généralement pas satisfaits, faute de moyens financiers et d'équipements performants pour le ramassage et d'élimination des algues *(rédaction principale : CEVA)*.