

LA POLLUTION DES EAUX CONTINENTALES ET OCÉANIQUES

Le problème de la pollution des eaux représente sans aucun doute un des aspects les plus inquiétants de la dégradation du milieu naturel par la civilisation contemporaine. Si, à de rares exceptions près, l'ensemble des phénomènes de pollution constituent une menace potentielle susceptible d'entraver à plus ou moins brève échéance l'activité humaine, la contamination des eaux continentales et océaniques est un problème actuel. La crise de l'eau sévit déjà, elle affecte aussi bien les pays industrialisés et les mers qui les entourent que bien des régions du tiers monde à climat aride où la production agricole voit son expansion limitée par le manque d'eau.

Les mécanismes et les effets de la pollution des eaux figurent paradoxalement parmi les mieux connus de toutes les nuisances. La nature des agents polluants, leur mode d'action biologique ont donné lieu à de très nombreux travaux. La recherche de méthodes efficaces a conduit à des solutions satisfaisantes dans la plupart des cas, aussi bien sur le plan technique qu'économique. Cependant, le sujet est encore plus compliqué que celui de la pollution atmosphérique dans la mesure où de très nombreuses substances solides peuvent se dissoudre dans l'eau ou être mises en suspension et entraînées fort loin des zones où elles ont été émises. Par suite de cette homogénéité du milieu aquatique, les contaminants introduits dans les eaux vont exercer leur action sur tous les organismes situés en aval et parfois même en mer dans les zones littorales et pélagiques.

Un autre problème spécifique de la pollution des eaux réside dans leur relative pauvreté en oxygène dissous. Alors que les atmosphères les plus polluées renferment, à de rares exceptions près, une concentration en oxygène de valeur quasiment identique à la normale, il en va tout autrement de l'eau.

Quantité d'oxygène dissous à saturation dans un litre d'eau sous la pression normale

Dans l'eau de mer baltique à 20‰ de ClNa en cm ³ d'O ₂ par litre	Dans l'eau douce en cm ³ /l	en mg/l	Température en °C
7,97	10,244	14,16	0
7,07	8,979	12,37	5
6,35	7,96	10,92	10
5,79	7,15	9,76	15
5,31	6,50	8,84	20
4,86	5,95	8,11	25
4,46	5,48	7,63	30

Il apparaît que les quantités d'oxygène dissous dans l'eau sont assez faibles aux températures ordinaires. Fait important, le taux d'oxygène décroît avec la température, et il est beaucoup plus faible en mer qu'en eau douce à température égale.

Ce sont les mers froides qui présentent par ailleurs les plus fortes oxygénations. On constate d'autre part une décroissance du taux d'oxygène dissous jusqu'à une certaine profondeur en milieu océanique. La mer Noire constitue un cas extrême : elle renferme des eaux entièrement dépourvues d'oxygène à partir de 200 mètres de profondeur. L'oxygène constitue en définitive un facteur limitant pour la plupart des organismes, tant dans les eaux douces qu'océaniques.

De cette relative rareté de l'oxygène en milieu aquatique découlent deux importants corollaires

1- les animaux dulçaquicoles et marins ont besoin, pour respirer, de réaliser une circulation branchiale extrêmement intense qui assure le contact des branchies avec les énormes volumes d'eau nécessaires afin d'en extraire assez d'oxygène. Ceci accroît d'autant les risques d'absorption de quantités mortelles de tel ou tel polluant chimique ;

2- les animaux aquatiques peuvent manquer d'oxygène si pour une raison quelconque, naturelle ou artificielle, la température de l'eau s'élève de façon trop importante. C'est par exemple le cas pendant la période estivale, où les fortes températures ambiantes se conjuguent au faible débit des fleuves pour faire décroître le taux d'oxygène dissous dans leurs eaux à l'étiage.

Un dernier caractère fondamental, spécifique du milieu aquatique, réside dans les faibles fluctuations thermiques qu'il présente au cours du cycle annuel et a fortiori pendant une période de plus courte durée.

En effet, l'eau possède un ensemble de propriétés physiques qui concourent à minimiser les changements de température, forte chaleur spécifique, fortes chaleurs latentes de fusion et d'évaporation, maximum de densité à 4°C.

Aussi, à l'opposé des habitats terrestres où l'air subit des variations thermiques de très forte amplitude au cours d'une même journée, le milieu aquatique ne présente que de faibles fluctuations saisonnières de température. Cependant, la température constitue un facteur limitant dans les eaux continentales ou océaniques, car la plupart des organismes qui y vivent sont sténothermes, c'est-à-dire possèdent une très faible tolérance aux fluctuations thermiques. Aussi, de faibles changements de température peuvent exercer une influence catastrophique sur les biocœnoses aquatiques. En ce sens, la pollution thermique due au rejet d'eaux chaudes, produites par les centrales électriques, dans les rivières (**caléfaction** = terme utilisé pour désigner la pollution thermique) constitue un problème d'environnement des plus préoccupants à l'heure actuelle.

NATURE ET IMPORTANCE DE LA POLLUTION DES EAUX

Au cours des années 60, la pollution des eaux, tant continentales qu'océaniques, s'est accrue à un rythme inquiétant. Les « progrès » de cette pollution reflètent fidèlement ceux de la croissance industrielle. L'histoire de la Grande-Bretagne est riche d'exemples à cet égard. Au début du XIXe siècle, la Tamise était un fleuve propre et certains écrits précisent que l'on pouvait y capturer sans peine des saumons. Elle était déjà devenue un égout à ciel ouvert au milieu de ce même siècle.

On ne peut s'étonner, dans ces conditions, de la pollution permanente de tous les grands bassins fluviaux. Tel est le cas de toutes les rivières.

Aux Etats-Unis, la situation est catastrophique sur la côte Est, mais elle présente une certaine gravité dans bien d'autres régions. Le cas des Grands Lacs, en particulier ceux de l'Erié et de l'Ontario, mérite une mention spéciale. On estime qu'ils sont de nos jours dans un état de pollution irréversible à l'échelle humaine. Il faudrait un demi-millénaire pour qu'ils retrouvent un état satisfaisant si l'on cessait immédiatement tout rejet d'effluents !

Le rapport de la Commission internationale d'étude des Grands Lacs, publié en 1971, a révélé que le lac Erié recevait chaque année 36 millions de tonnes de matières solides, 4 millions de tonnes de chlorures, 27000 tonnes de phosphore et 160000 tonnes de produits nitrés ! De plus, la rivière Niagara et quelques cours d'eau de moindre importance, rejettent dans le lac Ontario quelque 47×10^6 tonnes/an de matières solides, 6 millions de tonnes de chlorures, 12 000 tonnes de phosphore et 146 000 tonnes de produits nitrés !

De façon générale, la situation est si grave aux Etats-Unis que le gouvernement a dû prendre de sévères mesures répressives et appliquer des sanctions rigoureuses aux industriels fautifs : des amendes pouvant s'élever à 50 000 dollars par jour sont prévues par la loi !

En U.R.S.S., on estime que 360000 km de cours d'eau sont pollués. La forte contamination de la Volga par les agglomérations et les industries riveraines s'est traduite par une considérable diminution du stock d'esturgeons, donc de la production de caviar (Abelson, 1970). La raréfaction de ces poissons a aussi été favorisée par l'importante pollution de la mer Caspienne. Celle-ci résulte des diverses activités pétrolières : forages "off shore" qui rejettent à la mer leurs eaux usées contaminées, nettoyage des soutes des pétroliers naviguant sur cette mer, raffineries déversant leurs effluents dans celle-ci.

La pollution biologique des eaux

L'immense majorité des substances polluantes, qu'elles soient gazeuses, liquides ou solides, sont susceptibles de contaminer l'hydrosphère. L'étendue de la contamination est liée à leur degré de solubilité. Cependant, l'expérience révèle que des substances aussi peu

solubles dans l'eau que les hydrocarbures liquides ou les insecticides organochlorés peuvent s'insérer dans les biocœnosés limniques ou marines et y causer de multiples désordres.

On peut distinguer trois catégories parmi les divers polluants des eaux ; celle des agents biologiques de pollution (microorganismes et matières organiques fermentescibles), celle des agents chimiques (diverses substances toxiques ou modifiant des facteurs écologiques en milieu aquatique) et celle des agents physiques de pollution (caléfaction, radioactivité).

Elle résulte du rejet dans les eaux continentales ou littorales d'une grande variété de substances organiques fermentescibles. Celles-ci peuvent être d'origines diverses : effluents urbains ou industriels renfermant des débris ménagers, des matières fécales, des lessives de sucreries, de papeteries, etc.

La pollution biologique des eaux se traduit par une forte contamination bactériologique. Elle soulève dans bien des cas de redoutables problèmes d'hygiène publique qui ne sont pas limités aux seuls pays du tiers monde.

Cette extension incessante de la pollution micro biologique des eaux continentales et littorales a pour conséquence une recrudescence d'affections telles que les colibacilloses ou les hépatites virales, dont la fréquence s'accroît avec régularité dans les nations industrialisées. L'actuelle extension de la pandémie cholérique montre aussi les redoutables problèmes épidémiologiques qui peuvent résulter de cette contamination biologique des eaux.

Bien d'autres graves affections pathogènes sont favorisées par la pollution biologique des eaux. C'est le cas par exemple de la typhoïde, des dysenteries et des virus entériques. On ignore souvent qu'un des vaccins anti-poliomyélitiques a été préparé à partir d'une souche de ce virus, isolée de l'eau alimentaire d'une grande ville américaine (Ternisien, 1968).

L'utilisation des cours d'eau comme moyen de dilution des effluents urbains présente donc de graves conséquences pour l'hygiène publique. Il semble que la pollution par des matières organiques permette à de nombreuses espèces de germes pathogènes de se multiplier dans des proportions incommensurables par rapport à ce qu'ils auraient pu faire dans des eaux propres.

Faut-il rappeler que les eaux usées des abattoirs rejettent plusieurs centaines de millions de germes aérobies et de germes anaérobies par cm^3 , dont plusieurs espèces pathogènes. Même le rejet des eaux d'égouts urbains en mer présente de sérieux risques bactériologiques pour les baigneurs et a fortiori pour les consommateurs de coquillages. Le fameux pouvoir antibiotique de l'eau de mer, souvent évoqué pour justifier des comportements inadmissibles et irresponsables de collectivités locales ou de pollueurs privés, ne joue que dans certaines limites. Les plages très fréquentées de la côte

méditerranéenne sont polluées sur une grande étendue vers le large, par la persistance de divers germes de contamination fécale rejetés en mer par les émissaires des agglomérations riveraines.

Ce n'est pas la construction à grand frais d'un émissaire marin qui résoudra le problème. N'a-t-on pas trouvé à Los Angeles des colibacilles vivants à 14 km du rivage ?

Quelles sont les causes de contamination des eaux par des matières organiques ? Outre les rejets des égouts urbains, il faut mentionner ceux de diverses industries alimentaires hautement polluantes, abattoirs, laiteries, fromageries, sucreries, etc.

L'industrie du papier occupe aussi une place de choix dans la pollution organique des eaux. En effet, elle y déverse des lessives riches en glucides, donc hautement fermentescibles. Une papeterie "moyenne" pollue les eaux comme une ville de 500000 habitants !.

La charge de pollution organique d'une eau s'évalue par la **DBO₅** « *Demande Biologique d'Oxygène en 5 jours* ». Celle-ci rend compte de la quantité d'oxygène nécessaire aux microorganismes décomposeurs pour dégrader, minéraliser entièrement, la totalité des matières organiques présentes dans un litre d'eau polluée.

Dans les eaux d'égout des villes européennes, on évalue en moyenne à 190 g/habitant la quantité de matières dissoutes ou en suspension rejetée chaque jour dans les fleuves riverains. Sur ce total, on compte 50 g de matières organiques fermentescibles, qui nécessitent pour leur décomposition une DBO₅ par habitant de 54 g/jour en moyenne.

A Paris, la DBO₅ est de 70 g/j/habitant, elle atteint même 84 g/j/h en certaines agglomérations industrielles !

En France, une eau n'est considérée comme potable que si sa charge organique correspond à une DBO₅ inférieure à 5 mg/l, sa teneur en oxygène dissous excède 4 mg/l et si sa charge micro biologique est inférieure à 50 germes coliformes par cm³. Elle doit aussi être exempte de résidus toxiques.

Pollution chimique des eaux

La pollution minérale des eaux résulte de la libération dans ces dernières de divers composés tels les nitrates, les phosphates et autres sels utilisés en agriculture, divers résidus rejetés par la métallurgie et d'autres activités.

Plomb

Le plomb utilisé comme adjuvant dans les carburants des moteurs d'automobiles assure la contamination globale de l'hydrosphère. Eu égard à l'immensité des surfaces océaniques, il pourrait paraître surprenant que l'on puisse détecter en pleine mer des traces de contamination par le plomb. L'expérience confirme pourtant ce fait. On estime à 25 000

tonnes l'apport annuel de plomb à l'océan, résultant de l'usage des alkyl-plomb comme anti-détonant.

Chov et Patterson (1966) ont montré que la concentration moyenne en plomb des eaux de l'Atlantique Nord s'est élevée de 0,01 à 0,07 mg/l au cours des 45 dernières années, à la suite de cet usage du plomb comme adjuvant dans les essences. Ces auteurs ont aussi observé une distribution verticale anormale de ce métal dans l'océan, qui ne peut être attribuée qu'à la pollution. Alors que le taux de dilution du baryum, un élément lourd voisin du plomb, croît avec la profondeur, ils observent l'inverse avec ce dernier. Ce sont les eaux du Pacifique, au large de San Diego, et celles de la Méditerranée, au voisinage de zones industrialisées, qui présentent les plus fortes concentrations en plomb, alors que les plus faibles taux dans l'eau de mer ont été relevés dans les parages des Bermudes. Il convient de souligner que l'on ignore tout actuellement des effets du plomb sur les biocœnoses marines, et en particulier sur les chaînes trophiques de prédateurs !

Outre le plomb, la décharge par diverses industries de cuivre, de zinc, de chrome, de nickel, de cadmium, éléments très toxiques pour les organismes limniques ou marins, constitue une grave menace pour l'hydrosphère. Il est aussi surprenant qu'un si petit nombre de travaux aient été consacrés au devenir du cuivre dans les eaux continentales, alors que les agricultures européennes et américaines utilisent chaque année des tonnages considérables de ce métal.

Mercurure

La pollution de l'hydrosphère par le mercure mérite une mention particulière à cause de la croissance de l'usage de ce métal et la haute toxicité de certains de ses dérivés.

Elle s'est rendue tristement célèbre en 1956, lors de « l'accident » de la baie de Minamata au Japon, qui provoqua la mort de plusieurs centaines de personnes et en empoisonna gravement des milliers d'autres. Cette intoxication résultait d'une forte contamination des poissons et autres animaux marins, dont se nourrissaient les habitants de la baie, par les résidus mercuriels rejetés dans la mer avec les effluents d'une usine d'acétaldéhyde qui utilisait des sels de mercure comme catalyseurs.

La production mondiale de mercure dépasse les 10000 tonnes par an (Goldwater, 1971). A cela il faut ajouter 3000 tonnes de ce métal rejetées chaque année dans l'atmosphère par suite de l'utilisation des combustibles fossiles (Jeensu, 1971). Tout au plus 20% sont recyclés dans l'industrie, le reste est répandu dans l'environnement. Aux Etats-Unis, les diverses utilisations du mercure se répartissent de la façon suivante :

- 33% sert dans l'électrochimie de la soude et du chlore et pourrait être en grande partie recyclé, mais est rejeté à l'eau.

- 41% sert à l'électrotechnique, la métrologie et à divers usages de laboratoire.

Le transfert de mercure des continents vers l'océan via les eaux courantes est estimé à 5000 tonnes par an (Golberg, 1970).

De très nombreux Sels minéraux sont rejetés dans les eaux continentales ou marines par l'industrie et l'agriculture (engrais chimiques). Certains, comme les cyanures utilisés en galvanoplastie, sont extrêmement toxiques, de même que divers arsenicaux. Les liqueurs de papeteries riches en sulfites constituent aussi de redoutables contaminants. Outre leurs propriétés réductrices, ces substances présentent une action biocide qui n'est pas négligeable et s'ajoute à la déplétion du taux d'oxygène dissous.

Nitrates

Le problème de la pollution des eaux par les nitrates et les phosphates employés comme engrais chimiques en agriculture est aussi très préoccupant de nos jours. Commoner a étudié les variations des quantités de nitrates rejetées au cours des 25 dernières années par les diverses sources susceptibles de contaminer l'environnement avec ces sels minéraux. Si les taux contenus dans les effluents urbains n'ont crû que de 70%, les quantités rejetées par les moteurs à combustion interne se sont élevées de 300% tandis que l'usage des engrais azotés s'élevait de 1400 % pendant la même période.

Dans le cas des Etats-Unis, les experts estiment que les quantités totales de nitrates produites par les combustions et l'industrie des engrais, et dispersées dans le milieu naturel, s'élèvent à 10 millions de tonnes par an, chiffre considéré comme supérieur à celui résultant de la synthèse de nitrates par les divers processus bio géochimiques normaux qui contrôlent le cycle de l'azote dans l'ensemble du territoire fédéral.

Commoner (1970) a montré que la quantité de nitrates charriés par une rivière de l'Illinois est en corrélation directe avec la période où se fait l'apport d'engrais chimiques aux cultures, si l'on tient compte du décalage correspondant au temps nécessaire pour que s'effectue la percolation. Ce même auteur a aussi mis en évidence une bonne corrélation entre l'augmentation de la consommation des nitrates par la céréaliculture américaine et celle de la contamination des eaux superficielles par ces substances.

Les taux de pollution des eaux de boisson par les nitrates atteignent de nos jours des niveaux préoccupants en bien des régions d'Amérique du Nord et de la C.E.E. où le taux maximum de 10 ppm admis dans l'eau potable est assez souvent dépassé.

Phosphates

La contamination de l'eau par les phosphates est aussi des plus sérieuses dans les pays industrialisés. Nous savons que le phosphore est souvent le facteur limitant en milieu limnique ou océanique par suite de la faiblesse du taux de phosphates dissous.

La civilisation moderne a accru la vitesse de circulation du phosphore. En effet l'agriculture utilise des tonnages considérables de divers phosphates. Ces sels constituent aussi des adjuvants importants des détergents ménagers (Polyphosphates sodiques). Aux Etats-Unis, il s'est vendu en 1966 près de 2 milliards de kg de lessives synthétiques renfermant au total plus d'un million de tonnes de phosphates, qui ont été évidemment rejetés dans les eaux superficielles (Brenner, 1969). Les effluents urbains renferment en moyenne de 0,75 à 2 kg de phosphore minéral par an et par habitant (Hasler, 1970).

Les eaux renferment à la sortie d'une station d'épuration en moyenne 8mg de phosphate/litre. Celui-ci provient de la minéralisation des matières organiques. Il faut ajouter à cette quantité les phosphates contenus dans les détergents biodégradables. En moyenne, le traitement secondaire des eaux dans une station d'épuration enlève 80% de phosphore. Aller au-delà n'est pas envisageable dans les données économiques actuelles. Ceci explique la persistance du risque d'eutrophisation des lacs par les rejets d'effluents urbains, même après passage en station d'épuration.

Hydrocarbures

La pollution des eaux continentales et océaniques par les hydrocarbures constitue la principale cause de contamination de l'hydrosphère par la civilisation moderne. L'existence de régions marines, dans lesquelles les pétroliers peuvent légalement rejeter le contenu de leurs soutes après nettoyage (dégazage), constitue un véritable défi aux enseignements de l'océanographie. Le problème est de nos jours particulièrement préoccupant dans les régions d'estuaires fort poissonneuses, dont les produits des pêcheries ne peuvent plus être consommés à cause du goût. En outre, l'équilibre écologique des mers fermées paraît de plus en plus compromis par cet agent polluant.

La pollution par les hydrocarbures résulte de divers phénomènes liés à l'extraction du pétrole, à son transport maritime et en aval à l'utilisation des produits finis : carburants et lubrifiants.

La principale source de contamination du milieu océanique résulte du transport du pétrole, et, dans une moindre mesure, des accidents survenus aux puits sous-marins dont la fréquence ne pourra que s'accroître au fur et à mesure qu'augmente le nombre de forages "offshore". Actuellement, plus d'un milliard de tonnes de pétrole sont chaque année transportées par voie maritime. Une fraction de cette masse, estimée au moins à 0,1% et souvent à 0,5%, est rejetée dans l'océan de façon plus ou moins légale : il s'agit d'une cause de pollution non pas accidentelle mais volontaire. Elle résulte de la pratique du dégazage en mer. Après décharge de la cargaison, les citernes sont nettoyées avec de l'eau de mer et les soutes ballastées avec celle-ci pour conférer une plus grande stabilité au navire allégé. Cette eau souillée de pétrole est ensuite rejetée en haute mer dans des zones délimitées par des

conventions internationales mais souvent aussi de façon frauduleuse près des côtes, à l'encontre de ces lois. De la sorte, 300000 tonnes de pétrole par an ont été légalement déversées en Méditerranée au cours de la dernière décennie dans deux zones de dégazage autorisées situées l'une au sud-ouest de Chypre, l'autre entre l'Italie et la Libye. Mais en outre les côtes de cette mer, de même que celles de la Manche et de la mer du Nord, sont systématiquement contaminées par les dégazages illicites et les délestages des pétroliers. Une véritable marée noire est lâchée chaque jour par les quelque trois cents navires qui franchissent le Pas-de-Calais en empruntant la voie de navigation qui longe les côtes françaises. La technique utilisée consiste soit à opérer de nuit, soit à rejeter les eaux souillées dans le sillage du navire, ce qui rend l'identification impossible aux avions de surveillance. Des centaines de tonnes de pétrole sont donc déversées dans la mer à chaque voyage.

Outre le transport proprement dit du pétrole, une autre source de contamination de l'océan, accidentelle celle-là, provient des collisions entre pétroliers ou de leur échouage. Quelque cinq cents sinistres de ce type furent recensés entre 1960 et 1970. On imagine sans peine l'ampleur des risques inhérents à la navigation de "super-tankers" qui jaugent quelque 400000 tonnes de port en lourd. Ces navires ne peuvent franchir qu'un nombre limité de détroits et n'accoster qu'en quelques installations portuaires dans l'ensemble du monde.

Les accidents survenus aux puits de pétrole "offshore" peuvent aussi gravement contaminer l'océan. Au moment des opérations de forage, de tubage, à celui de la pose de la tête du puits et au cours de son exploitation existent de graves risques de pollution (Grenon, 1971). Le premier grave sinistre survenu à un forage sous-marin fut celui de Santa Barbara en Californie. La fissure de la tête du puits libéra dans la mer des dizaines de milliers de tonnes de pétrole au total. Aux environs de Los Angeles, la dérive d'une immense flaque de pétrole couvrant 1800 km² de surface océanique causa de graves dommages à tout le littoral, en particulier à des réserves ornithologiques.

Les eaux continentales sont aussi fortement contaminées, selon plusieurs modalités, par les hydrocarbures. Les effluents des raffineries, les vidanges "sauvages" de moteurs d'automobiles, les pertes d'huile des carters, celles d'essence ou de gas-oil au moment du remplissage des réservoirs, constituent autant de sources de contamination des cours d'eau et des nappes phréatiques. Comme l'essence s'infiltré dans le sol à une vitesse sept fois supérieure à celle de l'eau et qu'elle communique un goût détestable à l'eau de boisson à des concentrations aussi faibles que 1 ppb, cette pollution peut rendre impropre à la consommation des réserves considérables d'eaux souterraines. Par ailleurs tous les fleuves des pays industrialisés charrient des hydrocarbures

POLLUTION PAR LES SUBSTANCES ORGANIQUES DE SYNTHÈSE

Les détergers

Les détergers synthétiques se sont répandus dans les usages domestiques à partir de 1950. Ils renferment une substance active ; le détergent, doué de propriétés surfactantes, tensioactives, dilué dans une charge de tripolyphosphate de soude ou de pyrophosphate tétrasodique. En outre, ils contiennent des ingrédients mineurs (parfums, agents "blanchissants", persulfates, perborates), dont la toxicité n'est pas négligeable pour les organismes aquatiques.

Les plus employés des surfactants sont des détergers anioniques, qui sont les moins toxiques. Les substances diminuent la tensioactivité et la viscosité de l'eau. On les a substitués aux savons car ils moussent facilement et émulsionnent sans difficulté les graisses. Ils sont efficaces même avec des eaux "dures", à la différence du savon. Les détergers anioniques sont des alkyl benzène sulfonates. Pendant longtemps, le plus utilisé d'entre eux fut le tétrapropylène benzène sulfonate (TBS), non biodégradable.

On leur a substitué depuis les alkyl sulfonates linéaires ou LAS, biodégradables à 99 %. Notons cependant que la loi française autorise encore les produits non biodégradables, bien qu'elle impose depuis 1971, 80% de biodégradabilité en trois semaines pour tout détergent commercialisé. Malheureusement, les 20% restants représentent en valeur absolue un taux tout à fait excessif par suite de ses effets écologiques.

En Grande-Bretagne le citoyen est beaucoup plus conscient, que chez les français, de ses responsabilités dans le domaine de la protection de l'environnement, les fabricants ont pris d'eux-mêmes et dès 1965 la décision de ne produire que des détergers biodégradables. Aussi, le taux moyen de ces substances dans la Tamise est passé de 0,35mg/l pendant la période 1954-65 à 0,06mg/l pendant les six premiers mois de 1966 (selon Brenner, 1969).

Les pesticides

La production et l'emploi des produits antiparasitaires constituent une grave menace pour l'hydrosphère. La fabrication industrielle des pesticides représente une importante source de contamination des eaux continentales et marines. Elle a pour origine le rejet dans celles-ci des résidus de synthèse de ces substances par les usines implantées au bord des fleuves ou des côtes. Les exemples de pollution survenue à la suite de pratiques aussi aberrantes ne se comptent plus.

Ainsi les eaux souterraines et les rivières sont dorénavant exposées en permanence au déversement des déchets industriels provenant de la fabrication des pesticides. En outre,

le stockage de masses énormes de tels résidus provoquera par le jeu des infiltrations et pendant des siècles une contamination des nappes phréatiques.

Une autre source majeure de pollution des eaux continentales et littorales a pour origine les traitements insecticides effectués par voie aérienne sur d'immenses surfaces. Ces épandages massifs, souvent entrepris dans le cadre de diverses campagnes "d'éradication", sont exécutés au-dessus des lacs, marécages et étangs (démoustication, par exemple) ou sur des zones forestières.

Le traitement des forêts et des cultures fixe dans les couches superficielles du sol des particules de toxique qui passent dans la nappe phréatique et sont entraînées dans les cours d'eau par l'érosion pluviale.

Mais en outre, une fraction importante des matières actives dispersées sont volatilisées dans l'atmosphère car le vent entraîne dans l'air des particules solides adsorbant les pesticides et les brouillards produits par les machines de pulvérisation, même par temps calme, passent aussi dans l'atmosphère. A cela s'ajoutent les phénomènes de codistillation. Pris dans les courants stratosphériques, les pesticides sont distribués à une échelle globale et les précipitations les font retomber sur les terres émergées et les océans, où les courants marins achèvent leur répartition dans l'ensemble de l'hydrosphère. Cependant, les fleuves interviennent pour une part prépondérante dans la contamination des eaux marines du plateau continental de l'hémisphère Nord.

L'existence de résidus organochlorés dans les organismes océaniques est un phénomène assez étonnant car ils sont pratiquement insolubles dans l'eau et y demeurent en suspension, adsorbés par la matière organique. Il semble que leur répartition homogène à la surface des mers soit un effet secondaire de leur pollution par le pétrole. A la suite de leur forte solubilité dans les hydrocarbures, les pesticides s'émulsionneraient dans ces derniers, ce qui favoriserait leur dispersion et leur transport par les courants marins dans des zones très éloignées.

Les écosystèmes limniques sont a fortiori pollués de façon sans cesse accrue par les pesticides.

Aux Etats-Unis, les principaux cours d'eaux du pays et de nombreuses nappes phréatiques renfermaient, au début des années 60, des traces significatives de divers insecticides organochlorés et parfois de parathion et d'herbicides.

L'usage d'insecticides organochlorés et dans une moindre mesure du parathion dans les luzernières, les vignobles et les rizières, se traduit par une pollution significative des canaux du Vaccarès, et des étangs inférieurs. La présence du PCB (polychlorobiphényles) est due à l'emploi en riziculture d'une préparation de DDT et d'HCH en mélange, synergisée par du penta et de l'octochlorobiphényle.

Polychlorobiphényles (PCB)

Ces substances sont des agents plastifiants de structure moléculaire proche de celle du DDT. Les PCB sont très utilisés dans l'industrie des matières plastiques, comme matériaux d'imprégnation et d'isolement des câblages électriques, comme adjuvants des huiles de coupe dans l'industrie métallurgique, voire comme synergistes d'insecticides chlorés.

Ils sont dispersés dans la biosphère avec les débris renfermant des matières plastiques et surtout lors des combustions incomplètes de ces derniers sur les décharges d'ordures ou dans les incinérateurs.

La pollution des eaux marines et continentales par les PCB est aussi importante et tout au moins aussi étendue que celle provoquée par les insecticides organochlorés.

Ainsi une zone lacustre du Wisconsin, éloignée de tout centre industriel, a révélé une sérieuse pollution de ses biocénoses par ces substances. Des pélicans (*Pelecanus erythrorhynchos*) et des cormorans (*Phalacrocorax auritus*) qui nichaient dans ces marécages ont montré une sensible atténuation de leur potentiel biotique à la suite de la contamination de leur chaîne trophique par les PCB (Anderson, and al, 1968).

L'océan mondial est systématiquement pollué, même dans ses régions les plus reculées, par les polychlorobiphényles ainsi qu'en atteste l'analyse de divers procellariiformes, oiseaux pélagiques qui passent la majeure partie de leur existence en haute mer et ne viennent au sol qu'au moment de la reproduction. Des travaux suédois ont mis en évidence la contamination systématique de nombreux vertébrés marins de la Baltique par les PCB.

Toutefois, malgré l'importance de cette pollution de l'océan mondial par les PCB, celle-ci paraît dans la plupart des cas inférieure à celle qui résulte de l'usage du DDT et autres insecticides chlorés.

Autres substances organiques de synthèse

La civilisation technologique rejette, dans les eaux de façon directe ou accidentelle, d'innombrables substances organiques de synthèse. Les matières plastiques constituent de nos jours un contaminant très répandu dans le milieu marin, on en a découvert des fragments entraînés par les courants qui dérivait en plein milieu de la mer des Sargasses ou de régions pélagiques encore plus reculées.

Les phénols figurent aussi parmi de redoutables polluants des eaux continentales. Leur toxicité est des plus élevées pour la plupart des organismes aquatiques. Il en est de même pour les crésols et leurs homologues supérieurs.

Enfin, que penser des déversements volontaires dans les océans de résidus renfermant des composés de synthèse très toxiques ou de toute autre substance dont on

veut se débarrasser ? Certes, dans la plupart des cas les matériaux sont enfermés dans des caissons ou des fûts métalliques étanches. Mais qu'advient-il lorsque ces récipients seront corrodés ? L'immersion d'un stock de plusieurs milliers de tonnes d'un gaz de combat, le Sarin, ester phosphorique de toxicité effarante, au fond du golfe du Mexique par l'armée américaine, le 18 août 1970, situe bien l'ampleur du problème.

Altérations physiques de l'hydrosphère

Matériaux insolubles

Les eaux continentales sont de nos jours menacées dans leur intégrité physique. Les marécages, en particulier, ont toujours été considérés par l'homme comme un milieu hostile. Leur surface régresse sans cesse par suite des assèchements et des comblements.

Le rejet de matières solides minérales insolubles peut affecter de façon sensible le milieu limnique. Tel est le cas du déversement des résidus d'exploitation de carrières ou de mines dans les cours d'eau. Les alluvions et les argiles qui peuvent être ainsi rejetés se déposent sur le lit des rivières et constituent une pellicule qui empêche le développement de la couverture biologique naturelle. De plus, ces dépôts ravagent les frayères.

Une mention particulière doit ici être faite d'une forme de pollution des eaux continentales due à la chasse. L'usage de cartouches chargées de projectiles constitués par un alliage de plomb et d'antimoine se traduit par la dispersion d'une quantité considérable de ces derniers dans l'environnement. Dans une seule journée de la saison d'ouverture, si chacun des deux millions de chasseurs français tire une seule cartouche chargée en moyenne de 32 g de plomb, cela correspond à répandre dans la nature quelque 64 tonnes de ce métal. En milieu aquatique, ils s'accumulent au fond des eaux. Leur insolubilité ne provoque pas une contamination significative de celles-ci et ce dépôt de plomb de chasse dans les écosystèmes limniques est inoffensif pour la faune dulçaquicole. En revanche, il s'avère catastrophique pour les Anatidés qui les avalent avec leur nourriture si ce n'est volontairement. En effet, les canards comme bien d'autres oiseaux ont l'habitude d'ingérer de petits cailloux et divers objets durs qui s'accumulent dans leur gésier, et ont pour rôle de faciliter le travail de broyage des aliments, lequel chez les oiseaux, animaux dépourvus de dents, est dévolu à cet organe.

L'accumulation de ces plombs dans le gésier va provoquer à plus ou moins brève échéance une grave intoxication, dénommée saturnisme, fatale aux canards ainsi contaminés. L'étude par radiographie de quelque 35500 individus appartenant à la Station Ornithologique de la Tour du Valat a montré que 40% des cols-verts (*Anas platyrhynchos*) et 5% des sarcelles (*Anas crecca*) étaient atteints de saturnisme (Hovette, 1972). Il s'ensuit une mortalité considérable dans les populations aviennes ainsi contaminées.

CONSÉQUENCES ÉCOLOGIQUES DE LA POLLUTION DES EAUX

Effets de la pollution organique

La pollution organique des eaux agit de façon comparable sur les facteurs abiotiques et biotiques tant en faciès lotiques (eaux courantes) qu'en faciès lentiques (lacs, eaux calmes de façon générale). Cependant, les conséquences écologiques globales de cette pollution présentent des différences notables et il convient d'étudier séparément le problème dans chacune de ces deux grandes catégories d'écosystèmes limniques.

Une caractéristique essentielle des eaux courantes résulte du perpétuel brassage qui assure en première approximation une certaine homogénéité du milieu aussi bien pour les facteurs physiochimiques normaux que pour les polluants. Le problème de la pollution de tels écosystèmes paraît donc a priori plus simple que celui des lacs, baies ou estuaires, milieux beaucoup plus complexes par suite de leur hétérogénéité,

En faciès lotique, le rejet d'un effluent riche en matières organiques va provoquer une perturbation totale de l'écosystème avec apparition de quatre zones qui vont se succéder dans le sens du courant.

Tout d'abord s'observe une zone de dégradation, où les eaux du fleuve et celles de l'effluent se mélangent. Une zone de décomposition active lui fait suite, où champignons et bactéries aérobies puis anaérobies vont se multiplier et décomposer la matière organique introduite dans le cours d'eau. Si tout l'oxygène est consommé, celle-ci deviendra une zone septique dans laquelle se formeront des composés réducteurs. Plus en aval s'observera une zone de restauration, où l'épuration va peu à peu restituer aux eaux leurs caractères initiaux et à laquelle succédera progressivement une zone d'eaux propres.

En définitive, on peut comparer avec Wuhrman (1972) un fleuve à un système de fermentation continue doué d'un pouvoir auto épurateur. Le terme de purification doit ici être pris au sens d'élimination de la matière organique particulaire ou dissoute douée de propriétés polluantes. Les composés chimiques présents dans l'eau ou déposés dans les sédiments constituent d'authentiques facteurs écologiques pour les associations biocénétiques qui se développent à n'importe quel point du cours d'eau.

L'auto épuration induit par conséquent des effets secondaires tels que l'apparition de gradients dans la concentration d'oxygène et d'éléments nutritifs ainsi que des gradients biologiques.

Une véritable pullulation bactérienne se produit dans un effluent pollué par des matières organiques.

A côté des espèces pathogènes qu'il peut contenir, on y observe essentiellement des microorganismes saprophytes : bactéries hétérotrophes et champignons qui décomposent les diverses substances biochimiques en sels minéraux.

L'existence de cette flore microbienne permet la dégradation de tout effluent organique par des bactéries adaptées à sa composition et dont la densité de population ne diminuera vers l'aval qu'à partir du moment où la concentration en éléments nutritifs organiques deviendra trop réduite.

Certaines espèces de bactéries anaérobies vivent dans les eaux sans oxygène ou dans les boues réductrices et produisent du méthane par dégradation de molécules hydrocarbonées de structure simple. Dans les milieux pauvres en oxygène ou dépourvus de celui-ci se rencontrent certaines espèces de Sulfobactériales, comme *Desulfovibrio desulphuricans*, qui réduisent les sulfates en sulfure et produisent de l'hydrogène sulfuré d'odeur caractéristique. Ces microorganismes confèrent aux boues et aux limons une couleur noirâtre, car ils déterminent la formation de sulfure ferreux, noir, par réaction du fer avec l'hydrogène sulfuré.

D'autres bactéries anaérobies ammonifiantes métabolisent les composés azotés et dégagent de l'ammoniac. Certaines espèces bactériennes saprophytiques qui pullulent dans les eaux polluées se rassemblent en colonies de grande taille, d'aspect gélatineux ou filamenteux, visibles à l'œil nu. Parmi celles-ci, les *Sphaerotilus natans*, qui s'agglomèrent en filaments gélatineux. C'est une bactérie hétérotrophe fréquente dans les eaux polluées par des matières organiques glucidiques.

De nombreuses espèces de sulfobactéries anaérobies pullulent aussi dans les eaux chargées de matières organiques. Mais, outre les bactéries, ces dernières renferment aussi une riche flore fongique. Les champignons des eaux septiques sont des phycomycètes ou des ascomycètes.

La prolifération de ces organismes dans la zone de décomposition active provoque des bouleversements dans les conditions écologiques du milieu. Leur action se traduit inéluctablement par une chute brutale de la teneur en oxygène dissous.

La variation du taux d'oxygène dissous en fonction de la distance par rapport au point de déversement, ou en un point donné et en milieu fermé, à partir du moment où s'est produite la pollution, est directement liée à celle de la DBO.

L'activité des décomposeurs va se traduire par l'apparition d'ammoniaque et parfois d'hydrogène sulfuré dans les eaux, ainsi que de phosphates minéraux, terme ultime de la dégradation des nucléotides et autres dérivés phosphorés de nature biochimique.

Quand le taux d'oxygène aura remonté à une valeur convenable pourront intervenir les bactéries nitrifiantes qui convertiront l'ammoniac en nitrates selon la réaction (1)

Les algues disparaissent totalement des eaux désoxygénées par une pollution organique. Cependant, si le taux d'oxygène reste suffisant, on constate que les algues, d'abord réduites en nombre, se mettent à pulluler. La prolifération de ces organismes autotrophes résulte de la libération des nitrates et phosphates par les décomposeurs, à partir

de la matière organique présente dans l'effluent ou que ce dernier renfermait à l'état dissous (détersifs, engrais chimiques). On constate que le maximum de densité de la phytocoénose algale est atteint à quelque distance du point d'émission. Les espèces qui prolifèrent ainsi sont adaptées à des milieux très riches en éléments nutritifs : *Oscillatoria*, *Phormidium* (algues bleues), *Ulothrix* (algue verte), *Euglena* (phytoflagellé). Dans les eaux surchargées en nitrates s'observe souvent une algue verte *Stegeaclanidium tenue*.

Certaines diatomées comme *Gonphonema panulum* et *Nitzschia palea* et des *Melosira* se rencontrent en grande abondance, même dans la zone de décomposition active, avec parfois des espèces des genres *Navicula* et *Surirella*. Une mention particulière doit être faite de l'algue verte *Cladophora glomerata*, très fréquente dans les eaux riches en éléments nutritifs. Cette espèce ne prolifère qu'à partir du moment où un certain degré de minéralisation de la matière organique est déjà atteint. Elle peut y pulluler sous forme de filaments ramifiés qui dépassent deux mètres de longueur et constituent des masses flottantes vert sombre. Celles-ci peuvent s'étendre sur des kilomètres vers l'aval.

Dans la zone de récupération on remarque aussi la présence d'algues vertes du groupe des *Spirogyra* et des phytoflagelles coloniaux du genre *Pandorina*.

Lorsque le pouvoir auto épurateur du milieu a achevé son action, les conditions initiales sont restituées et l'on observe une phytocoénose d'eaux propres.

Les zoocoénoses lotiques subissent aussi un complet bouleversement à la suite d'une pollution organique. Aucune espèce de poisson, aucun invertébré d'eaux pures, ne peut survivre dans la "zone septique". On y observe, en revanche, la prolifération d'espèces animales adaptées aux conditions écologiques très particulières qui y règnent : grande richesse en matières organiques fermentescibles et important déficit en oxygène, entre autres facteurs.

Dans les vases qui sédimentent au niveau de la zone de décomposition active prolifèrent des larves d'insectes de régime saprophage, pourvues de longs siphons respiratoires (*Eristalis* et *Psychoda*, par exemple). On remarque aussi dans les vases putrides de petits oligochètes appartenant aux genres *Tubifex* dont la présence est d'une telle constance dans ces milieux qu'on les considère comme des indicateurs biologiques de la pollution organique des eaux. On a dénombré jusqu'à 400 000 individus de ces espèces au mètre carré dans les limons des cours d'eau contaminés. Dans la zone septique des rivières très polluées par des matières fermentescibles s'observent parfois aussi de nombreuses larves de moustiques lesquelles se nourrissent aux dépens des algues microscopiques qui s'y développent.

Lorsque remonte le taux d'oxygène dissous apparaissent dans les vases d'innombrables larves de Diptères *Chironomides* du groupe *Chironomus thummi*.

On rencontre avec beaucoup de régularité, dans la zone à *Cladophora* auxquelles ils sont associés, les *Ase//us aquaticus*, petits crustacés isopodes.

Plus en aval, on entre dans la zone où le pouvoir auto épurateur du milieu a pu rétablir des conditions comparables à celles qui régnaient en amont du point d'émission du polluant. On y retrouve une faune d'eaux propres caractérisée par la présence de larves d'insectes inféodées aux faciès normalement oxygénés : (larves de perlides, de phryganes et d'éphémères, et une faune ichtyologique normale.

Pollution organique en milieu lentique : l'eutrophisation des lacs

Les lacs, les marais, étangs et autres milieux lenticques se caractérisent par de vastes surfaces d'eaux dormantes dont le volume est considérable par rapport à leur vitesse d'écoulement. En conséquence, leur renouvellement et leur oxygénation ne s'effectuent qu'avec lenteur. Cette durée est encore plus longue pour certains grands lacs continentaux. Certains sont même dépourvus d'émissaire, de sorte que leurs eaux ne se renouvellent que par évaporation. Tel est le cas du lac Nakuru au Kenya, du Tchad, des chotts sahariens, etc. et de mers fermées comme la mer d'Aral ou la Caspienne. Leurs eaux tendent progressivement à se surcharger en sels dissous apportés par les affluents.

Les lacs sont inéluctablement appelés à disparaître par comblement à la suite d'apport de matériaux par l'érosion du bassin versant et de phénomènes liés à la multiplication des végétaux et autres organismes de la biocœnose qu'ils hébergent. Ce processus, appelé eutrophisation, résulte d'un accroissement de fertilité des eaux du lac par apport d'éléments nutritifs, en particulier de phosphates et de nitrates qui favorisent la prolifération du phytoplancton et des plantes aquatiques. Peu à peu, ce processus accélère la sédimentation : le lac se rétrécit, se comble et finit par disparaître. Ce processus est très lent dans les conditions naturelles, il s'accomplit à l'échelle des temps géologiques.

Dans la plupart des pays tempérés, les lacs proviennent des époques glaciaires. Ils se sont constitués à la fin du Pléistocène, au moment de la fusion des banquises et de leur retrait vers le Nord. Les jeunes lacs, relativement profonds, sont pauvres en éléments nutritifs. Ils sont dits oligotrophes. Ils ne peuvent héberger qu'une biomasse végétale restreinte et leur productivité est faible.

Tandis que l'érosion amène progressivement aux eaux du lac les sels minéraux indispensables, les sols des terres qui l'entourent se stabilisent par croissance de la végétation ripicole.

Pendant que croît la production primaire des eaux et que la biocœnose lentique se diversifie, l'apport d'éléments nutritifs au lac n'est pas pour autant arrêtée par la stabilisation du bassin versant, mais il s'effectue à un rythme constant. L'écosystème lacustre est alors entré dans une période d'équilibre qui peut durer des dizaines, voire des centaines de

milliers d'années. L'apport de matériaux est entièrement consommé par la production biologique entretenue par une importante biomasse animale et végétale.

Cependant, tout au long de cette période, le lac devient de moins en moins profond par suite de la sédimentation. Dans un lac à maturité en état d'équilibre on remarque, pendant la belle saison, l'apparition d'un thermocline qui sépare deux zones stratifiées, la supérieure constituée par des eaux chaudes (épilimnion), la couche profonde par des eaux froides denses (hypolimnion). Mais peu à peu, la remontée du fond va mettre un terme à cette stratification, de sorte que les eaux profondes vont subir d'importants changements. Il va se produire un accroissement considérable de la surface immergée, sur laquelle pourront se développer les plantes aquatiques. Lorsque la profondeur n'est plus suffisante, la stratification deviendra impossible.

L'agitation des eaux due au vent mélangera les couches et homogénéisera leur température. Il s'ensuivra un accroissement de productivité primaire et une accélération de la colonisation des eaux lacustres par les macrophytes, tandis que la végétation terrestre gagnera sur ses bords. Le lac est alors dit eutrophe.

Enfin, au terme de son évolution, il sera entièrement comblé et se transformera en une étendue marécageuse

Cependant, avant que ne disparaisse la stratification, le lac présentera d'importants changements au niveau de l'hypolimnion. La dégradation de la matière organique, qui s'est accumulée en grande quantité dans les limons benthiques va consommer d'importants volumes d'oxygène dissous. Les eaux profondes peuvent même devenir anaérobies et impropres à toute vie animale. Ceci peut survenir non seulement dans les écosystèmes limniques mais aussi en milieu marin. Ainsi, les eaux d'une mer fermée comme la mer Noire sont entièrement dépourvues d'oxygène à partir de 200 m de profondeur.

On appelle eutrophisation le processus d'enrichissement des eaux lacustres (ou marines) par des sels minéraux. L'homme accélère considérablement l'eutrophisation des eaux de nos jours car il déverse dans les lacs et les mers fermées des quantités considérables de matières organiques fermentescibles et d'effluents riches en phosphates (détergents, engrais chimiques) et en nitrates.

Aujourd'hui, tous les grands lacs alpins et le plus vaste écosystème limnique du monde, celui des Grands Lacs Nord américains, sont menacés ou en voie d'eutrophisation accélérée.

En réalité, comparer le phénomène naturel d'eutrophisation aux conséquences du déversement par l'homme d'effluents putrides urbains ou industriels dans des eaux initialement pures choque beaucoup d'écologistes. Aussi, Mac Intyre et Holmes (1971) proposent-ils à juste titre le terme de dystrophisation pour caractériser cette perturbation des milieux lenticques par la civilisation moderne.

Une telle expression permet d'évaluer les effets possibles sur les algues d'une hausse de la concentration dans l'eau des éléments nutritifs. Si le phosphore est le facteur limitant, 1mg de cet élément permet la synthèse de 0,1g de biomasse d'algues (en poids sec) en un seul cycle de transformation limnique. Cette biomasse exercera, lorsqu'elle sera morte et sédimentée au fond du lac, une DBO secondaire de 140mg pour sa minéralisation.

Les taux de phosphore compris entre 3 et 8mg/l, que l'on relève souvent dans les effluents urbains, peuvent par conséquent produire de 300 à 800mg de matière organique par litre.

L'eutrophisation ou plutôt la dystrophisation des eaux se traduira donc par une brutale pullulation des végétaux planctoniques.

Le cas des lacs de Zürich a donné pour la première fois un exemple saisissant des effets de l'apport d'éléments nutritifs à un écosystème limnique. La ville de Zürich déverse ses effluents dans le bassin inférieur tandis que le lac supérieur n'a jamais été contaminé par de tels rejets. Dès 1896 fut observé dans la partie inférieure une prolifération de la diatomée *Tabellaria fenestrata*. Puis en 1920-24 apparut en abondance l'*Oscillatoria rubescens*, une algue bleue filamenteuse, qui se mit à proliférer en nombre immense. Minder (1938) comparant les phytocoénoses des deux lacs de Zürich remarquait que la partie supérieure est resté oligotrophe. Au contraire, la partie inférieure présentait alors une plus grande richesse en phytoplancton tant par la diversité des espèces que par leur biomasse, en particulier en aval du point où sont déversés les plus forts volumes d'effluents urbains.

La surcharge du lac en matières végétales provoque une rapide diminution de sa transparence. Alors que dans un lac oligotrophe, l'activité photosynthétique se poursuit à plus de 30 m de profondeur, celle-ci va se concentrer dans les eaux eutrophes au niveau des premiers mètres au-dessous de la surface, qui seuls recevront un flux lumineux d'intensité suffisante.

Tous ces phénomènes vont concourir pour accroître le taux d'oxygène dissous dans les eaux superficielles du lac.

L'appauvrissement de l'hypolimnion en oxygène se traduit par la disparition des salmonides, poissons nobles d'eaux propres, froides et bien oxygénées. Au contraire, les cyprinides, espèces frustes et de régime herbivore vont profiter de la surcharge des couches superficielles en matières végétales et ils supplanteront progressivement les salmonides. Le déclin des espèces nobles sera à ce stade largement compensé par la forte hausse de productivité en cyprinides.

Pendant la même période, les salmonides, espèces de haute valeur commerciale : corégones (*Coregonus fera* et *hiemalis*), ombles (*Salvelinus alpinus*), truite de lac (*Salmo trutta*), se sont considérablement raréfiés.

L'ultime stade de la dystrophisation est marqué par l'apparition de fermentations anaérobies après déplétion totale de l'oxygène dissous dans les couches profondes. Selon de nombreux experts, des surfaces lacustres très vastes évoluent de nos jours vers cet état.

Ce stade se caractérise par l'apparition de fermentations putrides avec dégagement d'hydrogène sulfuré et d'ammoniac. Notons que l'hydrogène sulfuré peut être produit spontanément au fond de baies, voire de mers eutrophes. C'est par exemple le cas de la mer Noire.

Même des mers aussi étendues que la Baltique peuvent être dystrophisées par l'action humaine au point d'atteindre l'ultime stade, ainsi qu'en atteste l'évolution de son taux d'oxygène dissous.

Au dernier stade, la dystrophisation des eaux prend une allure autocatalytique. Les vases et les eaux qui les surmontent, devenues réductrices, décomplexent les phosphates contenus dans l'ensemble matières organiques-phosphates-fer. La solubilisation de phosphates minéraux qui s'étaient accumulés dans les sédiments va provoquer de nouvelles "explosions" de la flore. alguale, avec nouvelle surcharge en matières organiques. Les conditions écologiques vont devenir comparables à celles décrites en faciès lotique après pollution par des substances fermentescibles. Le milieu lacustre va évoluer vers un état septique.

L'ultime stade de la dystrophisation peut donc conduire un écosystème limnique à un état septique, entièrement azoïque, à l'image de ce que l'on observe dans les cours d'eau surchargés d'effluents organiques.

Effets de la pollution chimique des eaux

Toxicité des principaux contaminants chimiques

Le phytoplancton et les macrophytes sont diversement affectés par la pollution des eaux selon la nature de l'agent contaminant. Les sels de cuivre, les chromates sont fatals aux algues à des concentrations aussi faibles que la ppm. De nombreux pesticides, en particulier tous les herbicides, sont très toxiques pour le phytoplancton.

Les herbicides du groupe des urées substituées (Monuron, Diuron) bloquent la croissance des phytoflagellés à des concentrations aussi faibles que 1ppb ! D'autres recherches ont montré que le pichloram était encore plus toxique pour le phytoplancton marin. On s'interroge sur les conséquences qui peuvent résulter de l'usage de ces substances sur la productivité primaire des eaux.

Certains "experts" ont conseillé l'emploi du monuron pour détruire les Oscillatoria qui pullulent en milieu eutrophisé.-

Les insecticides sont aussi très nocifs pour le phytoplancton. Ainsi, le toxaphène arrête la croissance des genres de phytoflagellés à la dose de 7 ppb.

La diminution de productivité d'une communauté phytoplanctonique à *Platymonas* et *Dunaliella* exposée à une concentration de 1 ppm pendant 4 h est de 29 % pour le lindane, 77% pour le DDT et 95% pour le chlordane. On a pu montrer que le DDT et d'autres insecticides inhibaient la photosynthèse chez les organismes phytoplanctoniques.

Si la contamination des eaux marines du plateau continental par les insecticides organochlorés et autres pesticides continue à s'accroître au rythme actuel, leurs effets sur la productivité primaire constitue une perspective bien inquiétante. Elle laisse entrevoir la possibilité d'une diminution de la quantité de matières protéiques disponibles dans les océans pour l'alimentation humaine. La régression de la biomasse phytoplanctonique déterminera infailliblement une réduction des effectifs de poissons du plateau continental.

Les détersifs synthétiques sont très toxiques pour la flore microbienne des eaux. Leurs effets inhibiteurs sur les bactéries aérobies soulèvent de sérieux problèmes pour le traitement des effluents dans les stations d'épuration quand leur concentration est trop élevée, car ils entravent l'activité des lits bactériens.

Les invertébrés et les vertébrés dulçaquicoles et marins sont victimes des innombrables substances chimiques rejetées dans les eaux par l'industrie. La sensibilité extraordinaire des poissons à certains polluants, sans doute liée aux particularités de la circulation branchiale, les a fait utiliser dans les tests biologiques de pollution.

En Grande-Bretagne, le test-poisson consiste à plonger un téléostéen d'eau douce dans une eau contaminée et à mesurer le nombre de minutes de survie de l'espèce considérée. L'indice de toxicité de l'eau t est évalué par la relation

$$t = \frac{1}{100n} \quad (n = \text{au nombre de minutes de survie}).$$

Les principaux paramètres toxicologiques utilisés pour déterminer les effets d'un polluant sur des animaux limniques ou marins sont la CL 50, la CL 100, le TL_M et le TL 50.

Les deux premiers paramètres (concentration létale) indiquent les concentrations susceptibles de faire périr 50 ou 100% d'une population animale en 24h ou 48h (ou une autre durée prédéterminée). Le TL est le temps létal moyen pour une concentration faisant périr tous les individus de la population et le TL 50, le temps théorique après lequel 50% des individus de la population ont péri sous l'effet d'une concentration supérieure à la CL 50.

Les tableaux qui suivent figurent à titre d'exemple les CL 50 de diverses substances polluantes et les concentrations d' NH_4OH et de cyanure dont le TL, est de 1000 minutes pour diverses espèces de téléostéens et d'invertébrés dulçaquicoles.

Tableau - Dose limite tolérable et concentration minimale provoquant 100% de mortalité (CL 100) relevée comme valeur moyenne pour les téléostéens d'eaux douces (d'après divers auteurs dans Furon, 1962).

Substance	Dose limite tolérée (en ppm)	CL 100 (en ppm)
HCl	75	200
HNO ₃	200	750
H ₂ SO ₃ (papeteries)	0,5	1
NH ₄ OH	13	25
CUSO ₄	50	100
Phénol	1	10
Chromate de potassium	0,1	0,5
Cyanure de potassium	0,1	0,5
"Manoxol" (détertif)	0,4	8,5

Tableau - Sensibilité à l'ammoniaque et au cyanure de divers téléostéens et invertébrés limniques (d'après divers auteurs)
[Concentrations torr. à un TL_m de 1 000 mn]

Espèces	NH ₄ OH (en mg/l)	Cyaure équivalent azote (en mg/l)
Truite arc en ciel (<i>Salmo gairdnerii</i>)	0,6	0,08
Vairon (<i>Phoxinus laevis</i>)	0,9	0,1
Chevaine (<i>Squalius cephalus</i>)	0,8	0,24
Perche (<i>Perca fluviatilis</i>)	1	0,13
Tanche (<i>Tinca vulgaris</i>)	--	3,7
Perche soleil (<i>Eupomotis gibbosus</i>)	2	--
Planaire (<i>Polyscelis</i> sp.)		22
Gammare (<i>Gammarus pulex</i>)	7	0,3
Ephémère (<i>Ecdyonurus</i> sp)	5	0,08
Perlode (<i>Perla cephalotes</i>)	14	--

Les pesticides figurent parmi les contaminants des milieux limniques et marins dont la toxicité est souvent des plus élevées pour les vertébrés à sang froid et les invertébrés qui les peuplent.

La CL 50 de composés comme l'endrine, l'endosulfan et la dieldrine, pour les téléostéens d'eau douce, est inférieure à 5 ppb. Les insecticides sont en général plus toxiques que les herbicides et les fongicides pour les poissons et les invertébrés aquatiques

Dans le tableau V.11, figurent à titre d'exemple, les concentrations de divers pesticides utilisés pour traiter les rizières ou pour détruire les moustiques et les CL 50 de ces mêmes substances relevées en moyenne pour les téléostéens d'eau douce (d'après Holden, 1964).

- Comparaison des concentrations préconisées pour divers traitements pesticides en milieu aquatique avec leur CL 50 moyenne pour les téléostéens d'eau douce, après 24 h. (d'après Holden, 1964).

Substance	A - Concentration utilisée (en ppm)	B - CL 50 pour les poissons (en ppm)	A/B
Dieldrine (I)	0,27	0,013	20
DDT (I)	0,34	0,02	17
Phosphamidon (I)	0,74	500	1/700
2,4 D(H)	0,5	0,5	1
2,4,5 T(H)	3,7	6	1,2
Aminotriazole (H)	2,2	325	1/150
Acétate de phényl Hg (F)	0,04	0,005	8

I = Insecticides, H = Herbicides, F = Fongicides "

L'examen du tableau précédent montre que les doses requises pour les traitements sont nettement supérieures à celles qui font périr la moitié des effectifs des populations de poissons d'eau douce.

Les herbicides du groupe de l'acide phénoxy-acétique paraissent aussi assez nocifs pour les vertébrés aquatiques. On peut à cet égard s'interroger sur les effets des 20000 tonnes de 2, 4, 5 T déversés par l'armée américaine sur le delta du Mékong au cours du conflit vietnamien (Gruchow, 1970). "La plupart de ce tonnage sera entraîné en mer par les crues de la mousson. Il n'existe aucune étude sur les effets de ce poison dans les chaînes trophiques marines et il semble excessif de penser qu'un écocide à cette échelle ne provoquera aucune conséquence néfaste".

Précisons enfin que même des herbicides en apparence inoffensifs comme l'aminotriazole peuvent provoquer de redoutables effets indirects chez les poissons car ils agissent assez électivement sur les gonades et stérilisent ainsi ces animaux.

Conséquences biocénologiques de la pollution chimique des eaux

Hydrocarbures

Si l'on excepte les conséquences du "mazoutage" pour l'avifaune marine, les effets écologiques de la pollution par les hydrocarbures demeurent aujourd'hui encore assez mal connus.

A cet égard, le naufrage du Torrey-Canyon a apporté de précieux renseignements sur les conséquences biocoenologiques de la contamination des eaux marines par les produits pétroliers (cf. Smith J.E., 1970).

Les relevés effectués par les océanographes britanniques de la Station biologique de Plymouth montrèrent que l'ensemble du plancton a beaucoup souffert du contact avec les hydrocarbures. Les *Halosphaera* et *Pterosperma*, organismes phytoplanctoniques du groupe des *Prasinophycées* qui vivent dans les couches les plus superficielles de l'océan furent particulièrement affectées par le pétrole. Il en fut de même du zooplancton qui se trouvait

dans la zone contaminée. On estime que 90% des oeufs pélagiques de pilchard furent détruits et les alevins se raréfièrent beaucoup dans la zone envahie par les flaques d'hydrocarbures qui s'échappèrent des soutes du navire.

Le naufrage du Torrey-Canyon a par ailleurs montré la grande nocivité des détersifs en milieu marin. Ces derniers furent utilisés à vaste échelle sur la côte de Cornouailles pour favoriser la dispersion et l'émulsification du pétrole dans l'eau de mer et pour nettoyer plages et rochers souillés par la "marée noire". Quelque 10000 tonnes de détersifs furent ainsi répandues et firent des ravages dans la faune d'invertébrés néritiques et benthiques. Aucun gastéropode (*Patelles, bigorneau*), aucune moule, et en général aucun mollusque de la zone de balancement des marées n'échappa au traitement.

D'autres investigations montrèrent que 100 ppm de détersifs mélangés à l'eau de mer empêchaient la confection du tube chez les jeunes larves d'Annélides polychètes sabulicoles du genre *Sabellaria*. De plus, des incertitudes subsistent sur les effets cumulatifs à long terme pour la faune intersticielle que produiront ces substances surfactantes adsorbées par les sables.

En définitive, mollusques, crustacés libres ou sédentaires (crabes, crevettes, balanes, etc.), poissons littoraux, disparurent en quasi-totalité des zones néritiques traitées aux détersifs.

La faune benthique souffrit aussi beaucoup de la pollution par ces substances. Des plongées effectuées à des profondeurs comprises entre 2 et 15m révélèrent une forte mortalité chez les crustacés *Galathea strigosa*, *Poriunus puber* (Crabe nageur) et *Cancer pagurus* (tourteau). Les lamellibranches *Ensis siliqua* et *Mactra corallins*, les échinodermes *Marthasterias glacialis* et *Echinocardium cordatum* (oursin fouisseur), périrent en masse à la suite de cet usage intempestif des détergents contre la marée noire.

A l'opposé, des espèces comme *Maia squinado* (Araignée de mer) et l'astérie *Asterias rubens*, firent preuve d'une surprenante tolérance aux effets conjugués du pétrole et des détersifs.

Les oiseaux de mer figurent parmi les premières victimes de la pollution pétrolière. Alcidés, Anatidés, Laridés, Procellariiformes, etc. se posent sur les flaques de pétrole et souillent de la sorte leur plumage de façon irréversible. La grande affinité des hydrocarbures pour les graisses qui imprègnent les plumes des oiseaux et les rendent hydrofuges a pour conséquence de détruire le matelas protecteur que forme le plumage. En son absence, les oiseaux mazoutés ne tardent pas à se refroidir et à périr de congestion. A cela se surajoute une intoxication due à l'ingestion de pétrole par l'animal qui l'absorbe lors des plongées ou lorsqu'il essaie d'en débarrasser son plumage. Cet empoisonnement se traduit entre autres effets, par de sévères perturbations du système endocrine, en particulier des glandes surrénales des oiseaux mazoutés.

L'accident du "Torrey-Canyon" a fait de véritables hécatombes dans les colonies d'oiseaux de mer tant en Bretagne qu'en Cornouailles. La réserve des Sept-Iles, dans les Côtes-du-Nord, où soixante années d'efforts de protection avaient permis de reconstituer de prospères colonies fut particulièrement contaminée. Les effectifs de Macareux (*Fratercula arctica*) qu'elle hébergeait passèrent de 4000 à 600 individus après la "marée noire", ceux de pingouins (*Alca tords*) et de guillemots (*Uria aalge*) de 700 à 100 individus. En revanche, les Fous de Bassan (*Sula bassana*, espèce d'une vigueur exceptionnelle, survécurent mieux au désastre.

En réalité, la Manche, la mer du Nord, la Méditerranée, de plus en plus lourdement polluées par le pétrole, deviennent sans cesse plus inhospitalières pour les oiseaux marins. Ainsi, le long des côtes hollandaises, on a estimé que 20 à 50000 individus appartenant à une cinquantaine d'espèces aviennes dont 14 espèces de canards, sont chaque année victimes de cette dramatique pollution. En Grande Bretagne, ce chiffre s'élèverait à 250000 oiseaux par an. Le problème est identique aux alentours de Terre-Neuve où une colonie de pingouins de plusieurs centaines de milliers d'individus a été décimée en quelques années.

La pollution de l'océan par les hydrocarbures est seule responsable d'une telle hécatombe. De plus, ce processus s'accélère de lui-même car les petites colonies présentent plus d'échecs de reproduction que les grandes et une plus forte mortalité embryonnaire et juvénile. Après évaporation des fractions les plus volatiles, le pétrole répandu à la surface de la mer est soumis à un phénomène de biodégradation. Les nombreuses espèces chimiques d'hydrocarbures contenues dans le "Brut" seront attaquées par des bactéries aérobies et des champignons dont la systématique est encore mal connue. Cette microflore va décomposer le pétrole en substances dont la nature et a fortiori la toxicité sont très peu étudiées aujourd'hui encore. Après plusieurs semaines ou plusieurs mois de cette lente action bactérienne, les produits de dégradation résiduels s'agglomèrent et constituent des nodules bitumineux, de forme irrégulière, qui mesurent de 0,1 à 10cm de diamètre et dérivent à la surface de l'océan. Ils sont recouverts par une couche grisâtre constituée surtout par des bactéries aérobies. Celles-ci dégradent les hydrocarbures avec une consommation d'oxygène de $12,5 \text{ mm}^3/\text{h}/\text{cm}^3$ de bitume, soit 4 mm^3 par heure et par cm^2 de surface de substrat (Horn, Teal et Backus, 1970).

Les nodules sont de consistance molle et renferment encore dans leur partie centrale des fractions volatiles très toxiques. Ils sont colonisés par l'isopode pélagique *Idotea metallica* et les Anatifes *Lepas anatifera* et *L. fascicularis*. La taille maximale atteinte par ces crustacés et leur vitesse de croissance sur ce substrat peu banal permet d'évaluer à 2 ou 3 mois l'âge des plus anciens de ces nodules. De nos jours, tout l'océan mondial est souillé par ces résidus de la biodégradation marine du pétrole. Les nodules semblent s'accumuler

dans la mer des Sargasses où les transporte le jeu complexe des courants de l'Atlantique Nord (Morris, 1971).

Les recherches de divers océanographes ont montré l'importance de cette contamination. L'usage des filets à neuston a permis de calculer l'étendue de la pollution de l'Atlantique et de la Méditerranée par ces nodules.

Des poissons pélagiques très voraces comme le *Scomberesox saurus* avalent les petits nodules bitumineux. Cette espèce constitue un maillon essentiel des chaînes trophiques dans les mers tempérées. Elle incorpore ainsi des quantités importantes de substances toxiques qui passent de la sorte dans des chaînes alimentaires aboutissant à l'homme.

A cet égard, aucun océanographe digne de ce nom ne saurait cautionner l'usage des détersifs, quels qu'ils soient, en milieu océanique pour lutter contre la pollution par les hydrocarbures.

En effet, le fait d'émulsionner le pétrole dans l'eau de mer favorise son absorption par des animaux microphages et son passage dans les chaînes trophiques au détriment de sa dégradation bactérienne. Même des détersifs comme le Corexit-7664, abusivement présentés comme inoffensifs en milieu marin, ne constituent pas une solution rationnelle dans la lutte contre la contamination des océans par les hydrocarbures. Outre les inconvénients, ils possèdent un effet synergiste qui exalte la toxicité du pétrole pour les organismes marins.

Le dépôt du pétrole au fond des océans sous l'effet des détersifs est un non-sens écologique car cela revient à ralentir sinon bloquer toute biodégradation à cause de la faible teneur en oxygène des eaux abyssales.

Malgré les grandes incertitudes qui règnent encore en ce domaine, il semble que la contamination de l'océan par le pétrole exerce de plus en plus une influence néfaste sur sa productivité primaire.

Pesticides

La pollution par les pesticides se traduit aussi par une influence drastique sur les biocénoses limniques et littorales. L'usage des insecticides organochlorés dans la lutte contre les insectes vecteurs s'avère catastrophique pour les invertébrés dulçaquicoles ou de la faune littorale et pour les poissons.

Mais les effets les plus redoutables de la contamination des eaux par les pesticides résultent de la possibilité de concentration de certains d'entre eux dans les chaînes trophiques, toujours longues en milieu limnique ou marin. Un des exemples les plus célèbres des catastrophes écologiques auxquelles peut conduire la contamination des eaux par les insecticides organochlorés, est celui du Clear Lake en Californie, (Hunt et Bishoff, 1960). Ce

lac fut traité au TDE (composé voisin du DDT) en 1949, 1954, 1957 pour éliminer un diptère culicide, *Chaoborus astictopus*. Il importe de préciser que cet insecte n'est pas dangereux car il ne pique pas et ne transmet aucune affection à l'homme. Son seul inconvénient réside en ce qu'il vole en grande abondance et incommoder de ce fait promeneurs et baigneurs, lesquels sont parfois entourés par des nuées de ces insectes. Ces campagnes d'éradication se traduisirent par la pollution des eaux du lac, à des doses apparemment faibles 0,014ppm de TDE ; mais après l'épandage, le plancton en renfermait 5ppm et des poissons-chats (*Ameiurus catus*) capturés en 1958 en recelaient 1700 à 2375ppm dans leurs graisses et 22 à 221ppm dans leurs muscles, de sorte que la colonie de Grèbes occidentaux (*Aechmophorus occidentalis*), oiseaux à régime strictement piscivore qui peuplaient ce lac, connut une régression rapide. De 1000 couples nicheurs, il n'en subsistait que 30 après le traitement et ces derniers paraissaient stériles. Les grèbes trouvés morts renfermaient jusqu'à 2500ppm de TDE dans leurs tissus.

Quels sont les processus qui conduisent à l'accumulation de telles concentrations d'insecticides dans les super-prédateurs à partir de traces aussi infimes ? Si l'alimentation intervient pour une large part, l'absorption directe de l'insecticide à partir d'une eau faiblement polluée n'est pas négligeable chez certains organismes. C'est même le seul mécanisme en cause dans le cas du phytoplancton. Cette absorption directe est aussi très importante chez les vertébrés. Les poissons absorbent les substances toxiques diluées à des concentrations à peine inférieures aux doses léthales et tolèrent indéfiniment dans leur organisme des quantités parfois fort élevées d'insecticides.

La régression de nombreuses espèces d'oiseaux de mer est entièrement imputable à de tels processus.

Mercure

C'est cependant la pollution de l'océan par le mercure qui a donné l'illustration la plus terrifiante des conséquences d'une contamination intempestive de la biosphère par la technologie moderne.

Pour bien comprendre les mécanismes de pollution par cet élément, il faut connaître les modalités par lesquelles il circule dans le milieu naturel. Le cycle bio géochimique du mercure est à prédominance sédimentaire bien qu'il s'effectue entre la lithosphère, l'hydrosphère et l'atmosphère. Les quantités de ce métal présentes à l'état naturel dans la biosphère ont deux origines: les éruptions volcaniques et l'érosion hydrique par lixiviation des roches superficielles qui entraîne dans les cours d'eaux puis les océans une fraction du mercure contenu dans les roches superficielles.

Jensen et Jernolov (1967) ont montré le rôle essentiel de certaines bactéries des sédiments benthiques dans le cycle de cet élément. Celles-ci transforment le mercure

minéral en monométhyl (ou méthyl) mercure, puis en diméthylmercure $(\text{CH}_3)_2\text{Hg}$, lequel, très volatil, passe dans l'atmosphère. Au contraire, le méthyl-mercure CH_3Hg^+ reste dans l'hydrosphère où il est incorporé aux chaînes alimentaires selon un processus classique. Il est d'abord absorbé par le phytoplancton puis par les divers consommateurs de l'écosystème. Lorsque les plantes ou les animaux meurent, le méthyl-mercure est restitué aux sédiments et le cycle recommence. Le mercure est normalement présent à des traces infinitésimales dans les atmosphères non polluées. Il s'y rencontre en phase gazeuse à des concentrations aussi faibles que 0,002 ppb. Dans les eaux continentales ou océaniques, la concentration de mercure est de l'ordre de la ppb.

Par suite de la faible biodégradabilité de certains de ses dérivés, le mercure tend à se concentrer dans les êtres vivants. Les algues peuvent l'accumuler dans leurs cellules à des taux cent fois supérieurs à sa dilution dans l'eau de mer et des poissons pélagiques comme les thons capturés dans des zones éloignées de tout foyer de pollution peuvent en renfermer jusqu'à 120ppb. Les thons figurent parmi les animaux marins qui dans les conditions naturelles possèdent les tissus les plus riches en mercure. Des taux élevés de cet élément ont été décelés dans le squelette d'individus fossiles de ces poissons vieux de plus de 10 millions d'années.

Mais l'existence d'organismes qui renferment dans des conditions naturelles de fortes doses de mercure dans leurs tissus n'exclut pas pour autant celle d'une pollution significative des écosystèmes limniques et marins par le mercure que libère dans l'environnement l'industrie moderne.

Les travaux effectués au cours des années 60 par divers chercheurs japonais et suédois ont montré de façon irréfutable que le mercure rejeté dans les eaux sous forme organique ou minérale se transforme inexorablement en méthyl-mercure très peu biodégradable. Celui-ci s'accumule dans les diverses espèces qui composent les réseaux trophiques ainsi contaminés. Westoo (1966) a pu montrer que la plupart du mercure présent dans les poissons des lacs suédois se trouvait dans les tissus sous forme de méthyl-mercure.

L'histoire de la maladie de Minamata, qui résulte d'une contamination des poissons et divers invertébrés marins par de fortes doses de méthyl-mercure est fort édifiante à cet égard. Cette affection s'est manifestée par deux fois au Japon : à partir de 1953 dans la baie qui a donné son nom à la maladie, puis en 1965 dans la région de Niigata.

En 1956, une mystérieuse épidémie se répandit dans la baie de Minamata. Elle n'était pas contagieuse, frappait des familles entières, surtout de pêcheurs, dont la nourriture était pour l'essentiel fondée sur la consommation de mollusques, crustacés et poissons capturés dans les eaux de la baie.

Cette maladie se caractérisait par divers troubles du système nerveux central, de nature aussi bien sensorielle que motrice : constriction du champ visuel, difficultés d'audition, d'élocution, défaillance du raisonnement, tremblements, démarche hésitante, etc.

Sur 116 cas officiellement reconnus furent dénombrés 43 morts ; les survivants présentèrent de façon irréversible le syndrome décrit ci-dessus. Cependant, les médecins japonais qui enquêtèrent sur cette épidémie évaluent à plusieurs milliers le nombre réel de personnes qui ont manifesté des atteintes plus discrètes de la maladie et à plusieurs centaines le nombre de décès.

Par ailleurs, ces experts furent intrigués d'apprendre que dans les villages de pêcheurs atteints par ce mal, de nombreux chats présentaient aussi des troubles nerveux. Certains, devenus fous, se suicidaient en se jetant à l'eau, comportement très aberrant chez un animal dont l'aversion pour cet élément est notoire. La cause de la maladie provenait selon toute vraisemblance de l'existence dans la nourriture des habitants de la baie et de leurs animaux domestiques d'un facteur pathogène ou toxique.

De minutieuses investigations effectuées entre 1956 et 1959 firent mettre hors de cause une dizaine de métaux et métalloïdes. En revanche, on constata que les symptômes apparaissaient chez des chats normaux alimentés expérimentalement avec des poissons pêchés dans la baie. En 1959, la découverte de mercure dans les poissons toxiques attira l'attention du groupe de chercheurs qui s'efforçait d'élucider les causes de la maladie de Minamata.

L'apparition en 1965 de la même affection dans la région de Niigata, très éloignée de Minamata, apporta une preuve supplémentaire de la responsabilité du méthyl-mercure dans cette maladie. Sur 30 personnes gravement atteintes, 5 périrent. Toutes consommaient de grosses quantités de poissons qu'elles pêchaient dans la rivière Agano. Or les eaux de celle-ci recevaient les effluents d'une autre unité de synthèse de l'acétaldéhyde.

Les investigations effectuées dans la région avaient montré de façon irréfutable la responsabilité du méthyl-mercure. Parmi les divers arguments expérimentaux qui appuient cette affirmation, nous citerons la corrélation étroite qui existe entre la teneur en mercure des cheveux d'individus malades ou normaux, l'importance du poisson dans leur régime alimentaire et l'apparition des symptômes.

Par ailleurs, les analyses effectuées dans la région de Niigata ont montré que le taux de mercure total relevé dans les poissons de la rivière Agano prélevés en aval de l'émissaire de l'usine d'acétaldéhyde, était toujours nettement supérieur au maximum admis dans l'alimentation humaine par les autorités sanitaires internationales (0,5ppm). Il s'élevait souvent à plus de 10ppm. En outre, dans plus de la moitié des poissons examinés, le méthyl-mercure représentait plus de 25% du mercure total contaminant leur organisme.

Aujourd'hui, le méthyl-mercure apparaît comme l'unique cause de la maladie de Minamata. C'est l'ingestion d'importantes quantités de poissons et autres animaux aquatiques contaminés par celui-ci qui détermine l'apparition des symptômes, parfois après plusieurs années de période latente.

Au Japon, le méthyl-mercure provenait des résidus de fabrications d'usines de synthèse d'acétaldéhyde bien que la conversion de mercure minéral en ce composé par les bactéries des sédiments benthiques ait certainement contribué à sa formation.

Le méthyl-mercure libéré dans l'environnement s'est ensuite concentré dans les chaînes trophiques, toujours assez longues en milieux aquatiques. Ainsi, dans la baie de Minamata, ce composé n'excède jamais 0,1ppb dans l'eau de mer, mais on en relevait jusqu'à 50 ppm (exprimé en mercure) dans certains poissons de la baie, soit un coefficient de concentration de 500000 entre l'eau polluée et la nourriture des pêcheurs de cette région.

La contamination des écosystèmes limniques et marins par le méthyl-mercure n'est pas hélas ! un phénomène localisé au Japon. Les rives septentrionales de la Méditerranée, le littoral hollandais et la Suède, ainsi que certains lacs canadiens souffrent aussi d'une telle pollution.

L'attention des hygiénistes suédois fut attirée dès 1965 par le fait que les poissons d'eau douce vendus sur les marchés renfermaient de hautes teneurs en méthyl-mercure, souvent de l'ordre d'une ppm (par rapport à leur poids sec).

Johneis et Westermarck (1967) établirent que cette contamination de la faune aquatique par le mercure provenait de la pollution de nombreux écosystèmes limniques du pays par les rejets d'effluents de l'industrie du papier. Celle-ci utilisait en effet comme fongicide l'acétate de phényl-mercure dans la préparation des pâtes et des pulpes de cellulose. Cette pollution se manifestait non seulement dans les lacs et les cours d'eau situés en aval des usines rejetant ces effluents contaminés mais même dans des zones lacustres exemptes d'industries mais situées sous le vent des régions polluées (on sut plus tard que cela résultait du transport atmosphérique de divers dérivés volatils comme le diméthyl-mercure).

Chez des poissons prédateurs comme le brochet, la concentration normale dans les tissus est de 0,1 à 0,2 ppm, celle-ci était égale ou supérieure à 0,5 ppm avec des pics à 10 ppm, dans cinquante échantillons prélevés en diverses régions du pays.

Par ailleurs, les chercheurs mirent en évidence une bonne corrélation entre la teneur en méthyl-mercure des muscles et l'âge des brochets. Le coefficient de concentration dépassait 40000 chez cette espèce si l'on compare la teneur de l'eau à celle de l'organisme de ces poissons en méthyl-mercure.

Les eaux continentales Nord-Américaines ne sont pas indemnes de pollution par le mercure. Le lac St-Clair, au Canada, présente aujourd'hui une forte contamination de toute

sa biocœnose par cet élément. Les poissons contenus dans le jabot d'oiseaux ichthyophages renferment des doses élevées de mercure, comprises entre 2 et 4 ppm. Sa concentration dans 147 échantillons d'oiseaux d'eau étudiés appartenant à 15 espèces différentes excède 0,2 ppm. Un grand héron bleu (*Ardea herodias*) renfermait 23 ppm de mercure dans ses muscles et 175 ppm dans son foie ; par ailleurs, les doses de cet élément relevées dans les oeufs analysés étaient comparables à celles qui ont expérimentalement réduit la fécondité d'oeuf de faisans.

L'ensemble des conséquences écologiques qui résultent de la pollution de la biosphère par le mercure constitue à bien des égards un signal d'alarme.

Le rejet de chaleur dans l'environnement constitue de nos jours une forme de pollution physique du milieu naturel susceptible de provoquer de véritables bouleversements biocénétiques car elle agit sur un facteur écologique primordial : la température du milieu.

L'utilisation des eaux continentales et littorales pour le refroidissement des centrales électriques conventionnelles ou nucléaires se traduit par un rejet de chaleur dans le milieu susceptible de provoquer, s'il est assez important, de très graves perturbations biocénétiques. Cette pollution thermique des eaux, improprement appelée "caléfaction" par certains spécialistes, est un phénomène de nature physique, relativement récent, en grande partie lié à l'heure actuelle au développement de programmes électronucléaires dans les divers pays industrialisés.

1- Causes et importance de la pollution thermique

La pollution thermique provient de l'usage fait par l'homme de sources d'énergie artificielles qui modifient de façon plus ou moins importante le bilan énergétique des écosystèmes. Les combustibles fossiles et maintenant la fission de l'Uranium, auxquels notre civilisation a recours comme sources d'énergie primaire perturbent le bilan énergétique global de l'écosphère, car elles se surajoutent au flux solaire, lequel constitue l'unique entrant énergétique naturel. Si les modifications produites à l'échelle de la biosphère ne sont pas encore inquiétante, l'apport de la technologie ne représentant que le 1/10000^{ème} du flux solaire total à l'heure actuelle, il n'est plus de même si l'on se place au niveau de la région voire des macro écosystèmes.

De nos jours, dans le comté de Los Angeles, l'apport de chaleur artificielle résultant de l'usage des combustibles fossiles dépasse 5% du flux solaire total sur une surface évaluée à 106 hectares. L'îlot de chaleur urbain constitue d'ailleurs un phénomène bien connu du profane. Il est notoire que la température moyenne dans les villes est supérieure à celle de la campagne environnante; l'écart maximum s'observe pendant la période hivernale, à cause du chauffage des habitations. Si les conséquences de la pollution thermique

peuvent donc être perceptibles à l'échelle des mésoclimats, il n'empêche que ses effets sont avant tout préoccupants en milieu aquatique à l'heure actuelle.

Dès à présent, la pollution thermique des eaux continentales et littorales peut atteindre localement une telle ampleur qu'elle menace la pérennité de l'ensemble des biocœnoses propres à ces milieux.

La cause essentielle de la pollution thermique des eaux provient de la production d'électricité quoique les aciéries et d'autres industries lourdes puissent en certaines régions y contribuer de façon significative.

Le rendement thermodynamique des centrales nucléaires est sensiblement inférieur à celui des centrales thermiques classiques. A puissance électrique égale, il en résulte une pollution thermique supérieure de 50% à celle engendrée par une centrale fonctionnant au charbon. Les rejets d'eau chaude par les réacteurs électronucléaire vont donc poser de très sérieux problèmes écologiques, compte tenu de l'ampleur des programmes en cours dans le monde. L'échauffement des cours d'eau deviendrait inadmissible si ces derniers servaient à refroidir les condenseurs de ces centrales par des systèmes en circuit ouvert.

II. Conséquences de la pollution thermique des eaux

A. Effets sur les facteurs abiotiques.

1) Action sur la température.

La conséquence immédiate et évidente du rejet d'eau chaude en milieu limnique ou marin tient en une élévation significative de la température des eaux naturelles qui reçoivent ces basses calories.

Dans des pays très industrialisés comme la Grande-Bretagne, la pollution thermique atteignait des niveaux importants, où l'élévation de la température des cours d'eau (ΔT moyen) variait de 6 à 9°C. En règle générale, l'élévation de température observée dans la plupart des cas excède déjà 5°C, avec les centrales fonctionnant aux combustibles fossiles.

En réalité, divers facteurs interviennent pour favoriser soit au contraire pour entraver la dissipation de ces basses calories dans le milieu marin. Il s'agit en fait d'un phénomène dynamique mettant en jeu la dilution des eaux chaudes dans l'environnement, la convection, et, la diffusion thermique. Les courants, l'agitation de la surface de la mer par le vent interviennent de façon efficace pour atténuer l'étendue de la zone thermiquement polluée. Des modèles mathématiques ont été inventés pour calculer l'importance de la pollution thermique provoquée en milieu marin par la construction de grands parcs de centrales électronucléaires.

L'élévation de la température des eaux modifie le taux d'oxygène dissous. En effet, la solubilité des gaz dans l'eau diminue quand croît leur température. Mais un autre phénomène intervient pour provoquer une déplétion de la teneur en oxygène des eaux

polluées par la chaleur. Celui-ci résulte de l'importante concentration en matières organiques fermentescibles présente dans les fleuves des pays industrialisés et dans les zones d'estuaire ; cette pollution organique provient des rejets d'effluents urbains et des industries agroalimentaires. Elle va provoquer une consommation rapide de l'oxygène dissous par les bactéries aérobies, dont la prolifération et l'activité, sera favorisée par l'élévation de température. De façon générale, l'échauffement de l'eau, outre qu'il diminue sa teneur en oxygène, présente l'effet antagoniste d'augmenter la demande d'oxygène de l'ensemble des organismes poïkilothermes. Une élévation de 10°C de la température des eaux multiplie de 2,2 fois les besoins respiratoires des animaux à sang froid.

Compte tenu de la biomasse importante présente dans les eaux eutrophes, qu'elles soient limniques ou marines, ces phénomènes vont contribuer efficacement à diminuer la teneur en oxygène dissous, à la limite, à l'asphyxie des eaux.

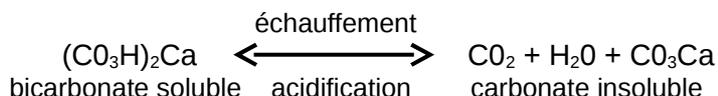
3) Effets sur les autres gaz.

La pollution thermique diminue également la teneur des eaux en Azote et en gaz carbonique. La déplétion des eaux en CO₂ dissous est plus sensible en milieu limnique qu'en milieu marin ; en effet, la légère alcalinité (pH 8,3) de l'eau de mer et son remarquable pouvoir tampon facilitent la solubilisation et la rétention des ions bicarbonates.

Bien que l'azote dissous n'ait aucun rôle biologique, sauf pour les organismes nitrifiants, bactéries et cyanophycées, la déplétion de ce gaz peut avoir des effets inattendus sur les animaux aquatiques.

4) Effets sur la teneur des eaux en calcium.

Le réchauffement des eaux influe sur leur teneur en ion calcium est conditionnée par l'équation suivante



Il en résulte qu'un échauffement excessif des eaux provoque une diminution de la concentration en ion Ca⁺⁺, lequel est indispensable à l'ossification des téléostéens et à la constitution de la coquille des Mollusques ou de l'exosquelette des invertébrés marins les plus divers.

B- Effets sur les biocœnososes.

Les métabolismes de la communauté toute entière est modifié dans un écosystème pollué par la chaleur. L'accroissement de température va provoquer une augmentation immédiate de l'activité cellulaire et donc de la respiration de toute la biocœnose. Toutefois, la production primaire peut aussi être favorisée par une élévation de température. Le

déséquilibre de la communauté par glissement d'un rapport P/R > 1 (autotrophie) vers un rapport P/R < 1 (hétérotrophie prédominante) n'est donc pas obligatoire et éventuellement, un nouvel équilibre peut s'établir.

Par ailleurs, bien que la chaleur soit un facteur qui agisse à la fois sur la photosynthèse et la respiration de la biocœnose, ses effets peuvent être contrôlés par d'autres facteurs tels que la teneur en sels minéraux nutritifs. Ainsi les proliférations d'algues requièrent un minimum de 0,015ppm de phosphates et 0,2ppm de nitrates.

Même si le rapport P/R d'une communauté n'est pas profondément modifié par la pollution thermique, celle-ci peut tout de même provoquer des bouleversements biocénétiques. Il existe en effet de grands écarts dans l'étendue de l'intervalle de tolérance à la température et les thermopreferendum des diverses espèces constituant toute communauté limnique ou marine.

En réalité, l'exposition à des températures de valeur supérieure au thermopreferendum, si elle n'est pas létale se traduit déjà par des effets néfastes sur la croissance et la reproduction des espèces considérées.

1) Effets de la pollution thermique sur les producteurs primaires.

L'échauffement des eaux diminue la diversité du phytoplancton et de façon plus générale de toute la flore algale. Les diatomées dont le thermopreferendum est assez bas, figurent parmi les premières espèces affectées. Une élévation de 10°C baisse de 2,5 fois la diversité spécifique du peuplement diatoméen des eaux. Toutefois, la pollution thermique peut provoquer, au contraire, la pullulation de quelques espèces de diatomées particulièrement thermophile.

2) Effets sur les Invertébrés.

Le zooplancton peut être fortement affecté par la pollution thermique. Les cladocères (*Daphnia*, *Moinia*) présenteront une nette sensibilité à l'échauffement des eaux. A 30°C, la longévité moyenne des *Daphnia* est trois fois plus faible qu'à 15°C.

Les copépodes, qu'ils soient limniques ou marins supportent mal la pollution thermique. Les gammarides, qui jouent un rôle important dans l'alimentation de certains stades juvéniles chez les poissons prédateurs, en particulier des Salmonidés, sont dans l'ensemble assez sensibles à l'échauffement des eaux.

Diverses larves d'insectes dont le rôle trophique pour la faune ichtyenne est absolument capital en milieux dulçaquicoles figurent parmi les premières victimes de la pollution thermique.

Parmi les autres éléments de la faune benthique les mollusques montrent aussi une grande sensibilité à la pollution thermique.

Bien que la pollution thermique des eaux provoque, en conséquence, une nette diminution de diversité de la zoocoenose benthique, certaines espèces d'invertébrés peuvent être favorisées par cette dernière.

Les invertébrés marins, adaptés à un milieu dont les fluctuations naturelles de température sont beaucoup plus faibles que dans les écosystèmes limniques, présentent une sténothermie beaucoup plus étroite que celle de leurs homologues dulçaquicoles. Ils possèdent en conséquence une plus forte sensibilité à la pollution thermique.

3) Effets sur les poissons

Il est difficile d'analyser les effets de la pollution thermique sur les poissons sans prendre en considération les phénomènes d'acclimatation. Ici encore, il convient de distinguer les cas des milieux limniques et océaniques.

Dans les eaux douces continentales, la température varie au cours du cycle annuel de 0°C à 30°C sous les moyennes latitudes. La faune autochtone est adaptée à ces variations saisonnières. Si l'on tient compte de l'étendue de l'intervalle de tolérance des poissons dulçaquicoles, on constate qu'ils peuvent même résister à des températures situées au delà de ses limites.

En réalité, la vitesse à laquelle adviennent des variations de température est aussi importante pour la survie des poissons qui les subissent que la valeur absolue des écarts. De rapides fluctuations de température, même comprises à l'intérieur de l'intervalle de tolérance, peuvent avoir des conséquences mortelles pour les téléostéens et autres vertébrés aquatiques qui sont exposés à ces dernières.

On peut définir pour chaque espèce une température léthale inférieure (TLI), au-dessous de laquelle l'espèce ne peut survivre. Celle-ci est en général de l'ordre de 0°C pour la plupart des poissons d'eau douce indigènes mais elle peut être nettement supérieure à cette dernière pour certaines espèces thermophiles.

La température léthale supérieure (TLS) marque la limite au-dessus de laquelle les poissons périssent par excès de chaleur. L'intervalle de tolérance est compris entre ces deux bornes. Une zone de résistance existe dont la limite supérieure et inférieure correspondent aux températures minimales provoquant la mort instantanée.