



Causes, mécanismes, symptômes et gestion de l'eutrophisation côtière.

Tant va à la mer qu'elle se fâche...

Auteur : Christiane LANCELOT

Université libre de Bruxelles, Écologie des Systèmes aquatiques, Belgique

Les symptômes

Parfois au cours du printemps et de l'été, la mer se colore et se trouble (figure 1) ; certaines plages se couvrent de dépôts de mousses blanchâtres et nauséabondes (figure 2), de poissons morts (figure 3) ou encore de dépôts d'algues vertes (*cf.* fiche Alain Ménesguen : *Les « marées vertes », une manifestation croissante et bien visible de l'eutrophisation de certaines zones côtières* [18])... Ces désagréments sont les divers symptômes d'un dysfonctionnement de l'écosystème côtier marin soumis aux apports croissants d'éléments nutritifs d'origine humaine : la mer souffre d'un excès de nutriments. Le phénomène est appelé eutrophisation anthropique ou culturelle.

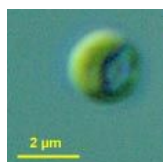


Figure 1. Marée « brune » due à l'accumulation de *Aureococcus anophagefferens* (Image copyright : Bob Andersen and D. J. Patterson) dans la Great South Bay dans l'État de New York (USA) en juin 2008. Image Yubanet (<http://yubanet.com>).

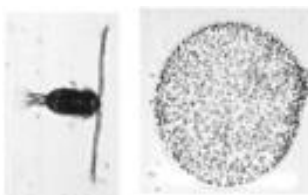


Figure 2. Dépôts de mousses (photo V. Rousseau) résultant de l'accumulation de colonies de *Phaeocystis globosa* ne pouvant être consommées par les copépodes indigènes *Temora longicornis* en raison de leur taille (photos FlowCam K. Denis). Mer du Nord (Ostende), mai 2006.



Figure 3. Mortalité de saumons d'élevage dans les eaux norvégiennes et suédoises suite à l'efflorescence de *Chrysochromulina polylepis* en mai 1988 (Photo : O. Tollesby).

L'eutrophisation côtière : à l'origine un phénomène naturel

Étymologiquement, le terme eutrophisation, dérivé du grec, signifie « bien nourri » et correspond à un processus d'enrichissement en éléments nutritifs, une fertilisation qui bénéficie en premier lieu aux producteurs primaires, premier maillon de la chaîne alimentaire. Ceux-ci synthétisent la matière organique qui compose leurs tissus, en puisant le carbone et les nutriments inorganiques du milieu, et en utilisant la radiation solaire comme source d'énergie. Parmi les producteurs primaires, on distingue les algues et le phytobenthos présents dans les zones littorale et de marnage, ainsi que le phytoplancton omniprésent et responsable de plus de 90 % de la production primaire marine. Avec un nom également dérivé du grec, le phytoplancton désigne l'ensemble des micro-organismes végétaux littéralement errant au sein de la masse d'eau. De petite taille, il offre un rapport surface/volume important, qui lui permet d'être compétitif dans un milieu où les nutriments et l'énergie solaire sont réduits, comparativement aux conditions rencontrées par les végétaux de l'écosystème terrestre. Azote et phosphore sont les nutriments majeurs utiles à la synthèse du matériel cellulaire du phytoplancton quelle que soit l'espèce. Le silicium est nécessaire à la synthèse du frustule des diatomées, paroi de protection composée de silicium associé à une matrice organique (cf. fiche Paul Tréguer : *Pourrions-nous vivre sans silicium ?* [19]). Les diatomées sont la proie des copépodes (zooplancton), initiant ainsi une chaîne trophique courte et efficace menant à la production de poissons (figure 4a). Très compétitives en milieu turbulent et riche en nutriments (Margalef, 1978 [9]), les diatomées composent la floraison de printemps, qui consomme le stock hivernal de nutriments disponibles selon un rapport molaire azote/silicium/phosphore N:Si:P de 16:16:1 (Redfield, 1934 [11] ; Brzezinski, 1985 [5]), caractéristique de leurs besoins. Le phytoplancton non siliceux se développe ensuite, soutenu par de l'azote et du phosphore provenant des processus locaux de minéralisation de la matière organique détritique ou d'excrétion animale. De petite taille, comparé aux diatomées, et généralement pourvu de flagelles, ce nanophytoplancton prend part à un réseau trophique microbien complexe dont la fonction première est la reminéralisation des éléments nutritifs mais où son brouteur (le microzooplancton) joue un rôle pivot dans l'écosystème, étant la proie des copépodes (figure 4a). L'efflorescence composée de diatomées de printemps, suivie d'une floraison modeste de nanophytoplancton associé à un réseau microbien actif, caractérise le fonctionnement d'un écosystème marin naturel (Margalef, 1978 [9] ; Azam et al., 1983 [2]).

Différentes sources d'éléments nutritifs affectent le fonctionnement de l'écosystème côtier, interface entre le continent, l'océan ouvert et l'atmosphère : les remontées d'eaux océaniques profondes (upwellings

côtiers), les rivières et les eaux souterraines, les émissions littorales et les retombées atmosphériques. Les upwellings constituent le principal processus d'enrichissement naturel des eaux côtières en azote, phosphore et silice. Ces nutriments résultant de la reminéralisation de la matière organique détritique exportée vers l'océan profond ne perturbent pas l'équilibre naturel des eaux marines. L'enrichissement stimule la production de diatomées, associée à un écosystème riche en poissons. Ainsi plus de 40 % de la pêche mondiale sont associés à cinq upwellings côtiers (Mann & Lazier, 2006 [8]).

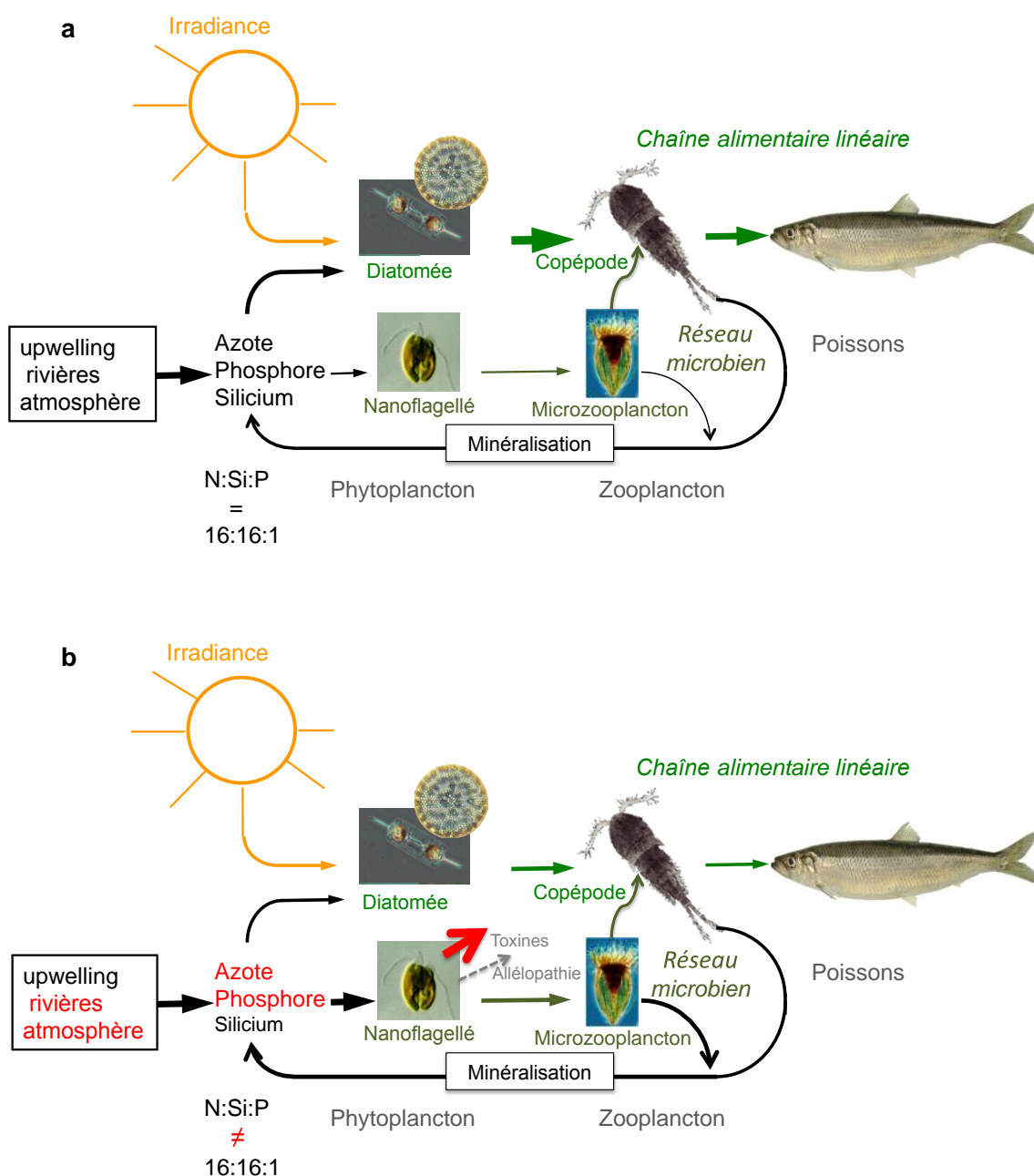


Figure 4. Chaîne trophique linéaire et microbienne des eaux côtières « naturelles » (a) et eutrophisées (b).

L'eutrophisation côtière d'origine anthropique : un problème planétaire aux effets régionaux et locaux

La fin de la Seconde Guerre mondiale marque le début du processus de globalisation, marqué ce jour par un quasi-triplement de la population mondiale, amplifié par un développement intensif des activités industrielles et agricoles, et accompagné d'un réaménagement du territoire et la formation toujours croissante de mégapoles (Steffen *et al.*, 2004 [13]). Cette accélération de la pression humaine sur le bassin-versant a notamment modifié le processus d'enrichissement de la zone côtière et, par là, sa composition en nutriments. Bien que dépendants localement et régionalement de l'hydro-géomorphologie naturelle, du climat et du développement socio-économique, on estime qu'entre 1970 et 2000, les apports fluviaux d'azote et de phosphore à la zone côtière ont augmenté à l'échelle globale de, respectivement, 18 et 13 % (Seitzinger *et al.*, 2010 [12]). Sur la même période, les barrages, toujours en nombre croissant, pour satisfaire les besoins en eau et énergie des populations ont réduit les apports de silicium à la mer de quelque 18-19 % (Beusen *et al.*, 2009 [3]). Aux apports fluviaux dominants viennent s'ajouter des eaux souterraines fortement chargées en nitrates d'origine agricole (Zhang & Mandal, 2012 [17]), des retombées atmosphériques (Zhang, 1994 [16]) et des rejets d'azote et de phosphore issus de l'aquaculture locale en pleine expansion (Bouwmann *et al.*, 2011 [4]). Ces apports d'origine humaine ont modifié l'équilibre naturel des nutriments côtiers, caractérisé aujourd'hui globalement par un excès d'azote et de phosphore, et un déficit en silicium par rapport aux conditions naturelles ainsi qu'une plus grande contribution des formes chimiques organiques. Le niveau et la qualité de cet enrichissement sont extrêmement variables, dépendants des caractéristiques hydro-géomorphologiques de la zone côtière et du bassin-versant.

Loin de conduire à une pêche miraculeuse, ces surplus de nutriments favorisent l'efflorescence quasi monospécifique d'algues indésirables (Heisler *et al.*, 2008 [7]), en majorité non siliceuses et communément appelées par la communauté scientifique HA(B) [*Harmful Algae* ou *Harmful Algal Bloom*]. HA est un terme générique à connotation sociétale, regroupant des algues de diverses classes phylogénétiques, espèces ou souches, et qui ont en commun d'affecter négativement le fonctionnement de l'écosystème, la santé humaine et les intérêts socio-économiques (Anderson *et al.*, 2012 [1]). Le dommage soit se manifeste par la libération de toxines à l'encontre des poissons (ichtyotoxine) ou de l'homme via l'ingestion de coquillages infectés, soit est la conséquence indésirable de l'accumulation de biomasse algale non transférée aux copépodes et aux poissons (figure 4b) : il y a dysfonctionnement de la chaîne trophique. Les nuisances qui en découlent sont variées, dépendantes des caractéristiques biologiques et hydrologiques locales : dépôts de mousses nauséabondes, accroissement de la turbidité et destruction des herbiers, pertes de la faune par épuisement de l'oxygène utilisé pour la dégradation bactérienne de la matière organique dérivée des accumulations de HA non consommées...

L'incroyable stratégie des HA

Le succès des HA dans les zones côtières et estuariennes s'expliquerait aujourd'hui par leur extraordinaire plasticité et leur double stratégie d'adaptation aux nouvelles conditions en éléments nutritifs et ressources énergétiques et de défense par élimination de leurs compétiteurs et consommateurs. Ainsi, les HA sont en majorité mixotrophes¹ (Burkholder *et al.*, 2008 [6]), combinant au sein d'un même organisme les modes autotrophe et hétérotrophe, et passant de l'un à l'autre selon les conditions environnementales de lumière et d'éléments nutritifs. Ainsi certaines algues phytoplanctoniques maximisent leur croissance par l'utilisation des composés organiques dissous d'azote et/ou de phosphore (hétéro-osmotrophie) ; d'autres ingèrent des bactéries ou d'autres protistes (phagotrophie) pour pallier le déficit de nutriments inorganiques et/ou d'énergie en cas de limitation par la lumière. La stratégie de défense peut être dirigée

¹ La mixotrophie est la capacité qu'ont certains micro-organismes planctoniques à utiliser à la fois la phototrophie et l'hétérotrophie pour leurs besoins énergétiques et nutritionnels

contre le seul prédateur via l'excrétion de substances répulsives ou la simple formation de colonies « trop grosses pour être mangées » (Tang, 2003 [14] ; figure 2), ou contre l'ensemble des compétiteurs algaux et les prédateurs *via* la libération dans le milieu de substances allélopathiques (inhibitrices) spécifiques (Tillman, 2003 [15]). Cette double stratégie impliquant mixotrophie et défense au sein d'un seul organisme expliquerait le succès et la quasi-monospécificité des efflorescences HA en zone côtière eutrophisée par des apports déséquilibrés d'azote et de phosphore et de leur forme chimique (inorganique *versus* organique). La dominance de l'une ou l'autre espèce de HA dépendra de son éco-physiologie propre, de la biodiversité présente, de la quantité et composition chimique des apports anthropiques, de leur temps de résidence et de l'hydrodynamique propre de la zone côtière affectée. Leurs effets indésirables à l'encontre de la société, l'environnement et l'écosystème ne résultent pas d'un acte délibéré mais en sont la conséquence.

Les mécanismes de lutte contre l'eutrophisation des eaux côtières européennes

La prise de conscience des problèmes liés à l'eutrophisation côtière remonte aux années 1970 lorsque les premiers signes indésirables apparaissent sur les côtes européennes. C'est entre 1974 et 1992 que sont signées différentes conventions pour la protection de la mer du Nord (OSPAR, <http://www.ospar.org>), de la mer Baltique (HELCOM, <http://helcom.fi>), de la mer Méditerranée (convention de Barcelone, <http://www.unepmap.org>) et de la mer Noire (convention de Bucarest ; <http://www.blacksea-commission.org>) par les États riverains et l'Union européenne. Les premières recommandations en matière de réduction de l'eutrophisation comme par exemple celle de diminuer de 50 % les apports fluviaux d'azote et de phosphore à la mer du Nord par rapport à 1985 sont signées dans l'urgence en 1988, sans en avoir préalablement vérifié la faisabilité technique, la pertinence de la cible et l'efficacité écologique. S'ensuivent en 1991 les premières directives européennes portant sur la réduction des apports d'azote et ou de phosphore par les eaux urbaines résiduelles (91/271/CEE) et des émissions de nitrates d'origine agricole (91/676/CEE). Leur mise en œuvre a aujourd'hui réduit d'environ 50 % les apports fluviaux de phosphore, tandis que ceux d'azote sont faiblement diminués voire maintenus par rapport à leur niveau maximal de 1985 (Passy *et al.*, 2013 [10]). Cette exacerbation du déséquilibre du réservoir d'azote et de phosphore disponible explique la persistance des efflorescences d'HA, plus compétitives dans ces conditions, et de leurs effets indésirables, et ce malgré les efforts de réduction des émissions. La prise en compte du bassin-versant et des notions de continuum aquatique (rivière-estuaire-mer côtière), de bon état chimique et écologique, et de critères objectifs de qualité écologique reprises dans les directives européennes cadre Eau (2000/60/CE) et de Stratégie marine (2008/56/EC), et une meilleure prise en compte des progrès effectués dans la connaissance de l'écophysologie et des mécanismes de contrôle des efflorescences des HA devraient permettre d'optimiser les choix en matière de politique de réduction des émissions anthropiques et de mettre en place une gestion durable et personnalisée des zones côtières.

Pour en savoir plus :

- [1] Anderson D.A., Cembella A.D. & Hallegraeff G.M., 2012. Progress in understanding harmful algal blooms: paradigm shifts and new technologies for research, monitoring, and management. *Annual Review of Marine Science*, 4, 143-176.
- [2] Azam F., Fenchel T., Field J.G., Gray J.S., Meyer-Reil L.A. & Thingstad F., 1983. The ecological role of water-column microbes in the sea. *Marine Ecology Progress Series*, 10, 257-263.
- [3] Beusen A.H.W., Bouwman A.F., Durr H.H., Dekkers, A.L.M. & Hartmann J., 2009. Global patterns of dissolved silica export to the coastal zone: results from a spatially explicit global model. *Global Biogeochemical Cycles*, 23 : GBOA02, doi : 10.1029/2008GB003281.
- [4] Bouwman A.F. *et al.*, 2011. Global hindcasts and future projections of coastal nitrogen and phosphorus loads due to shellfish and seaweed aquaculture. *Reviews in Fisheries Science*, 19, 4, 331-357.



- [5] Brzezinski M. A., 1985. The Si:C:N ratio of marine diatoms: interspecific variability and the effect of some environmental variables. *Journal of Phycology*, 21, 347-357.
- [6] Burkholder J.M., Glibert P.M. & Skelton H.M., 2008. Mixotrophy, a major mode of nutrition for harmful species in eutrophic waters. *Harmful Algae*, 8, 77-93.
- [7] Heisler J. *et al.*, 2008. Eutrophication and harmful algal blooms: a scientific consensus. *Harmful Algae*, 8, 3-13.
- [8] Mann K.H. & Lazier J.R.N., 2006. *Dynamics of Marine Ecosystems: Biological-Physical Interactions in the Oceans*. Blackwell Publishing Ltd., Oxford, 489 p.
- [9] Margalef R., 1978. Life-forms of phytoplankton as survival alternatives in an unstable environment. *Oceanologica Acta*, 1, 493-509.
- [10] Passy P. *et al.*, 2013. A model reconstruction of riverine nutrient fluxes and eutrophication in the Belgian coastal zone since 1984. *Journal of Marine Systems*, 128, 106-122.
- [11] Redfield A.C., 1934. On the proportions of organic derivatives in sea water and their relation to the composition of plankton. In : *James Johnstone Memorial Volume* (Daniel R.V. ed.). University of Liverpool, p. 177-192.
- [12] Seitzinger S.P. *et al.*, 2010. Global river nutrient export: a scenario analysis of past and future trends. *Global Biogeochemical Cycles*, 24 : GB0A08, doi : 10.1029/2009GB003587.
- [13] Steffen W. *et al.*, 2004. *Global Change and the Earth System: a Planet under Pressure*. The IGBP Book Series, Springer, Berlin, Allemagne, 335 p.
- [14] Tang K.W., 2003. Grazing and colony size development in *Phaeocystis globosa* (Prymnesiophyceae): the role of chemical signal. *Journal of Plankton Research*, 25, 7, 831-842.
- [15] Tillman U., 2003. Kill and eat your predator: a winning strategy of the planktonic flagellate *Prymnesium parvum*. *Aquatic Microbial Ecology*, 32, 73-84.
- [16] Zhang J., 1994. Atmospheric wet deposition of nutrient elements: correlations with harmful biological blooms in the northwest pacific coast. *Ambio*, 23, 464-468.
- [17] Zhang J. & Mandal A.K., 2012. Linkages between submarine groundwater systems and the environment. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 4, 219-226.

Fiches de l'Institut océanographique

[18] Alain Ménesguen, juin 2013 : *Les « marées vertes », une manifestation croissante et bien visible de l'eutrophisation de certaines zones côtières*

<http://www.institut-ocean.org/images/articles/documents/1372090600.pdf>

[19] Paul Tréguer, septembre 2013 : *Pourrions-nous vivre sans silicium ?*

<http://www.institut-ocean.org/images/articles/documents/1379319660.pdf>