

Les « marées vertes », une manifestation croissante et bien visible de l'eutrophisation de certaines zones côtières

Auteur : Alain MÉNESGUEN

Océanographe biologiste
IFREMER/Centre de Bretagne, Département ODE (Océanographie et Dynamique des Écosystèmes), Unité DYNECO (DYNamiques de l'Environnement CÔtier), Laboratoire EB (Écologie Benthique)

Localisation

Parce qu'elles se produisent en général très près du rivage, les proliférations de macroalgues sont les cas d'eutrophisation marine les plus facilement observables, donc les plus connus du grand public.

Le phénomène d'eutrophisation peut se résumer à la production et l'accumulation, suite à un important enrichissement nutritif du milieu, d'une biomasse végétale excessive par rapport aux capacités de consommation biologique ou d'évacuation physique de l'écosystème. Ces proliférations sont largement répandues dans le monde.



Figure 1. Distribution des principaux cas de « marées vertes », recensés depuis 1980 (in Ye *et al.*, 2010).

Le site le plus touché au monde est, depuis 2008, la baie de Qingdao en Chine (point rouge sur la figure 1), avec 1 million de tonnes d'*Ulva prolifera* (Hu *et al.*, 2010). En Europe, avec 550 000 tonnes recensées en 1987 (Sfriso *et al.*, 1989), la lagune de Venise a été le site semi-fermé le plus touché jusqu'en 1990 ; sa biomasse a ensuite diminué en raison d'une augmentation de turbidité créée par le dragage (Sfriso & Marcomini, 1996). Puis vient la Bretagne (figure 2), avec 50 sites de prolifération sur plages sableuses (CEVA, 2012), et 25 à 30 sites sur vasières, largement ouverts sur un océan à fort marnage ; l'ensemble correspond en été à un pic de biomasse totale d'environ 50 000 tonnes d'algues vertes (Ménésguen, 2003).



Figure 2. Marées vertes à *Ulva armoricana* sur la plage de Saint-Michel-en-Grève (Bretagne).
à gauche : ulves en suspension au débouché du Roscoat (cliché Marc Schaffner, CRB),
à droite : ulves échouées en haut de plage (cliché Ifremer).

Les espèces responsables et leurs caractéristiques générales

Les algues proliférantes sont le plus souvent des chlorophycées. Au premier rang, figurent les genres appelés jusqu'en 2000 « *Ulva* », avec un thalle en lame (« laitue de mer »), et *Enteromorpha*, avec un thalle en ruban (« en forme d'intestin »). Ces deux genres sont aujourd'hui rassemblés dans l'unique genre *Ulva* (Hayden *et al.*, 2003). Signalons *U. armoricana* (figure 3a) et *U. rotundata*, pour la Bretagne, *U. rigida* en lagunes méditerranéennes. D'autres chlorophycées peuvent aussi proliférer : *Ulvaria* (thalle vert sombre, en lame) ou *Cladophora* (en forme de fils vert glauque, figure 3b). La détermination des ulves est complexe et sujette à de nombreuses révisions : les analyses génétiques (Malta *et al.*, 1999, Tan *et al.*, 1999) ont montré que leur grande plasticité morphologique ne correspondait pas à une forte différenciation génétique, mais dépendait plutôt du contexte écologique (Hofmann *et al.*, 2010).

Une phéophycée, *Pylaiella littoralis* (figure 3c), décrite sous sa forme libre proliférante dans le Massachusetts par Wilce *et al.* (1982), abonde souvent en mer Baltique et a créé sur quelques sites de Bretagne-Nord (baie de la Fresnaye, baie de Saint-Brieuc) des « marées brunes », les années de faible pluviosité estivale.

Chez les rhodophycées, *Gracilaria* spp. est très présente dans les étangs méditerranéens (Languedoc, Catalogne).

On peut observer une séquence d'apparition des macroalgues proliférantes, en fonction du degré d'eutrophisation : gracilaires et/ou cladophores, puis *Pylaiella*, puis ulves.

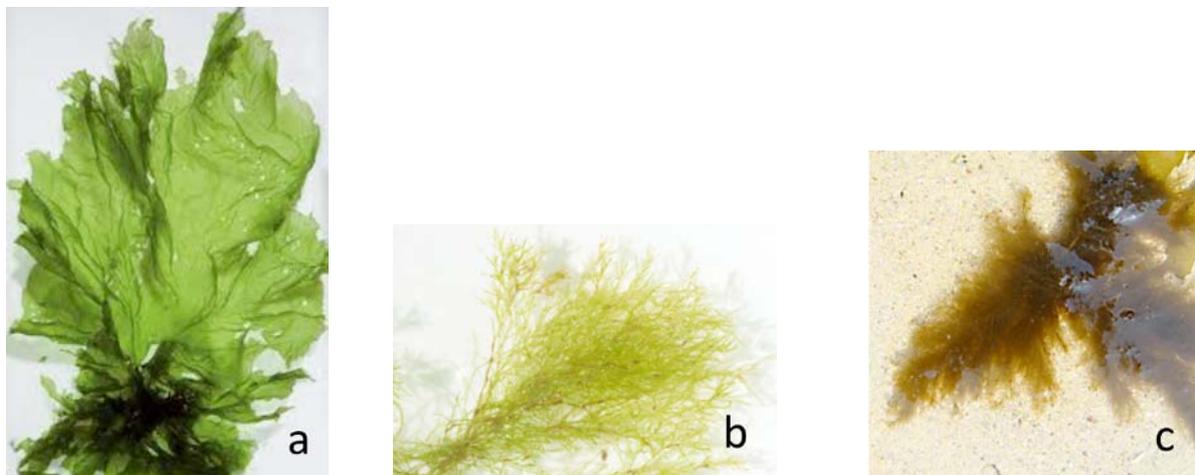


Figure 3. Principales algues proliférantes.

a : *Ulva armoricana* (cliché M.-C. Noailles), b : *Cladophora rupestris* (cliché Malcolm Storrey),
c : *Pylaiella littoralis* (cliché Florence Gully).

De façon générale, ces espèces sont opportunistes et annuelles. Elles se développent principalement au printemps et perdurent jusqu'en automne. Leur thalle en forme de feuille ou en minces filaments leur confère un rapport surface/volume élevé, qui facilite les échanges avec le milieu ambiant, notamment la captation de l'énergie lumineuse (Agusti *et al.*, 1994) et le pompage des sels nutritifs (Rosenberg & Ramus, 1984). Leur vitesse de croissance est élevée (Duarte, 1995). Leur capacité de stocker des réserves de sels nutritifs leur donne un avantage compétitif important par rapport aux algues pérennes. Leur thalle est fragile, et les formes en lame sont facilement arrachées de leur substrat (Hawes & Smith, 1995), puis déchirées en multiples fragments. Lors de cette existence dérivante, le plus souvent à proximité du fond, va s'exprimer l'extraordinaire capacité de ces algues primitives à bouturer : potentiellement, chaque morceau de thalle est capable de reformer un thalle complet, toujours en suspension dans l'eau.

Bien que photophiles, les ulves s'adaptent à différentes conditions d'éclairement (Henley *et al.*, 1991), et ne présentent pas de photo-inhibition à très fort éclaircissement, sauf si elles s'échouent : perdant leur eau, elles vont blanchir en raison de la destruction des pigments chlorophylliens par les rayons ultra-violet (Bischof *et al.*, 2002). Les ulves sont capables de supporter des températures négatives à l'obscurité, durant plusieurs semaines, et de reprendre ensuite leur croissance (Kamermans *et al.*, 1998).

Conditions de formation de « marées vertes »

La réunion de trois conditions semble nécessaire et suffisante pour qu'une prolifération macroalgale se développe.

- Un éclaircissement suffisant jusqu'au fond

Les sites favorables présentent quasiment tous une profondeur faible, voire très faible. La profondeur la plus fréquente de la lagune de Venise est de 1 m, celle du fjord de Roskilde de 3 m. En mer à marée, comme en Bretagne, les plages ou les vasières atteintes sont plates, et la colonne d'eau qui les surmonte est généralement peu épaisse, au moins durant une grande partie du cycle de marée (Piriou *et al.*, 1991). La faible profondeur favorise au printemps un réchauffement rapide de la couche d'eau et son éclaircissement intense, d'autant plus que le fond est sableux et réverbérant. *A contrario*, les estuaires de grands fleuves charriant des sédiments fins ne sont pas propices aux ulves, mais plutôt au phytoplancton, qui se maintient plus facilement dans la colonne d'eau près de la surface.

- Un apport d'azote inorganique

Un apport d'azote inorganique est nécessaire pour qu'une prolifération algale ait lieu. L'évolution saisonnière des teneurs des algues en azote et phosphore montre que la teneur en phosphore reste élevée toute l'année, alors que celle en azote chute systématiquement en fin de printemps, l'amenant durant l'été au niveau connu pour interdire la croissance de l'algue (Dion *et al.*, 1996). En effet, le relargage en solution de phosphate à partir de stocks adsorbés dans le sédiment, ainsi que la très rapide reminéralisation du phosphore organique détritique, empêchent le phosphore d'être limitant dans les zones à marées vertes.

L'ulve est capable d'utiliser l'ion nitrate et l'ion ammonium, avec une préférence pour ce dernier (Floreto *et al.*, 1993). Depuis l'intensification de l'agriculture, les flux d'azote sont très majoritairement constitués de nitrate. Cependant, avant la mise en place d'une étape terminale de dénitrification dans les stations d'épuration des rejets urbains, certaines villes ont apporté sous forme d'ammonium une importante contribution au flux azoté, comme à Belfast au début du xx^e siècle (Letts & Richards, 1911). La grande capacité de stockage des nutriments par les ulves leur permet d'utiliser au mieux les apports de sels nutritifs par les cours d'eau en crue.

Dans certains sites de Bretagne, depuis longtemps le siège de marées vertes et où les flux azotés sont très abondants, la biomasse algale dans les premières vagues arrive à être tellement forte qu'elle produit un auto-ombrage. L'éclairement devient le facteur limitant (Merceron, 1999), et le rideau dense d'ulves situé au bord de l'eau ne joue plus alors son rôle partiel d'« éponge à nitrate », ce qui permet l'enrichissement de la frange côtière et son verdissement : accrochées à d'autres algues ou libres sur le fond, des ulves bien développées ont été observées jusqu'à près de 20 m de profondeur.

- Un fort confinement de la masse d'eau

Un fort confinement permet aux algues en développement de rester dans la masse d'eau, dont les conditions sont propices en termes d'éclairement, de température et de sels nutritifs.

De nombreuses lagunes méditerranéennes (Venise, Méjean, Tunis avant les travaux de forçage d'une circulation, etc.) et nordiques (Verse Meer, par exemple), certains fjords peu profonds (Roskilde, Schlei, etc.), et des marais maritimes sont des exemples démonstratifs d'un confinement « statique » par les terres environnantes.

Dans les mers à marée (océan Atlantique, Manche, mer du Nord), des marées vertes se développent aussi bien dans des anses, des fonds de baie (bassin d'Arcachon, Bretagne) que sur de grands estrans rectilignes lorsqu'ils sont abrités par un chapelet d'îles (Frise hollandaise et allemande). Il s'agit toujours d'estrans très plats à faible pente et le plus souvent sableux, où un confinement « dynamique » est assuré par la très faible vitesse du courant résiduel (c'est-à-dire le déplacement net de l'eau, une fois éliminé le va-et-vient dû à la marée). Les vasières de décantation en bordure d'estuaire peuvent également fournir un biotope propice aux formes attachées au fond (estuaire du Blavet).

Conséquences sur l'écosystème et l'homme

En milieu semi-fermé peu profond (lagunes), mais aussi en haut de plage des mers à marée, la stagnation de fortes biomasses algales conduit à leur mort et donc à leur dégradation bactérienne, d'autant plus rapide que la température est élevée. Très rapidement, les bactéries aérobies épuisent l'oxygène dissous dans l'eau, et des bactéries anaérobies se développent, notamment celles utilisant l'ion sulfate comme oxydant. Les ulves sont particulièrement riches en sucres sulfatés (les ulvanes), et la réduction de ce sulfate va produire de l'hydrogène sulfuré (H₂S), très toxique pour la respiration des animaux. Dans les lagunes méditerranéennes, la faune aquatique sera décimée par l'empoisonnement de l'eau (phénomène appelé « malaïgue » en Languedoc). Sur les plages de mers à marée, ce sont les animaux sauvages (oiseaux, sangliers, etc.) ou domestiques (chiens, chevaux), voire les humains, marchant sur les tas en putréfaction qui peuvent perdre connaissance, en inhalant des émanations concentrées en H₂S, puis mourir en quelques minutes si personne ne les retire de la zone toxique. En Bretagne, la mort probable d'un joggeur en juin 1989, le coma de 4 jours subi en mai 1999 par un conducteur d'engin de ramassage des ulves en putréfaction, suivis de la mort de 2 chiens en juillet 2008 et d'un cheval en juillet 2009 ont enfin révélé le risque sanitaire mortel créé par les dépôts d'ulves pourrissants.

Outre l'obligation décrétée de ramassage immédiat des dépôts sur les plages, cette prise de conscience a entraîné la mise en place sur 5 ans (2010-2014) d'un programme gouvernemental de lutte contre les « marées vertes » de Bretagne. En effet, aux nuisances d'ordre touristique (odeurs de putréfaction, désagréments causés aux baigneurs, augmentation de la contamination bactérienne des eaux de baignade par osmoprotection des bactéries terrigènes, causée par des exsudats algaux – Bernard *et al.*, 1995), s'ajoute l'entrave croissante aux activités de conchyliculture (recouvrement de bouchots) ou de pêche (colmatage des filets et des chaluts de petits navires côtiers, accrochage dans les palangres). Régulièrement privilégié par les pouvoirs publics jusqu'en 2010, le traitement curatif de la marée verte constituée a porté sur le ramassage estival des algues en échouage, au moyen d'engins usuels de travaux publics (bulldozers, tractopelles, camions), mais des techniques plus spécifiques de ramassage dans l'eau ont été utilisées dans certaines lagunes méditerranéennes (barges spécialement instrumentées à Venise et dans la lagune du Prévost, près de Montpellier), et plus récemment sur les plages des Côtes-d'Armor (engin sur roues à tapis roulant). En Bretagne, les algues collectées, mêlées de sédiment et d'eau salée, sont collectées désormais sur des plates-formes de séchage/compostage sous tunnel, mélangées à des débris végétaux terrestres pour former un compost, avant d'être épandues en tant qu'engrais sur des terres agricoles. Des études (Morand *et al.*, 2006) ont montré qu'un rendement et une rentabilité économique corrects d'une éventuelle méthanisation des algues brutes, compromis par la forte teneur en eau et en sulfate des algues, nécessiteraient une hydrolyse partielle préalable, suivie de pressage pour ne garder qu'un condensat du jus de digestion.

Depuis 2010, les pouvoirs publics ont désormais mis l'accent sur la réduction préventive volontariste de la cause majeure de cette atteinte aux écosystèmes côtiers, c'est-à-dire le lessivage de l'excédent d'engrais azotés répandus sur les terres agricoles. La teneur en nitrate à laquelle il faudrait redescendre dans des cours d'eau responsables de marées vertes en Bretagne a pu être évaluée grâce à la modélisation de nombreux sites par l'Ifremer (Ménèsquen & Salomon, 1988) puis par le CEVA : une teneur de 10 mg/L de nitrate dans ces cours d'eau permettrait de diviser par 2 la biomasse d'ulves accumulées sur les plages (Perrot *et al.*, soumis).

Bibliographie citée

- [1] Agusti S., Enriquez S., Christensen H., Sand-Jensen K. & Duarte C.M. (1994). Light harvesting by photosynthetic organisms. *Functional Ecology*, 8, 273-279.
- [2] Bernard T., Cormier M., Dupray E., Ghoul M. & Minet J. (1995). Marine macroalgae as a source of osmoprotection for *Escherichia coli*. *Microbial Ecology*, 30, 171-181.
- [3] Bischof K., Peralta G., Kräbs G., van de Poll W.H., Pérez-Llorés J.L. & Breeman A.M. (2002). Effects of solar UV-B radiation on canopy structure of *Ulva* communities from southern Spain. *Journal of Experimental Botany*, 53(379), 2411-2421.
- [4] CEVA (2012). *Suivi des proliférations d'algues vertes sur le littoral breton en complément du contrôle de surveillance DCE*. Rapport sur le Projet 4 du CIMAV 2011, 98 p. + annexes.
- [5] Dion P., Le Bozec S. & Golven P. (1996). Factors controlling the green tides in the bay of Lannion (France). In : Rijstenbil J.W., Kamermans P., Nienhuis P.H., editors. *Synthesis report of the Second EUMAC Workshop*, held in Sète (France), 121-137.
- [6] Duarte C.M. (1995). Submerged aquatic vegetation in relation to different nutrient regimes. *Ophelia*, 41, 87-112.
- [7] Floreto E.A.T., Hirata H., Ando S. & Yamasaki S. (1993). Effects of temperature, light intensity, salinity and source of nitrogen on the growth, total lipid and fatty acid composition of *Ulva pertusa* Kjellman (Chlorophyta). *Botanica Marina*, 36, 149-158.
- [8] Hawes I. & Smith R. (1995). Effect of current velocity on the detachment of thalli of *Ulva lactuca* (Chlorophyta) in a New Zealand estuary. *Journal of Phycology*, 31, 875-880.
- [9] Hayden H.S., Blomster J., Maggs C.A., Silva P.C., Stanhope M.J. & Waaland J.R. (2003). Linnaeus was right all along: *Ulva* and *Enteromorpha* are not distinct genera. *European Journal of Phycology*, 38, 277-294.
- [10] Henley W.J., Levassasseur G., Franklin L.A., Osmond C.B. & Ramus J. (1991). Photoacclimation and photoinhibition in *Ulva rotundata* as influenced by nitrogen availability. *Planta*, 184, 235-243.



- [11] Hofmann L.C., Nettleton J.C., Neefus C.D. & Mathieso A.C., 2010. Cryptic diversity of *Ulva* (Ulvales, Chlorophyta) in the Great Bay Estuarine System (Atlantic USA): introduced and indigenous distromatic species. *European Journal of Phycology*, 45(3), 230-239.
- [12] Hu C., Li D., Chen C., Ge J., Muller-Karger F.E., Liu J., Yu F. & He M.-X. (2010). On the recurrent *Ulva prolifera* blooms in the Yellow Sea and East China Sea. *Journal of Geophysical Research*, 115, C05017, doi:10.1029/2009JC005561.
- [13] Kamermans P., Malta E.-J., Verschuure J.M., Lentz L.F. & Schrijvers L. (1998). Role of cold resistance and burial for winter survival and spring initiation of an *Ulva* spp. (*Chlorophyta*) bloom in a eutrophic lagoon (Veerse Meer lagoon, The Netherlands). *Marine Biology*, 131, 45-51.
- [14] Letts E.A. & Richards E.H. (1911). *Report on green seaweeds and especially Ulva latissima in relation to the pollution of the waters in which they occur*. Royal Commission on Sewage Disposal, 7th Report, HMSO, London. Appendix III, Section II.
- [15] Malta E.J. & Verschuure J.M. (1997). Effects of environmental variables on between-year variation of *Ulva* growth and biomass in a eutrophic brackish lake. *Journal of Sea Research*, 38, 71-84.
- [16] Malta E.J., Draisma S.G.A. & Kamermans P., 1999. Free-floating *Ulva* in the southwest Netherlands: species or morphotypes? A morphological, molecular and ecological comparison. *European Journal of Phycology*, 34, 443-454.
- [17] Ménesguen A., 2003. *Les marées vertes en Bretagne, la responsabilité du nitrate*. Rapport Ifremer, 10 p. http://envlit.ifremer.fr/content/download/27419/222408/version/1/file/marees_vertes_0306.pdf
- [18] Ménesguen A. & Piriou J.-Y. (1995). Nitrogen loadings and macroalgal (*Ulva* sp.) mass accumulation in Brittany (France). *Ophelia*, 42, 227-237.
- [19] Ménesguen A. & Salomon J.C. (1988). Eutrophication modelling as a tool for fighting against *Ulva* coastal mass blooms. In : *Computer modelling in ocean engineering*, Schrefler & Zienkiewicz (eds.), Proc. 1st Int. Conf., Sept. 19-22, 1988, Venice (Italy). Balkema, Rotterdam, 443-450.
- [20] Merceron M. (1999). Marées vertes en Bretagne : état actuel des connaissances. In : *Pollutions diffuses : du bassin versant au littoral*. Saint-Brieuc (Ploufragan), 23-24/09/1999, Actes de colloques IFREMER, n° 24, 49-60.
- [21] Morand P., Briand X. & Charlier R.H. (2006). Anaerobic digestion of *Ulva* sp.3. Liquefaction juices extraction by pressing and technico-economic budget. *Journal of Applied Physiology*, 18, 741-755.
- [22] Perrot T., Rossi N., Ménesguen A. & Dumas F. (en révision). Modelling green macroalgae blooms of Brittany coast for water quality management. *Journal of Marine Systems*.
- [23] Piriou J.-Y., Ménesguen A. & Salomon J.-C. (1991). Les marées vertes à ulves : conditions nécessaires, évolution et comparaison de sites. In : *Estuaries and coasts : spatial and temporal intercomparisons*, Elliott M., Ducrottoy J.-P. (eds), Proc. 19th Symp. Estuar. Coast. Sci. Assoc., 4-8 sept. 1989, Caen (France). Olsen and Olsen, Fredensborg (Denmark), 117-122.
- [24] Rosenberg G. & Ramus J., 1984. Uptake of inorganic nitrogen and seaweed surface area : volume ratios. *Aquatic Botany*, 19, 65-72.
- [25] Schramm W. & Nienhuis P.H. (1996). Introduction. In : *Marine benthic vegetation - Recent changes and the effects of eutrophication* (Schramm W., Nienhuis P.H., eds). *Ecological Studies*, 123, 1-4.
- [26] Sfriso A. & Marcomini A. (1996). Decline of *Ulva* growth in the Lagoon of Venice. *Bioresource Technology*, 58, 299-307.
- [27] Sfriso A., Pavoni B. & Marcomini A. (1989). Macroalgae and phytoplankton standing crops in the Central Venice Lagoon: primary production and nutrient balance. *Science of the Total Environment*, 80, 139-159.
- [28] Tan I.H., Blomster J., Hansen G., Leskinen E., Maggs C.A., Mann D.G., Sluiman H.J. & Stanhope M.J. (1999). Molecular phylogenetic evidence for a reversible morphogenetic switch controlling the gross morphology of two common genera of green seaweeds, *Ulva* and *Enteromorpha*. *Molecular Biology and Evolution*, 16, 1011-1018.
- [29] Wilce R.T., Schneider C.W., Quinlan A.V. & Bosch K.V. (1982). The life history and morphology of free-living *Pilayella littoralis* (L.) Kjellm. (Ectocarpaceae, Ectocarpales) in Nahant Bay, Massachusetts. *Phycologia*, 21, 336-354.
- [30] Ye N., Zhang X., Mao Y., Liang C., Xu D., Zou J., Zhuang Z. & Wang Q. (2011). 'Green tides' are overwhelming the coastline of our blue planet: taking the world's largest example. *Ecological Research*, 26, 477-485.

Sites internet sur les marées vertes

<http://www.bretagne-environnement.org/Mer-et-littoral/Les-menaces/Les-marees-vertes>

http://www.academie-agriculture.fr/detail-seance_278.html

<http://www.bretagne.pref.gouv.fr/Les-actions-de-l-Etat/Environnement-et-prevention-des-risques/L-eau/Plan-de-lutte-contre-les-algues-vertes/Avancement-du-plan/Points-d-etape/Avancement-de-la-declinaison-du-plan>

http://www.cgedd.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/007942-01_rapport_cle2e3e51.pdf

http://www.bretagne.fr/internet/upload/docs/application/pdf/2012-03/rapport_algues_vertes_sans_couverture_v2.pdf

<http://www.eau-et-rivieres.asso.fr/index.php?100/561>

<http://www.halteauxmareesvertes.fr/>