



# Zones mortes

Comment les engrais agricoles  
tuent nos rivières, lacs et océans.

GREENPEACE

[greenpeace.org](http://greenpeace.org)

# GREENPEACE

## **Auteure principale :**

Reyes Tirado, Ph.D.  
Laboratoires de recherches de Greenpeace  
Université d'Exeter, Royaume-Uni  
GRL-TN-08-2008  
<http://www.greenpeace.to>

## **Remerciements pour les conseils et des commentaires éditoriaux de la part de :**

Jan van Aken, Éric Darier,  
Josh Brandon, Sarah King,  
Isabelle Meister et Michelle Allsopp

## **Photos :**

couverture : © iStock/Schweitzer  
p. 4 : © Eau Secours/McGee  
p. 7 : © Greenpeace/Beltrà  
p. 9 : © Greenpeace/Stone  
p. 11 : © iStock/Cardamone  
p. 13 : © iStock/Sherwood Veith  
p. 15 : © Greenpeace/Robinson  
p. 17 : © Greenpeace/Baléia  
p. 19 : © Greenpeace/Kirchhof  
p. 24 : © Fotolia/Malevich

## **Zones mortes : Comment les engrais agricoles tuent nos rivières, lacs et océans.**

ISBN 978-0-9732337-8-0  
Édition originale : ISBN 978-0-9810375-1-6 (pdf)  
© Greenpeace  
Été 2008

# Table des matières

## Introduction

<b>1 Définitions</b>	<b>4</b>
Fleurs d'eau et proliférations d'algues	
Surabondance de nutriants et eutrophisation	
Prolifération d'algues nuisibles et marées rouges (première conséquence de la surabondance de nutriants)	
Raréfaction de l'oxygène et zones mortes (secondaire conséquence de la surabondance de nutriants)	
<b>2 Origines de la surabondance de nutriants et de l'eutrophisation</b>	<b>6</b>
Le ruissellement des engrais	<b>6</b>
Les nutriants provenant des égouts domestiques	<b>8</b>
Le phosphore	<b>8</b>
Les nutriants de sources industrielles	<b>9</b>
La combustion de combustibles fossiles	<b>10</b>
L'impact des changements climatiques	<b>10</b>
<b>3 Raréfaction de l'oxygène, zones mortes et autres impacts</b>	<b>11</b>
La raréfaction de l'oxygène	<b>11</b>
Zones mortes et engrais	<b>12</b>
Perte de biodiversité et invasions de méduses	<b>12</b>
<b>4 Aperçu de la situation dans différents pays</b>	<b>13</b>
Chine	<b>13</b>
Inde	<b>13</b>
Philippines	<b>15</b>
Thaïlande	<b>15</b>
Europe	<b>15</b>
États-Unis : golfe du Mexique	<b>16</b>
Mexique : golfe de Californie	<b>16</b>
Canada	<b>17</b>
<b>5 Les mesures d'atténuation</b>	<b>20</b>
<b>6 Références</b>	<b>22</b>

# Introduction

Le ruissellement des engrais utilisés pour l'agriculture industrielle est en train d'étouffer les lacs, les rivières et les océans de la Terre. L'azote et le phosphore engendrent des explosions de proliférations d'algues qui désoxygènent l'eau. Cela crée des zones mortes dans tous les océans et sur tous les continents de la planète, du golfe du Mexique à la mer Noire en passant par les lacs du Québec et le delta de la rivière Yangtze en Chine. Qui plus est, le réchauffement des océans causé par les changements climatiques ne pourra qu'amplifier ce problème. Si nous n'adoptons pas des mesures concrètes pour contrôler l'utilisation des engrais, l'impact négatif sur la biodiversité sera croissant, l'industrie de la pêche en eaux côtières et en eaux intérieures sera de plus en plus lourdement touchée et certaines plages deviendront des zones toxiques dénuées de vie et interdites aux baigneurs.

## 1 Définitions

### FLEURS D'EAU ET PROLIFÉRATIONS D'ALGUES

Les fleurs d'eau sont le résultat de la prolifération rapide et massive de plantes minuscules (des phytoplanctons) qui flottent à la surface des eaux des lacs, des rivières et des océans. Les fleurs d'eau peuvent être causées par une grande variété d'algues qui se distinguent notamment par leur couleur et leur toxicité. Toutefois, dans la plupart des éclosions, seulement une ou deux espèces sont responsables. Par exemple, les fleurs d'eau qu'on appelle les « marées rouges » sont causées par la prolifération d'algues rouges.

Certaines fleurs d'eau sont causées par des phénomènes naturels. Par exemple, dans l'océan, la remontée saisonnière des eaux profondes peut générer un apport de nutriments. (Kudela et coll. 2005). Toutefois, la majorité des fleurs d'eau résulte du ruissellement dans l'eau de nutriments polluants d'origine humaine, qui déclenchent la prolifération massive d'organismes (Diaz et coll. 2004, Dumont et coll. 2005, Glibert et coll. 2005). Plus l'eau contient de nutriments, plus les algues peuvent se développer et former d'épaisses couches de fleurs d'eau.

### SURABONDANCE DE NUTRIANTS ET EUTROPHISATION

La pollution par les nutriments – azote et phosphore – atteint les eaux littorales des lacs et des océans de différentes façons : ruissellement d'engrais agricoles dans les rivières, égouts domestiques et industriels, retombées atmosphériques provenant de la combustion d'énergies fossiles (Rabalais et coll. 2002, Dumont et coll. 2005, PNUE/GPA 2006). L'eutrophisation se manifeste par une augmentation des nutriments dans un plan d'eau intérieur ou côtier. Elle entraîne souvent la croissance massive d'organismes aquatiques.

### PROLIFÉRATION D'ALGUES NUISIBLES ET MARÉES ROUGES (première conséquence de la surabondance de nutriments)

Le terme « prolifération d'algues nuisibles » désigne une prolifération d'algues qui génère des effets négatifs directs ou indirects. Exemple d'effets directs : production de toxines qui causent des maladies ou entraînent la mort chez les humains ou les organismes aquatiques. Exemples d'effets indirects : déclin des pêches et de la biodiversité le long des littoraux, raréfaction de l'oxygène dans l'eau entraînant des zones mortes dans l'océan.



Ce qu'on appelle communément les marées rouges, ce sont simplement des proliférations d'algues rougeâtres. Les algues sont microscopiques, mais quand leur concentration devient particulièrement élevée, leur pigmentation devient visible à l'œil nu. Il y a aussi des algues oranges, brunes, bleues ou vertes. Quant au terme « marée », il s'agit dans ce contexte d'un terme imagé qui n'a rien à voir avec le phénomène physique des marées maritimes.

#### **RARÉFACTION DE L'OXYGÈNE ET ZONES MORTES (seconde conséquence de la surabondance de nutriments)**

Les zones mortes dans l'océan et le long des côtes sont des secteurs où la teneur en oxygène de l'eau située près du fond est très faible (Diaz 2001). On parle alors d'une situation hypoxique. (Lorsque la teneur en oxygène est nulle ou indétectable, on utilise le terme anoxique). Les poissons et les invertébrés du fond de l'océan ne peuvent pas survivre dans les secteurs hypoxiques et c'est pourquoi on parle de zone morte : parce qu'on n'y retrouve aucun animal vivant (Jackson

et coll. 2001, Rabalais et coll. 2002). La raréfaction de l'oxygène dans les océans risque d'avoir un impact majeur au cours du 21<sup>e</sup> siècle (Jackson et coll. 2001, Diaz et coll. 2004). Différentes études portant sur les changements au sein des écosystèmes marins indiquent que la raréfaction de l'oxygène est un phénomène important qui résulte de la surabondance de nutriments et de l'eutrophisation causée par les activités humaines terrestres (Diaz et coll. 2004). À l'heure actuelle, on répertorie dans le monde 199 zones mortes reliées à l'eutrophisation d'origine humaine (figure 1).

La plupart des zones mortes sont saisonnières – elles apparaissent une fois par année, généralement pendant les mois les plus chauds et à la suite de pluies qui amplifient le ruissellement des nutriments. D'autres, comme celle de la mer Baltique, sont permanentes (voir la carte des zones mortes permanentes, annuelles et épisodiques à la figure 4).



## 2 Origine de la surabondance de nutriments et de l'eutrophisation

Le phosphore et l'azote sont les deux principaux nutriments responsables de l'eutrophisation partout dans le monde. Toutefois, l'azote a un impact plus important sur les écosystèmes parce qu'il est souvent l'élément le plus limitatif, particulièrement dans les estuaires et dans d'autres environnements marins. (Diaz et coll. 2004, PNUE et WHRC 2007). Le phosphore (provenant principalement des engrais, des égouts et des détergents) contribue aussi à l'eutrophisation, surtout en eaux douces. Dans plusieurs cas, l'azote et le phosphore peuvent interagir et c'est pourquoi, dans un contexte de gestion environnementale, il faut traiter ces deux éléments de manière intégrée (PNUE et WHRC 2007).

Les écoulements d'azote vers l'océan sont en forte hausse et on s'attend à ce que cette tendance se poursuive. Depuis l'époque préindustrielle, les écoulements d'azote ont été multipliés par 15 dans le bassin hydrographique de la mer du Nord, par 11 dans le nord-est des États-Unis, par 10 dans le bassin de la Yellow River, par 6 dans le bassin du Mississippi, par 5 dans le bassin hydrographique de la mer Baltique, et par 4 dans le sud-ouest de l'Europe (PNUE/GPA 2006). Les projections pour 2030 font état d'une augmentation de 14 % par rapport à 1995 des apports mondiaux d'azote vers des côtes maritimes (PNUE/GPA 2006).

La surabondance de nutriments provient principalement des sources suivantes :

- 1. Le ruissellement des engrais** est une source importante d'apport en nutriments dans plusieurs secteurs eutrophiques. Par exemple, 67 % de l'apport en azote dans le Mississippi, un fleuve qui se jette dans le golfe du Mexique, provient du ruissellement des engrais (Rabalais et coll. 2002, Rabalais 2007). Dans la mer Baltique (PNUE et WHRC 2007) et dans le lac Taihu (Liu et Qiu 2007), plus de 50 % de l'apport total en nutriments provient du ruissellement.
- 2. Les égouts domestiques** incluant les excréments humains et les détergents au phosphore.
- 3. Les activités industrielles**, incluant la fabrication d'engrais et le rejet des eaux usées.

- 4. La combustion des combustibles fossiles** peut devenir une source d'apport en nutriments importante dans certaines régions fortement industrialisées. Par exemple, elle est responsable d'environ 30 % de l'apport d'azote dans la mer Baltique et d'environ 13 % dans le Mississippi (Howarth et coll. 2002).

Il est évident que les proliférations d'algues nuisibles sont reliées à la surabondance de nutriments. Toutefois, d'autres facteurs peuvent aussi avoir un impact sur le déclenchement et l'intensité des proliférations. Par exemple, des températures plus chaudes favorisent la croissance des algues. De même, lorsqu'il y a absence de vent, l'eau ne se fait pas remuer et sa surface stable favorise la formation des fleurs d'eau. D'autres phénomènes naturels, comme la remontée des eaux profondes de l'océan riches en nutriments ou la fertilisation au fer par les poussières du Sahara transportées par le vent, sont aussi reliés à l'apparition de marées rouges toxiques et à d'autres proliférations d'algues nuisibles dans certaines régions spécifiques.

### Le ruissellement des engrais

À l'échelle mondiale, de même que sur tous les continents sauf l'Afrique, les engrais azotés synthétiques sont la plus importante source d'azote d'origine humaine dans les eaux côtières. Environ 40 % de l'azote d'origine humaine qui pénètre dans les écosystèmes marins (11 millions de tonnes par année) provient de ces engrais. Le reste (16 millions de tonnes par année) provient de différentes sources : égouts domestiques et industriels, déchets animaux, culture des légumineuses et retombées atmosphériques provenant de la combustion des combustibles fossiles (Maranger et coll. 2008). Le ruissellement des engrais est la principale source de pollution à l'azote dans le sud et l'est de l'Asie, en Europe et dans le Midwest américain (Figure 2 – Dumont et coll. 2005). Dans le monde, les régions qui affichent le plus fort taux d'exportation d'azote inorganique vers les eaux côtières sont le sud et l'est de l'Asie de même que le nord de l'Europe – soit jusqu'à 5000 kg par km<sup>2</sup> de superficie terrestre par année (Dumont et coll. 2005).

Parmi les raisons expliquant les rejets massifs d'azote d'origine humaine figure notre utilisation très inefficace de l'azote pour produire des aliments. La quantité d'azote que nous utilisons pour produire des aliments est beaucoup plus élevée que celle que nous consommons en réalité dans les aliments; le reste est inutilisé et devient une source de

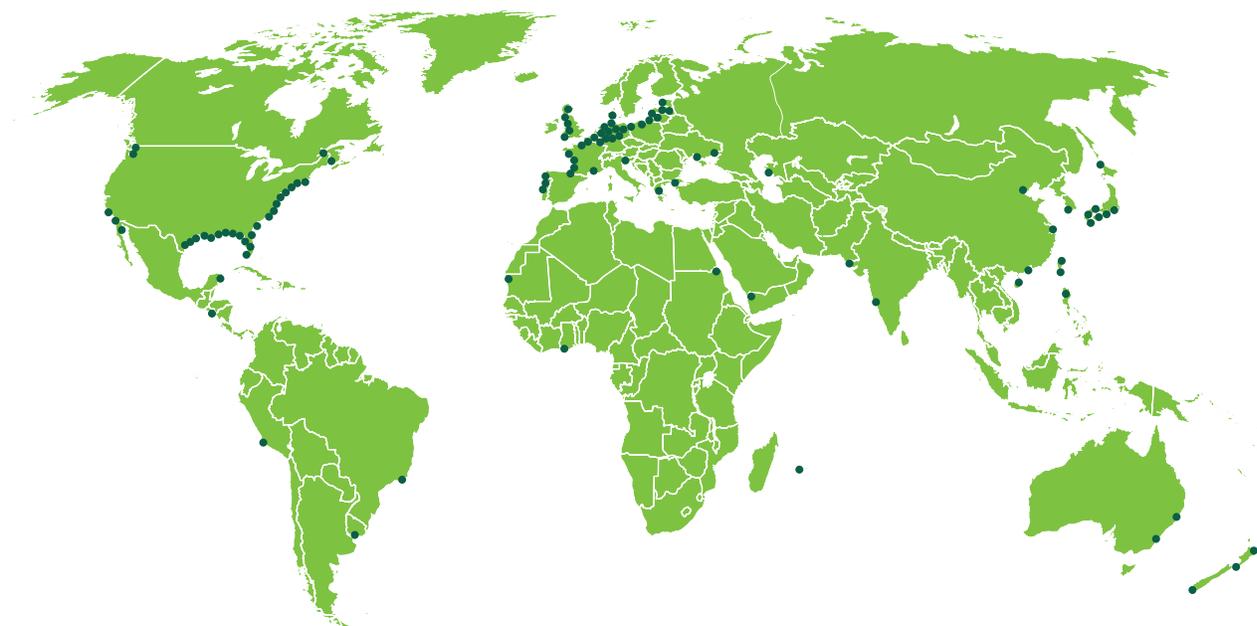


pollution des sols, des cours d'eau et de l'air. Par exemple, dans un système de production porcine industrielle classique, moins de 20 % de l'azote répandu pour faire pousser le fourrage des animaux sera consommé par la personne qui mange la viande—le reste se retrouve dans l'environnement (PNUE et WHRC 2007).

Dans le monde, en moyenne 12 % des engrais azotés synthétiques appliqués sur les terres se retrouve dans les eaux littorales. Toutefois, ce pourcentage peut atteindre jusqu'à 30 % dans certains cas où le ruissellement est intense—par exemple, dans les régions cultivées où les pluies sont abondantes (Maranger et coll. 2008). Au cours des 40 dernières années, la quantité d'engrais qui atteint directement les eaux littorales a été multipliée par 6 à cause de la croissance exponentielle de l'utilisation des engrais dans le monde (Maranger et coll. 2008). Par exemple, dans les années 1970, la Chine utilisait moins de 5 millions de tonnes d'engrais azotés par année. Elle en utilise maintenant plus de 30 millions, ce qui représente désormais 25 % de la consommation mondiale. En conséquence, la Chine a connu une augmentation significative de la pollution à l'azote dans ses eaux littorales. (FAOSTATS 2008, Glibert et coll. 2005).

En plus de l'augmentation quantitative, le type d'engrais utilisé a aussi changé avec le temps, et cela pourrait expliquer l'augmentation de certaines proliférations d'algues nuisibles dans différentes régions. Par exemple, la quantité d'urée utilisée à l'échelle mondiale est 100 fois plus élevée qu'il y a 40 ans et l'urée représente maintenant plus de 50 % des engrais azotés appliqués dans le monde (Glibert et coll. 2006). Cette augmentation de l'utilisation de l'urée semble être reliée à l'augmentation de la croissance de certaines algues toxiques ou nuisibles qui préféreraient l'urée à d'autres types de composés azotés (Glibert et coll. 2006). Comme l'indique la figure 3, à l'échelle mondiale, on a observé une corrélation entre l'augmentation des cas documentés d'intoxication par phycotoxine paralysante (IPP)—une intoxication qui peut être causée par différentes espèces d'algues—et l'augmentation de l'utilisation de l'urée au cours des 30 dernières années (Glibert et coll. 2006). Même si on ne peut pas faire un lien de cause à effet direct entre l'urée et les proliférations d'algues toxiques, ces données illustrent l'impact qu'une augmentation massive de l'utilisation de l'urée à l'échelle mondiale pourrait avoir sur les proliférations d'algues nuisibles.

**FIGURE 1** Carte mondiale de 199 zones de raréfaction d'oxygène reliées à l'eutrophisation d'origine humaine



C'est en Chine que l'on retrouve une des illustrations les plus concrètes de la relation entre la fréquence des proliférations d'algues nuisibles et l'augmentation totale des apports en nutriments dans les eaux littorales. Depuis la période où la Chine a commencé à utiliser de plus en plus d'engrais chimiques, soit au cours des années 1970, le nombre de cas de proliférations d'algues nuisibles a été multiplié par 20. De plus, les proliférations touchent des zones plus étendues, leur toxicité s'est accrue et elles durent plus longtemps (Glibert et coll. 2005, PNUE et WHRC 2007). Dans le nord de l'Europe et dans le golfe du Mexique, les proliférations ont aussi été directement associées à l'augmentation des nitrates dans les rivières (Glibert et coll. 2005).

### Les nutriments provenant des égouts domestiques

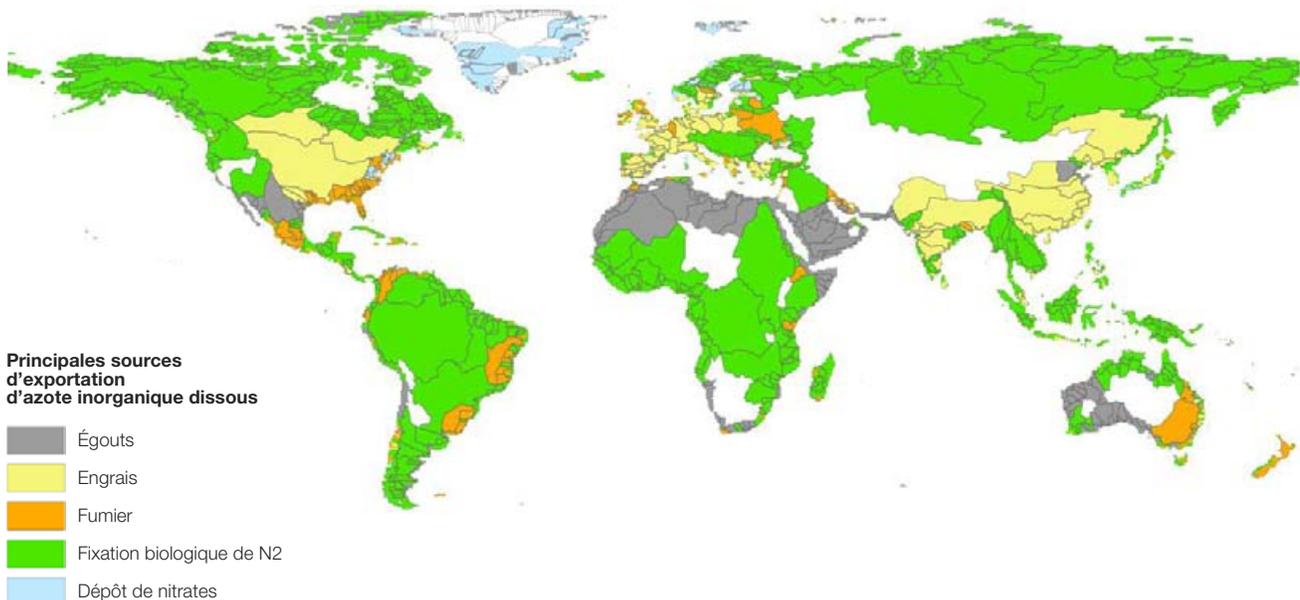
L'augmentation de la population humaine et de ses rejets d'eaux usées a aussi entraîné une augmentation des nutriments libérés dans l'environnement. Dans les pays en

développement, les eaux usées sont généralement rejetées directement dans les cours d'eau, sans traitement préalable. Moins de 35 % des villes des pays en développement traitent leurs eaux usées (PNUE et WHRC 2007). Et dans les cas où les eaux sont traitées, il s'agit souvent d'un traitement primaire, peu efficace pour éliminer l'azote. Même dans les pays développés, la plupart des systèmes ne permettent pas de faire un traitement tertiaire qui permettrait de retirer la majorité de l'azote. Dans certaines localités, les eaux usées constituent la principale source de rejet d'azote dans l'environnement. À l'échelle régionale, toutefois, c'est l'agriculture qui demeure la principale cause de la surabondance de nutriments (PNUE et WHRC 2007).

### Le phosphore

Même si les activités industrielles ont souvent un impact important à l'échelle locale, les deux principales sources de pollution au phosphore dans les eaux de surface sont les égouts municipaux et l'agriculture. Du côté de l'agriculture, les

**FIGURE 2** Principales sources d'exportation d'azote inorganique dissous vers différents bassins de fleuves et rivières dans le monde





principales sources sont l'élevage des animaux et l'utilisation des engrais. En ce qui concerne les rejets des municipalités, on estime que dans certains pays de l'UE où les détergents au phosphore sont encore permis, 25 % du phosphore que l'on retrouve dans les égouts municipaux provient des détergents. On peut réduire considérablement les rejets de phosphore en interdisant les détergents qui en contiennent et en améliorant le traitement des eaux usées. Plusieurs pays ont réussi à réduire l'eutrophisation en implantant des mesures de réduction des rejets de phosphore. C'est le cas notamment du lac Léman en Suisse, du lac Érié aux États-Unis et du lac Endine en Italie. Dans tous les cas, les études indiquent qu'il faut réduire le phosphore de 70 à 90 % pour réduire l'eutrophisation de façon significative (Glennie et coll. 2002).

De 80 à 85 % de tout le phosphate produit par l'industrie mondiale est utilisé comme engrais. Le deuxième plus important usage—loin derrière—est la fabrication de

détergents. Le phosphate est aussi employé comme supplément dans la nourriture pour animaux (Chambers et coll. 2001).

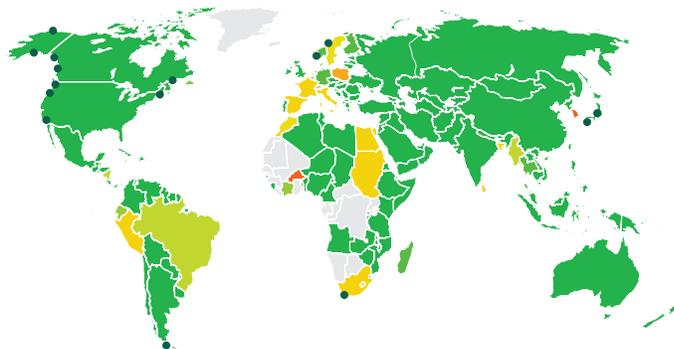
### Les nutriments de sources industrielles

Jusqu'à récemment, les rejets industriels localisés étaient responsables d'une importante partie de la pollution par les nutriments, surtout dans les pays développés. Aujourd'hui, l'importance relative de cette forme de pollution a diminué grâce à une réglementation plus stricte, mais aussi parce que d'autres sources non ponctuelles ont pris le relais, notamment l'agriculture et l'élevage du bétail. Cela dit, à certains endroits spécifiques, les rejets industriels demeurent encore le principal responsable de l'eutrophisation et des proliférations d'algues nuisibles.

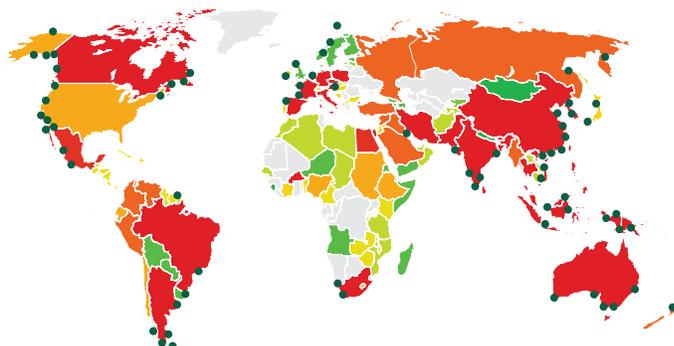
Plusieurs usines de fabrication ou de traitement utilisent des produits azotés ou phosphorés comme matière première ou comme composant pour la fabrication de leurs produits.

**FIGURE 3** Répartition mondiale de la consommation d'engrais à l'urée par pays, en tonnes métriques

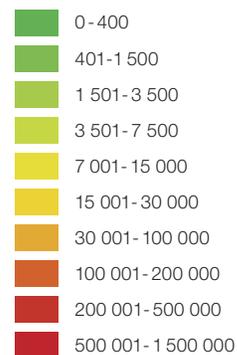
Consommation d'urée (1965)–Cas d'IPP (1970)



Consommation d'urée (1999)–Cas d'IPP (2000)



Consommation d'urée (Mg/an)



Répartition mondiale de la consommation d'engrais à l'urée par pays, en tonnes métriques, en 1965 (carte du haut) et en 1999 (carte du bas) ainsi que les observations de dinoflagellés contribuant aux intoxications par phycotoxine paralysante (IPP) ou les cas documentés d'IPP en 1970 (carte du haut) et en 2000 (carte du bas). Les observations d'IPP sont indiquées par des cercles. Noter que les estimations de consommation d'urée ne comprennent pas l'urée utilisée à d'autres fins que la fertilisation.

SOURCE : GLIBERT ET COLL. 2006. AVEC LA PERMISSION DE SPRINGER SCIENCE & BUSINESS MEDIA.

### EXEMPLES DES PRINCIPAUX TYPES D'INDUSTRIES RESPONSABLES DE REJETS DE NUTRIANTS

- **Engrais :** nitrate d'ammonium, urée, phosphates, *etc.*
- **Pesticides :** pesticides organophosphorés, composés azotés
- **Transformation alimentaire :** rejets alimentaires, nitrite de sodium (utilisé pour la production de viandes préparées, saucisses, *etc.*)
- **Détergents au phosphore :** tripolyphosphate de sodium (encore utilisé comme agent détergent principal dans plusieurs pays)
- **Autres industries :** peintures ignifuges, produits du tabac, cosmétiques et crèmes hydratantes.

### La combustion de combustibles fossiles

La combustion de combustibles fossiles (pour le transport et pour la production d'électricité) génère des gaz azotés (NO<sub>x</sub>) qui peuvent se déposer directement dans les plans d'eau ou y aboutir indirectement par ruissellement après s'être déposés ailleurs. Dans certaines régions, ils constituent une importante source de pollution à l'azote. Par exemple, dans la mer Baltique, on estime que 30 % de l'apport en azote provient de cette source ; dans le Mississippi, qui se jette dans le golfe du Mexique, il est de 13 % (Howarth et coll. 2002).

Dans l'ouest du Canada, l'importante augmentation de la production de pétrole à partir des sables bitumineux a entraîné une augmentation des pluies acides chargées de soufre et de gaz azotés. Ces pluies se déposent ensuite plus à l'est, notamment en Ontario et au Québec (gouvernement du Canada, 2008). Ceci explique en partie pourquoi, au Québec, plus de 160 lacs et rivières ont été affectés par des proliférations d'algues en 2007, dont certains sont situés dans des régions non agricoles (gouvernement du Québec, 2007).

### L'impact des changements climatiques

Les changements climatiques pourraient contribuer à l'augmentation des cas de proliférations nuisibles à l'avenir parce que le temps plus chaud tend à stimuler la croissance des algues et à favoriser les espèces toxiques (Chu et coll. 2007). D'autres facteurs physiques résultant des changements climatiques pourraient aussi favoriser l'écoulement des nutriments et l'eutrophisation. Par exemple, dans le cadre d'une étude portant sur le golfe du Mexique, un groupe de scientifiques affirmait récemment que : « Les changements climatiques susceptibles de se produire au cours du 21<sup>e</sup> siècle pourraient avoir un impact majeur sur l'hypoxie dans le nord du golfe du Mexique. Si les changements climatiques se traduisent par une augmentation des précipitations, de l'écoulement dans les rivières et de l'apport en azote, on prévoit que l'hypoxie gagnera en étendue, en persistance et en intensité. » (Rabalais et coll. 2007).



### 3 Raréfaction de l'oxygène, zones mortes et autres impacts

Les zones mortes se forment dans les océans et les lacs lorsque les millions de plantes et d'animaux minuscules (phytoplanctons et zooplanctons) associés aux fleurs d'eau meurent et se déposent sur le fond marin. Une fois au fond, des microbes décomposent ces organismes en consommant de l'oxygène, ce qui entraîne une augmentation radicale des populations microbiennes et une raréfaction de l'oxygène près des fonds marins. Dans l'eau de mer pleinement oxygénée, on enregistre une concentration d'oxygène d'environ 10 parties par millions (ppm). Lorsque la concentration descend à 5 ppm, les poissons et les autres animaux marins respirent plus difficilement (Diaz 2001, Dodds 2006). Si la concentration descend sous le seuil de 2 ppm, on considère qu'il s'agit d'une zone hypoxique. En pareils cas, les poissons se déplacent vers des zones plus riches en oxygène. Par contre, les animaux moins mobiles, eux, commencent à mourir lorsque la concentration avoisine les 1,5 ppm (Diaz et coll. 2004). La diversité des fonds marins

se trouve ainsi réduite puisque plusieurs animaux ne peuvent pas survivre, même si l'eau plus près de la surface contient encore suffisamment d'oxygène pour supporter la vie animale.

#### La raréfaction de l'oxygène

À l'échelle mondiale, les zones où l'on enregistre des phénomènes de raréfaction de l'oxygène le long des côtes sont principalement situées à proximité de secteurs densément peuplés ou associés aux bassins des rivières qui déversent de fortes quantités de nutriments (Diaz et coll. 2004). Dans certaines régions, les zones mortes s'étendent sur de grandes superficies et ce problème prend de l'ampleur partout dans le monde. Depuis les années 1960, le nombre de zones mortes a doublé tous les 10 ans. En 2006, le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) estimait que le nombre de zones mortes dans le monde était passé de 150 en 2004, à 200 en 2006 – une augmentation de 30 % en seulement deux ans (PNUE 2006).

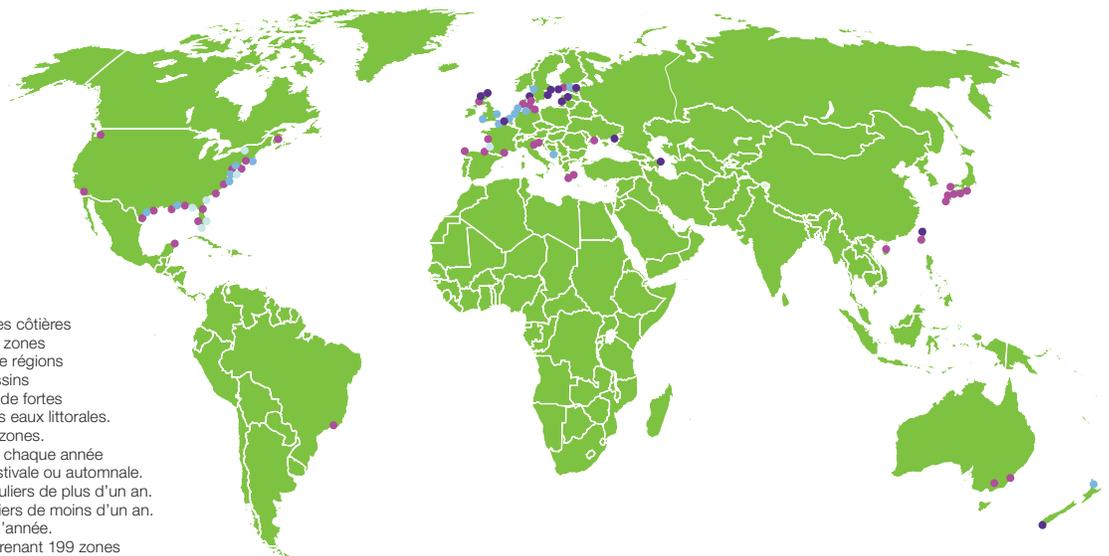
Les plus grandes zones mortes se situent près des côtes de la mer Baltique (100 000 km<sup>2</sup>), au nord du golfe du Mexique

FIGURE 4 Répartition mondiale des zones côtières hypoxiques en 2003

#### Zones hypoxiques

- Annuelle
- Épisodique
- Périodique
- Persistante

Répartition mondiale des zones côtières hypoxiques en 2003. Les 146 zones identifiées sont situées près de régions fortement peuplées ou de bassins hydrographiques qui rejettent de fortes quantités de nutriments dans les eaux littorales. On distingue quatre types de zones.  
*Annuelle*: l'hypoxie se produit chaque année en raison de la stratification estivale ou automnale.  
*Épisodique*: à intervalles irréguliers de plus d'un an.  
*Périodique*: à intervalles réguliers de moins d'un an.  
*Persistante*: hypoxique toute l'année.  
 Voir la carte mise à jour comprenant 199 zones à la figure 1.



(21 000 km<sup>2</sup>) et jusqu'à récemment, au nord-ouest de la mer Noire (40 000 km<sup>2</sup>). On enregistre aussi des épisodes d'hypoxie, quoique moins étendus et moins fréquents, au nord de la mer Adriatique, au sud de la mer du Nord et dans plusieurs estuaires et secteurs côtiers des États-Unis (Rabalais et coll. 2002). Des recherches récentes révèlent que l'on observe aussi des zones hypoxiques le long des côtes de l'Amérique du Sud, de la Chine, du Japon, du sud-est de l'Australie et de la Nouvelle-Zélande. Parmi les sites les plus récemment identifiés, mentionnons la Finlande, le Ghana, la Chine (rivière Yangtze et estuaire de la Pearl) et la côte ouest de l'Inde (voir figure 1) (PNUE 2006). La carte du PNUE à la page précédente (figure 4) indique les zones mortes des océans en 2003 et elle permet de distinguer les zones persistantes et les différents types de zones temporaires. Par exemple, certaines zones mortes dans le nord du golfe du Mexique surviennent au printemps et durent jusqu'à la fin de l'été, mais on les observe rarement en automne et en hiver. À l'opposé, les zones mortes de la mer Baltique sont permanentes – on les retrouve à longueur d'année (Rabalais et coll. 2002).

### Zones mortes et engrais

La croissance de la zone hypoxique dans le golfe du Mexique suit la même courbe exponentielle que celle de l'augmentation de l'utilisation des engrais amorcée dans les années 1950 (Rabalais et coll. 2002). Dans la mer Baltique, il a été clairement démontré que l'utilisation excessive d'engrais était associée aux zones mortes (Karlson et coll. 2002). Dans le nord-ouest de la mer Noire, la zone morte s'étendait sur plus de 40 000 km<sup>2</sup> dans les années 1970 et 1980. Depuis, la situation s'est améliorée, vraisemblablement en raison d'une réduction de l'utilisation des engrais agricoles.

Cette réduction est survenue à la suite de l'effondrement économique de l'ex-Union soviétique et à la réduction des subventions pour les engrais qui ont suivi. Parallèlement à la réduction des engrais transportés par le Danube, on a observé des signes de rétablissement des écosystèmes dans les eaux et les fonds marins de la mer Noire. En 1999, la zone hypoxique n'était plus que de 1000 km<sup>2</sup>. Cependant, selon une étude publiée en 2001, on n'a observé aucun rétablissement des algues de fond et la plupart des stocks de poisson demeurent décimés (Rabalais et coll. 2002). Les zones mortes de la mer Baltique et de la mer Noire ont entraîné la disparition de la pêche aux poissons de fond dans ces secteurs (Diaz 2001).

### Perte de biodiversité et invasions de méduses

En plus de son impact sur la fréquence et l'intensité des proliférations d'algues nuisibles et des zones mortes, la surabondance de nutriments est aussi associée à une disparition des habitats d'herbes marines et à une réduction radicale de la biodiversité (Diaz et coll. 2004). Les invasions récurrentes de méduses que l'on a observées récemment dans les eaux littorales de la Méditerranée, dans les estuaires de rivières en Chine et sur les côtes du Japon ont été causées par différents facteurs, mais la surcharge de nutriments et l'eutrophisation sont à la base du problème (Purcell et coll. 2007). Par ailleurs, les conséquences de la surpêche peuvent aussi accentuer les impacts de l'eutrophisation (Maranger et coll. 2008). En effet, l'exploitation non durable des ressources halieutiques fait en sorte que certaines espèces, comme les méduses ou le plancton, n'ont plus à faire face à leurs prédateurs ou aux compétiteurs naturels qui contribuaient à limiter leur expansion.



## 4 Aperçu de la situation dans différents pays

### Chine

La pollution par les nutriments et les proliférations d'algues nuisibles sont des problèmes répandus en Chine, à la fois le long des côtes maritimes et sur les plans d'eau douce. Les trois principales régions touchées entre 1993 et 2001 étaient les suivantes (voir aussi le tableau 1):

- Mer de Bohai
- Est de la mer de Chine: baie de Hangzhou, estuaire de la rivière Yangtsé
- Sud de la mer de Chine: estuaire de la rivière Pearl, est de la côte de Guangdong.

En 2007, on a rapporté 82 cas de marées rouges le long des côtes chinoises, pour une superficie totale de 11 610 km<sup>2</sup> (Liang 2008). Les estuaires des deux grandes rivières de Chine (Yangtsé et Pearl) sont fortement eutrophes et fréquemment touchés par des proliférations d'algues nuisibles, ce qui a mené à la formation de deux nouvelles zones mortes dans l'océan (PNUE 2006).

Les trois lacs les plus pollués et les plus eutrophes sont le Taihu et le Chao, à l'est de la Chine, et le Dianchi, dans la province de Yunnan, au sud (voir le tableau 1).

Les principales sources de nutriments dans les plans et cours d'eau de la Chine sont le ruissellement des engrais, l'élevage du bétail, l'aquaculture, les égouts domestiques des villes et les rejets industriels. Cette dernière source a été fortement réduite au cours de la dernière décennie. Par contre, les nutriments provenant du ruissellement des engrais et des égouts domestiques ont augmenté et ils font l'objet de peu de mesures de contrôle (Dai et coll. 2006, Tang et coll. 2006, Liu et Qiu 2007, Qin et coll. 2007).

Dans l'estuaire de la rivière Pearl, la surabondance de nutriments provient principalement du ruissellement des engrais utilisés dans les fermes en amont de la rivière et des égouts des régions peuplées des alentours. Plus de 70 % des égouts domestiques sont rejetés directement dans la rivière ou près de son embouchure, sans traitement (Huang et coll. 2003, Dai et coll. 2006).

Selon un expert en écologie marine cité par un organisme gouvernemental, « année après année, plus du cinquième de toutes les eaux usées de la Chine se retrouve dans la mer de Bohai. Si on ne prend pas de mesures pour enrayer cette pollution, la région risque de se transformer en zone morte d'ici 10 ans. » (SEPA 2008). Jusqu'à la fin de 2005, 42 % des villes chinoises (278 sur 660) n'avaient aucun système de traitement des eaux usées et plus de la moitié des usines de traitement de 30 grandes villes fonctionnaient à moins de 30 % de leur capacité de traitement (Liu et Qiu 2007).

La consommation d'engrais chimiques a augmenté radicalement en Chine au cours des dernières années. Des études indiquent que 55 à 75 % de l'azote et 75 à 90 % du phosphore des engrais ne sont pas utilisés par les cultures, et qu'une partie de cet engrais non utilisé aboutit dans les cours d'eau par ruissellement (Liu et Qiu 2007). On estime que près de 40 % de l'apport en azote et en phosphore dans le lac Dianchi, et plus de 50 % de celui du lac Taihu, provient de sources non ponctuelles, essentiellement agricoles (Liu et Qiu 2007). Une nouvelle étude publiée dans le Chinese Journal of Ecology démontrait aussi que le nitrate utilisé comme engrais agricole était une des principales sources de la pollution par l'azote du lac Taihu, suivi par les égouts domestiques et le fumier. Le tableau 1 présente les principales sources de pollution et leur impact sur les proliférations d'algues nuisibles.

### Inde

Historiquement, très peu de recherches scientifiques ont été effectuées en Inde sur l'éclosion et les caractéristiques biologiques des proliférations d'algues nuisibles (Bhat et Matondkar 2004). On sait cependant que des marées rouges ont été rapportées sur les côtes est et ouest du pays. Récemment, on a identifié des proliférations comme cause possible d'empoisonnements et de décès survenus au fil des ans à la suite de consommation de mollusques à différents endroits dans l'état du Kerala (Daijworld.com 2008). En octobre 2006, le PNUE a identifié une nouvelle zone morte océanique dans la région (PNUE 2006).

TABLEAU 1 Principales régions touchées par l'eutrophisation et les proliférations d'algues nuisibles en Chine

LOCALISATION DES PROLIFÉRATIONS	PÉRIODE DE POINTE	ORIGINE DES PRINCIPAUX NUTRIANTS POLLUANTS	IMPACTS
<b>CÔTES MARITIMES</b>			
<b>Mer de Bohai</b> Cas les plus graves : estuaire de la rivière Jaune, baies de Liaodong et de Bohai	Juillet – août	Ruissellement d'engrais, rejets industriels, égouts domestiques. Environ 21 % de la population chinoise (300 millions de personnes) habite dans cette région.	Augmentation de la fréquence des proliférations, souvent accompagnées d'exterminations massives d'animaux marins.
<b>Est de la mer de Chine</b> Cas les plus graves : estuaire de la rivière Yangtzé, côte est de Zhejiang	Mai – juin	Ruissellement d'engrais, rejets industriels et égouts domestiques transportés par la rivière Yangtzé. La concentration de nitrates dans la rivière a été multipliée par 10 entre 1968 et 1997.	246 proliférations rapportées entre 2000 et 2004 (contre 111 dans les années 1990).
<b>Sud de la mer de Chine</b> Cas les plus graves : estuaire de la rivière Pearl, côte Shenzhen	Mars à mai	Ruissellement d'engrais des fermes en amont de la rivière Pearl, rejets industriels, égouts des zones peuplées avoisinantes.	Environ 15 proliférations annuelles rapportées entre 1998 et 2003. En 1998, une prolifération majeure près de Hong-Kong a tué près de 80 % des poissons d'une ferme d'élevage.
<b>PLANS D'EAU DOUCE</b>			
<b>Lac Taihu</b>	Juin	Plus de 50 % de sources non ponctuelles (agriculture des bassins hydrographiques à l'ouest, égouts domestiques, aquaculture). Les nutriments de source industrielle ont été fortement réduits au cours des 10 dernières années.	Augmentation radicale au cours de la dernière décennie et persistance durant tout l'été. Des microcystines, des toxines puissantes qui s'attaquent au foie, ont contaminé l'eau potable.
<b>Lac Chao</b>	Juillet à septembre	Principalement de sources non (engrais, égouts domestiques). Les nutriments de source locale ont été réduits de 40 % depuis la fin des années 1970.	Fortement eutrophe depuis les années 1990, augmentation de la fréquence et de l'étendue des proliférations au cours des dernières années.
<b>Lac Dianchi</b>	Avril – mai	Environ 40 % de sources non ponctuelles (engrais), égouts domestiques. <i>« Les mesures d'assainissement ont échoué parce qu'elles étaient presque exclusivement axées sur les sources industrielles locales et non sur les écoulements agricoles ou les égouts domestiques ».</i> (Guo 2007)	Fortement eutrophe depuis les années 1990, augmentation de la fréquence et de l'étendue des proliférations au cours des dernières années.
<b>Rivière Xiao</b> (barrage des Trois Gorges)		Ruissellement d'engrais, rejets industriels, égouts domestiques.	Proliférations en aval des Trois Gorges, détérioration de la vie aquatique.



## Philippines

Depuis 1983, les proliférations d'algues nuisibles sont reconnues comme un phénomène catastrophique qui affecte la santé publique et l'économie des Philippines (Relox et Bajarias 2003). Entre 1990 et 2003, on a enregistré plus de 120 marées rouges et autres proliférations nuisibles le long des côtes du pays, la plupart dans les baies de Manille et de Masinloc (Wang et coll. 2008). Dans la baie de Manille, les proliférations toxiques n'ont pas cessé d'augmenter depuis la première éclosion rapportée, en 1983 (Sombrito et coll. 2004), et 80 % des proliférations ont eu lieu au cours de la dernière décennie (Wang et coll. 2008).

Le plus grand lac d'eau douce du pays, Laguna de Bay, est régulièrement affecté par des proliférations toxiques d'algues bleu-vert (*Microcystis aeruginosa*) qui persistent de mai à juillet ou de septembre à novembre selon les années (Baldia et coll. 2003). Les toxines libérées pourraient mettre en péril les poissons élevés en aquaculture—la principale activité économique du lac. Aux Philippines, l'eutrophisation causée par les apports excessifs de matière organique et de nutriments résultant de l'aquaculture et de l'agriculture semble constituer la principale cause des proliférations d'algues en eaux douces et en eaux salées (Wang et coll. 2008).

Les proliférations d'algues nuisibles ont un impact négatif sur les ressources marines, sur la santé humaine et sur l'économie du pays. De 1983 à 2002, on a rapporté 2122 cas d'intoxications par phycotoxine paralysante (IPP) et 117 décès de personnes de tous les âges (Bureau of Fisheries and Aquatic Resources 2003). Ces proliférations ont entraîné des pertes économiques dans le secteur de la pêche, notamment à l'industrie des mollusques et crustacés. L'éclosion de 1983 a causé des pertes de 2,2 millions de pesos et une diminution radicale de la demande pour les produits de la mer. L'éclosion de 1988 dans la baie de Manille a aussi eu un impact marqué puisqu'elle a entraîné une chute de prix de près de 40 % pour l'ensemble des produits de la mer.

## Thaïlande

De récentes études sur les réservoirs d'eau douce du pays ont permis de répertorier de fréquentes proliférations d'algues nuisibles (Peerapornpisal, 2006). Les chercheurs ont identifié des algues toxiques dans les réservoirs de Chiang Mai (barrage Mae Kuang Udomtara) et de Nakhon Pathom (Bang Phra) (Peerapornpisal et coll. 1999, Chantara et coll. 2002).

Pendant des siècles, le golfe de Thaïlande a fourni d'importantes ressources marines aux habitants du pays. Aujourd'hui, cependant, le développement agricole et industriel a fait de l'eutrophisation le principal problème de la côte intérieure du golfe (Menasveta 2001, Cheevaporn et Menasveta 2003). Les quatre principales rivières de la Thaïlande se jettent dans le golfe et entraînent une eutrophisation à cause des eaux de ruissellement qu'elles transportent. La Chao Phraya est la plus polluée des quatre rivières, surtout près de son estuaire, en raison de l'expansion urbaine et industrielle. La rivière Ta Chin devient aussi de plus en plus polluée à cause du développement industriel et agricole accéléré et de l'expansion urbaine dans la région de Bangkok. On a rapporté des cas d'intoxications par phycotoxine paralysante (IPP) et même des décès humains après consommation de moules contaminées dans la région de l'estuaire de la rivière Pranburi, une région affectée par des marées rouges (Menasveta 2001). L'anoxie résultant des proliférations d'algues pourrait entraîner la destruction massive de poissons, comme celle survenue en août 1991 près des côtes de Choburi à la suite d'une immense marée rouge de *Noctiluca*, qui s'étendait du district de Bangsan jusqu'à Pattaya (Menasveta 2001).

Le rythme d'éclosion des proliférations de plancton a augmenté au cours des dernières décennies dans le golfe de Thaïlande (Singhasaneh 1995). On a découvert que deux espèces d'algues bleu-vert (*Trichodesmium erythraeum* et *Trichodesmium thiebautii*) et des *Noctiluca miliaris* étaient à l'origine des proliférations d'algues le long des côtes (Singhasaneh 1995). Dans l'ouest du golfe, on a souvent observé les marées rouges de décembre à février ; à l'est, de mars à août.

## Europe

Les concentrations en nutriments dans les rivières qui se jettent dans la mer Méditerranée sont, en général, au moins quatre fois moins élevées que celles des rivières du nord-ouest de l'Europe, mais on observe nettement une tendance à la hausse des concentrations d'azote et de phosphates.

Dans la mer Noire, les concentrations d'azote sont quatre fois plus élevées que dans les années 1960. Il est clairement établi que cette eutrophisation résulte des fortes augmentations des rejets d'azote et de phosphore dans la mer Noire dans les années 1960 et 1970 (Mee 2001). Jusqu'à récemment, le nord-ouest de la mer Noire était affecté par l'une des grandes zones mortes du monde (40 000 km<sup>2</sup>). Heureusement,

d'importantes réductions ont eu lieu à la suite des changements politiques et économiques dans l'ancienne Union soviétique, qui ont notamment entraîné un déclin des subventions pour les engrais. Parallèlement à la réduction des engrais transportés par le Danube, on a observé des signes de rétablissement des écosystèmes dans les eaux et les fonds marins de la mer Noire. Cependant, selon une étude publiée en 2001, on n'a observé aucun rétablissement des algues de fond et la plupart des stocks de poisson demeurent décimés (Rabalais 2002). Les rivières sont responsables de 65 % de l'apport en azote et, à lui seul, le Danube représente 70 % de l'apport de toutes les rivières. Dans le contexte actuel où plusieurs pays de l'Europe centrale et de l'Europe de l'Est joignent ou sont sur le point d'adhérer à la Communauté européenne, le sort de la mer Noire sera directement influencé par la réglementation et les politiques globales de la Communauté. Les nouveaux pays membres voudront sans doute avoir accès à l'agriculture industrielle et aux mêmes technologies que les membres actuels, ce qui risque de mettre en péril le lent processus de récupération du nord-ouest de la mer Noire (Mee et coll. 2005).

Dans les années 1800, les eaux de la mer Baltique étaient particulièrement claires, et pauvres en nutriments. Cet environnement marin est maintenant eutrophe et chargé de nutriments à cause des apports excessifs d'azote et de phosphore. Les rivières sont responsables de 69 % de l'apport total en azote dans la mer Baltique; le reste provient de retombées atmosphériques (essentiellement causés par la combustion des combustibles fossiles). La région de la mer Baltique est l'une des plus naturellement sensibles à l'insuffisance d'oxygène en Europe. C'est aussi l'une des mers les plus polluées au monde selon la Helsinki Commission for the protection of the Baltic Sea (Helcom).

Les évaluations faites par la Helcom indiquent clairement que l'agriculture est l'une des principales sources de pollution par les nutriments de la mer Baltique. Plus de 50 % de l'azote et du phosphore transporté par l'eau dans la mer Baltique est d'origine agricole (PNUE et WHRC 2007). À l'heure actuelle, la Helcom concentre ses efforts sur l'identification de nouvelles mesures pour réduire les apports de nutriments agricoles dans la mer. Mais pour s'attaquer à l'ensemble du problème de la pollution à l'azote, il faudra aussi réduire l'apport de nutriments d'autres sources importantes, comme les municipalités, les colonies isolées et la combustion des combustibles fossiles. Le programme de réduction des nutriments à la source (visant notamment les eaux usées municipales et industrielles) a donné de bons résultats et la plupart des participants

ont atteint l'objectif de réduction de 50 % du phosphore (PNUE et WHRC 2007). Toutefois, les progrès demeurent limités en ce qui concerne les sources non ponctuelles, comme l'agriculture.

Selon les experts de la Helcom, « *l'enrichissement excessif – la surabondance de nutriments – dans la mer Baltique entraîne des proliférations d'algues en été, qui entraînent à leur tour une désoxygénation dans certains secteurs, et cela nuit à la biodiversité. Par exemple, les morues ne peuvent plus déposer leurs œufs sur les fonds marins parce que les œufs ont besoin d'oxygène.* » (Gunter 2005). À l'est de la mer Baltique, on retrouve une zone morte permanente qui atteint jusqu'à 100 000 km<sup>2</sup>. Les proliférations d'algues bleu-vert entraînent aussi la destruction de poissons et de fréquentes fermetures de plages sur la mer Baltique.

### États-Unis : golfe du Mexique

Aux États-Unis, la pollution diffuse à l'azote et au phosphore a augmenté radicalement, ce qui a entraîné une série d'effets négatifs : eutrophisation, proliférations d'algues nuisibles, zones mortes, destruction de récifs coralliens, d'algues marines et de poissons, intoxications alimentaires, décès d'oiseaux et de mammifères marins (PNUE/GPA 2006). Les activités humaines ont entraîné une augmentation de la circulation d'azote dans le bassin du Mississippi d'environ 400 %. L'eutrophisation a notamment créé une immense zone morte dans le golfe du Mexique. Au début des années 1990, on estimait la superficie de cette zone morte à 9500 km<sup>2</sup>. En 2000 et 2007, elle a atteint 22 000 km<sup>2</sup> (Rabalais 2007). « *La plupart des nutriments qui se retrouvent dans le golfe proviennent des activités agricoles* » selon Nancy Rabalais, directrice du Marine Consortium de l'Université de Louisiane et spécialiste des zones mortes. Dans l'une de ses récentes publications, elle estime que 67 % des nitrates du bassin proviennent des grandes fermes situées en bordure du Mississippi.

### Mexique : golfe de Californie

Les scientifiques estiment que près de 75 % de l'azote utilisé comme engrais dans la vallée du Yaqui, à l'ouest du Mexique, est perdu dans l'atmosphère et aboutit dans les eaux de surface. Année après année, on estime que de 11 000 à 22 000 tonnes d'azote s'écoulent ainsi dans la mer, ce qui a un impact puissant sur les eaux pauvres en azote du golfe de Californie; des proliférations d'algues apparaissent quelques jours seulement après l'application de l'engrais et l'irrigation.



En 2005, une équipe de chercheurs de l'Université Stanford aux États-Unis a démontré, à l'aide d'images satellites, qu'il y avait une corrélation étroite entre la surutilisation d'engrais azotés et les épisodes de prolifération d'algues le long des côtes (Beman et coll. 2005). Sur les images, on voit d'épaisses proliférations tout près des côtes, alimentées par le ruissellement de l'azote des champs de blé. Les mesures prises par les chercheurs ont permis de constater que les proliférations pouvaient atteindre jusqu'à 577 km<sup>2</sup> dans le golfe de Californie, l'un des écosystèmes marins les plus productifs et les plus biologiquement diversifiés du monde. En effet, un plus grand nombre de baleines et de dauphins se nourrissent et se reproduisent le golfe de Californie que n'importe où ailleurs sur la planète. On y retrouve près de 900 espèces de poissons et 34 espèces de mammifères marins. Plus de 800 des espèces présentes dans le golfe ne se retrouvent nulle part ailleurs dans le monde. Le long des côtes, les mangroves et les lagunes abritent des centaines d'espèces d'oiseaux. Des proliférations régulières d'algues dans cet écosystème précieux et unique pourraient avoir un impact majeur.

En avril et mai 2006, des scientifiques locaux ont documenté trois proliférations d'algues nuisibles de couleur jaune-brun dans l'État du Sinaloa au Mexique. En mai 2006, une de ces proliférations a entraîné une destruction massive de poissons et on a retrouvé environ 60 tonnes de poissons morts sur la plage sur une distance de 3 km, entre Las Cabras et El Palmito del Verde. C'était la seconde vague de destruction de poissons associée à ce type de proliférations dans la région depuis 2004 (Cortés-Altamirano et coll. 2006).

## Canada

Récemment, le Canada a été touché par plusieurs proliférations d'algues nuisibles, principalement dans les lacs et rivières du Québec et du Manitoba. En été 2007, on a observé des éclosions massives d'algues bleu-vert dans plusieurs lacs du pays, ce qui a eu un lourd impact environnemental et entraîné d'importantes pertes économiques. De plus, les épisodes d'eutrophisation surviennent de plus en plus souvent dans les rivières et le long des côtes.

Comme les eaux douces du Canada ont une limitation naturelle de phosphore, c'est habituellement la pollution au phosphore d'origine humaine qui semble être la principale cause des proliférations d'algues dans les lacs et rivières du pays (Chambers et coll. 2001). Il est donc urgent de mettre

un frein à la pollution au phosphore pour protéger les eaux douces du Canada. Cela dit, la pollution à l'azote est également très élevée au Canada, ce qui entraîne aussi différents problèmes : pluies acides, eutrophisation et proliférations d'algues, particulièrement dans les estuaires marins (Chambers et coll. 2001). Ces problèmes deviennent très difficiles et très dispendieux à corriger une fois qu'ils ont pris une certaine ampleur critique. Autant du point de vue environnemental que du point de vue de l'économie, il est donc à la fois urgent et rentable d'arrêter la pollution à l'azote avant que le problème ne devienne aigu (Schindler et coll. 2006). Des proliférations d'algues, les destructions de poissons qui les accompagnent et des intoxications humaines sont survenues dans les estuaires marins de la côte est et de la côte ouest (Chambers et coll. 2001).

Dans le lac Winnipeg, les concentrations totales d'azote et de phosphore sont environ deux fois plus élevées qu'il y a une dizaine d'années. L'état actuel du lac, en ce qui concerne les concentrations de nutriments et les proliférations d'algues, est comparable à celui du lac Érié au début des années 1970, une période pendant laquelle ce lac a été exposé à de graves problèmes d'eutrophisation (Schindler et coll. 2006). En 2007, les relevés du gouvernement du Québec faisaient état de plus de 160 lacs et rivières affectés par des proliférations d'algues. Certains de ces plans d'eau étaient situés dans des régions non agricoles, ce qui veut dire que les proliférations n'ont pas toutes été causées par les engrais agricoles (gouvernement du Québec, 2007). L'élevage des animaux – principalement le porc – demeure une source importante de pollution au phosphate dans plusieurs bassins hydrographiques du Québec. De plus, l'importante augmentation de la production de pétrole à partir des sables bitumineux dans l'Ouest canadien a entraîné une augmentation des pluies acides chargées de soufre et de gaz azotés dans l'est, notamment en Ontario et au Québec. Plusieurs lacs de l'ouest du pays ont subi une eutrophisation allant de modérée à grave par suite de la conversion de territoires en terres agricoles et au ruissellement d'engrais qui a suivi (Schindler et coll. 2006).

**Le secteur agricole** est responsable d'environ 82 % de la pollution au phosphore et de 49 % de la pollution directe à l'azote, principalement à cause du ruissellement des engrais et de l'élevage des animaux (Chambers et coll. 2001, Janzen et coll. 2003). Si on ajoute les sources indirectes de pollution à l'azote attribuables à l'agriculture (retombées de gaz agricoles comme l'ammoniac et le NO<sub>x</sub>), la part de l'agriculture représente 80 % de toute la pollution à l'azote du pays (Chambers et coll. 2001). De plus, l'agriculture est

la source d'azote qui connaît la plus forte augmentation au Canada (Chambers et coll. 2001). L'utilisation d'engrais commerciaux et le fumier produit par les animaux ont connu une augmentation très rapide. Les augmentations d'azote sont beaucoup plus rapides que celles du phosphore et du potassium, les deux autres composants principaux des engrais commerciaux. La production d'engrais azotés au Canada est 75 fois plus importante maintenant qu'en 1950 (année de début des registres) tandis que l'utilisation de phosphore n'a augmenté que de 5 fois et celle du potassium, de 7 fois (Schindler et coll. 2006).

Les gouvernements du Canada et du Québec ont récemment annoncé qu'ils limiteraient **la quantité de phosphore dans les détergents**. D'ici 2010, tous les détergents pour la lessive et la vaisselle vendus au Canada devront avoir une teneur maximale en phosphates de 0,5 % de leur poids (à l'heure actuelle, la limite volontaire est de 2,2 %). Toutefois, cette mesure risque d'avoir peu d'effets concrets puisque la contribution des détergents à l'ensemble de la pollution par les nutriments dans l'eau est minime en comparaison de celle des ruissellements agricoles. En 1996, les détergents représentaient en moyenne seulement 8 %<sup>1</sup> de la pollution au phosphore dans les eaux usées municipales au Canada (Chambers et coll. 2001). Quant à ces eaux usées, elles sont responsables de 12 % de l'ensemble de la pollution au phosphore (contre 82 % pour l'agriculture). Bref, selon ces données, les détergents ne constitueraient au total qu'environ 1 % de l'ensemble de la pollution due au phosphore dans les eaux canadiennes.

Après la pollution directe causée par les activités agricoles, **les retombées atmosphériques azotées** (de l'ammoniac et des gaz NO<sub>x</sub>) constituent la deuxième plus importante source de pollution à l'azote (jusqu'à 30 % du total). Ces retombées proviennent principalement de l'ammoniac émis par le fumier et de la fabrication d'engrais commerciaux (Chambers et coll. 2001). Les émissions d'ammoniac ont augmenté de 9 % entre 1995 et 2000, surtout en raison des activités agricoles de l'ouest du pays (principalement concentrées dans la partie sud des provinces des Prairies et dans le bas du bassin hydrographique de la rivière Fraser). On s'attend à ce que les émissions d'ammoniac augmentent de 50 % entre 2000 et 2020, essentiellement à cause de l'augmentation de la production de bétail et de volaille, des engrais commerciaux et de la fabrication de pesticides (Schindler et coll. 2006).

La hausse de la demande pour la viande, combinée à la baisse des marges de profit par animal vendu, a entraîné une **forte augmentation de l'élevage du bétail** au Canada. De 1996 à 2001, le cheptel canadien de porcs a augmenté de 26,4 % et celui des poulets de 23,4 %, alors que la population humaine a augmenté de seulement 4 %<sup>2</sup> (Schindler et coll. 2006). L'élevage du porc est une source particulièrement importante de phosphore et d'azote (Chambers et coll. 2001). Les quantités d'azote résultant de l'épandage du fumier et de l'utilisation d'engrais sont élevées et, dans la plupart des cas, supérieures aux quantités requises par les plantes. Dans les régions où les populations animales sont élevées (notamment dans le sud de l'Alberta, de l'Ontario et du Québec, ainsi que dans le bas de la vallée de la Fraser et dans la région de l'Okanagan au sud de la Colombie-Britannique), l'azote répandu par l'intermédiaire du fumier peut atteindre ou dépasser le seuil des 1000 kg/hectare. De plus, l'utilisation des engrais commerciaux au Canada a augmenté de 20 à 30 % tous les 5 ans (Schindler et coll. 2006). Dans la plupart des régions du pays, la réglementation sur la gestion des déchets animaux est rudimentaire et le fumier est souvent simplement étendu ou vaporisé dans les champs. Les quantités et la sélection des périodes d'épandage ne sont pas bien gérées (Schindler et coll. 2006). Le fumier de porc est généralement dirigé vers des étangs de surface, qui dégagent de grandes quantités d'ammoniac dans l'atmosphère. Dans plusieurs régions, on détruit les bandes de végétation riveraines et on remblaye les terrains marécageux. Dans la partie sud du Canada, les zones humides ont été détruites dans une proportion de 70 % en moyenne. Or, les zones humides ont une importante capacité de dénitrification et d'absorption de l'azote. Dans plusieurs régions, leur destruction a entraîné une forte hausse des teneurs en azote dans les eaux de surface. Les apports de phosphore ont aussi augmenté, entraînant une hausse rapide de l'eutrophisation (Schindler et coll. 2006).

**Les émissions de gaz azotés (NO<sub>x</sub>)** produites par les centrales électriques, les véhicules et l'industrie du pétrole et du gaz produisent aussi d'importantes retombées d'azote, qui contribuent à alourdir le bilan du Canada. Les véhicules sont responsables de près de la moitié des émissions de NO<sub>x</sub> et l'industrie du pétrole et du gaz suit de près. On prévoit que les émissions de NO<sub>x</sub> du Canada vont augmenter de 17 % d'ici 2020, notamment à cause de l'activité gazière et pétrolière dans l'Ouest et des centrales électriques au charbon (Schindler et coll. 2006). Il se peut toutefois que cette prévision s'avère en deçà de la réalité compte tenu



de l'augmentation rapide de la population de l'Alberta et de l'exploitation massive des sables bitumeux, ce qui devrait entraîner une augmentation marquée des émissions d'azote dans l'atmosphère (Schindler et coll. 2006). L'exploitation des sables bitumeux d'Athabasca, dans le nord-est de l'Alberta, est en pleine expansion et plusieurs nouvelles usines sont en construction ou déjà en fonction. On prévoit que les camions géants, capables de transporter des centaines de tonnes chacun, produiront des NO<sub>x</sub> qui feront augmenter, d'ici peu, les émissions d'azote de 359 % par rapport à leur niveau de 1998 (Environnement Canada 2003, Schindler et coll. 2006).

En partie à cause de **la circulation des pluies acides** de l'ouest vers l'est, les régions qui affichent les plus fortes retombées atmosphériques d'azote sont situées dans l'est du pays, particulièrement au sud de l'Ontario et du Québec (Aherne et Watmough 2006). Au Québec, ce phénomène affecte une superficie d'au moins 860 000 km<sup>2</sup>, soit le quart du territoire (rapport préliminaire du gouvernement du Canada 2008, cité dans *Le Devoir* 2008). Au Manitoba, les sols forestiers du sud-est de la province (au sud et à l'est du lac Winnipeg) dépassent de beaucoup le seuil critique maximal de retombées azotées (Aherne et Watmough 2006—figure 11, p. 31), ce qui risque de mettre en péril l'avenir de la forêt et des écosystèmes aquatiques de cette région (Boggs et coll. 2005). Au cours de la dernière décennie, le gouvernement canadien a décidé de prendre les émissions de soufre comme principale cible pour contrôler les pluies acides, mais les retombées azotées pourraient bien annuler une partie des résultats obtenus grâce à la surveillance des émissions de soufre (réunion mixte des ministres de l'Énergie et de l'Environnement du Canada 1999). En fait, les retombées azotées ne semblent pas avoir été réduites en parallèle avec les mesures pour contrôler les émissions de soufre et les pluies acides (Watmough et coll. 2005).

La part de **l'aquaculture** dans l'ensemble de la pollution des eaux de surface par les nutriments augmente rapidement. En 1996, l'aquaculture ne générait que 1 % de la pollution à l'azote et au phosphore dans les eaux de surface du Canada (Chambers et coll. 2001), mais la situation change rapidement avec l'augmentation marquée des activités aquicoles. La croissance des fermes d'élevage de saumon le long des côtes canadiennes a entraîné une augmentation importante des nutriments dans les fermes et leurs environs, et donc une pollution par les nutriments et la croissance excessive d'algues (Mente et coll. 2006; CCNB, 2004;

Robinson et coll., 2004; Strain, 2005; Strain et Hargrave, 2005). L'impact que l'on observe le plus fréquemment est une détérioration des conditions des fonds marins sous les cages à cause de la pollution par les nutriments et de la désoxygénation de l'eau. Dans les cas extrêmes, le fond marin sous les cages se transforme en une zone morte où la vie marine n'est plus possible, entourée par une zone où la diversité animale est restreinte (Goldburg et coll. 2001). Déjà dans les années 1990, des chercheurs avaient démontré que la diversité animale (macrofaune) était réduite dans l'environnement immédiat des piscicultures de la baie de Fundy; après cinq ans d'exploitation, on a observé des impacts jusqu'à une distance de 200 mètres des cages (Pêches et Océans Canada 2003).

Les déchets issus de l'aquaculture rejettent de l'azote et du phosphore dans l'eau, mais peu de silice, ce qui engendre des conditions moins favorables aux diatomées et plus favorables à la croissance, normalement lente, des phytoplanctons (dinoflagellés et cyanobactéries) (Mente et coll. 2006). Ainsi, la surabondance de nutriments, combinée à d'autres facteurs, a entraîné une croissance rapide de ces espèces et des proliférations d'algues nuisibles sous la forme de tapis denses de macroalgues vertes (principalement des espèces *enteromorpha* ou *ulva*) sur le fond marin de la zone intertidale. À proximité des fermes d'élevage de saumon de la baie de Fundy, on a découvert des tapis d'*enteromorpha* qui recouvraient plus de 30 % des sédiments; la faible teneur en oxygène à l'intérieur et sous ces tapis nuit à la croissance des mollusques (Pêches et Océans Canada 2003). Une ferme d'élevage de 200 000 saumons produit une quantité d'azote et de phosphore équivalant à peu près aux rejets de nutriments dans les égouts (avant traitement) d'une population de 20 000 et 25 000 personnes, respectivement. Les 49 600 tonnes de saumon d'élevage produit en 2000 en Colombie-Britannique ont entraîné le rejet d'autant d'azote que les égouts (avant traitement) de 682 000 personnes et autant de phosphore que ceux de 216 000 personnes (Fondation David Suzuki 2008).

- 1 Les principaux fabricants de détergents (Procter & Gamble, Lever Brothers) ont déjà éliminé le phosphore de leurs détergents pour la lessive vendue en Amérique du Nord. Ceux qui n'ont pas encore changé la composition de leurs produits ne détiennent que 5 % du marché environ (Chambers et coll. 2001).
- 2 C'est l'Alberta qui a le plus important cheptel—6,4 millions de têtes en 2001, une augmentation de 11,3 % par rapport à 1996. L'objectif du gouvernement albertain est de doubler cette quantité. Le Québec et le Manitoba sont les provinces qui ont enregistré les plus fortes hausses dans le secteur du porc, mais l'Alberta, la Saskatchewan et d'autres provinces ont aussi enregistré des hausses importantes. De 1996 à 2001, l'élevage du poulet a augmenté de 37 % en Colombie-Britannique—la plus forte hausse au pays (Schindler et coll. 2006).

## 5 Les mesures d'atténuation

Comme la surabondance de nutriments est la cause commune de la plupart des proliférations d'algues nuisibles et des zones mortes dans le monde, la solution la plus rapide et la plus efficace pour contrer ce problème est de réduire la pollution par les nutriments attribuables aux activités humaines. Les principales mesures à privilégier sont les suivantes :

### 1. Éliminer ou réduire la pollution par les nutriments d'origine humaine (azote ou phosphore) à leur source en fonction du problème spécifique de prolifération ou de zones mortes :

- a. **Éliminer le problème de ruissellement** dans les fermes en adoptant des pratiques agricoles écologiques.
  - Éliminer l'usage excessif d'engrais et s'assurer que les cultivateurs utilisent uniquement les quantités minimales nécessaires, de manière non polluante. Éliminer, le cas échéant, les subventions qui favorisent l'usage excessif ou inapproprié d'engrais. Planter et appliquer des mesures strictes de réduction de l'utilisation des engrais.
  - Éliminer les pertes d'engrais en améliorant les calendriers d'épandage et les techniques d'application, et utiliser un mode de nutrition des plantes aussi efficace que possible.
  - Favoriser l'addition de matière organique dans les sols cultivés de manière à réduire les pertes d'azote et à améliorer la rétention d'eau et de nutriments des sols ainsi que la rétention du carbone. Par exemple, en appliquant des méthodes biologiques dans les vergers de pommiers aux États-Unis, on a réduit le ruissellement du nitrate (Kramer et coll. 2006).
  - Éviter de laisser des sols à nu. Des études ont démontré que les concentrations de nitrate dans les eaux de ruissellement d'un champ cultivé en ligne et laissé à nu pendant un certain nombre de mois par année étaient plus de 20 fois supérieures à celles d'un champ couvert de plantes toute l'année (plantes de pâturage, cultures de protection comme le trèfle, etc.) (Raloff 2004).
- b. **Éliminer les rejets de nutriments provenant des égouts industriels** en minimisant les pertes à la source et en implantant un système de traitement adéquat.
- c. **Faire le traitement des eaux usées domestiques de façon à en éliminer les nutriments**, surtout dans les régions densément peuplées. Lorsque la principale préoccupation sanitaire est d'empêcher la transmission de maladies infectieuses par l'eau, il faut donner priorité au traitement primaire et secondaire des eaux usées pour rendre l'eau potable exempte d'éléments pathogènes humains. Par contre, si on fait face à des problèmes environnementaux et économiques croissants à cause de l'eutrophisation et de l'hypoxie des eaux littorales, il faut aussi reconnaître l'importance du traitement tertiaire pour réduire les rejets d'azote réactif (PNUE et WHRC 2007)
- d. **Interdire les produits à base de phosphore, comme les détergents.**
- e. **Viser l'arrêt de l'utilisation des combustibles fossiles.** En plus de contribuer aux changements climatiques, leur combustion rejette des nutriments dans l'atmosphère qui aboutissent dans les cours d'eau.

## **2. Maximiser la rétention naturelle des nutriments en restaurant la végétation le long des cours d'eau. La végétation permet de réduire les pertes de sédiments et de nutriments du sol**

(Rabalais et coll. 2007).

## **3. Financer des recherches destinées à mieux comprendre l'impact des nutriments sur les proliférations et les zones mortes et assurer le suivi historique des rejets de nutriments dans l'environnement.**

Dans plusieurs régions, on comprend encore mal quelles sont les causes exactes de l'eutrophisation, des proliférations d'algues nuisibles et des zones mortes. Pour être en situation d'empêcher les proliférations et pour établir les meilleures mesures adaptatives possibles, il faut avoir en main des données fiables, notamment sur les apports en nutriments, et pouvoir faire des projections en fonction de différents scénarios. En fait, pour améliorer la situation d'une zone morte donnée, il faut déterminer de combien on doit réduire les apports en nutriments en fonction de l'objectif.

Dans le golfe du Mexique, par exemple, le gouvernement fédéral a établi en 2001 un objectif de réduction de 75 % de la superficie de la zone morte annuelle (soit une réduction de 20 000 à 5000 km<sup>2</sup>). Pour atteindre cet objectif, la National Oceanic and Atmospheric Administration a déterminé qu'il faudrait réduire presque de moitié les rejets de nitrate. Malheureusement, ces réductions ne se concrétisent pas, au contraire, notamment à cause des nouvelles pressions économiques et environnementales liées à l'essor de la culture du maïs-éthanol.

## 6 Références

- Aherne, J., et S. A. Watmough. 2006. Calculating critical loads of acid deposition for forest soils in Manitoba and Saskatchewan. Final Report: Data Sources, Critical Loads, Exceedance and Limitations. Environmental and Resource Studies, Trent University, Peterborough, Ontario.
- Baldia, S. F., M. C. G. Conaco, T. Nishijima, S. Imanishi, et K.-I. Harada. 2003. Microcystin production during algal bloom occurrence in Laguna de Bay, the Philippines. *Fisheries Science* 69:110-116.
- Beman, J. M., K. R. Arrigo, et P. A. Matson. 2005. Agricultural runoff fuels large phytoplankton blooms in vulnerable areas of the ocean. *Nature* 434:211-214.
- Bhat, S. R., et S. G. P. Matondkar. 2004. Algal blooms in the seas around India-Networking for research and outreach. *Current Science* 87: 1079-1083p.
- Boggs, J. L., S. G. McNulty, M. J. Gavazzi, et J. M. Myers. 2005. Tree growth, foliar chemistry, and nitrogen cycling across a nitrogen deposition gradient in southern Appalachian deciduous forests. *Canadian Journal of Forest Research* 35:1901-1913.
- Bureau of Fisheries and Aquatic Resources. 2003. Basic Information on Red Tide and Harmful Algal Blooms (HABs). Department of Agriculture. [http://www.bfar.da.gov.ph/infocorner/info\\_redtide.htm](http://www.bfar.da.gov.ph/infocorner/info_redtide.htm) Dernière visite le 28 mars 2008.
- CCNB. 2004. An eutrophication survey of bays in the Quoddy Region. Final 805 report to the New Brunswick Environmental Trust Fund.
- Chambers, P. A., M. Guy, E. S. Roberts, M. N. Charlton, R. Kent, C. Gagnon, et G. Grove. 2001. Nutrients and their impact on the Canadian environment. Agriculture et Agroalimentaire Canada, Environnement Canada, Pêches et Océans Canada, Santé Canada et Ressources naturelles Canada.
- Chantara, S. et coll. 2002. Relationship of amount of toxic blue-green algae to water quality in Mae Kuang Reservoir, Chiang Mai. Site visité le 25 juin 2007, [http://www.scisoc.or.th/stt/28/web/content/Q\\_17/Q12.htm](http://www.scisoc.or.th/stt/28/web/content/Q_17/Q12.htm)
- Cheevaporn, V., et P. Menasveta. 2003. Water pollution and habitat degradation in the Gulf of Thailand. *Marine Pollution Bulletin* 43:43-51.
- Chu, Z., X. Jin, N. Iwami, et Y. Inamori. 2007. The effect of temperature on growth characteristics and competitions of *Microcystis aeruginosa* and *Oscillatoria mougeotii* in a shallow, eutrophic lake simulator system. *Hydrobiologia* 581:217.
- Cortés-Altamirano, R., R. Alonso-Rodríguez, et A. Sierra Beltrán. 2006. Fish mortality associated with *Chattonella marina* and *C. cf. ovata* (Raphidophyceae) blooms in Sinaloa (Mexico). *Harmful Algae News* 31:7-8.
- Dai, M., X. Guo, W. Zhai, L. Yuan, B. Wang, L. Wang, P. Cai, T. Tang, et W.-J. Cai. 2006. Oxygen depletion in the upper reach of the Pearl River estuary during a winter drought. *Marine Chemistry* 102:159-169.
- Daijiworld.com. 2008. Mangalore: 'Shellfish is an Important Source of Cheap Protein'.
- Diaz R. J. 2001. Overview of hypoxia around the world. *Journal of Environmental Quality* 30: 275-281.
- Diaz, R. J., J. Nestlerode, et M. L. Diaz. 2004. A global perspective on the effects of eutrophication and hypoxia on aquatic biota. Pages 1-33 in 7th International Symposium on Fish Physiology, Toxicology and Water Quality. U.S. Environmental Protection Agency, Ecosystems Research Division, Athens, Georgia, USA. EPA600/R-04/049, Tallinn, Estonia.
- Dodds, W. K. 2006. Nutrients and the "dead zone": the link between nutrient ratios and dissolved oxygen in the northern Gulf of Mexico. *Frontiers in Ecology and the Environment* 4:211-217.
- Dumont, E., J. A. Harrison, C. Kroeze, E. J. Bakker, et S. P. Seitzinger. 2005. Global distribution and sources of dissolved inorganic nitrogen export to the coastal zone: Results from a spatially explicit, global model. *Global Biogeochemical Cycles* 19:GB4S02.
- Environnement Canada 2003. Submission to the Alberta Energy and Utilities Board. Canadian Natural Resources Ltd. Horizon Oil Sands Mine Application 1273113. Septembre 2003.
- Fondation David Suzuki. 2008. Ocean Pollution from Salmon Farming. <http://www.davidsuzuki.org/Oceans/Aquaculture/Salmon/Pollution.asp> (dernière visite le 28 mars 2008).
- Glennie, E. B., C. Littlejohn, A. Gendebien, A. Hayes, R. Palfrey, D. Sivil, et K. Wright. 2002. *Phosphates and alternative detergent builders – Final report*. EU Environment Directorate.
- Gilbert, P. M., J. Harrison, C. Heil, et S. Seitzinger. 2006. Escalating worldwide use of urea – A global change contributing to coastal eutrophication. *Biogeochemistry* 77:441-463.
- Gilbert, P. M., S. P. Seitzinger, C. Heil, J. M. Burkholder, M. W. Parrow, L. A. Codispoti, et V. Kelly. 2005. The role of eutrophication in the global proliferation of harmful algal blooms. New perspectives and new approaches. *Oceanography* 18:198-209.
- Goldburg, R.J., Elliot, M.S. et Naylor, R.L. 2001. Marine aquaculture in the United States. Environmental impacts and policy options. Pew Oceans Commission, Philadelphia, PA, USA. 44 pp.
- Gouvernement du Canada, 2008. Progress Report on Canada Wide Acid Rain Strategy for Post-2000 (Draft).
- Gouvernement du Québec, 2007. Plan d'intervention détaillé sur les algues bleu-vert 2007-2017. <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/flrivlac/algues.htm>
- Gunter, A. 2005. Still striving to clean up the Baltic Sea. *The Baltic Times*, 25 mars 2005.
- Guo, Q. G. 2007. Blue-Green Algae Bloom in Dianchi Lake, The Sixth Largest Freshwater Lake in China in Water Research and News Rutgers University. <http://waterresearch.blogspot.com/2007/06/blue-green-algae-bloom-in-dianchi-lake.html> Dernière visite le 28/03/2008.
- Howarth, R. W., A. Sharpley, et D. Walker. 2002. Sources of Nutrient Pollution to Coastal Waters in the United States: Implications for Achieving Coastal Water Quality Goals. *Estuaries* 25:656-676.
- Huang, X. P., L. M. Huang, et W. Z. Yue. 2003. The characteristics of nutrients and eutrophication in the Pearl River estuary, South China. *Marine Pollution Bulletin* 47:30-36.
- Jackson, J. B. C., M. X. Kirby, W. H. Berger, K. A. Bjorndal, L. W. Botsford, B. J. Bourque, R. H. Bradbury, R. Cooke, J. Erlanson, J. A. Estes, T. P. Hughes, S. Kidwell, C. B. Lange, H. S. Lenihan, J. M. Pandolfi, C. H. Peterson, R. S. Steneck, M. J. Tegner, et R. R. Warner. 2001. Historical Overfishing and the Recent Collapse of Coastal Ecosystems. *Science* 293:629-637.
- Janzen, H. H., K. A. Beauchemin, Y. Bruinsma, C. A. Campbell, R. L. Desjardins, B. H. Ellert, et E. G. Smith. 2003. The fate of nitrogen in agroecosystems: An illustration using Canadian estimates. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 67:85-102.

- Karlson, K., R. Rosenberg, et E. Bonsdorff. 2002. Temporal and spatial large-scale effects of eutrophication and oxygen deficiency on benthic fauna in Scandinavian and Baltic waters—a review. *Oceanography and Marine Biology: an Annual Review* 40:427-489.
- Kramer, S. B., J. P. Reganold, J. D. Glover, B. J. M. Bohannon, et H. A. Mooney. 2006. *Reduced nitrate leaching and enhanced denitrifier activity and efficiency in organically fertilized soils*. PNAS 103:4522-4527.
- Kudela, R., G. Pitcher, F. Figueiras, T. Probyn, T. Moita, et V. L. Trainer. 2005. Harmful algal blooms in coastal upwelling systems. *Oceanography* 18: 184-187.
- Le Devoir*, 12 février 2008. Des algues bleues tombées des cieux. Louis-Gilles Francœur, <http://www.ledevoir.com/2008/02/12/175798.html>
- Liang, Y. 2008. Report: China's coastal areas still suffering from severe pollution. [http://news.xinhuanet.com/english/2008-01/15/content\\_7428174.htm](http://news.xinhuanet.com/english/2008-01/15/content_7428174.htm).
- Liu, W., et R. L. Qiu. 2007. Water eutrophication in China and the combating strategies. *Journal of Chemical Technology And Biotechnology* 82:781-786.
- Maranger, R., N. Caraco, J. Duhamel, et M. Amyot. 2008. Nitrogen transfer from sea to land via commercial fisheries. *Nature Geoscience* 1:111-113.
- Mee, L. D. 2001. Eutrophication in the Black Sea and a basin-wide approach to its control. Pages 71–91 in B. Von Bodungen et K. Turner, editors. *Science and Integrated Coastal Management*. Atelier Dahlem, 12-17 décembre 1999, Berlin. 71-94.
- Mee, L. D., J. Friedrich, et M. T. Gomoiu. 2005. Restoring the Black Sea in times of uncertainty. *Oceanography* 18:32-43.
- Menasveta, P. 2001. Marine pollution problems in Thai waters. In: procès-verbal atelier, International Symposium on Protection and Management of Coastal Marine Ecosystem.
- Mente, E., Pierce, G.J., Santos, M.B. et Neofitou, C. 2006. Effect of feed and feeding in the culture of salmonids on the marine aquatic environment: a synthesis for European aquaculture. *Aquaculture International* 14 : 499–522.
- Pêches et Océans Canada. 2003. A scientific review of the potential environmental effects of aquaculture in aquatic ecosystems. Volume 1. Far-field environmental effects of marine finfish aquaculture. (B.T. Hargrave) Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences 2450: ix + 131 pp.
- Peapornpisal, Y. et coll. 1999. Water Quality and Phytoplankton in the Mae Kuang Udomtara Reservoir, Chiang Mai, Thailand. Visité le 25 juillet 2007 [www.science.cmu.ac.th/josci2.html](http://www.science.cmu.ac.th/josci2.html)
- Peapornpisal, Y. 2006. Diversity, phylogenetic criteria and cyanotoxins of toxic blue-green algae in Thailand. Rapport préparé dans le cadre de la 10<sup>e</sup> Technical Conference du BRT, 8-11 octobre 2006, Marinetime Park and Spa Resort, Krabi Province.
- Purcell, J. E., S. Uye, et W. T. Lo. 2007. Anthropogenic causes of jellyfish blooms and their direct consequences for humans: a review. *Marine Ecology Progress Series* 350:153-174.
- Rabalais, N. N. 2007. Dead zone size near top end. Communiqué de presse, 28 juillet 2007. Louisiana Universities Marine Consortium (LUMCON).
- Rabalais, N. N., R. E. Turner, et W. J. Wiseman. 2002. Gulf of Mexico hypoxia, aka "the dead zone". *Annual Review of Ecology and Systematics* 33:235-263.
- Rabalais, N. N., R. E. Turner, B. K. Sen Gupta, D. F. Boesch, P. Chapman, et M. C. Murrell. 2007. Hypoxia in the northern Gulf of Mexico: Does the science support the Plan to Reduce, Mitigate, and Control Hypoxia? *Estuaries and Coasts* 30:753-772.
- Raloff, J. 2004. Limiting Dead Zones. How to curb river pollution and save the Gulf of Mexico. *Science News* 165:378.
- Relox, J. R., et F. F. A. Bajarias. 2003. Harmful algal blooms (HABs) in the Philippines. Atelier sur le suivi des marées rouges dans les eaux littorales asiatiques, Université de Tokyo, Japon.
- Robinson SMC, Auffrey LM, Barbeau MA. Far-field impacts of eutrophication on the intertidal zone in the Bay of Fundy with emphasis on the softshell clam, *Mya arenaria*. Berlin: Springer; 2005. p. 253–74.
- Schindler, D., P. Dillon, et H. Schreier. 2006. A review of anthropogenic sources of nitrogen and their effects on Canadian aquatic ecosystems. *Biogeochemistry* 79:25-44.
- SEPA 2008. [http://english.zhb.gov.cn/zwxx/hjyw/200610/t20061023\\_94978.htm](http://english.zhb.gov.cn/zwxx/hjyw/200610/t20061023_94978.htm)
- Singhasaneh, P. 1995. Weather Forecast and Plankton Bloom Detection using Oceanographic Buoy in the Gulf of Thailand. GISdevelopment.net, AARS, ACRS 1995, Water/Marine Resources.
- Sombrito, E. Z., A. d. Bulos, E. J. Sta Maria, M. C. V. Honrado, R. V. Azanza, et E. F. Furio. 2004. Application of 210Pb-derived sedimentation rates and dinoflagellate cyst analyses in understanding Pyrodinium bahamense harmful algal blooms in Manila Bay and Malampaya Sound, Philippines. *Journal of Environmental Radioactivity* 76:177-194.
- Strain PM, Hargrave BT. 2005. Salmon aquaculture, nutrient fluxes and ecosystem processes in southwestern New Brunswick. Berlin: Springer; 2005. p. 29–58.
- Strain PM. 2005. Eutrophication impacts of marine finfish aquaculture. DFO 921 Can Sci Advis Sec Res Doc 2005/034; 2005. ii + 37 pp.
- Tang, D., B. Di, G. Wei, I. H. Ni, I. Oh, et S. Wang. 2006. Spatial, seasonal and species variations of harmful algal blooms in the South Yellow Sea and East China Sea. *Hydrobiologia* 568:245-253.
- PNUE et WHRC. 2007. Reactive Nitrogen in the Environment: Too much or Too Little of a Good Thing. Paris.
- PNUE. 2006. Further Rise in Number of Marine 'Dead Zones'.
- PNUE/GPA. 2006. The State of the Marine Environment: Trends and processes. PNUE/GPA, La Haye.
- Wang, S., D. Tang, F. He, Y. Fukuyo, et R. Azanza. 2008. Occurrences of harmful algal blooms (HABs) associated with ocean environments in the South China Sea. *Hydrobiologia* 596:79-93.
- Watmough, S., J. Aherne, C. Alewell, P. Arp, S. Bailey, T. Clair, P. Dillon, L. Duchesne, C. Eimers, I. Fernandez, N. Foster, T. Larssen, E. Miller, M. Mitchell, et S. Page. 2005. Sulphate, Nitrogen and Base Cation Budgets at 21 Forested Catchments in Canada, the United States and Europe. *Environmental Monitoring and Assessment* 109:1-36.



Le ruissellement des engrais est une source importante d'apport en nutriments dans plusieurs secteurs eutrophiques. Par exemple, 67 % de l'apport en azote dans le Mississippi, un fleuve qui se jette dans le golfe du Mexique, provient du ruissellement des engrais

# GREENPEACE

Greenpeace International  
Ottho Heldringstraat 5  
1066 AZ Amsterdam  
The Netherlands

Greenpeace Canada  
454, avenue Laurier Est  
Montréal (Québec)  
H2J 1E7  
Tél. : 1-800-320-7183  
www.greenpeace.ca

Greenpeace France  
22, rue des Rasselins  
75020  
Paris, France  
Tél. : 01-44-64-02-02

Greenpeace Suisse  
Bureau francophone  
Case postale 1558  
1211 Genève 1  
Tél. : 022/731.02.09

Greenpeace Belgique  
159, chaussée de Haecht  
1030  
Bruxelles, Belgique  
Tél. : 00 32 (0) 2 274.02.00  
Télec. : 00 32 (0) 2 274.02.30

[www.greenpeace.org](http://www.greenpeace.org)

Greenpeace est une organisation indépendante vouée à la protection de l'environnement. Nous organisons des campagnes de sensibilisation créatives, parfois axées sur la confrontation, mais toujours non violentes. Nous faisons la promotion de solutions efficaces et novatrices pour faire de notre planète un endroit plus vert et plus pacifique.

Fondée en 1971 au Canada, Greenpeace est maintenant la plus importante organisation écologiste financée par ses membres au monde. Greenpeace est présente dans 38 pays et compte plus de 2,8 millions de membres à l'échelle mondiale.

Imprimé sur papier fait de fibres recyclées post-consommation à 100%, sans chlore.

