



Organisation Mondiale de la Santé
Bureau Régional de l'Europe



COMMISSION
EUROPÉENNE

Eutrophisation et santé



Eutrophisation et santé

Proliférations d'algues, "marées rouges", "marées vertes", mortalités de poissons, fruits de mer non comestibles, "algues bleues" et dangers pour la santé publique, quel est le lien entre toutes ces notions ?

La réponse est **EUTROPHISATION** : un phénomène complexe susceptible de se développer en eau douce ou en eau de mer, caractérisé par un développement anormal de certains types d'algues, perturbant l'écosystème aquatique et pouvant présenter des risques pour la santé animale et humaine. La principale cause de l'eutrophisation est une concentration excessive en nutriments rejetés par l'agriculture et les stations de traitement des eaux usées.

L'objet de cette brochure est de décrire d'une manière simple les mécanismes menant à l'eutrophisation, ses effets environnementaux, les désagréments qu'elle génère et ses risques pour la santé ; les mesures de prévention et de traitement sont aussi abordés.

Nous espérons que cette publication, fruit de la collaboration de la Commission Européenne et de l'OMS, contribuera à une meilleure compréhension du problème de l'eutrophisation et à une maîtrise plus efficace des rejets de nutriments dans nos lacs, nos rivières et nos mers.

Dr Günter KLEIN

Directeur

Centre Européen de l'OMS
pour l'environnement et Santé,
Bureau de Bonn

Prudencio PERERA

Directeur

Qualité environnementale
et ressources naturelles
Commission Européenne

Europe Direct est un service destiné à vous aider à trouver des réponses aux questions que vous vous posez sur l'Union européenne

Un nouveau numéro unique gratuit:
00 800 6 7 8 9 10 11

De nombreuses autres informations sur l'Union européenne sont disponibles sur l'internet via le serveur Europa (<http://europa.eu.int>).

Une fiche bibliographique figure à la fin de l'ouvrage.

Luxembourg: Office des publications officielles des Communautés européennes, 2003

ISBN 92-894-5655-8

© Communautés européennes, 2003

Reproduction autorisée, moyennant mention de la source

Printed in France - Imprimé sur papier blanchi sans chlore

Autorités locales, ce document vous est destiné

Le Bureau régional de l'Europe de l'OMS est régulièrement sollicité pour fournir des avis techniques ou pratiques sur un grand nombre de sujets liés à l'environnement et la santé.

Des experts, en collaboration avec de nombreux autres partenaires, ont rédigé ces documents pour vous aider à résoudre vos problèmes de santé et d'environnement.

Les recommandations sont hiérarchisées afin de permettre le développement de stratégies adaptées au contexte local.

††† Les recommandations ainsi identifiées sont celles qui doivent impérativement être appliquées pour assurer un environnement sûr et salubre. Toutes les autorités locales ont le devoir de s'y attaquer sans délai.

†† Les recommandations ainsi identifiées sont celles qui apporteront des améliorations sensibles de l'état de santé des populations et devraient être considérées comme des actions prioritaires.

† Les recommandations ainsi identifiées sont celles qui permettront, si elles sont suivies, d'améliorer substantiellement l'environnement local. La qualité de vie de tous les citoyens y gagnera.

Les recommandations sans niveau de priorité sont destinées à vous aider à élaborer des stratégies au niveau local et seront, en général, sans effet direct sur la santé.

Le personnel technique ainsi que les chargés de relation publique de vos services trouveront dans les annexes des informations pratiques de nature à les aider dans leur travail quotidien.

Une liste des sujets déjà publiés ou en cours de préparation figure en avant dernière page de couverture.

Conseillers scientifiques



Professeur Laura Volterra

Est chercheur depuis 1983 à l'Institut Supérieur de la Santé à Rome (Italie). Elle a travaillé sur les problèmes de biotoxines algales, et a une large expérience en microbiologie de l'eau potable et de baignade.



Dr Marc Boualam

Marc Boualam est docteur en Chimie et Microbiologie de l'eau de l'Université de Nancy, France. Il a fait des travaux dans différents domaines relatifs à la qualité de l'eau potable et de l'eau brute en collaboration avec des organisations scientifiques et industrielles.

Autres personnes ayant apporté leur contribution

Professeur Alain Ménesguen, IFREMER – M. Jean-Pierre Duguet, SAGEP – M. Jean Duchemin, Commission Européenne – M. Xavier Bonnefoy, OMS.

Xavier Bonnefoy
Conseiller régional



Proliférations d'algues dans l'eau de mer

Le mot “troph” en grec signifie nourriture ou nutriment, tandis que les mots “oligo”, “meso”, “eu” et “hyper” sont employés respectivement dans le sens de rare, modéré, abondant et excessif. Ainsi, les mots oligotrophe, mésotrophe, eutrophe et hypertrophe ont été utilisés par les biologistes pour décrire les diverses situations nutritionnelles d’un environnement aquatique, qu’il soit marin ou d’eau douce. Ces mots sont utilisés pour décrire la quantité de biomasse potentiellement disponible.

Les eaux eutrophes, soit les eaux où l’on peut trouver des nutriments en quantité importante vont favoriser la croissance des plantes et des algues “gourmandes” au développement rapide. Les espèces à longue durée de vie (et qui poussent lentement), ne peuvent pas résister à la compétition. Or, elles sont importantes pour la biodiversité (elles représentent notamment un habitat pour une faune variée) et se développent généralement dans des eaux oligo- ou mésotrophes. Les eaux eutrophes présentent souvent peu d’intérêt en terme de biodiversité et de qualité écologique. Les eaux “hypertrophes” disposent d’une telle quantité de nutriments qu’elles en meurent presque d’indigestion !

Le mot “eutrophisation” est aussi employé actuellement dans une perspective de préservation de la qualité écologique des eaux, par exemple dans les Directives de l’Union Européenne comme dans différents traités internationaux. “L’eutrophisation est l’enrichissement de l’eau en éléments nutritifs, notamment des composés de l’azote et/ou du phosphore provoquant un développement accéléré des algues et des végétaux d’espèces supérieures qui entraîne une perturbation indésirable de l’équilibre des organismes présents dans l’eau et une dégradation de la qualité de l’eau en question”.

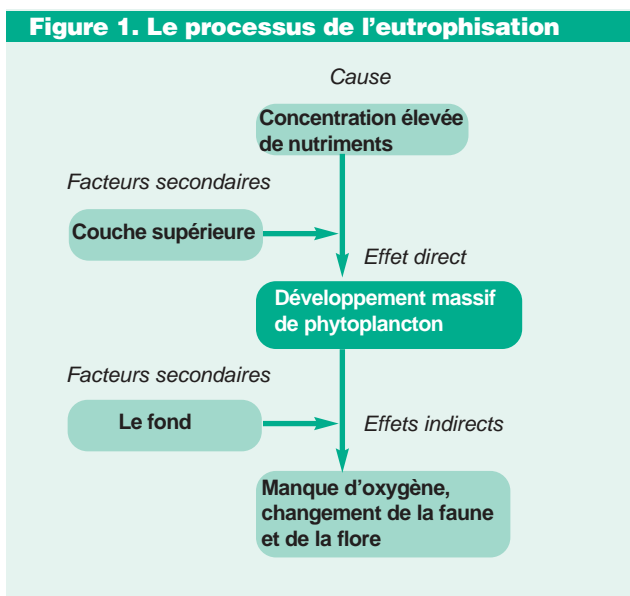
Ainsi, aujourd’hui “l’eutrophisation” est plus un état qu’une tendance et le terme décrit plus les conditions qualitatives d’un environnement aquatique qui a été déséquilibré que sa capacité de production (biomasse). C’est cette définition qui est adoptée dans ce document.

Scénario typique conduisant à l’eutrophisation

Les mécanismes qui conduisent à l’eutrophisation, c’est-à-dire à ce nouvel état de l’environnement aquatique, sont complexes et interdépendants. La figure 1 décrit le processus de l’eutrophisation.

La principale cause d’eutrophisation¹ est l’apport massif de nutriments dans une masse d’eau, le résultat principal est un déséquilibre dans la chaîne alimentaire qui conduit à des concentrations élevées en phytoplancton² dans des eaux stratifiées. Elle peut entraîner des proliférations algales³. La conséquence directe est une consommation excessive d’oxygène près du fond de l’eau. Les facteurs favorisant ce processus peuvent être divisés en deux catégories selon qu’ils sont liés à la dispersion des nutriments et à la croissance du phytoplancton, ou aux variations de la teneur en oxygène près du fond de l’eau (liée au confinement de certaines masses d’eau, à la pénétration de la lumière ou aux mouvements de l’eau). Divers effets peuvent être observés selon la sévérité de l’eutrophisation.

Les différentes étapes du déséquilibre de l’écosystème sont décrites sur la figure 2.

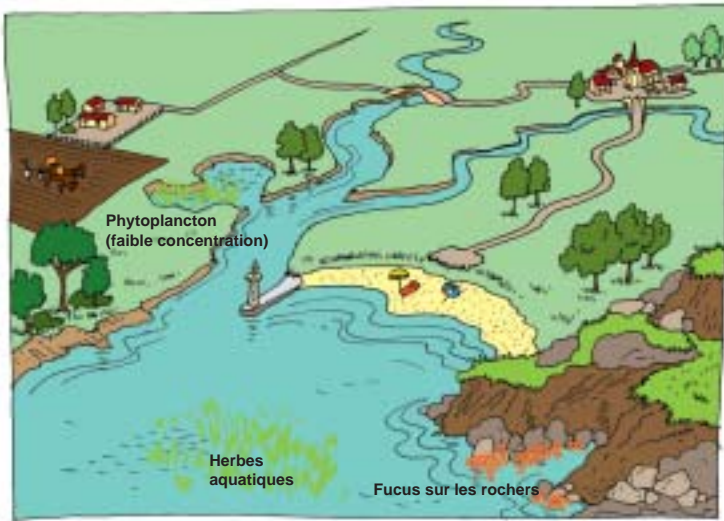


1 Druon J.N., “Indice de risque d’eutrophisation” – Document interne pour la DG ENV. Commission Européenne.

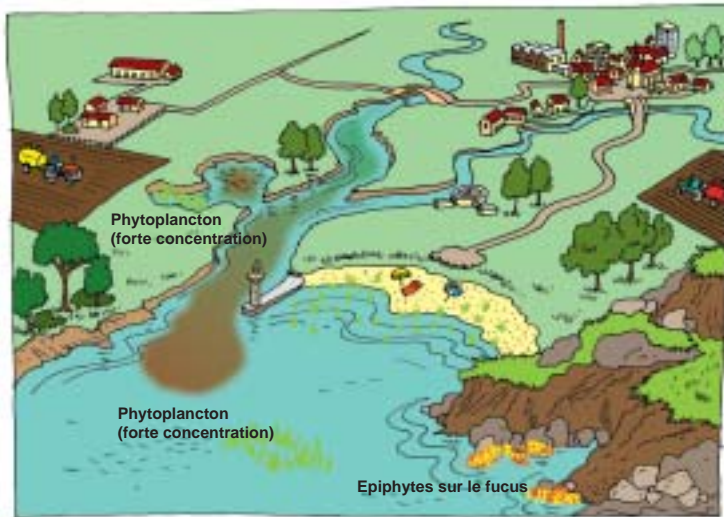
2 Phytoplancton : algues microscopiques, avec un squelette en silice (diatomées) ou sans, mobiles (dinoflagellés) ou non, en suspension dans l’eau douce ou de mer. Elles peuvent être vertes, brunes, ou même rouges.

3 Proliférations ou “Blooms” : c’est un phénomène au cours duquel apparaît une croissance explosive des algues et des cyano-bactéries, habituellement observé dans des eaux eutrophes. Les blooms peuvent être vus à l’œil nu quand la densité atteint plusieurs millions de cellules par litre d’eau. Ils sont en général dominés par un nombre limité d’espèces, voire une seule.

Fig 2 Déséquilibre de l'écosystème



Situation initiale



Début de l'eutrophisation



Eutrophisation extrême

En plus du carbone, de l'oxygène et de l'hydrogène que les plantes peuvent trouver directement dans l'eau, et du dioxyde de carbone qu'elles trouvent dans l'air, deux nutriments majeurs sont nécessaires pour le développement de la vie aquatique : l'azote (N) et le phosphore (P). Un troisième, la silice (Si), est nécessaire pour le développement des diatomées. Lors d'un phénomène d'eutrophisation, la concentration en nutriments dans l'eau change. Dans certains cas, un des trois nutriments peut être totalement consommé par la vie aquatique et ne sera plus disponible pour la croissance d'autres algues. Ce nutriment est appelé "facteur limitant".

Le rapport azote/phosphore dans la masse d'eau est un facteur important, déterminant lequel des deux éléments sera le facteur limitant. C'est la valeur de ce rapport qui dictera lequel devra être surveillé pour réduire la probabilité d'apparition d'un bloom (tableau 1).

En général, le phosphore a tendance à être le facteur limitant dans les eaux douces. Les grandes étendues marines ont souvent l'azote comme nutriment limitant, surtout l'été. Les zones intermédiaires, telles que les estuaires, sont souvent limitées par le phosphore pendant le printemps mais peuvent devenir limitées par la silice ou l'azote pendant l'été. Quand le phosphore est le facteur limitant, une concentration en phosphore de 0.01mg/l est suffisante pour permettre le développement planctonique, et des concentrations de 0.03 à 0.1 mg/l ou plus peuvent favoriser des proliférations (ou "blooms").

Dans les zones côtières, la croissance et la prolifération des diatomées sont favorisées par la présence de silice. Si cette concentration est faible, les diatomées ne peuvent pas se développer ; alors, d'autres espèces d'algues opportunistes, dont certaines toxiques, qui ne sont plus

Tableau 1 : Rapport azote/phosphore (exprimé en masse) pour différentes conditions limitantes dans les eaux douces estuariennes

	N-limitant (Ratio N/P)	Intermédiaire (Ratio N/P)	P-limitant (Ratio N/P)
Eau douce	≤ 4.5	4.5-6	≥ 6
Eau estuarienne ou côtière ⁴	≤ 5	5-10	≥ 10

⁴ La littérature scientifique en écologie marine utilise traditionnellement les rapports exprimés sous forme de rapport atomique. Avec une telle unité les chiffres du tableau se situeraient entre 12 et 24 pour les eaux d'estuaire.

soumises à la compétition avec les diatomées, peuvent se développer et former des blooms. Des espèces du genre *Phaeocystis* (gênant), ainsi que plusieurs dinoflagellés toxiques (*Prorocentrum*, *Dinophysis*, *Gymnodinium*), sont connues pour proliférer dans de telles conditions.

Les causes de l'eutrophisation et les facteurs favorisants

L'enrichissement de l'eau par les nutriments peut être d'origine naturelle, il est souvent accentué significativement par les activités humaines. C'est un phénomène ubiquitaire. Il y a trois voies principales permettant l'apport de nutriments d'origine humaine : le ruissellement, l'érosion et la percolation en provenance de zones agricoles fertilisées, les rejets d'eaux résiduares urbaines, et les rejets industriels. Le dépôt atmosphé-

rique d'azote (venant de l'élevage animal et des gaz de combustion) peut également être important.

D'après l'Agence Européenne de l'Environnement, "la principale source de pollution par l'azote est le ruissellement venant des terres agricoles, tandis que la majeure partie de la pollution par le phosphore vient des habitations et de l'industrie, y compris les détergents contenant du phosphore. L'accroissement rapide de la production industrielle et de la consommation des ménages au XX^e siècle a conduit à une forte augmentation des rejets d'eaux usées riches en nutriments. Bien que l'on observe depuis quelques années une tendance à mieux gérer les apports en azote et en phosphore dans les pratiques agricoles, la saturation des sols en phosphore existe encore dans certaines zones d'épandage excessif de fumier et de lisiers. L'élimination des nutriments par les stations de traitement d'eaux usées et la promotion des

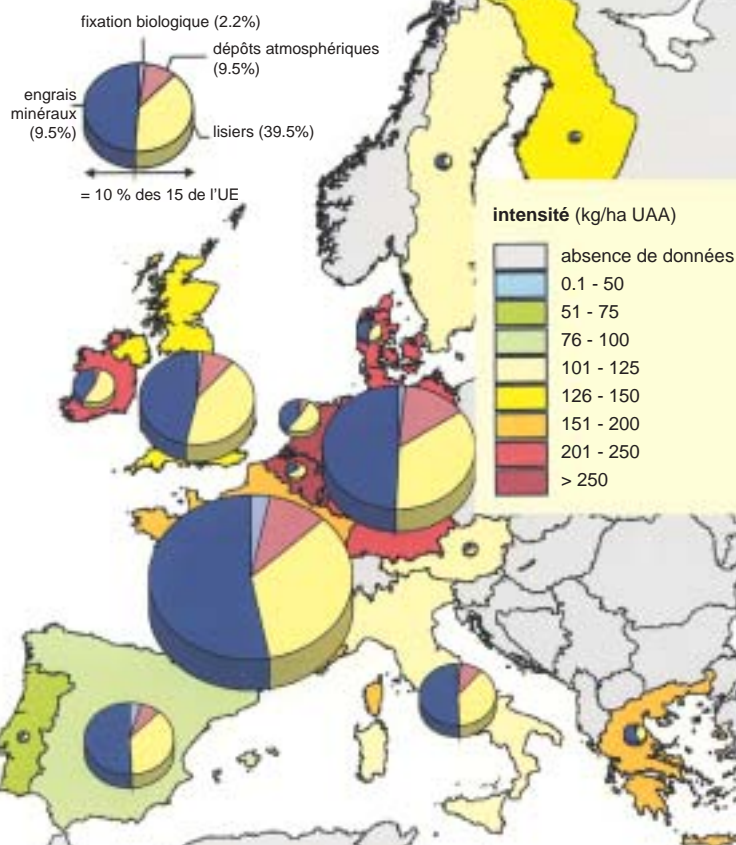
É T U D E D E C A S

La carte de l'azote sur les sols agricoles - 1997 Union Européenne

Source : Commission Européenne / DG ENV / Eurostat / JRC CIS

Azote total venant de

- dépôt atmosphérique
- fixation biologique
- déjections animales
- engrais minéraux (1997)



Les nitrates

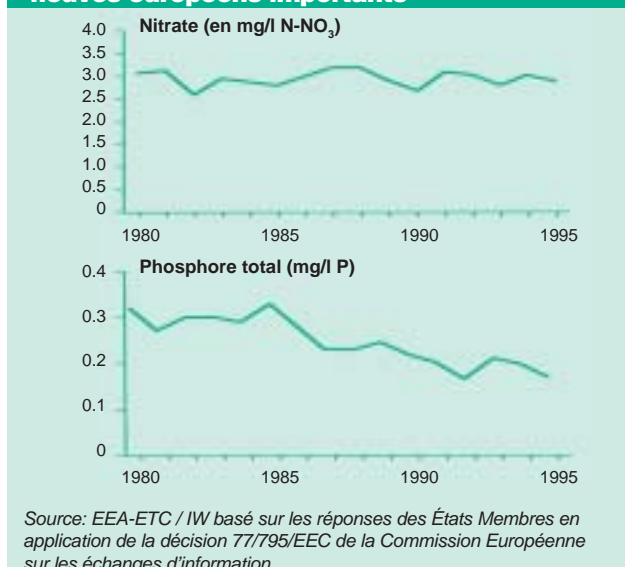
De 1950 à l'an 2000, l'utilisation d'azote minéral sous formes d'engrais agricoles dans les quinze Etats membres de l'Union Européenne a été multipliée par 10, passant de 1 à 9-10 millions de tonnes. Simultanément les rejets en azote en provenance des élevages atteignaient 9 millions de tonnes. Les seuls rejets d'azote dans l'environnement en provenance de l'agriculture atteignent actuellement 18 millions de tonnes.

Les pratiques agricoles en vigueur conduisent à la réduction des herbages permanents et d'autres surfaces "régulatrices", telles que les fossés, les haies et les marais : une situation qui favorise l'érosion, le ruissellement et le drainage rapide des nutriments dans les eaux superficielles.

Pays	Fixation biologique	Dépôts atmosphériques	Lisières	Engrais minéraux	Total 1000 t
	%	%	%	%	
Autriche	3.4	19.1	45.4	32.1	349.4
Belgique	0.8	9.5	56.9	32.9	480.9
Danemark	3.4	8.2	40.5	47.9	596.3
Finlande	2.3	3.7	29.9	64.1	272.9
France	3.0	9.6	34.4	52.9	4760.1
Allemagne	1.5	13.7	35.5	49.3	3627.3
Grèce	1.2	4.8	37.3	56.7	541.4
Irlande	0.3	4.7	53.9	41.1	960.4
Italie	1.3	9.5	38.5	50.7	1805.9
Luxembourg	0.5	9.5	39.6	50.4	35.7
Pays-Bas	0.3	7.7	52.5	39.6	935.0
Portugal	3.1	4.6	50.6	41.7	270.3
Espagne	4.3	7.3	37.6	50.7	2047.9
Suède	3.4	3.8	37.8	55.0	373.9
Royaume-Uni	1.6	9.3	42.4	46.8	2674.3
UE 15	2.2	9.5	39.5	48.9	19731.7

6 Source : Rapport de la Commission Européenne sur la mise en œuvre de la directive relative aux nitrates, COM (2002) 407

Fig. 2 : Azote et phosphore dans quelques fleuves européens importants

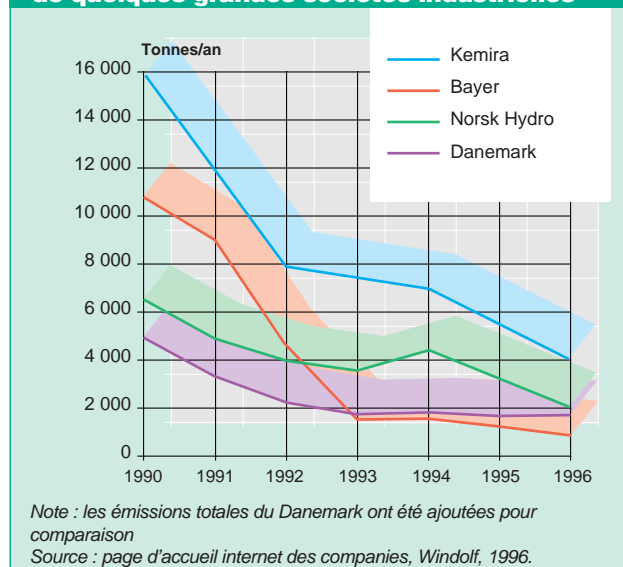


détergents sans phosphates sont fondamentales pour réduire l'impact de la pollution par l'azote et le phosphore dans les eaux de surface européennes⁷⁷.

Depuis 1980, les concentrations en nitrate dans la plupart des fleuves importants d'Europe sont restées à peu près constantes. Il n'y a pas d'évidence de réduction globale de l'épandage d'engrais azotés qui aurait permis une baisse de concentrations en nitrates dans les fleuves. À contrario, dans plusieurs régions d'Europe, telles que la Bretagne ou le Poitou en France, la Catalogne en Espagne, les concentrations sont toujours en hausse. Des données plus détaillées sur les nitrates sont disponibles dans le rapport de la Commission Européenne⁶.

Les concentrations en phosphore ont baissé dans la plupart des fleuves européens (Figure 2). Cette diminution est due essentiellement à un meilleur traitement des eaux usées urbaines et à l'utilisation de détergents ménagers contenant moins de phosphates. Les rejets industriels de phosphore ont également décliné de manière significative (figure 3). Les apports en phosphore en provenance de l'agriculture, malgré une réduction de la consommation en engrais phosphatés dans les pays européens, demeurent importants.

Fig. 3 : Émissions de phosphores provenant de quelques grandes sociétés industrielles



Malheureusement, en raison du rôle essentiel de l'azote dans le processus d'eutrophisation, la réduction des apports en phosphore par les fleuves dans la mer n'a pas conduit à des effets visibles durant les périodes estivales, sauf dans des régions très spécifiques. Dans la plupart des cas, le phosphore libéré par les sédiments a été suffisant pour permettre à l'eutrophisation de se développer, même si les apports extérieurs ont largement diminué. De fait, seule la côte néerlandaise a bénéficié de l'amélioration de la qualité des eaux du Rhin, partout ailleurs sur le littoral la situation est demeurée stable ou a empiré.

Quelques activités peuvent amener à une augmentation des phénomènes d'eutrophisation et, bien qu'elles soient très spécifiques, méritent d'être signalées :



Épandage de lisier.

- **Le développement de l'aquaculture** : l'expansion de l'aquaculture contribue à l'eutrophisation à la fois par les apports de nourriture non consommée par les animaux et par les excréta des poissons d'élevage.
- **Le transport** d'espèces exotiques : les navires de commerce peuvent transporter sur de grandes distances, dans l'eau de leurs ballasts, des algues toxiques, des cyanobactéries ou des végétaux nuisibles de zones endémiques vers des zones indemnes. Dans ces nouveaux environnements, ces nouvelles espèces peuvent trouver un habitat favorable à leur croissance et à leur dispersion, stimulées par des nutriments en suffisance ;
- **Les réservoirs, notamment en zones arides** : la construction de vastes réservoirs pour stocker et gérer l'eau douce a été pratiquée partout dans le monde. Ces barrages sont construits pour permettre la collecte des eaux de drainage provenant de vastes bassins versants. L'érosion conduit à l'enrichissement des eaux de ces réservoirs en nutriments tels que le phosphore et l'azote.

Facteurs favorisant le développement de l'eutrophisation

Outre l'apport de nutriments, la première condition qui favorise le développement de l'eutrophisation est purement physique – c'est le confinement des masses d'eau (temps de renouvellement). Une masse d'eau peut être confinée physiquement, par exemple dans un lac ou même dans une rivière au débit suffisamment faible pour qu'elle fonctionne "en piston" (les eaux en amont ne se mélangent pas avec les eaux en aval) ou de manière dynamique.

La notion de "confinement dynamique" se rapporte essentiellement aux zones marines. Les caractéristiques géologiques telles que la forme du fond de la mer, la forme des rivages, les conditions physiques telles que les courants, ou les zones de grande turbulence, les mouvements des marées, permettent à quelques zones maritimes de fonctionner "en cuvée", avec un renouvellement de l'eau très faible. C'est ce qu'on appelle un "confinement dynamique".

Dans d'autres cas, par les effets des marées, et/ou des courants, certaines zones qui sembleraient propices au confinement voient leurs eaux renouvelées régulièrement, et de ce fait risquent peu de devenir eutrophes.



Herbier à *Zostera* en juin 1987.



Zostera recouverte d'algues vertes filamenteuses en juin 1988.

D'autres facteurs physiques influent sur l'eutrophisation des aquifères. La stratification thermique des eaux stagnantes (tels que les lacs et les bassins), la température de l'eau et l'intensité de la lumière jouent un rôle sur le développement des algues. L'augmentation de la luminosité et de la température durant le printemps et l'été expliquent pourquoi l'eutrophisation est un phénomène éminemment saisonnier. La pénétration de la lumière dans l'eau est affectée par l'eutrophisation. En effet, le développement des algues et autres végétaux génère un effet d'ombre qui réduit la photosynthèse⁸ dans les couches profondes, aussi la croissance des herbes aquatiques et des algues du fond s'en trouve limitée.

⁸ Photosynthèse : c'est le processus qui permet aux organismes, en particulier les plantes vertes, d'utiliser l'énergie de la lumière pour effectuer la synthèse des hydrates de carbone (sucres) à partir de dioxyde de carbone et d'eau.

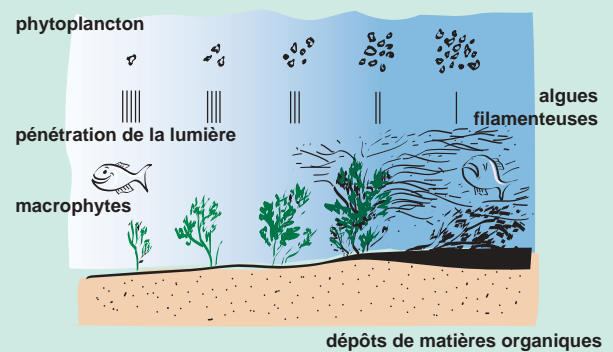
Principales conséquences de l'eutrophisation

La conséquence majeure de l'eutrophisation concerne la **disponibilité en oxygène**. Les plantes, pendant la photosynthèse, produisent de l'oxygène pendant la journée. Au contraire, la nuit, tous les animaux, les plantes, les micro-organismes aérobies ainsi que la matière organique en décomposition, consomment de l'oxygène. L'importance de chacun de ces deux processus dépend du développement de la biomasse. Lorsqu'il y a une accumulation importante de biomasse, le processus d'oxydation de la matière organique qui s'est formée en sédimentant au fond de l'eau va consommer tout l'oxygène disponible. Même l'oxygène contenu dans les sulfates (SO_4^{2-}) va être utilisé par des bactéries spécifiques. Ceci va conduire à la libération de sulfures (S^{2-}) qui vont immédiatement capturer l'oxygène libre encore présent dans les couches supérieures. Ainsi, le plan d'eau va perdre tout son oxygène et toute vie va disparaître. C'est à ce stade que l'odeur très spécifique d'œufs pourris, provenant essentiellement des sulfures dégradés en hydrogène sulfuré, apparaît.

Effets de l'enrichissement en nutriments sur la biodiversité

Dans des conditions normales, c'est-à-dire en dehors des périodes d'eutrophisation, les macrophytes au fond du plan d'eau se développent normalement, la quantité de phytoplancton est telle que la lumière peut pénétrer jusqu'au fond de l'eau. Les poissons et les coquillages peuvent vivre et se reproduire. Si la quantité de nutriments s'accroît, la plupart des macrophytes à vie courte vont se multiplier plus rapidement. De nouvelles espèces plus grandes vont se développer et entreront en compétition avec celles déjà présentes. Dans certains cas le phytoplancton va aussi proliférer. Ce développement de macrophytes, y compris les algues qui flottent librement, et du phytoplancton vont empêcher une grande partie de la lumière d'atteindre le fond. Les premiers signes d'anoxies deviennent visibles. Si la situation devient extrême, les concentrations en oxygène vont atteindre des niveaux tels que la vie aquatique sera impossible. Seules les espèces qui requièrent très peu d'oxygène pourront survivre. La quantité de sédiments organiques va s'accroître, ainsi que la demande en oxygène. L'étape ultime sera la fin de toute vie aérobie (voir fig.2)

Fig. 4 : Évolution de la vie des plantes aquatiques dans les eaux côtières avec augmentation des apports en nutriments¹⁰



10 Funen City Council, Eutrophisation des eaux côtières, publié par Funen City Council, Danemark, 1991

- **Variations des populations d'algues :** Pendant l'eutrophisation, les macro-algues, le phytoplancton (diatomées, dinoflagellés, chlorophytes) et les cyanobactéries⁹, dont la croissance dépend de la quantité de nutriments présents, de la lumière, de la température et des mouvements de l'eau vont se développer massivement. D'un point de vue de la santé publique, le fait que quelques-uns de ces organismes puissent émettre des toxines dans l'eau ou être eux-mêmes toxiques est important.

⁹ cyanobactéries : appelées aussi cyanophycées ou algues bleues-vertes. Ce sont des organismes très anciens capables de photosynthèse comme les plantes et qui ont des points communs à la fois avec les bactéries et les algues



Croissance de bactéries blanches sulfito-réductrices sur des sédiments noirs au milieu de colonies de moules communes.



Apparition localisée de bactéries blanches sulfite-réductrices suite à la disparition de l'oxygène au fond de la mer, due à une demande élevée en oxygène induite par la décomposition d'un tapis d'algues filamenteuses.

• **Variations des populations de zooplancton**¹¹, poissons et coquillages. Cette partie de l'écosystème est la première à changer quand débute l'eutrophisation. Ces populations sont très sensibles à la teneur en oxygène de l'eau. Elles peuvent mourir par manque d'oxygène ou du fait de changements dans la composition chimique de l'eau telle que l'alcalinité excessive qui apparaît pendant les périodes d'intense photosynthèse¹². L'ammoniaque, par exemple, est beaucoup plus toxique pour les poissons quand les eaux sont alcalines.

Les effets de l'eutrophisation

Un environnement eutrophe peut affecter de différentes manières la santé des populations exposées, animales et/ou humaines. Des risques spécifiques pour la santé apparaissent lorsque l'eau douce, extraite de zones eutrophes, est utilisée pour la production d'eau destinée à la consommation humaine. Les animaux consommant des eaux eutrophes peuvent également voir leur santé affectée.

¹¹ zooplancton : ce sont les animaux microscopiques, avec ou sans locomotion active, en suspension dans l'eau.

¹² Pendant les périodes de photosynthèse intense, les organismes vivants vont consommer tout le gaz carbonique disponible, y compris celui provenant des carbonates de l'eau. En conséquence, l'alcalinité de l'eau va augmenter pendant la journée, et l'acidité pendant la nuit.

Proliférations d'algues macroscopiques, de phytoplancton et cyanobactéries

Les algues présentent des degrés divers de complexité selon l'organisation de leurs cellules. Les macro-algues, le phytoplancton et les cyanobactéries peuvent coloniser les eaux marines, saumâtres ou douces si les conditions de lumière, de température et nutritionnelles sont favorables.

Les cyanobactéries ont été largement étudiées dans les systèmes d'eau douce, en raison de leur capacité à proliférer, à former de vastes surfaces d'écumes et à produire des toxines qui ont été impliquées dans l'empoisonnement d'animaux et de personnes. Quelques espèces d'algues peuvent aussi contenir des toxines, cependant les incidents où les algues d'eau douce (hors cyanophycées) sont à l'origine de maladies humaines ou animales, ont été très rarement rapportés.

Les épisodes de marées toxiques colorées dues à des blooms algaux sont connus depuis la plus haute Antiquité. De fait, dans la Bible (Exode, 7 :20-24) l'on peut lire "toute l'eau du Nil devint rouge sang et les poissons de la rivière moururent. Et la rivière était empoisonnée et les Egyptiens ne pouvaient plus boire ses eaux".

Les blooms algaux ont été observés en 1638 par des pêcheurs au nord-ouest de l'Islande, ils notent que les fjords étaient teintés couleur sang et pendant la nuit produisaient une sorte de phosphorescence. Les pêcheurs pensaient que la couleur pouvait être due au sang des baleines se battant ou à quelques insectes ou plantes marines (Olefsson et Palmsson 1772). Le premier rapport scientifique faisant état d'animaux domestiques morts empoisonnés par une eau de boisson polluée par un bloom d'algues bleues-vertes date de 1878 (lac Alexandria en Australie).

Près des côtes et dans les estuaires, où les conditions sont moins favorables à la prolifération des cyanobactéries qui ont besoin d'oligo-éléments tels que le fer, d'autres algues toxiques comme certains dinoflagellés potentiellement dangereux pour la santé ont été observés. Il y a de plus en plus d'éléments permettant de penser que les nutriments, surtout l'azote, favorisent un allongement de la durée et une augmentation de la fréquence de ces proliférations toxiques, ainsi qu'une concentration plus élevée en toxine dans les cellules.

Tableau 2. Organe-cibles des cyanotoxines et des espèces de cyanobactéries impliquées (Chorus et Bartram, 1999)

Groupe de toxine	organe-cible principal chez les mammifères	Genre de cyanobactérie
Peptides cycliques		
Microcystines	Foie	<i>Microcystis, Anabaena, Oscillatoria, Nostoc, Hapalosiphon, Anabaenopsis</i>
Nodularine	Foie	<i>Nodularia</i>
Alcaloïdes		
Anatoxine-a	Synapse nerveuse	<i>Anabaena, Oscillatoria, Aphanizomenon</i>
Anatoxine-a(S)	Synapse nerveuse	<i>Anabaena</i>
Aplysiatoxines	Peau	<i>Lyngbia, Schizothrix, Oscillatoria</i>
Cylindrospermopsines	Foie	<i>Cylindrospermopsis, Aphanizomenon, Umezakia</i>
Lyngbyatoxine-a	Peau, tractus gastro-intestinal	<i>Lyngbia</i>
Saxitoxines	Axones nerveux	<i>Anabaena, Aphanizomenon, Lyngbia, Cylindrospermopsis</i>
Lipopolysaccharides		
	Irritant potentiel, affecte tous les tissus exposés	Tout

Les effets sur la santé liés aux toxines des cyanobactéries en eau douce

Quelques cyanobactéries ont la faculté de produire des toxines dangereuses pour l'espèce humaine. Ces toxines peuvent être trouvées soit libres dans l'eau où apparaît le bloom, soit à l'intérieur des cellules de cyanobactéries. Quand les cellules sont jeunes (pendant la phase de croissance), 70 à 90% des toxines sont liées aux cellules tandis que lorsque les cellules vieillissent, les toxines libres peuvent atteindre 70% du total. Il est difficile d'éliminer les toxines libres dans l'eau par les procédés traditionnels de potabilisation. En règle générale, il est plus facile d'éliminer les cellules de cyanobactéries que les toxines libres (voir annexe technique).

La résistance et la persistance des toxines dans l'environnement sont variables selon les toxines. Des recherches ont montré la capacité qu'ont certaines toxines de résister à des contraintes physico-chimiques et biologiques, en particulier à des températures élevées (supérieures à 300°C). En principe, les effets cumulés de ces facteurs entraînent la dégradation des toxines dans l'environnement naturel en une à trois semaines. En l'absence de possibilité pour la lumière de pénétrer, les toxines peuvent résister plusieurs mois voire des années.

A ce jour, on connaît plus de cinquante espèces de cyanobactéries capables de produire des toxines. En Europe, les espèces les plus couramment observées

dans les eaux douces pendant les blooms sont *Microcystis, Anabaena, Aphanizomenon, Oscillatoria, Nodularia* et *Nostoc*.

De nombreuses expériences ont été conduites pour caractériser les effets sur la santé des toxines émises par les cyanobactéries, appelées aussi cyanotoxines, en particulier dans les eaux douces. L'exposition à ces toxines peut survenir lors de la consommation d'eau de boisson contaminée, au cours d'un contact cutané avec l'eau douce, ou par inhalation d'aérosols. Les toxines agissent au niveau moléculaire et par conséquent affectent les cellules, les tissus et organes (tableau 3). Les systèmes nerveux, digestif, respiratoire et cutané peuvent être touchés. La sévérité des symptômes dépend de l'âge ou des conditions physiologiques de l'individu atteint. La symptomatologie dépend des toxines impliquées. Il peut s'agir de fatigue, maux de tête, diarrhée, vomissements, maux de gorge, fièvre et irritations cutanées.

Les cyanotoxines peuvent être classées en trois groupes :

• Hépatotoxines.

Ce sont les cyanotoxines les plus fréquemment observées. Des expérimentations sur souris montrent qu'elles provoquent des lésions du foie pouvant aller jusqu'à la mort par hémorragie hépatique et défaillance cardiaque, quelques heures après une exposition à des doses élevées. Une exposition chronique des animaux provoque

des lésions du foie et favorise le développement de tumeurs.

Des questions demeurent en ce qui concerne les effets d'exposition répétée à de faibles teneurs en toxine. L'expérience chez l'animal a montré que des lésions du foie pouvaient apparaître suite à une exposition répétée, par voie orale, à des microcystines, les plus fréquemment observées des cyanotoxines. Certains pensent que la prévalence¹³ élevée de cancers du foie observés dans certaines régions de Chine pourrait être due à la présence de microcystines dans les eaux d'alimentation.

• Neurotoxines.

Elles sont moins répandues et agissent sur le système nerveux. Sur les souris et les oiseaux aquatiques, elles provoquent rapidement la mort par arrêt respiratoire, parfois en quelques minutes.

¹³ Prévalence : c'est le nombre de cas d'une maladie donnée ou d'une autre variable dans une population donnée pendant une durée déterminée (Last, 1998)

• Dermatotoxines.

Elles provoquent des irritations et des réponses allergiques sur les tissus cutanés par simple contact.

La toxicité globale d'une prolifération cyanobactérienne n'est constante ni dans le temps ni dans l'espace. Ceci rend difficile l'évaluation des risques pour la santé, il convient de noter que certains empoisonnements aigus ont conduit à la mort (tableaux 3 et 4).

La présence de cyanotoxines dans l'eau a été à l'origine de plusieurs épisodes épidémiques affectant soit l'animal soit l'homme (études de cas p.112). Environ 75% des blooms de cyanobactéries sont accompagnés d'une production de toxines. La présence de cyanotoxines après un traitement de potabilisation représente un danger réel pour la santé des patients sous dialyse rénale.

Tableau 3. Épidémies liées à la prolifération de cyanobactérie toxiques dans les eaux destinées à la consommation humaine (Chorus et Bartram, 1999, AFSSA, 2001¹⁴)

Lien et date du bloom de cyanobactérie	Espèces	Symptômes	Conséquences
Eau potable			
USA, 1931	<i>Microcystis</i>	Gastro-entérites	pas de données
USA, 1976	<i>Schizotrix, Plectonema, Phormidium, Lyngbia</i>	Gastro-entérites	62% de la population - alimentées par la station est tombée malade
Australie, 1979	<i>Cylindrospermopsis raciborskii</i>	Hépatites	141 hospitalisations
Australie, 1981	<i>Microcystis</i>	Gastro-entérites Lésions du foie	pas de données
Brésil, 1988	<i>Anabaena, microcystis</i>	Gastro-entérites	2000 personnes atteintes 88 décès
Suède, 1994	<i>Planktothrix agardhii</i>	Gastro-entérites	121 personnes atteintes
Brésil, 1996	<i>Aphanizomenon, Oscillatoria, Spirula</i>	Hépatites	166 personnes atteintes 60 décès

Tableau 4. Exemples d'épidémies dues à la prolifération de cyanobactéries toxiques dans les eaux de loisir Chorus et Bartram, 1999, (rapport provisoire) AFSSA, 2001

Eaux de loisir			
Canada, 1959	<i>Microcystis</i> <i>Anabaena circinalis</i>	Gastro-entérites, maux de tête, nausées, douleurs musculaires	30 personnes
UK, 1989	<i>Microcystis</i>	Gastro-entérites, vomissements, maux de gorge	20 personnes 2 hospitalisations

¹⁴ Coquet Sandrine, Évaluation des risques liés à la présence de cyanobactéries dans les eaux destinées à la consommation humaine, rapport AFSSA, Paris, 2001



La présence de cyanotoxines dans l'eau a été à l'origine de troubles affectant les animaux.

É T U D E D E C A S

Tragédie après la consommation d'eau de boisson contaminée par des cyanotoxines

En 1988 au Brésil, 2000 cas de gastro-entérites, dont 88 fatals, ont été recensés dans une zone alimentée en eau potable à partir d'un réservoir contaminé par des cyanobactéries (*Anabaena* et *Microcystis*). Des cas ont même été observés chez des patients qui faisaient bouillir leur eau avant de la boire. Les cas sont restés limités aux régions alimentées en eau par ce réservoir.

Les toxines algales dans les eaux de mer

On observe des toxines algales dans les écosystèmes marins où elles peuvent s'accumuler dans les coquillages et plus généralement, dans les fruits de mer, atteignant des niveaux dangereux pour la santé des hommes et des animaux.

Environ quarante espèces d'algues susceptibles de produire des toxines dangereuses pour la vie marine et pour l'homme ont été identifiées sur les côtes européennes. Parmi ces micro-algues, *Dinophysis*, *Alexandrium*, *Gymnodium*, *Pseudo-nitzschia* sont souvent observés et représentent un risque pour les consommateurs de fruits de mer.

Les différents effets sont :

- **Intoxication diarrhéique par les coquillages (DSP).**

L'intoxication provoque des symptômes gastro-intestinaux (par exemples diarrhée, vomissements et douleurs abdominales). Les espèces fréquemment impliquées sont du genre *Dinophysis* et *Prorocentrum*. Les porteurs

sont les coquillages filtreurs tels que huîtres, moules¹⁵, coques et palourdes. Aucun décès n'a été observé.

- **Intoxication paralysante par les coquillages (PSP).**

L'intoxication entraîne une paralysie musculaire, des difficultés respiratoires, un choc, et, dans les cas extrêmes, la mort par arrêt respiratoire. Les espèces fréquemment impliquées sont du genre *Alexandrium* et *Gymnodium*. Les porteurs peuvent être des huîtres, des

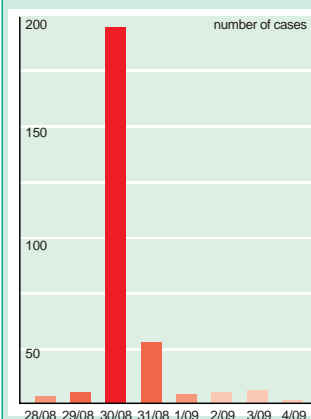
¹⁵ Une moule peut filtrer jusqu'à 30-40 l d'eau par jour.

É T U D E D E C A S

Une épidémie tout à fait caractéristique¹⁶

Pendant l'été 1988, près de Fécamp, en Seine-Maritime, France, les autorités de santé publique ont été alertées par l'hôpital local suite à un nombre inhabituel de patients admis pour vomissements et diarrhées. Après quelques investigations auprès des pharmaciens locaux de garde ce week-end, il est apparu qu'il y avait aussi d'autres malades qui ne s'étaient pas rendus à l'hôpital.

Plus de 200 personnes ont été touchées. Grâce au réseau existant des pharmaciens, l'épidémie a été parfaitement suivie, ainsi que le montre le schéma ci-dessous.



L'étude épidémiologique a montré que l'origine de cette épidémie était l'ingestion de moules récoltées par les touristes et les habitants locaux pendant les grandes marées. Les moules avaient filtré une grande quantité de *Dinophysis* (un phytoplancton toxique à DSP).

Suite à cet épisode, les autorités ont décidé d'élargir le réseau de surveillance du phytoplancton et des phycotoxines (REPHY ; voir p. f19) mis en place par l'IFREMER*, initialement prévu pour surveiller la production commerciale de coquillages, à cette région de France. Cette surveillance s'ajoutait à celle existante ("Diamoule") conduite par le réseau des pharmaciens locaux, coordonnés par les autorités de santé publique (DDASS).

*Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer

¹⁶ Coquillages et santé publique, du risque à la prévention, Lesne Jean et al, édition de l'ENSP, 1991

Tableau 5 Cas d'intoxications dues à la consommation de fruits de mer
(MAP Technical Reports, 1996)

Intoxication	Pays	Date	Conséquences
PSP	Philippine	1983	300 cas 21 décès
	Royaume-Uni	1968	78 cas
	Espagne	1976	63 cas
	France	1976	33 cas
	Italie	1976	38 cas
	Suisse	1976	23 cas
	Allemagne	1976	19 cas
DSP	Japon	1976-1982	1300 cas
	France	1984-1986	4000 cas
	Scandinavie	1984	300-400 cas
VSP	Japon	1889	81 cas
			51 décès
	Japon	1941	6 cas
			5 décès
ASP	Canada	1987	70 cas
			3 décès
NSP	Floride	1977 (?)	ND

moules, certains crustacés et poissons. 10% environ des personnes atteintes décèdent.

- **Amnésie due à une intoxication par les coquillages (ASP).** L'intoxication provoque une confusion mentale et une perte de mémoire, une désorientation et parfois le coma. Les espèces fréquemment impliquées sont les diatomées du genre *Nitzschia*. Les porteurs sont les coquillages filtrants, tels que les moules. Des décès ont été observés chez les personnes âgées.

É T U D E D E C A S

Effets graves pour la santé au cours d'une baignade dans des eaux contaminées par des algues bleues toxiques (Chorus et Bartram, 1999)

Au Royaume-Uni en 1989, après un entraînement dans une eau où un bloom très important de *microcystis* spp se développait, dix des vingt recrues de l'armée qui s'étaient baignées ont présenté des symptômes indiquant une intoxication (vomissements, diarrhée, douleurs abdominales centrales et maux de gorge). Deux d'entre eux ont développé une pneumonie grave et ont dû être hospitalisés pour des soins intensifs.

É T U D E D E C A S

Un effet récemment découvert de eutrophisation des eaux de mer¹⁷

La présence de bactéries potentiellement dangereuses pour la santé humaine, telles que certains Escherichia Coli, Salmonella spp ou Vibrio cholerae, peut représenter un danger pour les baigneurs. Dans des conditions normales, ces bactéries ne survivent pas très longtemps dans l'eau de mer. Cette survie limitée est due à la relative pauvreté en nutriments des eaux de mer, à l'exposition des bactéries aux rayons UV qui ont un effet bactéricide et enfin, à l'osmolarité¹⁸ de l'eau de mer qui est beaucoup plus élevée que celle des bactéries.

Pendant les épisodes de blooms, les conditions s'inversent, la nourriture devient abondante, la lumière diminue et il a été récemment démontré que quelques algues peuvent même produire des substances qui entraînent une osmoprotection pour les bactéries.

En conséquence, pendant ces épisodes, si des bactéries contaminent déjà l'eau de mer, la situation peut se dégrader dans ces conditions nouvelles, leur permettant de survivre et peut-être même de proliférer.

- **Intoxication par neurotoxines dans les coquillages (NSP).** L'intoxication mène à une paralysie musculaire, un état de choc et parfois la mort. Les espèces fréquemment impliquées sont du genre gymnodinium. Les porteurs sont les huîtres, les praires et les crustacés. Des décès ont été observés. Ces neurotoxines ont été à l'origine de véritables désastres écologiques au cours desquels une forte mortalité de poissons et d'autres formes de vie aquatique a été observée.
- **Intoxication à la vénéruprine par les coquillages (VSP).** L'intoxication provoque des troubles gastro-intestinaux, nerveux, hémorragiques, hépatiques et dans les cas extrêmes un délire et un coma hépatique. Les espèces fréquemment impliquées sont du genre *Prorocentrum*. Les porteurs sont les huîtres et les praires. Une forte mortalité est généralement observée parmi les populations intoxiquées.

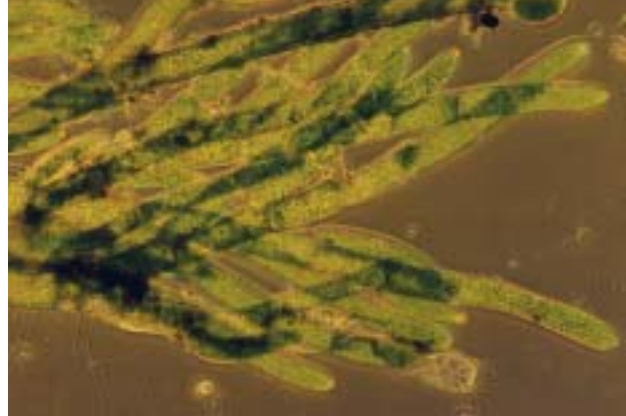
¹⁷ M. Ghoul et al, macroalgues marines comme source d'osmoprotection pour Escherichia Coli, in Microb Eco, 1995, vol 30, pp171-181

¹⁸ osmolarité : Caractéristique chimique de l'eau principalement liée à sa concentration en sels dissous.

Les blooms à microphytes

Il existe quelques effets spécifiques des blooms à microalgues en eau de mer qui peuvent avoir de lourdes conséquences économiques. Les proliférations d'algues vertes-bleues, de diatomées et de Prymensiophytes peuvent conduire à la sécrétion d'un mucus formant des "couvertures" flottant à la surface (c'était le cas de "neige marine" observée en 1999 dans le golfe d'Euvoikos en Grèce). Le même phénomène se produit presque chaque année, au printemps, avec des *Phaeocystis* le long des côtes belges (générant une épaisse mousse blanche).

Des quantités imposantes de masses gélatineuses ont été aperçues flottant dans la mer Egée en 1982 et 1983. Des phénomènes presque similaires sont décrits p.f15



Cladophora en cours de croissance. A fort grossissement, on observe nettement les bourgeonnements de l'algue.

É T U D E D E C A S

Évolution de la qualité des eaux de la Mer Noire

Ces trente dernières années, la qualité des eaux de la Mer Noire s'est dégradée. Une croissance alarmante de la masse algale est apparue du fait de l'enrichissement des eaux en nutriments. Après un déséquilibre majeur de l'écosystème entre les années 1970 et 1980, la masse des poissons morts a été estimée à 5 millions de tonnes entre 1973 et 1990, représentant une perte de près de 2 milliards de dollars. Une autre conséquence a été la baisse de fréquentation de la Mer Noire par les touristes, conduisant à un manque à gagner pour l'industrie touristique. Une étude lancée dans le cadre du Programme des Nations Unies pour l'Environnement de la Mer Noire a estimé qu'en 1995 la perte économique annuelle due à la désaffection des touristes dans cette région approchait les 360 millions \$ à chaque fois que la qualité de l'environnement baissait de 10%.

La crise économique en Europe Centrale et Orientale et les vastes programmes pour la protection des eaux du Danube ont conduit à une baisse des rejets en nutriments et à une baisse de l'eutrophisation (Roger Aertgaerts : communication personnelle)

Développement massif de macrophytes¹⁹

Les proliférations de macroalgues, également appelées marées vertes²¹ sont régulièrement observées dans l'environnement marin. Ces proliférations sont directement liées à l'enrichissement des eaux en nitrates et ont souvent lieu dans des baies ou des estuaires. Les espèces opportunistes impliquées sont fréquemment du genre *Ulva* (*Ulva armoricana*, *Ulva rotundata*, *Ulva rigida*), *Monostroma* (*Monostroma obscurum*), *Enteromorpha* (*Enteromorpha intestinalis*, *Enteromorpha linza*, *Enteromorpha clathrata*, *Elodea Myrissphyllus* dans les eaux douces) et plus rarement *Chaetomorpha* et *Cladophora*. Les principales saisons pour le développement massif de macroalgues sont le printemps et l'été. Ces macroalgues, à courte durée de vie, entrent en compétition avec les espèces autochtones, à durée de vie plus longue (par exemple le *Fucus*), qui sont beaucoup plus intéressantes en terme de biodiversité. Dans les zones côtières, l'accumulation de telles algues sur les plages peut atteindre des milliers de tonnes et générer de nombreuses nuisances y compris olfactives, rendant impossible l'utilisation des plages. En Bretagne, en France, il est estimé que plus de 50 000 tonnes de macroalgues

¹⁹ Macrophytes : signifient littéralement "de grandes plantes", par opposition au phytoplancton unicellulaire. Ils incluent les herbes marines, algues fixées, les algues flottantes, et les plantes et algues d'eau douce.

²¹ DCO : demande chimique en oxygène

sont déposées sur les plages chaque année, nécessitant un enlèvement mécanique coûteux.

Les effets des blooms à macrophytes sur la santé publique, y compris le bien-être et la sécurité, sont essentiellement liés à l'usage de l'eau à des fins de loisir. Du fait de l'aspect désagréable et des odeurs de décomposition, les activités de loisirs deviennent parfois impossibles ou dangereuses, et, dans tous les cas, déplaisantes dans les zones touchées par ces proliférations. De rares cas d'allergies ont été décrits.

É T U D E D E C A S

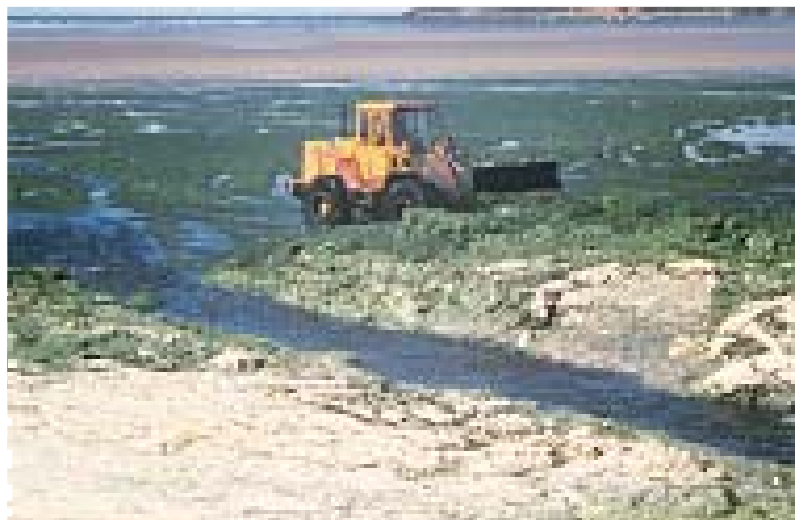
Effets esthétiques

Certains planctons, particulièrement de l'espèce "Phaeocystis", produisent un mucus qui forme une mousse quand il est fortement agité. Ces algues sont plus enclines à se développer quand il y a peu de compétition. Il semble que dans des régions telles que la côte S.E. de la mer du Nord, où tout le silicium a été capté par des diatomées dans les zones d'estuaires, l'azote restant est utilisé par Phaeocystis pour se développer. Ils produisent une grande quantité de mucus qui, si le temps est venteux, va se transformer en larges étendues de mousse couvrant de vastes surfaces le long des plages et des rives de lacs. Outre l'impact sur le paysage et la nuisance qu'elle représente pour les touristes, cette écume est soupçonnée de perturber le développement des larves des poissons plats.

Ce phénomène est fréquemment observé sur les côtes belges et hollandaises et apparaît de temps à autre en Allemagne.



Mousse due à un bloom de Phaeocystis (Mai 1988, Côte d'Opale, France)



Enlèvement mécanique des macroalgues (ulves) (juillet 1985, Baie de Lannion)

Les blooms à macrophytes dus à l'eutrophisation peuvent perturber la pêche. Certaines algues vertes filamenteuses telles que les *Cladophora* colonisent les fonds marins. Elles sont largement répandues en mer Baltique. Quelques-unes d'entre-elles produiraient des composants toxiques pour les œufs de harengs. Enfin, elles peuvent alourdir les filets de pêche et conduire à leur rupture, voire leur perte.

Dans les eaux douces, des macrophytes semblables, ainsi que certaines plantes aquatiques proliférantes (par exemples *Renunculus* et *Myriophyllum*) peuvent également perturber l'écosystème, la navigation et les loisirs dans les fleuves et les lacs.

L'effet de l'eutrophisation sur l'eau potable

Dans quelques cas spécifiques, les collectivités locales doivent recourir à des eaux eutrophes pour leur production d'eau potable. Il y a deux risques majeurs pour la santé à utiliser de telles eaux :

1. Les risques liés à la présence de matières organiques. Traiter une eau à forte teneur en matière organique représente toujours une difficulté technique. Cela peut conduire à la création de dérivés cancérigènes (Trihalométhanes (THMs), autres composés chlorés, ozonides) suite au traitement de désinfection. Si l'eau est eutrophe, alors aux matières organiques présentes dans des circonstances normales, vont s'ajouter celles sécrétées par les cyanobactéries (toxines et matériaux cellulaires). Un lien apparent entre le cancer de la vessie et les THMs a

été établi dans une étude épidémiologique²⁰. Cependant comme l'eau chlorée contient une grande quantité de sous-produits, il n'est pas possible de conclure avec certitude à partir de telles études que les THMs sont cancérigènes chez l'homme. L'OMS propose des valeurs guides concernant les THMs dans l'eau potable, comprises entre 25 et 100 µg/l selon les composés. Pourtant, et ce point est le plus important, l'OMS indique également que "la conformité avec les valeurs-guides en THMs ne doit pas, quelles que soient les circonstances, se faire aux dépens de la qualité microbiologique."

Pour des raisons identiques, la directive EU 75/440EEC propose des valeurs-guides pour les teneurs en matières organiques des eaux de surface destinées à l'alimentation humaine (30mg/l pour DCO²¹ et 7 mg/l pour DBO₅²²), avant tout traitement. Ces valeurs sont souvent dépassées pendant les blooms algaux.

20 US EPA. Première évaluation des composés "cancérigènes probables" dans l'eau destinée à la consommation humaine. Rapport au Congrès. Washington, DC, 1975.

21 DCO : demande chimique en oxygène

22 BOD₅ : demande biochimique en oxygène après cinq jours

2. Les risques liés à la présence de cyanobactéries dans les eaux douces. Quand l'eutrophisation entraîne le développement de cyanobactéries potentiellement toxiques, l'élimination de ces toxines est complexe. En cas d'eutrophisation de l'eau d'un réservoir, la meilleure option, si cela est possible, est de compter sur un autre approvisionnement en eau. Si cela n'est pas possible, alors des modifications doivent être apportées à la chaîne de traitement existante. La production d'une eau totalement exempte de toxines ne peut être garantie. Une information de la population concernée est nécessaire. La distribution d'eau embouteillée à la population à risque peut être envisagée. Une information plus détaillée sur les changements à apporter à la filière de traitement de l'eau, et sur la résistance des toxines aux différents désinfectants se trouve dans les annexes techniques.

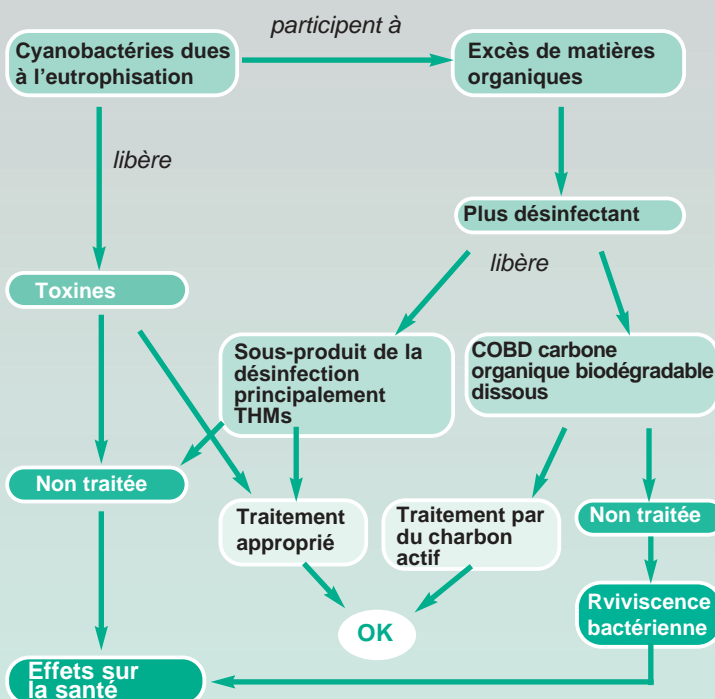
Surveillance de l'eutrophisation

La surveillance est utile si elle est conduite avec des objectifs bien identifiés. Les principales raisons pouvant conduire à surveiller une masse d'eau sont :

- prévenir l'apparition de l'eutrophisation ;
- favoriser l'alerte précoce. Les autorités de santé publique ont besoin de savoir si un phénomène d'eutrophisation risque de commencer afin de mettre en œuvre certaines actions préventives ;
- connaître le niveau du développement du processus, et avoir une image précise de la qualité de l'eau. C'est surtout utile pour les compagnies chargées du traitement des eaux destinées à la consommation humaine qui ont à traiter des eaux eutrophes ;
- améliorer les connaissances scientifiques.

En réalité, les systèmes de surveillance visent souvent simultanément plusieurs de ces objectifs.

Fig. 5: Effets possibles sur la santé du traitement par le chlore d'une eau contenant des matières organiques





Ulva armoricana

Surveillance et conduite à tenir pour protéger la santé publique lors du développement des cyanobactéries dans les eaux douces

Chorus et Bartram (1999) ont proposé le schéma suivant de surveillance et de conduite à tenir aux opérateurs et directeurs d'usine de traitement d'eau. Il permet une réponse graduée lors de l'apparition et au cours du développement d'un bloom à cyanobactéries. Cet outil a été mis au point en Australie. Trois niveaux de réponses sont définis :

Niveau de vigilance : Dès qu'une colonie, ou cinq filaments de cyanobactéries dans un échantillon d'1 ml d'eau sont détectés, ce niveau est activé. Quand le niveau de vigilance est dépassé, il est recommandé que

la masse d'eau atteinte soit l'objet d'analyses plus fréquentes – au moins une fois par semaine, de manière à ce que des changements rapides de la biomasse de cyanobactéries soit détectés.

Un niveau d'alerte 1 est prononcé quand le rapport du volume de la biomasse sur le volume total de l'eau dépasse $0,2\text{mm}^3/\text{l}^{23}$ ou quand le niveau de chlorophylle²⁴ dépasse $1\mu\text{g}/\text{l}$. Dès que le niveau d'alerte 1 est atteint, il convient de mesurer la concentration totale en toxine dans l'eau non traitée. Les autorités sanitaires seront consultées, informées et associées au suivi de l'évolution de l'état du bloom afin d'autoriser la poursuite de la distribution de l'eau traitée. Les analyses seront faites au moins une fois par semaine. Il est conseillé, à ce stade, de publier les conseils au public par voie de presse ou tout autre moyen adapté. Les services gouvernementaux, les autorités compétentes et les responsables locaux devraient également être informés, de même que les organisations de soin et de prévention chargées des populations à risque.

Le niveau d'alerte 2 est déclenché lorsque 100 000 cellules/ml ou $10\text{-mm}^3/\text{l}$ de biovolume ou $50\mu\text{g}/\text{l}$ de chlorophylle-a sont détectés, et que la présence de toxines est confirmée par des techniques chimiques ou biochimiques. Cette densité de cellules correspond à un bloom toxique établi avec une biomasse élevée, il est parfois accompagné de zones couvertes de mousse. Dans des situations de ce type, il convient de mettre en œuvre des systèmes de traitement d'eau appropriés et d'en évaluer la performance. Des mesures hydro-physiques pour ralentir le développement de cyanobactéries peuvent encore être entreprises.

Si des traitements d'eau efficaces ne sont pas disponibles (voir annexe technique) un plan d'urgence d'approvisionnement en eau doit être mis en œuvre. Dans les situations extrêmes, de l'eau potable sera fournie aux consommateurs soit par camion-citerne, soit embouteillée. Des communiqués de presse et une information des consommateurs au porte-à-porte devraient être entrepris par voie électronique et par prospectus informant que l'eau peut présenter un danger pour la consom-

²³ Biovolume : Rapport du volume des cellules sur le volume d'eau les contenant

²⁴ Chlorophylle-a : pigment vert trouvé dans la plupart des plantes, responsable de l'absorption de la lumière et permettant de procurer l'énergie nécessaire au déroulement de la photosynthèse.

Tableau 6 : Fréquence de la surveillance des eaux côtières pour le phytoplancton et les coquillages dans différents pays de l'Union Européenne

Pays	Fréquence de contrôle pour le Phytoplancton	Fréquence de contrôle dans les zones de production de coquillages
Belgique	---	Hebdomadaire
France	2 fois/mois de sept. à avril 1 fois/semaine de mai à août 1 fois/semaine pendant les alertes	Seulement pendant les alertes : Comme pour le phytoplancton
Allemagne	en continu	Hebdomadaire
Irlande	1 fois/mois de mars à avril 2 fois/mois en mai 1 fois/semaine de juin à sept.	Début juin à mi-juillet
Italie	---	Hebdomadaire
Portugal	1 fois/mois de dec. à avril 2 fois/mois de mai à nov. 1 fois/semaine pendant les alertes	Systematique dans plus de 30 stations
Espagne	1 fois/mois de dec. à mars 2 fois/mois d'avril à juin 2 fois/semaine de juillet à nov.	Seulement pendant les alertes Comme le phytoplancton
Pays-Bas	1 fois/semaine (mer couverte de mousse)	Dans les bassins de purification
Royaume-Uni	---	Échantillonnages des moules sur la côte est

mation humaine mais reste appropriée pour la vaisselle, la lessive, la douche et les WC.

Les programmes nationaux de contrôle de qualité de l'eau

Peu de programmes nationaux de contrôle de qualité de l'eau incluent des paramètres qui indiquent une eutrophisation ou un risque de développement excessif d'algues ou de cyanobactéries. En France un seuil de $1\mu\text{g/l}$ a été introduit par le décret 2001-1220 du 20 décembre 2001 relatif à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine, pour la microcystine, principale toxine produite par certaines cyanobactéries. En Europe, en Amérique du Nord, au Japon et en Australie, des plans locaux de suivi visant à rechercher l'existence d'espèces toxiques sont mis en œuvre dans les régions où les coquillages ou les poissons sont consommés. Ces plans concernent un échantillon de points stratégiques et incluent des analyses du phytoplancton et/ou des coquillages. La fréquence de l'échantillonnage dépend généralement de la saison. Le tableau 6 résume les systèmes de contrôle dans quelques états-membres européens. Ils permettent seulement le contrôle des blooms toxiques, ce qui n'est qu'une partie des conséquences de l'eutrophisation.

Des technologies telles que des images-satellites peuvent être utilisées pour la surveillance de vastes plans

d'eau. Ces techniques peuvent aussi servir à contrôler l'expansion des zones à concentration élevée en chlorophylle-a, donnant ainsi des indications sur la biomasse en phytoplancton des couches supérieures de la zone eutrophiée.

Quels paramètres utiliser pour la surveillance ?

Il est clair que des formules telles que "une augmentation de x grammes de macrophytes par m^2 " ou "de y microgrammes de chlorophylle-a par litre" ne peuvent convenir seules pour définir un seuil, qui lorsqu'il sera dépassé, signera l'eutrophisation d'une zone. Un tel paramètre unique n'existe pas.

De plus, pour définir l'amplitude du phénomène d'eutrophisation, deux résultats de mesures sont nécessaires : d'une part ceux obtenus quand le système est dans son état de référence, et d'autre part ceux obtenus dans les conditions actuelles ou futures. Comme les données de référence pour un endroit donné sont l'exception plutôt que la règle, il est difficile de tester l'eutrophisation en utilisant une approche au cas par cas.

Néanmoins, le premier signe d'une eutrophisation excessive est la diminution de la concentration en oxygène dans les couches inférieures de la masse d'eau stagnante, accompagné d'une augmentation du pH due à la photosynthèse (réduction du CO_2). Ces paramètres, ajou-










REPHY (Réseau de surveillance du phytoplancton et des phycotoxines)

L'Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (IFREMER) a créé un réseau de surveillance du phytoplancton et des phycotoxines (connu sous le nom de REPHY). Il est limité aux côtes de la France continentale. Ses objectifs sont de mieux connaître la distribution spatio-temporelle des différentes espèces de phytoplancton et de protéger les consommateurs.

L'IFREMER prélève des échantillons réguliers d'eau de mer, et procède à une recherche quantitative et qualitative de la présence des différentes espèces de phytoplancton, et surveille la toxicité de l'eau. Ce réseau de surveillance est en place depuis 1984 et a abouti à l'identification de certains épisodes de blooms toxiques. Seuls douze des quarante trois sites surveillés, représentatifs de l'ensemble de la zone côtière de la France continentale n'ont jamais été touchés. Quand les tests toxicologiques (sur des souris) sont positifs, l'information est répercutée sur les collectivités locales. Elles ont le pouvoir d'interdire le ramassage amateur et la vente professionnelle de tous les coquillages filtreurs venant des zones désignées comme contaminées. Les trois espèces de plancton identifiées à ce jour le long des côtes françaises ayant un potentiel toxique pour l'homme sont *Dinophysis*, *Alexandrium minutum* et *Pseudo-Nitzschia*.

Nombre maximum de cellules par litre (comptage dans la période 1992 - 2001)

Pour les trois principaux genres potentiellement toxiques en France, le maximum de cellules comptées inclut à la fois les espèces toxiques et les espèces non toxiques de ces genres.

Dinophysis	Pseudo-nitzschia	Alexandrium
		
> 10 000	> 1 million	> 1 million
		
1 000 to 10 000	10 000 à 1 million	10 000 à 1 million
		
< 1 000	< 10 000	< 10 000

Premier niveau d'alerte



Le compte de cellules *Dinophysis* dans l'eau de mer.
Seuil d'alerte = 300 par litre

Deuxième niveau d'alerte - "Test souris"



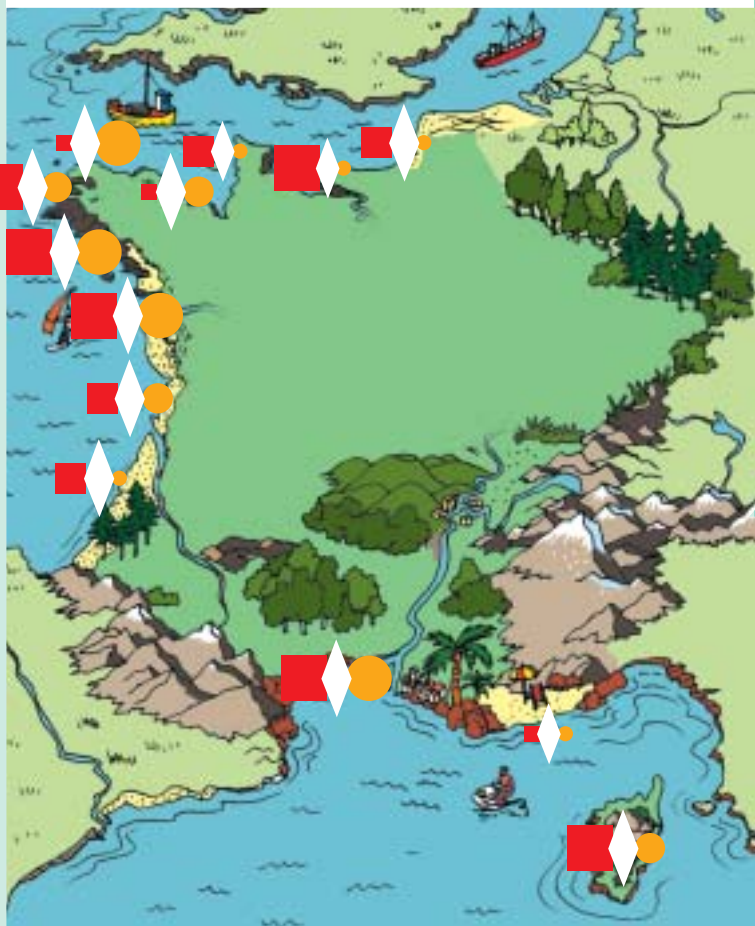
Des extraits de moules sont injectés à trois souris. Si les trois souris meurent dans les cinq heures qui suivent, le ramassage des coquillages est immédiatement interdit.

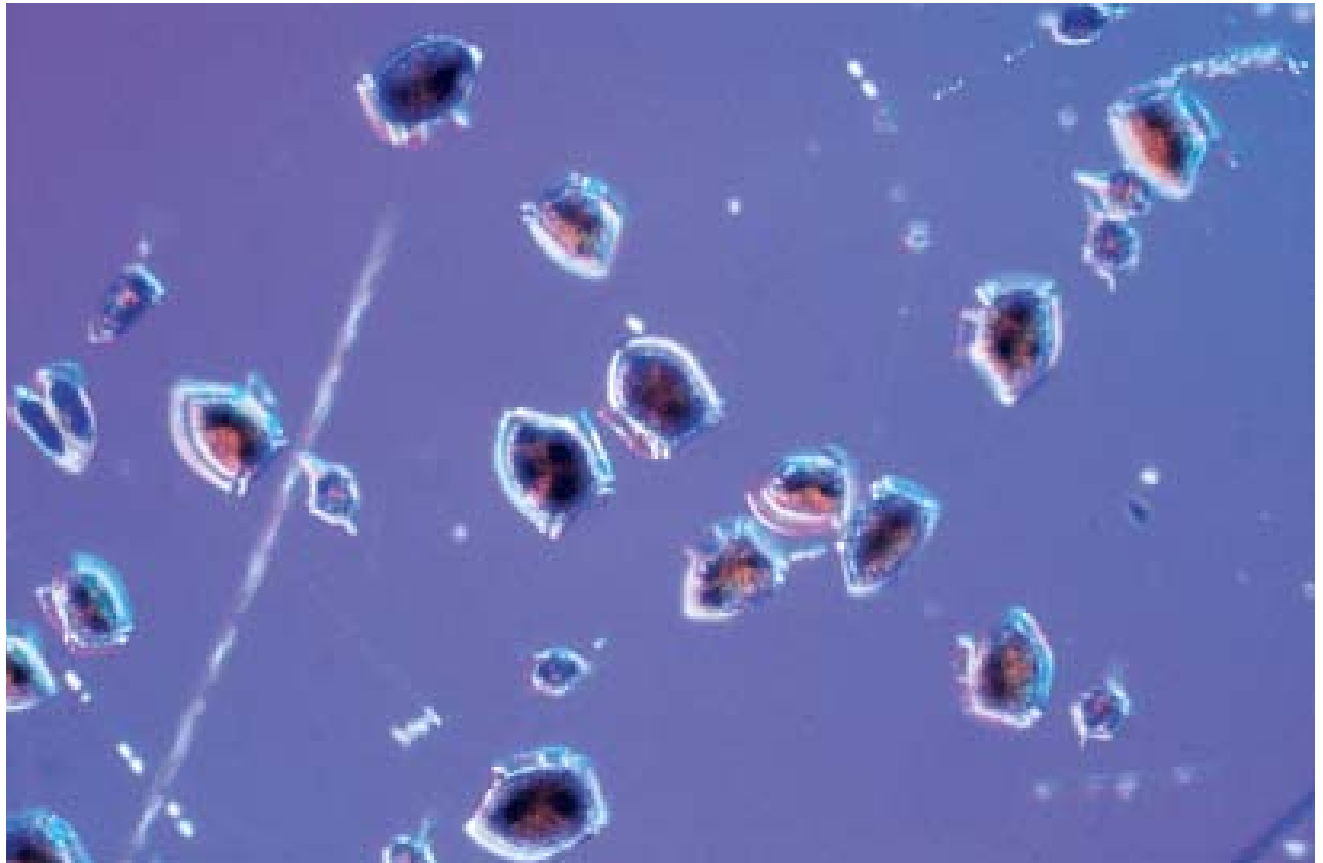
Troisième niveau d'alerte - «Réseau Diamoule»



Médecins et pharmaciens établis le long des côtes marines notent soigneusement les cas de diarrhée. Tous les cas qui seraient apparus dans les douze heures après consommation de moules doivent être rapportés aux autorités de santé publique.

(D'après J. Duchemin)





Dinophysis norvegica - un dinoflagellé potentiellement toxique.

Tableau 7. Paramètres présentant un intérêt pour surveiller l'eutrophisation

Paramètre	Aspect de l'eutrophisation surveillée	Coût par analyse* (Euros)
Azote (N) et phosphore (P)	Indicateurs de l'eutrophisation et de survenue possible d'un bloom. Reflète l'équilibre entre un grand nombre de processus physiques et biologiques. Faire la différence entre les formes organiques et inorganiques de l'N et du P dissous.	60
Silice	Indicateur d'apport en eau douce dans l'eau de mer et d'une possibilité de blooms de diatomées. Un déficit en silice dans les eaux côtières peut favoriser des proliférations à dinoflagellés.	10
Matères en suspension	Indicateur pertinent pour la production d'eau potable.	15
Oxygène dissous	Information essentielle pour connaître les effets de l'eutrophisation. Indicateur clé pour détecter le début d'un processus d'eutrophisation.	5
Bactéries	Les développements microbiens apparaissent dans le cycle de la vie aquatique et sont intéressants pour mieux connaître l'évolution de l'eutrophisation.	10
Biomasse algale ou de cyanobactéries	Une augmentation de la biomasse algale ou des cyanobactéries est une caractéristique de l'eutrophisation. C'est aussi une information utile pour évaluer les effets de l'eutrophisation sur l'écosystème. La biomasse peut être déterminée directement par un comptage au microscope ou indirectement par des mesures de pigments tel que la chlorophylle-a. D'autres mesures sont disponibles telles que la détermination de la quantité de matières organiques, de particules en suspension, ou la mesure du nombre et de la taille des particules en suspension. C'est un indicateur utile pour les traités d'eau.	Variable
Développement d'espèces de macrophyte à courte durée de vie	Indicateur pertinent d'une gêne potentielle pour la baignade et du déséquilibre de l'écosystème aquatique.	Variable, dépend du mode d'observation

* Coûts indicatifs

tés aux observations directes au microscope, sont pratiquement les seuls qui peuvent permettre de prévoir le début d'un tel phénomène, aussi longtemps qu'un modèle intégrant les conditions physiques, les apports en nutriments et les effets biologiques n'a pas été validé au niveau local.

La prévention^{25,26}

Les causes qui conduisent à l'eutrophisation sont multiples et les mécanismes en jeu sont complexes. Pour réduire l'enrichissement en nutriments des eaux, il faut considérer plusieurs aspects avant de décider d'une stratégie. Aujourd'hui, l'utilisation de modèles informatisés permet une meilleure compréhension du rôle de chaque facteur et une prévision de l'efficacité des diverses mesures curatives et préventives. La meilleure façon d'éviter l'eutrophisation est d'essayer d'interrompre la part de ces mécanismes que l'homme peut contrôler. Il convient de réduire les apports en nutriments dans les eaux. Les effets de la réduction des apports sur l'intensité de l'eutrophisation ne sont malheureusement pas linéaires. Une gestion complète des opérations devrait comprendre :

- **L'identification de toutes les sources de nutriments.** Cette information est obtenue par l'étude des bassins versants. Une connaissance des activités industrielles, de la localisation et des modes de rejets des effluents, et enfin des pratiques agricoles (utilisation d'engrais (chimique ou animaux) / consommation par les plantes et localisation des cultures) est nécessaire pour planifier et mettre en place des actions visant à réduire l'enrichissement en nutriments de l'eau. L'identification des points de rejets d'eaux usées, des pratiques agricoles, de la nature du sol, de la végétation et de l'interaction entre sol et eau facilitera la définition de zones prioritaires.
- **Une connaissance du comportement hydrodynamique** de la masse d'eau, en particulier comment les nutriments sont transportés, et de sa vulnérabilité, permettra de mieux connaître les mécanismes par lesquels l'eau est enrichie en nutriments.

25 voir aussi la directive "Nitrates" 91/676/CEE-Annexes II et III

26 voir aussi la directive "Traitement des eaux usées d'origine urbaine" - 91/271/CEE

Les apports dus aux rejets d'effluents urbains ou industriels non traités peuvent être réduits par l'utilisation systématique de stations de traitement d'eaux usées. Dans les zones sensibles, les industries et les collectivités locales devraient limiter les rejets de nutriments dans les eaux usées traitées en mettant en œuvre des traitements spécifiques de dénitrification et d'élimination du phosphore.

Les sources diffuses de nutriments liées aux activités humaines peuvent être limitées en ayant recours à des techniques de conservation des sols et à des limitations des usages d'engrais. La perte diffuse des nutriments peut être réduite en mettant en œuvre des bonnes pratiques agricoles, telles que :

- des apports d'engrais en phosphore et en azote équilibrés, c'est à dire des apports correspondant aux besoins des cultures avec des espoirs de rendement raisonnables, prenant en compte l'apport en azote du sol et de l'atmosphère, et un fractionnement des apports le long de la croissance de la plante ;
- une analyse régulière de la composition des sols, l'élaboration de plans d'épandage d'engrais notés sur des registres au niveau de la parcelle ;
- des volumes de stockage de lisiers suffisants permettant des épandages durant les seuls moments propices ;
- le maintien des parcelles en herbe pendant l'hiver, utilisation de "cultures pièges" dans les rotations de cultures ;
- la mise en herbage sans engrais (ou la plantation de larges haies) le long des cours d'eau et des fossés ("bandes enherbées") ;
- la promotion d'herbages permanents, plutôt que des cultures temporaires de fourrage ;
- la prévention de l'érosion des sols en pente ;
- une gestion précise de l'irrigation (c'est-à-dire une utilisation du goutte à goutte, une surveillance des apports en engrais et de l'humidité du sol)

Dans les régions côtières, la multiplication des points de rejet, ou la modification de leur emplacement, peut permettre d'éviter des pics localisés de pollution.

La ré-utilisation et le recyclage, dans l'aquaculture et dans l'agriculture, d'eaux riches en nutriments peuvent constituer des moyens d'éviter les rejets dans le milieu aquatique et la consommation directe des nutriments par la flore et la faune locales.

Recommandation 1



Si des eaux eutrophes sont la seule source d’approvisionnement possible pour la production d’eau potable, toutes les mesures doivent être prises pour protéger la santé, en particulier :

- Limiter au maximum la quantité totale de matières organiques présentes dans l’eau avant la chloration finale ;
- S’assurer qu’il reste du chlore libre disponible en distribution. Une chloration convenablement conduite peut garantir la destruction de la plupart des toxines libérées lors des proliférations d’algues bleu-vertes, et est nécessaire pour la sécurité bactériologique.

Recommandation 3



Dans l’environnement marin, il est possible, avec un niveau raisonnable de certitude, de prévoir l’apparition de blooms algaux, et dans certains cas de prédire l’apparition d’algues toxiques associées au processus d’eutrophisation.

Toutes les mesures devraient être prises par les collectivités locales pour rendre disponibles les systèmes de surveillance, permettant de mettre en œuvre les mesures de protection nécessaires au bon moment. Il en résulterait une protection plus efficace de la santé publique que celle offerte par la réaction pure et simple aux situations de crise.

Recommandation 2



Bien que tous les aquifères ne présentent pas le même niveau de risque de devenir eutrophes, toutes les mesures possibles doivent être mises en œuvre pour réduire le rejet en nutriments tels que le phosphore et l’azote dans l’environnement.

Ceci peut être obtenu grâce à différentes lignes de conduite, deux d’entre elles sont particulièrement importantes :

- réduire l’utilisation des produits chimiques contenant de l’azote ou du phosphore (par exemple les engrais, les phosphates des poudres à lever, etc.) ;
- assurer un traitement poussé des eaux usées avant leur rejet dans le milieu naturel

Eutrophisation et santé

A N N E X E S T E C H N I Q U E S

Table des matières

La mesure des toxines	24
Le traitement des plans d'eau affectés par des blooms	25
Le traitement d'une eau eutrophe en vue de la production d'eau potable	25
Conduite à tenir en cas de crise	27
• Information du public	27
• Eau potable	27
• Aquifères adjacents	27
Bibliographies, lecture conseillée et sites web utiles	28

Mesure des toxines

La mise en œuvre de méthodes analytiques capables de détecter les toxines algales requiert un laboratoire bien équipé et entraîné et des personnels formés. Ces méthodes appartiennent à deux classes principales :

(a) celles qui permettent de confirmer la présence ou l'absence de toxines dans un échantillon d'eau. Elles sont basées sur des méthodes biologiques, enzymatiques ou immunologiques

(b) celles qui permettent l'identification et la quantification des toxines présentes dans un échantillon d'eau. Elles sont plus complexes, généralement basées sur des méthodes physico-chimiques, et utilisables sur des échantillons d'eau purifiée.

Les méthodes physico-chimiques sont très sensibles et peuvent être très spécifiques (par exemple capables de détecter sélectivement une toxine donnée). Cependant, elles ne permettent pas toujours de conclure sur la toxicité globale de l'événement. D'un autre côté, les méthodes biologiques sont moins

spécifiques mais permettent l'évaluation de la toxicité globale de l'événement. La spécificité, la durée nécessaire pour faire les analyses et le coût indicatif des principales méthodes sont présentés dans le tableau 8.

Quelle que soit la méthode utilisée, l'échantillon d'eau sera conservé à l'obscurité et au froid et les analyses seront effectuées aussi rapidement que possible après prise de l'échantillon afin d'éviter la dégradation possible de certaines toxines.

Tableau 8 : Détection des toxines (d'après Chorus et Bartram, 1999; AFSSA, 2001)

Méthode	Toxines	Coût			Temps de réponse ²⁷	Remarque
		Cap	Con	Pers		
Biologiques						
Souris	Toxicité global, hépatotoxines, neurotoxines	E	E	E	h-j ²⁸	sensibilité et spécificité limitées
Artémia	Toxicité global	B	B	E	h-j	sensibilité et spécificité limitées
Daphnia	Toxicité global	B	B	E	var.	pas de corrélation avec la sensibilité humaine
Bactériologiques						
Microtox	Toxicité global	B	B	E	mn ²⁹	non spécifique, méthode contestée
Enzymatiques						
Phosphatase	Hépatotoxines	M	M	B	h	haute sensibilité
Acétylcholinestérase	Anatoxines (a)	M	M	B	var.	bonne sensibilité
Immunologiques						
Elisa Monoclonale Polyclonale	Microcystines, Nodularine, saxitoxine	M	E	B	var.	haute sensibilité
Physico-chimiques						
HPLC/UV /MS /fluorescence	Toutes les toxines	E/TE	M	B/M	Var	sensibilités et spécificités variables disponibles
LC/MS						identification et quantification des toxines
GC/MS /ECD						détection des concentrations très faibles
NMR						analyse d'échantillons nombreux
MECC						application pour la recherche

Cap = investissement, Con = Consommable, P = Personnel, TE = très élevé, E = élevé, M = Moyen, B = bas, LC = chromatographie en phase liquide, UV= Ultraviolet, MS = spectrométrie de masse, HPLC = chromatographie en phase liquide à haute performance, GC = chromatographie en phase gazeuse, ECD = détecteur à capture d'électrons, MECC = chromatographie électronique sur miscelles.

²⁷ Temps de réponse : temps nécessaire au laboratoire pour fournir les réponses
²⁸ h-j : heures ou jours
²⁹ mn : minutes

Traitement des plans d'eau affectés par des blooms

Quand un bloom touche un plan d'eau, des mesures préventives peuvent être prises soit pour éviter son extension à des zones indemnes, soit pour traiter les zones contaminées.

Quand la réglementation des pays le permet, des algicides peuvent être employés si aucune autre solution n'est disponible ou efficace. Plusieurs algicides tels que le sulfate de cuivre, le chlore ou le citrate de cuivre sont capables de tuer les algues et les cellules de cyanobactéries. Il en résultera un relargage dans l'eau de leur charge intracellulaire, y compris leur toxine indésirable. Cette approche extrême devrait être mise en oeuvre avec précaution. Le traitement algicide des plans d'eau peut aboutir à un goût et à une odeur désagréable de l'eau. De plus, certains algicides ont des impacts environnementaux indésirables qui pourraient conduire à la sélection d'espèces d'algues ou de cyanobactéries résistantes. L'efficacité de l'algicide dépend des caractéristiques du plan d'eau et en particulier de la possibilité de mettre toute la masse d'eau en contact avec le produit.

Exemples d'algicides :

• Le sulfate de cuivre

Il a été souvent utilisé en raison de son efficacité et de son faible coût. Le cuivre, qui n'est pas biodégradable, peut s'accumuler dans les sédiments. Au cours de relargage il affectera le phytoplancton, les macro-invertébrés ou même les poissons.

• Les chélates de cuivre tels que le citrate de cuivre

Ils peuvent être employés dans des eaux dures et alcalines, où le sulfate de cuivre est moins efficace.

Des réservoirs artificiels intermédiaires (zones tampons)

Les réservoirs collectant l'eau en provenance d'une vaste bassin versant peuvent accumuler des quantités élevées de nutriments pouvant aboutir à une prolifération. Des pré-réservoirs qui stockent temporairement l'eau peuvent réduire la quantité totale de phosphore de 50 à 65%. Le curage de ces "pré-réservoirs" doit être effectué régulièrement afin d'empêcher le phosphore d'être relargué, mais de façon suffisamment espacée afin que l'assimilation du phosphore par la biomasse dans la zone de pré-réservoir soit possible. Quand les apports en nutriments ont une source unique, l'élimination du phosphore par des procédés chimiques est très efficace.

Une autre façon de limiter la prolifération des algues et/ou des cyanobactéries dans des réservoirs profonds est l'utilisation de moyens physiques tels que limiter la pénétration de la lumière, ou mécaniques en déstratifiant la colonne d'eau.

• Les oxydants tels que le chlore ou le permanganate de potassium

Dans de nombreux pays, l'emploi d'algicides est interdit ou strictement limité. Quand ils sont autorisés, l'eau traitée ne devra pas être utilisée pour la production d'eau potable, pour l'abreuvement des animaux ou pour la baignade pendant la période de traitement et jusqu'à ce que les toxines soient dégradées. Cela peut prendre plusieurs semaines. Les algicides devraient être employés quand la densité cellulaire est basse pour éviter un relargage massif de toxines, qui apparaissent généralement de 3 à 24 heures après le traitement.

Si le bloom est bien établi, les algicides devraient être un ultime recours. Ils ne devraient être employés que si le réservoir peut être isolé pendant plusieurs jours.

Les prises d'eau dans les lacs sont souvent équipées avec une possibilité de captage à différentes profondeurs permettant ainsi de pomper dans des strates non contaminées de la colonne d'eau.

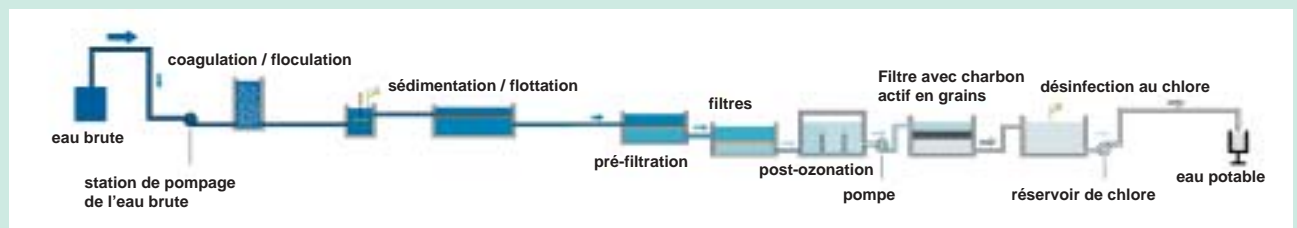
Le traitement d'eau eutrophe pour la production d'eau potable

La présence d'un grand nombre de cellules d'algues ou de cyanobactéries dans l'eau douce destinée à être utilisée pour la production d'eau potable crée quatre problèmes majeurs :

- la masse des cellules peut perturber les écoulements hydrauliques (en bouchant les filtres, et en provoquant des accumulations de boue)
- les cellules et leurs sous-produits peuvent dégrader la qualité esthétique et organoleptique de l'eau, provoquant une couleur, une odeur et un goût anormaux ou pire, conduire à la production de dérivés dangereux pour la santé.
- Dans certains cas, les toxines algales peuvent être relâchées dans l'eau.
- Par ailleurs, le relargage d'une quantité importante de matière organique biodégradable dans l'eau traitée va à son tour favoriser le développement de populations bactériennes indésirables. Dans la littérature cette matière organique est appelée "carbone organique biodégradable dissous".

Pour traiter de telles eaux, il faut avoir recours à de fortes doses de réactifs, ce qui a un impact sur le coût du traitement.

Une chaîne de traitement d'eau potable capable de traiter une eau contenant beaucoup de matière organique



Source : Michel Plumer, SAGEP, 2002

Le traitement conventionnel de l'eau potable, quand il est mené de façon convenable (grilles de préfiltration, coagulation-clarification, filtration) permet une bonne élimination des algues et des cyanobactéries. Malheureusement, un tel traitement est beaucoup moins efficace pour éliminer les toxines libres.

- **Dégrillage** : les usines de traitement d'eau utilisent habituellement des grilles pour arrêter les gros débris contenus dans l'eau. Les grilles n'arrêtent pas les cellules de cyanobactéries, seules les grilles les plus fines sont capables de retenir les espèces les plus grosses.
- **Floculation-clarification**, l'objectif du procédé est de permettre à de très fines particules, grâce à des produits chimiques, de s'agglomérer entre elles pour former des particules plus grosses appelées "floc". A son tour le floc est éliminé au cours de l'étape de clarification (par sédimentation, flottation ou filtration). L'efficacité d'un tel traitement dépend de nombreux facteurs dont la dose, la nature du floculant et la qualité de l'eau. Ce procédé convient très bien pour éliminer les cellules sans les rompre. Il est quasiment inefficace pour éliminer les toxines libres. La flottation est plus efficace pour éliminer les cyanobactéries que la sédimentation car le floc formé a une densité très proche de 1.
- **Filtration**, les principaux mécanismes qui surviennent pendant la filtration aboutissent à la rétention physique des

particules, y compris de grandes quantités de micro-organismes et d'algues. Différents types de matériaux peuvent être utilisés comme substrat de filtration, par exemple du sable ou du charbon actif. Selon la vitesse de filtration et le substrat, les techniques sont appelées filtration rapide sur sable, filtration rapide sur lit mixte, filtration lente sur sable etc.... Selon les techniques utilisées, et en fonction de la façon dont elles sont conduites, on aboutit à un taux moyen à élevé d'élimination des algues et des cyanobactéries. Néanmoins la filtration demeure un procédé peu efficace pour éliminer les produits chimiques dissous, en particulier les toxines algales.

Le second mécanisme qui apparaît pendant la filtration lente sur sable est la biodégradation d'une partie des matières organiques. Elle a un effet très limité sur l'élimination des toxines.

D'autres traitements de l'eau peuvent être considérés, en plus des traitements traditionnels :

- L'adsorption sur charbon actif est un traitement additionnel, fréquemment utilisé pour éliminer les matières organiques dissoutes. Elle peut être utilisée en continu ou en discontinu. Les charbons actifs en grain (GAC) sont très efficaces pour retenir et permettre la biodégradation des toxines algales. Le charbon actif en poudre (PAC) est ajouté à l'eau au début de la chaîne de traitement. Les PAC peuvent être

ajoutés pendant les périodes critiques, c'est-à-dire pendant les blooms algaux. Ils sont plus flexibles dans leur emploi. Des tests réguliers d'adsorption en laboratoire sont nécessaires pour adapter au mieux les doses de PAC en fonction de la quantité de matière organique et pour éliminer au mieux les toxines.

- L'oxydation est employée avec des objectifs divers lors du traitement de l'eau potable : pour assurer la désinfection, renforcer l'action de la coagulation/floculation ou encore pour contrôler la couleur et l'odeur de l'eau. Les produits les plus utilisés sont le chlore, l'ozone, les chloramines, le dioxyde de chlore et le permanganate de potassium. Des oxydants puissants tels que l'ozone (utilisé après la clarification) et le chlore libre (utilisé après filtration) peuvent, dans une large mesure, éliminer les toxines algales libres³⁰. L'ozonation utilisée à faible dose au cours de la phase de pré-traitement peut améliorer l'efficacité de la floculation dans la mesure où un pré-traitement très efficace est conduit sur l'eau brute. Les procédés membranaires tels que la microfiltration, l'ultrafiltration ou la nanofiltration sont très efficaces pour enlever les quelques cellules algales, souvent de cyanobactéries laissées après le pré-traitement.

30 Duguet J.P., Efficacité des traitements de potabilisation des eaux destinées à la consommation humaine vis à vis des toxines algales, in Techniques et sciences municipales, 9, pp75-83, Sept 2001.

L'osmose inverse et la nanofiltration enlèvent toutes les toxines existantes. L'ultrafiltration, associée au PAC, est efficace pour ôter les toxines.

Quand on traite des eaux qui contiennent des cellules de cyanobactéries potentiellement toxiques, il est important de s'assurer qu'à la fin du processus de traitement, il reste du chlore libre disponible pendant une période suffisamment longue. Si des doses insuffisantes de chlore sont utilisées, il va y avoir absence de chlore libre, et les toxines, en particulier les mycotoxines, ne seront pas oxydées. Le facteur "CT" (concentration x temps) est extrêmement utile pour calculer le dosage. De manière empirique un CT³¹ de 45 mg.min.l⁻¹ en chlore libre permet de diviser par 10 la quantité de microcystines-LR. Par exemple, une eau contenant 20µg.l⁻¹ de microcystine-LR exposée à du chlore libre en concentration de 0.5mg .l⁻¹ pendant trois heures (180 min) ne contiendra plus que 0.2µg.l⁻¹ de toxines (0.5*180 = 90, divisé par 1 CT de 45 = 2, c'est-à-dire une "réduction de deux logs" ou une division par 100)

Une désinfection par le chlore devrait toujours être ajoutée au traitement, avec un CT suffisant, et dépendant de la concentration en toxines dans l'eau brute. Il n'est pas suffisant de se baser exclusivement sur l'efficacité du traitement au charbon actif.

La préchloration, au niveau des pré-traitements, devrait être évitée de manière à limiter la production de THMs. Si, pour des raisons pratiques, elle ne peut être évitée, alors une dose suffisamment élevée de chlore doit être employée. La présence de chlore libre va

aider à minimiser le relargage possible de toxines venant des cyanobactéries. Les toxines qui ont échappé à cette étape du traitement devraient être éliminées, si besoin est, lors de l'étape suivante (voir le graphique de traitement d'eau p.f26).

Conduite à tenir lors d'une crise

En cas de bloom algal, des mesures ponctuelles doivent être mises en œuvre :

Information du public

Dans les régions à risque de bloom toxique par phytoplancton algal ou par cyanobactéries, il est important que l'information soit transmise au public par les collectivités locales. La presse écrite, la radio, la télévision et l'Internet sont tous des supports utiles qui méritent d'être associés. En même temps, des panneaux d'affichage temporaires signalant le danger devraient être installés le long des plans d'eau affectés par le bloom ou sur les terrains contigus. Le personnel médical et les professionnels de santé publique au niveau local seront informés au plus tôt des risques associés au bloom, et des moyens de diagnostiquer et traiter les individus atteints.

Il est de "bonne pratique" d'informer la population :

- des risques liés à la baignade ou aux activités sportives dans des eaux anormalement colorées ou troubles ;
- des phénomènes anaphylactiques qui peuvent survenir chez des baigneurs allergiques ou chez les gens marchant le long des rivages touchés par le bloom. En effet, beaucoup d'algues

peuvent produire et relâcher non seulement des toxines mais aussi des composés allergisants ;

- des risques pour la santé liés au ramassage et à la consommation de poissons et de coquillages pendant un bloom toxique en mer.

Il faut empêcher les animaux domestiques de boire et de se baigner dans l'eau douce touchée par un bloom et de brouter le long des rivages où l'écume s'est accumulée et a séché.

L'eau potable

- Les ressources en eau contaminée ne devraient pas être utilisées pour la production d'eau potable pendant une alerte ou pendant un bloom.
- S'il n'existe pas d'autres ressources disponibles, des mesures immédiates devraient être prises pour contrôler la qualité de l'eau et en particulier pour rechercher si elle est contaminée (ou risque de l'être) par un bloom toxique. Si c'est le cas, l'eau devra être traitée en conséquence ;
- Si les procédés de traitement d'eau efficaces ne sont pas disponibles, des mesures spécifiques seront prises telles que l'interdiction de la consommation de l'eau en provenance du réseau de distribution contaminé. L'eau sera alors fournie en bouteilles ou par camion-citerne comme alternative à l'eau potable du réseau.

Les masses d'eau adjacentes

Pendant un bloom, en plus des mesures d'information, la protection des zones non contaminées devrait demeurer une priorité.

³¹ Duguet J.P., Is really algal toxins a health problem in disinfected waters ? AIDIS/IWA International Seminar, Santa Fe, Argentina, Oct 2000.

Bibliographie, autres sources et sites web utiles

- **Chorus, I et Bartram, J.** Editors. (1999). *Toxic cyanobacteria in water*, London, E & FN Spon.
- **Menesguen, A. et al.** (2001). *L'eutrophisation des eaux marines et saumâtres en Europe, en particulier en France*. Rapport IFREMER pour la Commission Européenne DG.ENV.B1.
- **Environmental Resources Management** (2001). *Criteria used for the definition of eutrophication in marine and coastal waters*. ERM report for the European Commission DG-ENV.
- **Vollenweider, R.A. et al.** (1996). *Assessment of the state of eutrophication in the Mediterranean Sea*. MAP Technical Reports series n°106, UNEP, Athens.
- **Stanners, D. and Bourdeaux, Ph. Editors.** (1995). *Europe's Environment – The Dobris Assessment*. European Environment Agency (EEA), Copenhagen.
- **European Environment Agency** (1998). *Europe's environment: the second assessment*. Elsevier Science Ltd, Oxford.

Eutrophisation et Santé

(Collectivités locales, série de brochures sur l'environnement et la santé ; 40)

1. Eutrophication 2. Risk factors 3. Public Health 4. Water pollution – prevention and control 5. Food contamination – prevention and control 6. Water supply 7. Water purification 8.Environmental monitoring 9.Local government 10. Europe

© Organisation mondiale de la santé 2003

Le présent document a initialement été rédigé en anglais pour le Bureau régional de l'OMS pour l'Europe, en 2002, et portait le titre Eutrophication and health (n° 40 dans la collection de brochures Autorités locales, santé et environnement). Ce document peut être résumé ou faire l'objet d'un compte rendu, à la seule condition que la source soit indiquée. Le Bureau régional est favorable à la traduction de ce document à partir de la langue de l'original, mais son autorisation préalable doit lui être demandée. En conséquence, toute personne ou institution qui souhaite produire une version traduite de ce document doit d'abord prendre contact avec le Bureau régional de l'OMS pour l'Europe, Scherfigsvej 8, DK-2100 Copenhague Ø, Danemark, en vue d'une discussion sur un tel projet. Les opinions exprimées par des auteurs nommément désignés n'engagent que ces derniers. Le traducteur de ce document est seul responsable de la fidélité de la traduction.

Commission européenne
Eutrophisation et santé

Luxembourg: Office des publications officielles des Communautés européennes
2003 — 28 p. — 21 x 29,7 cm
ISBN 92-894-5655-8

Les sites de l'OMS

Siège :

http://www.who.int/water_sanitation_health/index.html

Bureau régional pour l'Europe :

<http://www.euro.who.int>

Site Web de la Commission Européenne :

<http://europa.eu.int>

Site Web de l'Agence Européenne pour l'Environnement :

<http://www.eea.eu.int>

Remerciements

Sans l'aide des experts, traducteurs, éditeurs, graphistes, artistes et secrétaires qui ont contribué à cette brochure, et sans le soutien financier de nombreux partenaires, ce document n'aurait jamais pu être imprimé. Qu'ils soient tous ici remerciés chaleureusement. Pr A. Menesguen (IFREMER, Brest, France), M. J. Duchemin (Commission Européenne, DG ENV), M. J.P. Duguet (SAGEP, Paris, France), Dr G. Klein (OMS/ECEH Bonn office, Allemagne), Dr J. Bartram (OMS/PEH Genève, Suisse), Dr E. Nush (Ruhrverband, Essen, Allemagne), Pr O. Gotsis-Skretas (Institute of Oceanography, Athènes, Grèce), Dr S. Fraga (Instituto Español de Oceanografía, Vigo, Espagne), M. R. Aertgeerts (OMS/ECEH Bureau de Rome, Italie), Dr F. de Oliveira Araujo (Direcção da Saude, Lisbonne, Portugal), Dr I. Chorus (UBA, Berlin, Allemagne), Dr G. Kamizoulis (OMS/MEDPOL, Athènes, Grèce), Dr P. Lassus (IFREMER, Nantes, France).

Dr Kathy Pond (Robens Centre for Public and Environmental Health, Université de Surrey) a édité le document.

M. Roger Laüt a peint l'illustration reproduite en page de couverture

M. Pierre Finot a mis en page l'ensemble du document

Crédit photographique :

p.f2, R. Oliveri, IFREMER - p.f5, Joint Research Centre - p.f6, Bjarne Andresen, Fyn County Council - p.f7-f8-f9, Nanna Rash, Funen County Council - p.f12, Stig E. Petersen, Funen County Council - p.f14, Annette Sode, Fyn County Council - p.f15a, cliché IFREMER - p.f15b, H. Grossel, IFREMER - p.f17, J.-Y. Piriou, IFREMER - p.f20, Per Andersen, Bio/consult.

Listes de brochures - état actuel - novembre 2003

Air

- Air et santé
- La qualité de l'air à l'intérieur des locaux
- La pollution atmosphérique par l'industrie
- La pollution atmosphérique par la circulation
- La pollution atmosphérique due aux déchets et aux solvants
- La pollution de l'air et la production d'énergie
- L'asthme et les allergies respiratoires
- L'air et les problèmes globaux

Eau

- Eau et santé
- Le suivi de la qualité de l'eau
- Le plomb dans l'eau
- Les pesticides dans l'eau
- Les nitrates
- L'eutrophisation
- La protection des captages
- La désinfection de l'eau
- Traitements I
- Traitements II
- Fuites et compteurs
- La sécurité de la distribution d'eau
- Les eaux pluviales
- L'assainissement autonome
- Stations d'épuration des eaux usées
- Entretien et gestion des réseaux d'égout
- Les eaux de loisirs

Hygiène

- Les rongeurs
- Les moustiques
- Les oiseaux
- Les animaux familiers
- Les cafards
- La propreté dans la ville

Déchets

- Déchets et santé
- Les décharges
- L'incinération des déchets
- Traitement biologique
- La collecte des déchets
- Les déchets d'activités de soins
- Recyclage des déchets
- La réduction de la production de déchets
- Les déchets toxiques dans les villes

Urbanisme

- Urbanisme et santé
- Sols contaminés
- Urbanisme et aspects socio-culturels
- Les réseaux urbains
- La ville du futur
- Transports et circulation
- Indicateurs urbains
- Les outils de l'urbaniste
- Administration et gestion
- Les équipements de proximité
- La ville à vélo et à pied
- Ville verte, ville bleue

Bruit

- Bruit et santé
- Bruit des transports
- Le maire, producteur de bruit
- Musique et bruit
- Bruit et école
- Sports et loisirs sportifs bruyants
- Bruits de voisinage
- Le maire face à la plainte
- Isolation et mesure du bruit
- Un environnement sonore sain

Pour plus d'informations, consultez notre site Internet :
<http://www.who.dk/environment/pamphlets>

Accidents

- Stratégie locale pour la prévention des accidents
- Prévenir les accidents des enfants
- Les accidents des personnes âgées
- La sécurité des habitations
- La sécurité routière
- Prévention des incendies
- Prévention des noyades
- Les aires de jeux et loisirs
- La sécurité dans les garderies et les écoles

Habitat

- Le "sick building syndrome"
- La cuisine
- L'amiante et l'habitat
- L'habitat et l'énergie
- Humidité et moisissures

Rayonnement

- Le radon
- Les rayons ultra-violet
- Avant, pendant et après un accident nucléaire
- Les déchets radioactifs
- Les champs électromagnétiques

Toxicologie

- Le plomb et la santé
- Les allergies et l'environnement
- Les intoxications oxycarbonées
- Les pesticides et la santé
- Le mercure et la santé
- L'amiante et la santé
- Les intolérances alimentaires

