

POLLUTION

Article écrit par [Patrick BOURRINET](#), [Francois RAMADE](#), [Martine RÉMOND-GOUILLOUD](#), [Tous les auteurs](#)

I. Prise de vue

II. La notion de nuisance

III. Les principales causes de pollution

- . Contaminants d'origine industrielle
- . Déchets solides
- . Contaminants d'origine agricole

IV. Classification des polluants

V. La circulation et la dispersion 2 des polluants

- . Les lois générales 2 de la circulation atmosphérique
- . Le transport à distance 2 des polluants dans l'atmosphère
- . Le temps de séjour 2 des polluants dans l'atmosphère
- . Passage des polluants de 2 l'atmosphère dans l'eau et les sols
- . Transfert des polluants dans 2 la biomasse et contamination 2 des réseaux trophiques
- . Concentration par les êtres vivants : 2 notion de bioconcentration 2 et de bioaccumulation

VI. Importance et effets écologiques 2 des principaux types de pollution

- . La pollution atmosphérique

Principaux polluants atmosphériques

Effets de la pollution atmosphérique

Dérivés du soufre, de l'azote, du fluor

Dérivés du carbone

Particules solides

- . La pollution des eaux continentales

Pollution « biologique »

Pollution « chimique »

- . La pollution des mers

Apports telluriques

Rejets d'effluents urbains

Rejets de matières solides 2 d'origine industrielle

Pollution de l'océan 2 par les composés organiques de synthèse

VII. Pollution nucléaire

- . Causes
- . Conséquences
- . Le problème des déchets radioactifs

VIII. Élimination et traitement 2 des déchets

- . La réglementation
 - Le cadre communautaire et national*
 - Définition du déchet*
 - Les grands principes*
- . Déchets ménagers et assimilés
 - Définition et composition*
 - Évacuation et collecte*
 - Les installations de traitement*
 - Récupération et valorisation*
- . Les déchets végétaux et agricoles

IX. Aspects économiques

- . Le coût des pollutions

X. La pollution et le droit

- . Vision classique : 2 problèmes de voisinage
- . Approche moderne : 2 technique, économie, démocratie
 - Sources*
 - Droit international*
 - Droit communautaire et droit interne : 2 l'exemple des déchets dangereux*
- . Prévention des pollutions
 - La voie technologique*
 - Instruments économiques*
- . Répression et réparation 2 des dommages
 - Intérêt limité 2 de la répression pénale*
 - Difficultés 2 de la réparation des dommages 2 en cas de préjudice écologique*
 - Collectivisation des risques : 2 fonds d'indemnisation*
 - Pollutions du passé : 2 l'inconnue*

XI. Le rôle des États

- . Principales politiques intérieures
 - La France*
 - La république fédérale d'Allemagne*
 - La Grande-Bretagne*
 - Autres pays d'Europe*
 - Europe centrale et orientale*
 - Les États-Unis d'Amérique*
 - Le Japon*
 - Les pays du Tiers Monde*
 - La Chine*
- . Aspects internationaux
 - La conférence de Rio de Janeiro 2 et les grandes organisations 2 internationales*
 - L'Europe*

XII. Bibliographie

Prise de vue

Bien que d'usage banal à l'heure actuelle, le terme de pollution recouvre des acceptions fort diverses et qualifie une multitude d'actions qui dégradent d'une façon ou d'une autre le milieu naturel.

Certes, le vocable désigne sans ambiguïté les effets des innombrables composés toxiques rejetés par l'homme dans l'environnement ; cependant, il s'applique également à d'autres altérations du milieu de nature physique ou chimique (émission de dioxyde de carbone dans l'atmosphère par exemple) qui, sans être nocives par elles-mêmes pour la santé humaine, sont susceptibles de provoquer des perturbations écologiques d'ampleur catastrophique.

Polluer signifie étymologiquement profaner, souiller, salir, dégrader. Ces termes ne prêtent pas à équivoque et nous paraissent tout aussi adéquats que les longues définitions données par les experts. Parmi ces dernières, nous retiendrons celle qui a été rédigée en 1965 par le Comité scientifique officiel de la Maison-Blanche pour la protection de l'environnement : « La pollution est une modification défavorable du milieu naturel qui apparaît en totalité ou en partie comme le sous-produit de l'action humaine, au travers d'effets directs ou indirects altérant les modalités de répartition des flux d'énergie, des niveaux de radiation, de la constitution physico-chimique du milieu naturel et de l'abondance des espèces vivantes. Ces modifications peuvent affecter l'homme directement ou au travers des ressources en produits agricoles, en eau, et autres produits biologiques. Elles peuvent aussi l'affecter en altérant les objets physiques qu'il détient, les possibilités récréatives du milieu ou encore en enlaidissant la nature. »

D'autres définitions, plus restrictives, limitent l'usage du terme de pollution au rejet de produits chimiques ou radioactifs dans l'environnement et désignent sous le vocable général de *nuisance* les autres altérations du milieu ambiant provoquées par l'homme (on parlera alors, par exemple, de nuisance sonore ou de nuisance esthétique...).

Malgré une opinion fort répandue, les pollutions ne constituent en aucun cas un problème récent ou un phénomène épisodique. Leurs origines remontent aux époques protohistoriques lorsque se constituèrent les premières cités souillées par les ruisseaux d'écoulement des eaux usées domestiques et par l'entassement dans les rues des ordures ménagères et autres résidus. Depuis ces temps reculés, la pollution urbaine a toujours sévi de façon chronique.

Pendant des millénaires, les causes de pollution furent peu nombreuses et d'importance limitée, résultant surtout de la contamination localisée des eaux superficielles et des nappes phréatiques par des bactéries pathogènes et des substances fermentescibles introduites dans les réseaux hydrologiques par les déchets domestiques, problème toujours aigu dans le Tiers Monde où ces pollutions restent une cause de morbidité grave : salmonelloses, hépatites virales ou choléra en sont des exemples.

Au cours du XIX^e siècle, la mutation industrielle a magnifié les besoins énergétiques, faisant d'abord appel pour les couvrir au charbon puis au pétrole, de sorte que les combustibles fossiles devinrent la source d'innombrables pollutions de l'air, de l'eau et des sols, depuis le stade de leur extraction jusqu'à celui de leur utilisation.

Avec le développement de la civilisation technologique contemporaine se sont ajoutées aux anciennes causes de

contamination de l'environnement par les résidus des activités humaines des causes nouvelles liées, par exemple, à la spectaculaire croissance de la chimie organique de synthèse et, en date plus récente, à celle de l'énergie nucléaire.

Divers facteurs de nature socio-économique ont aggravé les problèmes de pollution. En premier lieu, l'urbanisation accélérée des pays industrialisés a eu pour corollaire une concentration incessante des industries et de l'habitat, multipliant les sources de contamination de l'environnement et les causes de nuisance. Ensuite, la technologie moderne, en permettant une expansion considérable de la production industrielle, a engendré des masses énormes de déchets, tout en élaborant une multitude de substances minérales ou organiques non biodégradables, parfois très toxiques, ou encore indestructibles (matières plastiques, certains pesticides, résidus de fabrication tels les redoutables dioxines, métaux inoxydables, radionucléides, etc.).

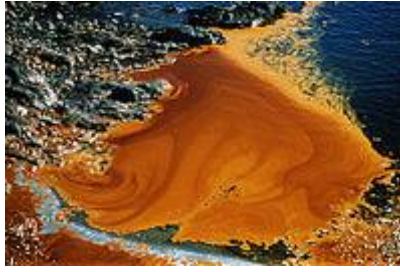
Quelques spectaculaires affaires de pollution ont fait prendre conscience, non seulement au grand public mais aussi aux hommes politiques, de la gravité des conséquences pouvant résulter de la contamination accidentelle ou chronique de l'environnement. Ainsi, le 23 juin 1969 un tonneau d'un insecticide, l'endosulfan, tombé dans le Rhin en aval de Bingen, pollua ce fleuve sur 600 kilomètres (jusqu'à son embouchure), faisant périr plus de 20 millions de poissons selon certaines estimations.

La catastrophe de Seveso, survenue le 10 juillet 1976, a donné une illustration saisissante des risques écotoxicologiques associés à un polluant aussi toxique et persistant que la dioxine. Ce jour-là, l'explosion d'un réacteur de synthèse de trichlorophénol provoqua la contamination par ce redoutable sous-produit d'une surface de 1 500 hectares dans la banlieue de Milan où est située cette localité. Moins de 4 kilogrammes de dioxine ont été répandus dans cette zone suburbaine, mais cela suffit pour provoquer la mort de 600 animaux domestiques et l'intoxication de 1 288 personnes !

En matière de pollution nucléaire, l'accident de Tchernobyl, survenu le 26 avril 1986, donne aussi un exemple spectaculaire des dimensions cataclysmiques que peuvent prendre les pollutions bien que, en l'occurrence, une proportion relativement faible de la quantité totale de radioactivité contenue dans le cœur de ce réacteur ait été dispersée dans l'environnement. Cette catastrophe provoqua la mort de trente-quatre personnes et l'irradiation à des doses très élevées de plusieurs centaines d'autres. En outre, parmi les millions de personnes exposées aux retombées radioactives, un nombre, encore mal évalué au milieu des années 1990, a déjà péri de cancers de la thyroïde et de leucémies. Les estimations les plus pessimistes font état de cent trente mille décès par cancer susceptibles de survenir dans les soixante-dix ans qui suivent l'accident. 3 000 kilomètres carrés de terres cultivables, de prairies et de forêts furent aussi contaminés, et l'on ne peut déterminer le moment à partir duquel cette surface pourra être réutilisée sans risque par les populations locales.

À côté des risques « qualitatifs » liés à la redoutable toxicité de certaines substances existent des causes de pollution « quantitatives » dont les conséquences écologiques peuvent être catastrophiques, malgré la moindre nocivité des polluants concernés, par suite de l'énormité des masses qui sont déversées dans le milieu naturel. Les « marées noires » en donnent un exemple fort illustratif. Ainsi, lors du naufrage de l'*Exxon Valdez*, qui a eu lieu le 24 mars 1989 dans la baie du Prince-Guillaume (Alaska), 42 000 tonnes de pétrole brut contaminèrent près de 500 kilomètres de littoral, provoquant des ravages dans la flore et la faune marines (oiseaux de mer, phoques et surtout les rares loutres de mer) .

Marée noire : l'Exxon Valdez, 1989



La marée noire provoquée par le naufrage du pétrolier Exxon Valdez, en mars 1989, dans la baie du Prince-Guillaume, en Alaska (États-Unis).

En définitive, tout au long de son histoire, la civilisation industrielle s'est caractérisée par une croissance spectaculaire du nombre et de l'intensité des pollutions dont elle est la cause. En sus de leurs conséquences directement néfastes à la santé humaine, celles-ci perturbent de façon de plus en plus préoccupante, comme nous allons le voir, divers processus écologiques fondamentaux propres au fonctionnement de la biosphère.

La notion de nuisance

Le terme de nuisance désigne toute dégradation de l'environnement qui ne présente pas d'impact écotoxicologique mais qui a pour conséquence d'induire une gêne pour les personnes qui la subissent. À la différence des pollutions, les nuisances ne provoquent pas nécessairement d'effet néfaste sur la santé humaine et/ou sur le plan écologique. Toutefois, elles sont perçues à juste titre par ceux qui y sont exposés comme une modification défavorable de l'environnement.

On peut citer en exemple les *nuisances esthétiques* provoquées par un urbanisme indigent (qui peut altérer gravement la qualité des paysages) ou par la dispersion d'emballages plastiques dans la nature, les *nuisances sonores* dues aux bruits liés au voisinage, à la circulation ou encore aux activités industrielles, ces bruits ayant des intensités inférieures au seuil de lésions physiologiques.

Une confusion fréquente est faite entre pollutions et nuisances. Elle résulte du fait que les premières réglementations destinées à protéger l'environnement de l'homme ne faisaient pas la distinction entre des altérations de l'environnement de nature fort différente et aux conséquences d'ampleur très inégale tant pour les populations humaines que pour les milieux naturels. Ainsi, les réglementations successives sur les installations classées – établissements industriels et autres usines dont les activités sont potentiellement polluantes et qui de ce fait entrent dans un cadre législatif qui définit leur zone d'implantation et contrôle les émissions de polluants – mettaient sur un même plan des industries malodorantes et des usines polluantes pour l'atmosphère bien qu'il existe une différence fondamentale entre l'émission d'effluents gazeux dont le seul inconvénient est de provoquer une mauvaise odeur et celle de gaz polluants – certes éventuellement malodorants – mais qui présentent surtout une toxicité considérable pour les animaux et les végétaux. À l'opposé, certains polluants de l'air peuvent être d'une effroyable toxicité pour l'homme tout en étant entièrement inodores.

À la différence des pollutions, les nuisances ne provoquent donc aucune perturbation écologique ou toxicologique et ne concernent généralement que le milieu urbain et les environs des agglomérations. Le concept de nuisance est essentiellement anthropocentrique.

Le bruit représente la nuisance la plus répandue. Elle est provoquée par des sons d'intensité trop forte. À partir d'une certaine intensité, dont les effets nocifs peuvent être accrus par des fréquences trop basses ou trop élevées, le bruit peut atteindre des valeurs où se produisent des effets physiologiques dangereux pour l'organisme. Dans la gamme des intensités sonores, il existe des valeurs qui dépassent le seuil de douleur de l'oreille (120 dB), à partir desquelles peuvent apparaître des lésions physiologiques irréversibles de l'oreille interne. Les infrasons (fréquences inférieures à 15 Hz) ont même pu expérimentalement provoquer, à de très fortes intensités, des hémorragies internes mortelles chez des animaux de laboratoire.

À la limite des intensités réputées tolérables, c'est-à-dire au-dessous de 80 dB, le bruit excessif, même pendant le sommeil, peut engendrer des effets psychophysiologiques défavorables.

Cependant, dans l'immense majorité des cas, le bruit demeure à la limite des nuisances dans la mesure où ses intensités sont inférieures à celles qui causent des dommages physiologiques détectables ; il crée en revanche une gêne de voisinage psychologiquement intolérable.

La nuisance visuelle (encore dénommée esthétique) est hélas assez répandue. Elle est liée soit à la laideur de l'habitat, soit à l'existence de constructions qui dénaturent le paysage, soit encore à la présence de débris chimiquement inertes mais qui souillent les sites .

Plage polluée



Le long ruban de débris sur une plage de sable.

Une plage couverte d'emballages rejetés par la mer , la présence dans un espace naturel de nombreux résidus de matières plastiques entraînés par le vent et accrochés aux branchages constituent une nuisance esthétique, bien qu'il n'y ait très généralement aucune pollution chimique associée. Un autre type de nuisance est constitué par les mauvaises odeurs non associées à des émanations gazeuses toxiques. Cette nuisance, dite olfactive, est beaucoup moins fréquente que les précédentes et généralement circonscrite aux alentours de certaines installations telles que les porcheries et autres élevages industriels importants, les usines d'équarrissage, certaines fabriques d'engrais chimiques, etc.

Pollution



Détritus rejetés par la marée, sur une plage du Texas, aux États-Unis.

Les principales causes de pollution

De nos jours, les principales causes de pollution de l'environnement proviennent de la production et de l'utilisation des diverses sources d'énergie, des activités industrielles et, de façon paradoxale mais néanmoins importante, de l'agriculture.

À chacune de ces causes fondamentales de pollution vont correspondre d'innombrables sources de dispersion des agents polluants situées depuis l'amont (industries extractives) jusqu'à l'aval, c'est-à-dire à celui des usages domestiques, lesquels peuvent jouer dans certains cas (matières organiques fermentescibles polluant les eaux par exemple) un rôle non négligeable dans la contamination de l'environnement.

La *production* et l'*utilisation d'énergie* viennent incontestablement au tout premier rang des causes de pollution de la biosphère.

Malgré les crises pétrolières de 1973 et de 1979, ainsi que la récession économique qui suivit dans la première moitié des années 1980, la consommation globale d'énergie a continué à croître. La diminution de l'usage du pétrole a été compensée par l'augmentation de celui du charbon, du gaz naturel et aussi par le développement de l'électronucléaire. En 1993, la consommation mondiale d'énergie a dépassé 12 milliards de tonnes d'équivalent charbon. Sur ce total, le pétrole a représenté plus de 4,5 milliards de tonnes, le charbon 3,1 milliards de tonnes, le gaz naturel 2,5 milliards de tonnes, le reste étant assuré par l'hydroélectricité et le nucléaire.

Cette consommation d'énergie fossile a rejeté cette année-là quelque 6,19 milliards de tonnes d'équivalent carbone sous forme de CO₂ dans l'atmosphère, contribuant ainsi de façon significative à l'augmentation de l'effet de serre.

À cela il faudrait ajouter l'usage du bois comme combustible dans les divers pays en développement (plusieurs centaines de millions de tonnes d'équivalent charbon par an), qui est la source d'une déforestation importante et aussi d'une pollution méconnue à l'intérieur des habitations en raison des mauvaises combustions.

De telles données numériques permettent de saisir le rôle majeur joué par la production de l'énergie dans la pollution de la biosphère. À tous les stades de l'activité humaine, l'usage des hydrocarbures fossiles, mais aussi celui du charbon, les place au premier rang des sources de contamination de l'environnement.

L'extraction et la combustion des *produits pétroliers* s'accompagnent d'innombrables pollutions : marées noires provenant des fuites de puits off shore ou d'accidents de transport qui contaminent l'océan mondial, raffinage qui pollue les eaux continentales, de même que les vidanges « sauvages » et autres usages dispersifs des hydrocarbures. Enfin,

leur combustion libère dans l'atmosphère divers polluants gazeux (gaz carbonique, oxyde de carbone, de soufre, d'azote, hydrocarbures imbrûlés, dérivés du plomb utilisés comme additifs dans les essences, etc.). En définitive, la boulimie énergétique propre aux pays industrialisés s'accompagne d'une contamination sans cesse accrue de l'air, des eaux continentales, de l'océan et même des sols par les innombrables substances polluantes produites par les combustions.

D'autres inquiétudes résultent du *développement de l'énergie nucléaire*. Aux appréhensions justifiées suscitées par les essais dans l'atmosphère de bombes H et autres engins dits de « dissuasion », et par la multiplication de ces armements qui seraient susceptibles de provoquer un cataclysme écologique, est venue s'ajouter la crainte d'une pollution insidieuse et généralisée provoquée par les rejets d'effluents dilués radioactifs dans l'air et les eaux. Ces derniers proviennent des réacteurs nucléaires mais surtout des usines de retraitement des combustibles irradiés indispensables à tout développement de l'énergie atomique à des fins pacifiques. La production de déchets nucléaires, déjà significative, posera de sérieux problèmes de stockage autour de l'an 2010. On a pu calculer que, si les États-Unis voulaient subvenir à tous leurs besoins en électricité à l'aide de centrales nucléaires, ils devraient gérer dans les années 2000 une production annuelle de déchets équivalente à celle engendrée par l'explosion de 8 millions de bombes atomiques de type Hiroshima !

En sus de la pollution chimique et autres nuisances engendrées par la production de l'énergie, on ne saurait omettre l'une d'entre elles, particulièrement importante, la *pollution thermique des eaux*, qui est de nature physique.

Comme le rendement thermodynamique des combustions excède rarement 40 %, quelque 60 % de l'énergie potentielle est perdue dans l'environnement sous forme de basses calories inutilisables lorsque l'homme « brûle » du charbon, du pétrole ou de l'uranium 235. Le refroidissement d'une centrale électrique de 1 000 mégawatts électriques nécessite de la sorte le débit d'un fleuve entier comme la Seine à son étiage ! La pollution thermique des eaux fluviales ou littorales qui en résulte se traduit par un réchauffement dont les conséquences sont catastrophiques pour les êtres vivants dulçaquicoles et marins.

Contaminants d'origine industrielle

L'*industrie chimique moderne*, mais aussi la métallurgie, voire l'électronique mettent en circulation dans la biosphère d'innombrables composés minéraux ou organiques de toxicité souvent élevée ou encore peu dégradables, parfois même indestructibles : mercure, cadmium, niobium, antimoine, vanadium représentent autant de corps simples ne se rencontrant qu'à l'état de trace dans les milieux terrestres ou aquatiques mais qui sont aujourd'hui devenus d'usage banal dans diverses branches industrielles.

Quant à la chimie organique de synthèse, elle élabore des composés artificiels en nombre sans cesse accru. En 1992, on estimait que plus de 500 nouvelles molécules étaient mises sur le marché chaque année et qu'au total environ 120 000 molécules minérales ou organiques de synthèse faisaient l'objet d'un usage commercial dans le monde. Plus inquiétant encore, en ce qui concerne les risques écotoxicologiques de cette invasion chimique, on considère que tout au plus le tiers de ces substances ont fait l'objet d'une étude crédible de leur impact potentiel sur l'environnement de l'homme.

En conséquence, un nombre considérable de ces substances est rejeté dans le milieu naturel et contribue à une

pollution à vaste échelle des divers écosystèmes. Si l'opinion publique des pays industrialisés est depuis longtemps au fait des « retombées » radioactives, elle ignore souvent que le même phénomène se produit pour un grand nombre de contaminants d'origine industrielle. On trouve des fragments de matière plastique dérivant du centre de l'Atlantique, et des traces de composés organochlorés non biodégradables (dichloro-diphényl-trichloréthane ou D.D.T., polychlorobiphényles ou PCB) dans l'organisme des Mammifères du Grand Nord canadien ou dans celui des manchots de l'Antarctique ! Un autre exemple de cette invasion chimique de l'écosphère a été donné par la mise en évidence dans la seconde moitié des années 1980 de traces de chlorofluorocarbures (CFC) dans la stratosphère antarctique.

Déchets solides

La civilisation moderne produit aussi des masses colossales de déchets solides, qui peuvent se classer selon diverses modalités. On pourra, par exemple, distinguer des déchets domestiques (ordures ménagères), agricoles et industriels. Les deux premières catégories sont essentiellement constituées de matières organiques, donc biodégradables. En revanche, les déchets des industries minières, métallurgiques, chimiques et nucléaires renferment des résidus intrinsèquement non biodégradables, voire inaltérables, et/ou des substances dont la toxicité est importante. Certains composés, tels que les dioxines, présentent même la particularité d'être à la fois peu ou pas dégradables et extrêmement toxiques.

Les déchets domestiques et agricoles peuvent représenter des volumes considérables. Ainsi, les seuls déchets solides de l'agriculture américaine excédaient 1,4 milliard de tonnes par an à la fin des années 1980.

Les déchets urbains posent aussi des problèmes spécifiques, car leur « production », si l'on peut dire, se concentre sur de faibles surfaces. En outre, les ordures ménagères posent, par les volumes considérables produits, de sérieux problèmes de protection de l'environnement.

Aux États-Unis, en 1993, la production de déchets solides non agricoles s'élevait à 1,2 milliard de tonnes par an, dont 220 millions de tonnes d'ordures ménagères. En France, la production urbaine d'ordures excède 1 kilogramme par personne et par jour.

Parmi les divers déchets produits, les plus redoutables – en dehors des résidus de l'industrie nucléaire, qui font l'objet de traitements spécifiques et assez stricts dans les pays de l'Organisation de coopération et de développement économiques (O.C.D.E.) – résultent des industries chimiques et éventuellement métallurgiques, qui produisent de grandes quantités de déchets toxiques.

Ainsi, à la fin des années 1980, les déchets dangereux produits par les industries américaines étaient de l'ordre de 275 millions de tonnes par an (O.C.D.E., 1991).

Au cours des années 1980, la production allemande de déchets chimiques toxiques était de 5 millions de tonnes par an et celle de la France de 2 millions de tonnes (P.N.U.E., 1991). La France en exportait 50 000 tonnes par an, mais en importait dans le même temps 250 000 tonnes, ce qui faisait de ce pays un importateur de déchets chimiques toxiques avec une balance des flux largement excédentaire.

De même, l'O.C.D.E. estimait déjà en 1980 que les déchets produits par l'industrie nucléaire s'élevaient à 10 milliards de curies par an. Cette valeur pourrait dépasser 50 milliards de curies dans les années 2000.

En sus de la nuisance esthétique associée à l'accumulation d'une fraction non négligeable de ces déchets solides dans des décharges à ciel ouvert dites « contrôlées », le lessivage par les eaux pluviales de certains de ces résidus conduit à une pollution clandestine et préoccupante des nappes phréatiques.

Contaminants d'origine agricole

L'agriculture moderne représente une importante source de pollution de l'espace rural mais aussi des milieux intégrés par l'homme. L'usage massif des engrais chimiques, le recours systématique aux pesticides ont permis une augmentation considérable des rendements agricoles. Ils se sont malheureusement accompagnés d'une pollution accrue des eaux continentales, des terres cultivées, ainsi que des productions végétales et animales par divers contaminants minéraux ou organiques.

La consommation mondiale des engrais chimiques, en croissance incessante depuis un demi-siècle tant dans les nations développées que dans les pays en développement, est passée de 50 millions de tonnes en 1965 à 150 millions de tonnes en 1990.

L'abus des fertilisants en agriculture a été tel que, dans de nombreux pays, la pollution des eaux superficielles et surtout celle des nappes phréatiques atteignent localement des niveaux qui excèdent les concentrations réputées admissibles en nitrates dans l'eau potable. En France, c'est le cas d'environ 10 % des eaux de puits situées en général dans des zones de céréaliculture intensive. Les métaux et métalloïdes toxiques (cadmium, vanadium, chrome, cuivre, arsenic, etc.) contenus comme impuretés dans la deuxième grande catégorie d'engrais chimiques, les superphosphates, s'accumulent dans les sols et peuvent passer dans les plantes cultivées. L'usage des pesticides (insecticides, fongicides, herbicides, etc.) a également connu une expansion spectaculaire en agriculture. La consommation mondiale de ces produits (matières actives pures) s'élevait à plus de 1,8 million de tonnes en 1989 (d'après l'Institut international de l'environnement et du développement, 1992). La masse de ces substances dispersées est considérable si l'on songe au pouvoir extraordinairement biocide de certains de ces produits dont la toxicité compense largement sur le plan du potentiel toxicologique la réduction en tonnage de divers composés insecticides tel le D.D.T., dont la fabrication est interdite dans les pays industrialisés. Il en est de même de certains insecticides tels les pyréthroïdes qui, bien que quasi inoffensifs pour les animaux à sang chaud, sont très toxiques pour les poissons et les autres organismes aquatiques.

L'usage excessif des pesticides, qui s'accompagne aujourd'hui d'une pollution croissante des nappes phréatiques en sus de leurs impacts écologiques indésirables, a conduit des pays comme les Pays-Bas à mettre en œuvre un programme destiné à diviser par deux, d'ici au début du ^exxi^e siècle, les quantités de ces substances employées en agriculture. De telles mesures sont également envisagées par le ministère de l'Agriculture des États-Unis (U.S.D.A.). En France, plus de 400 pesticides sont homologués pour des usages agricoles ! Les masses de ces substances dispersées dans l'espace rural sont très considérables si l'on réfléchit à la toxicité ou/et à la persistance de certaines d'entre elles. Plus de 3 millions de tonnes de D.D.T. ont été dispersés dans la biosphère depuis sa découverte. Comme le temps de demi-vie dans les biotopes de cet insecticide excède souvent vingt ans, il en subsistera des quantités appréciables dans les milieux qu'il a

saurait être limité à l'aspect fallacieusement ponctuel du panache de fumée d'une cheminée d'usine ou à l'émissaire d'égout déversant ses effluents dans la mer. Dans la quasi-totalité des cas, les substances libérées dans l'écosphère vont être entraînées fort loin du point de rejet. La circulation atmosphérique et hydrologique les dispersera de façon progressive dans l'ensemble de l'écosphère.

Les mouvements atmosphériques jouent un rôle fondamental dans la dispersion des polluants et leur répartition dans les divers biotopes. Tout composé organique ou minéral, même s'il est solide, peut théoriquement passer dans l'air. Direct dans le cas des gaz, ce passage s'effectue sous forme d'aérosols pour les liquides à faible tension de vapeur et à l'état de fines particules dans le cas des solides non sublimables.

Certains des contaminants introduits par l'homme dans l'atmosphère sont en fait des constituants naturels. L'anhydride sulfureux, la dioxyde de carbone, les oxydes d'azote, ou même le mercure produits par l'homme s'ajoutent aux quantités normalement présentes dans l'air. Ces dernières proviennent des divers processus biogéochimiques, donc des phénomènes naturels comme le volcanisme. D'autres substances polluantes : radionucléides, pesticides, PCB, agents plastifiants, etc., sont exclusivement d'origine technologique.

Les lois générales de la circulation atmosphérique

La connaissance des lois générales de la circulation des masses d'air dans l'atmosphère est essentielle pour comprendre les mécanismes par lesquels s'effectue la contamination de la biosphère.

Ces lois montrent que les masses d'air sont animées de mouvements horizontaux et verticaux, qui assurent rapidement la dispersion des polluants dans l'ensemble de l'atmosphère.

Le sens et la vitesse des courants stratosphériques et troposphériques sont connus avec précision. Ainsi a-t-on pu montrer l'existence d'un vent dominant d'ouest qui souffle au niveau de la tropopause (limite entre la troposphère, qui correspond aux couches les plus basses de l'atmosphère, et la stratosphère) dans l'hémisphère Nord. Sa vitesse, de l'ordre de 35 mètres par seconde, permet un transit circumterrestre de toute substance injectée à ce niveau en douze jours. Cela explique la célérité avec laquelle les particules émises par une éruption volcanique se dispersent dans l'ensemble de l'atmosphère planétaire.

À ces courants horizontaux se combinent des mouvements verticaux des masses d'air, qui permettent une circulation atmosphérique du nord vers le sud. La combinaison des vents ouest-est, avec une dérive ascensionnelle au niveau des basses latitudes engendre un type de circulation atmosphérique dénommé *cellule de Hadley*. Celui-ci permet l'échange des masses d'air entre les deux hémisphères au niveau de la troposphère des régions équatoriales. Entre l'équateur et les régions polaires viennent se placer en contact avec les cellules de Hadley d'autres cellules, dites *de Ferrel*, qui assurent le transfert des masses d'air polaires vers les tropiques et des masses d'air tropicales vers les pôles .

Circulation en cellule de l'atmosphère

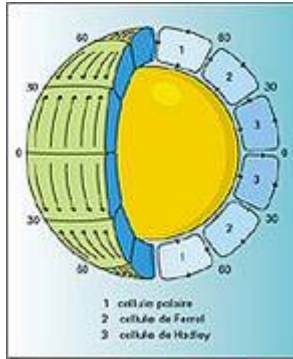


Schéma de la circulation en cellule de l'atmosphère. La combinaison de mouvements horizontaux et verticaux provoque la dispersion des polluants dans l'ensemble de l'atmosphère globale (d'après F. Ramade « Écologie fondamentale », McGraw-Hill Ediscience, 1994).

Le transport à distance des polluants dans l'atmosphère

Les distances parcourues par les polluants introduits dans l'atmosphère dépendent de plusieurs paramètres et en particulier de l'intensité de l'émission, de son altitude d'injection, de la taille des particules (pour les produits solides et les aérosols) et de la stabilité chimique de la substance considérée.

On peut distinguer trois catégories de transport atmosphérique des polluants, qui correspondent à une circulation à l'échelle locale, moyenne ou globale .

Transport atmosphérique des polluants

échelle de distance	mécanismes de transport	mécanismes de neutralisation	modification
locale (100 km)	vents dominants	pluie	zones de stabilité
moyenne (100-1000 km)	instabilités verticales dans la troposphère et les courants régionaux	pluie, neutralisation chimique	zones de transition isolées à intervalles multiples
globale	circulation générale	pluie continentale et océanique	zones de circulation atmosphérique

Principaux types de transport atmosphérique des polluants (d'après Miller et Robinson, 1989).

Dans le cas de la circulation globale, au transport troposphérique se superpose un transport stratosphérique qui explique l'accumulation de certains polluants dans la stratosphère arctique et antarctique. Il existe en effet une ascendance verticale dans la basse stratosphère équatoriale qui prolonge la cellule de Hadley. Dans la stratosphère, cette branche se sépare en deux : l'une se dirige vers le pôle d'été, où elle s'associe au mouvement ascendant des masses d'air induit par le réchauffement dû à l'ozone stratosphérique, qui capte une partie de l'énergie solaire , l'autre branche se dirige vers le pôle d'hiver, où elle contribue à l'accumulation de polluants qui s'observe dans l'atmosphère de cette région à cette période de l'année.

Circulation stratosphérique

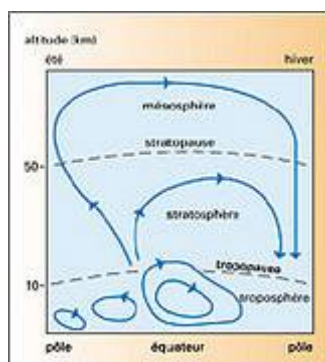


Schéma de la circulation stratosphérique expliquant le transport d'aéropolluants émis dans l'hémisphère Nord vers la stratosphère antarctique (d'après F. Ramade, « Écotoxicologie », Masson, 1992).

On y retrouve ainsi tous les gaz polluants dont la stabilité chimique est assez forte pour permettre leur transfert dans des zones si reculées de l'atmosphère : acides nitrique et sulfurique mais aussi des traces de leurs précurseurs (NO_2 , SO_2). C'est à ce phénomène de circulation stratosphérique des polluants gazeux que l'on doit attribuer l'existence du « brouillard arctique » mis initialement en évidence en Alaska au début des années 1980 et qui recouvre en fait toute la zone arctique boréale pendant l'hiver. C'est aussi ce phénomène de circulation stratosphérique qui explique la présence, en Antarctique, au début du printemps, de polluants gazeux (Fréons en particulier) et d'aérosols dans les nuages stratosphériques, situés entre 10 et 20 kilomètres d'altitude. Ces nuages constituent un site préférentiel de la destruction de l'ozone stratosphérique par les CFC.

Le temps de séjour des polluants dans l'atmosphère

Si la diffusion des polluants est rapide, voire presque immédiate au niveau de la troposphère, elle s'effectue en revanche très lentement dans la stratosphère à cause de la faible vitesse d'échange entre les couches d'altitude différente. Les mouvements verticaux y atteignent tout au plus quelques centimètres par seconde, de sorte que des particules introduites à ce niveau peuvent y séjourner des années. On a pu calculer que la durée moyenne pendant laquelle une particule insédimentable demeure dans la stratosphère est comprise entre deux et trois ans à l'altitude de 30 kilomètres ; elle est d'un an dans la basse stratosphère (entre 15 et 18 km) et de deux mois au niveau de la tropopause. Cette durée ne dépasse pas trente jours dans la troposphère moyenne (vers 6 000 m). Les aérosols ne séjournent qu'une semaine dans la basse troposphère, au-dessous de 3 000 mètres d'altitude.

Quand un polluant est libéré dans l'atmosphère, il peut soit être transformé en une autre forme chimique, soit être éliminé ou demeurer dans l'atmosphère, contribuant ainsi au phénomène général d'accumulation.

En réalité, très peu de polluants chimiques se déplacent à grande distance dans l'air sans subir des mécanismes de transformation ou d'élimination par suite de phénomènes de réaction avec la vapeur d'eau, d'oxydation, associés ou non à des processus de dégradation photochimique.

En réalité, le temps de séjour d'un polluant dépend de l'efficacité des mécanismes physico-chimiques (lorsqu'ils existent), qui permettent leur extraction de l'atmosphère puis leur transformation et leur accumulation dans les eaux et les sols. De tels processus font défaut pour certaines substances volatiles peu réactives libérées dans l'air, comme les Fréons

et, a fortiori, pour les gaz rares radioactifs dont l'absence totale de réactivité chimique est bien connue. Ces éléments risquent donc de s'accumuler et de persister pendant une durée indéterminée, mais prolongée, dans l'atmosphère ; tel est le cas du krypton 85 produit par les réacteurs nucléaires, dont la période est de 10,5 ans.

Passage des polluants de l'atmosphère dans l'eau et les sols

Fort heureusement, à quelques rares exceptions près, les polluants atmosphériques ne séjournent pas indéfiniment dans l'air. Les précipitations et les mécanismes de dépôt sec des particules les ramènent à la surface du sol et/ou dans l'hydrosphère. Les particules solides sont entraînées mécaniquement ou par dissolution ; les substances gazeuses sont également dissoutes dans les eaux pluviales. Ces mécanismes inertes de dépôt à la surface des eaux, des sols et de la végétation constituent les processus d'épuration de l'atmosphère de loin les plus importants pour les polluants qui ne sont pas dégradés in situ dans l'air.

Les polluants circulent ensuite à la surface des continents, cheminant dans les sols et contaminant les eaux superficielles et les nappes phréatiques. En outre, le jeu du lessivage et de l'érosion hydrique intervient de façon essentielle dans le transfert des polluants des sols vers l'hydrosphère. En définitive, les phénomènes géochimiques vont avoir pour conséquence d'amener, tôt ou tard, la masse des polluants émis par l'homme dans l'océan mondial, qui constitue l'ultime réceptacle des agents toxiques et autres contaminants.

Le rôle fondamental du cycle de l'eau et de la circulation atmosphérique générale dans le transfert des polluants fut mis en évidence au cours des années 1950 lors du suivi des retombées radioactives provoquées par les expériences nucléaires (cf. *infra*).

De nombreuses études de chimie analytique sur les contaminants traces ont confirmé que le jeu combiné de la circulation atmosphérique et des précipitations pouvait transférer les polluants fort loin de leurs zones d'émission.

Le premier exemple démontrant le transport de composés chimiques polluants à l'échelle planétaire fut la découverte, dès la fin des années 1960, d'une contamination des neiges tombant sur l'Antarctique par le D.D.T.

Les pluies acides constituent aussi un excellent exemple de transfert des polluants atmosphériques à grande distance. Elles peuvent affecter de grandes surfaces, voire des continents entiers. L'étude du pH des eaux de pluie montre que celui-ci a sérieusement diminué (augmentation de l'acidité) à la suite de l'usage sans cesse accru de combustibles fossiles riches en soufre. Les zones où les pluies sont les plus acides sont certes celles où se concentrent les industries et/ou les grandes agglomérations, mais on a remarqué le même phénomène dans des régions reculées de Scandinavie septentrionale. L'acidité des pluies dans ces dernières régions s'explique par le déplacement des masses d'air polluées émises par les pays d'Europe occidentale et centrale : plus de la moitié des apports annuels en SO₂ étant importée du sud de la Grande-Bretagne et du nord-est de l'Europe occidentale sous l'effet des vents dominants d'ouest.

La catastrophe de Tchernobyl a aussi montré de façon concrète la vitesse à laquelle des masses d'air contaminées sont susceptibles d'atteindre des régions éloignées de la source d'émission. Le nuage radioactif s'étendit sur l'Europe puis sur tout l'hémisphère Nord dans la semaine qui suivit l'accident.

La circulation hydrologique assure ensuite le transfert des effluents liquides et des apports telluriques émis dans les fleuves à partir de sols pollués vers l'océan. Il faut mentionner que les quantités d'hydrocarbures dues aux pertes de carburants et aux rejets sauvages d'huiles de vidange (ainsi qu'aux éventuels accidents survenant en milieu terrestre) apportent dans l'océan plus de 1 million de tonnes de pétrole par an, soit une quantité nettement supérieure à celle qui a été déversée en moyenne chaque année par les marées noires depuis les années 1960.

Enfin, en milieu océanique, le jeu des courants marins contribue à introduire des contaminants fort loin des zones où ils ont été rejetés.

Le seul transport des hydrocarbures, même en l'absence de marées noires, est la cause d'une contamination chronique de l'océan mondial, les courants dispersant le pétrole sur de vastes surfaces des océans Atlantique et Indien estimées à plus de 50 millions de kilomètres carrés en moyenne.

Transfert des polluants dans la biomasse et contamination des réseaux trophiques

La contamination des divers écosystèmes continentaux et marins par les agents polluants va se traduire par leur transfert sur les êtres vivants.

Ici intervient une notion importante, celle de dégradabilité. Il apparaît, de façon fort opportune, qu'un grand nombre de substances dispersées dans l'environnement sont instables. L'action des facteurs physico-chimiques les décomposera très vite en dérivés peu ou pas toxiques. Dans bien des cas, les micro-organismes – bactéries édaphiques ou aquatiques – joueront un rôle actif dans cette décomposition : on dit alors que la substance est biodégradable.

Malheureusement, si de nombreuses substances organiques et même minérales peuvent être converties par le jeu des facteurs biogéochimiques en des formes de toxicité atténuée, voire nulle, il existe toutefois toute une série de polluants qui sont peu ou pas biodégradables : les composés organochlorés, la plupart des matières plastiques, les diverses formes de métaux ou de métalloïdes toxiques en sont quelques exemples.

Ces éléments non biodégradables vont alors contaminer les communautés végétales puis animales, c'est-à-dire l'ensemble des réseaux trophiques (différents niveaux de la chaîne alimentaire) de chaque biocénose.

L'étude systématique de la contamination d'animaux terrestres ou marins à régime carnivore ou ichtyophage a révélé l'étendue de la pollution de la biosphère par des polluants non biodégradables, en particulier par les composés organohalogénés (insecticides, tel le D.D.T.) ou les polychlorobiphényles, substances apparentées au D.D.T. que l'on retrouve même chez certains oiseaux de mer tels les pétrels ou les puffins, qui vivent dans les zones océaniques les plus reculées des côtes. Plus près de nous, l'accumulation de ces mêmes substances chez les phoques de la mer Baltique a été la cause d'une importante régression des populations de ces Mammifères. Il en est de même des populations de bélougas, cétacé autrefois abondant dans le Saint-Laurent, au Québec, et dont les effectifs se sont effondrés au cours des années 1970 et 1980.

Concentration par les êtres vivants : notion de bioconcentration et de bioaccumulation

La dernière phase de la circulation d'un polluant dans la biosphère est constituée par la contamination des êtres vivants et, parfois, par la bioaccumulation dans l'organisme de ces derniers.

On désigne par le terme de *bioconcentration* l'accroissement direct de concentration d'un polluant lorsqu'il passe de l'eau dans un organisme aquatique. Cette notion peut être étendue aux organismes terrestres : passage de l'air et/ou du sol dans les plantes par pénétration transfoliaire et/ou transradiculaire, passage direct de l'air dans les espèces animales par inhalation.

Le terme de *bioaccumulation* désigne, lui, la somme des absorptions d'un polluant par voie directe et alimentaire par les espèces animales aquatiques ou terrestres. Il convient cependant de noter que, chez les animaux terrestres, le terme de bioaccumulation se réfère, en règle très générale, à l'absorption d'un polluant par voie alimentaire, car il est très rare qu'un contaminant du sol donne simultanément une inhalation significative dans un biotope donné.

Ce phénomène de bioaccumulation est connu de longue date grâce à l'existence d'espèces capables d'accumuler des substances naturelles à des concentrations plusieurs dizaines de milliers de fois supérieures à celles que l'on rencontre dans les sols ou les eaux. Ainsi, l'aptitude des algues du genre *Fucus* ou *Laminaria* à concentrer l'iode et le brome présents dans l'eau de mer a été mise à profit depuis fort longtemps pour l'extraction industrielle de ces éléments.

Ce processus de bioaccumulation s'observe également avec les diverses substances minérales ou organiques introduites par l'homme dans le milieu naturel. Ainsi, le plutonium, rejeté dans l'océan par les effluents dilués des usines de traitement de combustibles irradiés, peut être concentré jusqu'à 3 000 fois par le phytoplancton par rapport à sa dilution dans l'eau de mer et jusqu'à 1 200 fois par les algues benthiques. C'est d'ailleurs à la suite de pollutions radioactives que furent signalés les premiers cas connus de concentration biologique de polluants. Dès 1954, en Amérique du Nord, R. F. Foster et R. E. Rostenbach observaient que le phosphore 32 se trouvait dans le phytoplancton du fleuve Columbia (pollué par les rejets des réacteurs plutonigènes d'Hanford) à une concentration 1 000 fois supérieure à celle de l'eau de ce fleuve.

Le *facteur de concentration*, F_c , peut être défini comme le rapport de la concentration d'un polluant dans un organisme à sa concentration dans le biotope. Dans le cas des PCB, nous aurons :

$$F_c = \frac{[\text{PCB}]_{\text{organisme}}}{[\text{PCB}]_{\text{eau ou sol}}}$$

De nombreux êtres vivants, sinon tous, peuvent accumuler dans leur organisme, à des degrés divers, toute substance peu ou pas biodégradable. Certains d'entre eux présentent une aptitude particulière à la bioconcentration des polluants. Ainsi, les vers de terre, grâce à leur régime détritophage qui les conduit à ingérer chaque jour une masse d'humus égale à plusieurs fois leur poids, peuvent bioconcentrer le D.D.T. ou le plomb à des concentrations plusieurs dizaines de fois

supérieures à celles des sols. De même, les mollusques bivalves, telles que les huîtres, peuvent accumuler dans leur partie molle des polluants, comme le D.D.T., à des concentrations plusieurs dizaines de milliers de fois supérieures à celles des eaux marines. Il va en résulter un phénomène de transfert et d'amplification biologique de la pollution à l'intérieur des biocénoses contaminées (dénommé *bioamplification* ou encore *biomagnification*). Chaque chaîne trophique sera le site d'un processus d'accroissement de la concentration des polluants persistants dans la biomasse au fur et à mesure que l'on remonte les divers niveaux de la pyramide écologique. Les teneurs observées dans les tissus des espèces situées au sommet des chaînes alimentaires seront d'autant plus élevées, toutes choses égales par ailleurs, que le composé sera plus stable et la chaîne alimentaire plus longue. C'est ainsi que s'expliquent, pour une même substance, les facteurs de concentration toujours plus élevés en milieu aquatique que dans les écosystèmes terrestres.

En fait, on peut observer trois cas de figure caractérisant la circulation d'un polluant dans la communauté propre à un biotope contaminé. Le premier, heureusement le plus fréquent, se traduit par une diminution de la concentration du contaminant au fur et à mesure que l'on s'élève dans le réseau trophique. Il concerne essentiellement les substances toxiques biodégradables (polluants organiques de synthèse) ainsi que les produits pour lesquels la barrière intestinale fait obstacle à la pénétration dans les organismes vivants. Le deuxième cas est marqué par un simple transfert du contaminant (cas des polluants toxiques mais nécessaires pour l'organisme comme le cobalt et autres oligo-éléments), le troisième, heureusement relativement rare, rapporté à l'ensemble des polluants persistants est marqué par une bioamplification dans les échelons supérieurs des chaînes trophiques.

Importance et effets écologiques des principaux types de pollution

La pollution atmosphérique

Provoquée par le rejet intempestif de substances diverses dans l'atmosphère, la pollution atmosphérique constitue sans aucun doute la plus évidente des dégradations de l'environnement.

La pollution de l'air est la résultante de multiples facteurs qui caractérisent la civilisation contemporaine : croissance de la consommation d'énergie, développement des industries extractives, métallurgiques et chimiques, de la circulation routière et aérienne, de l'incinération des ordures ménagères, des déchets industriels, etc.

La pollution atmosphérique sévit surtout en milieu urbanisé, non seulement par suite de la concentration des industries et des foyers domestiques, mais aussi par suite de la circulation des véhicules à moteur.

Principaux polluants atmosphériques

Les principales substances polluant l'atmosphère peuvent se répartir en deux groupes principaux : les gaz et les particules solides (poussières, fumées) dénommées parfois à tort aérosols. On estime que les gaz représentent 90 % des masses globales de polluants rejetés dans l'air et les particules les 10 % restants.

Nous avons vu que l'origine de cette pollution est très variée. Le tableau décrit la nature et les principales causes d'émission de ces polluants que nous qualifierons de primaires. En effet, le problème est compliqué par le fait que beaucoup de contaminants injectés dans l'atmosphère vont réagir entre eux, même à forte dilution, pour donner de nouveaux composés très toxiques. Ainsi, l'anhydride sulfureux (SO_2) va s'oxyder dans l'air en SO_3 , lequel, à son tour, donnera, avec la vapeur d'eau, de l'acide sulfurique. Il contribuera ainsi, de façon déterminante, avec l'acide nitrique formé à partir des oxydes d'azote, à l'apparition du phénomène des pluies acides, véritable fléau qui sévit dans les pays industrialisés.

Polluants atmosphériques : nature et origine

	nature du polluant	source d'émission
gaz	oxyde de carbone	combustion : - usines - moteurs des véhicules - chauffage domestique
	oxyde de carbone	combustion : - usines - moteurs des véhicules - chauffage domestique
	hydrocarbures	échappement des moteurs - usines - chauffage domestique
	composés organiques	échappement des moteurs - usines - chauffage domestique
	anhydride sulfureux et autres oxydes soufrés	combustion : - usines - moteurs des véhicules - chauffage domestique
aérosols	particules solides	combustion : - usines - moteurs des véhicules - chauffage domestique
	particules liquides	combustion : - usines - moteurs des véhicules - chauffage domestique
	particules solides	combustion : - usines - moteurs des véhicules - chauffage domestique
	particules solides	combustion : - usines - moteurs des véhicules - chauffage domestique
	particules solides	combustion : - usines - moteurs des véhicules - chauffage domestique
aérosols	particules solides	combustion : - usines - moteurs des véhicules - chauffage domestique
	particules solides	combustion : - usines - moteurs des véhicules - chauffage domestique
	particules solides	combustion : - usines - moteurs des véhicules - chauffage domestique

Nature et origine des principaux polluants atmosphériques.

Bien que, d'une façon générale, une tendance à la diminution de la pollution de l'air urbain se soit manifestée dans de nombreux pays industrialisés, essentiellement à la suite des chocs pétroliers des années 1970, la pollution atmosphérique demeure préoccupante dans l'ensemble des villes du monde, certains types d'aéropolluants, en particulier les dérivés de l'azote et de l'ozone, ayant même tendance à augmenter en raison de l'accroissement incessant de la circulation automobile urbaine. La réaction des oxydes d'azote avec les hydrocarbures imbrûlés rejetés dans l'air par les échappements des véhicules à moteur produit des PAN (peroxyacétylnitrates), polluants secondaires beaucoup plus nocifs que les contaminants primaires dont ils proviennent.

Effets de la pollution atmosphérique

Les polluants rejetés dans l'atmosphère vont induire une multitude d'effets néfastes non seulement sur les espèces vivantes exposées, homme inclus, mais également sur l'ensemble des écosystèmes et même à l'échelle globale en perturbant les grands cycles biogéochimiques.

Dérivés du soufre, de l'azote, du fluor

L'*anhydride sulfureux* (SO_2) constitue le polluant atmosphérique dont l'impact sur l'ensemble des êtres vivants est de loin le plus préoccupant. Ce gaz se transforme rapidement dans l'air en acide sulfurique, très hygroscopique, qui joue un rôle essentiel dans la formation des *smogs* acides, brouillards propres aux milieux urbains des régions à climat tempéré froid où sévit une forte pollution de l'air.

L'anhydride sulfureux est aussi responsable des *pluies acides*, car il provoque une acidification incessante du pH des précipitations dans l'ensemble des pays industrialisés. Ces pluies acides sont responsables du dépérissement à vaste

échelle des forêts de conifères, et de l'acidification des eaux des lacs situés sur terrains cristallins.

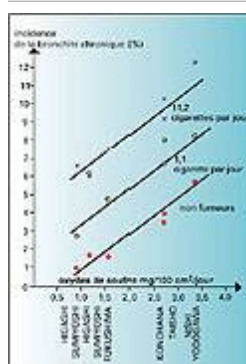
La pollution de l'air par le SO_2 est particulièrement néfaste pour les végétaux. Parmi ces derniers, certains cryptogames comme les lichens présentent une telle sensibilité qu'on les utilise comme *indicateurs biologiques* de pollution de l'air. Aucune espèce de lichen ne peut survivre à une concentration supérieure à 35 ppb dans l'air (ppb = partie par milliard = 10^{-9} : à Paris, la teneur moyenne annuelle de SO_2 au début des années 1990 était de $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ d'air), ce qui explique leur disparition des parcs situés au centre des villes. Le SO_2 est également fortement toxique pour les phanérogames, aucune plante supérieure ne pouvant croître normalement dans un air qui renferme en permanence plus de 80 ppb de SO_2 . Même chez les végétaux très résistants, des lésions foliaires apparaissent après à peine une demi-journée d'exposition à 0,25 ppm (ppm = partie par million = 10^{-6}) de ce gaz. Elles se caractérisent par une nécrose internervaire et bifaciale du limbe foliaire qui prend une coloration variable, souvent de teinte ivoire.

Parmi les arbres forestiers, les conifères présentent une sensibilité particulière au SO_2 bien que les espèces à feuilles caduques soient aussi affectées.

Les animaux et l'homme souffrent également de la pollution de l'air par le SO_2 . Sa toxicité chez les Mammifères se traduit par une diminution de l'élasticité pulmonaire à des concentrations inférieures à 1 ppm et au-delà par une hypersécrétion bronchique.

Le SO_2 agit de façon synergique à la fumée de tabac dans l'induction chez l'homme de la bronchite chronique et de l'emphysème pulmonaire .

Effets de l'augmentation du gaz sulfureux dans l'air



Effets pathologiques dus à l'augmentation du gaz sulfureux dans l'air.

Les *oxydes d'azote*, quoique toxiques pour les végétaux et les animaux aux fortes concentrations, constituent une catégorie importante d'aéropolluants, surtout à cause de leurs effets indirects. Ils se transforment en effet en des composés très dangereux, les peroxyacélnitrates (PAN) dans les atmosphères urbaines polluées et ensoleillées, propices à la formation des smogs photochimiques. Ces dernières sont le siège de diverses réactions conduisant à la formation d'ozone, lequel va à son tour agir sur d'autres polluants, les hydrocarbures imbrûlés, qu'il oxyde en peroxyacycles. La réaction de ces derniers avec les oxydes d'azote produit des PAN, lesquels sont particulièrement toxiques à la fois pour les végétaux et les animaux : 15 ppb de ces substances suffisent pour provoquer en quatre heures des brûlures foliaires chez les phanérogames, une dizaine de ppb induit une forte irritation des muqueuses oculaires et bronchiques des Mammifères alors que les taux de PAN supérieurs à 50 ppb sont par exemple relevés régulièrement dans diverses villes californiennes.

Les effets de l'exposition aux aéropolluants gazeux (SO₂, oxydes d'azotes, PAN, ozone, etc.) et/ou aux précipitations acides sont à l'origine de sérieux dommages à la végétation, en particulier dans les écosystèmes forestiers qui présentent, dans l'ensemble des pays industrialisés depuis la fin des années 1970, divers signes de dégénérescence. En Europe occidentale et centrale, dans le nord-est de l'Amérique du Nord, les boisements de conifères sont particulièrement affectés.

À la fin des années 1980, on estimait que de 1 à 4 % des arbres des forêts feuillues et jusqu'à 8 % de ceux des forêts de résineux étaient morts dans les divers pays d'Europe. La proportion d'arbres affectés par les pluies acides et autres aéropolluants dépassait 50 % dans les forêts de conifères de la quasi-totalité de ces pays, sauf dans celles de la péninsule Ibérique.

Les *dérivés fluorés* constituent une autre catégorie importante de polluants atmosphériques.

Les *fluorures* sont rejetés dans l'air par diverses industries, surtout celle de l'électrochimie de l'alumine. La contamination des sols qui en résulte s'avère catastrophique pour de nombreuses plantes cultivées ou spontanées et pour les forêts de conifères. De plus, elle s'accompagne d'une concentration du fluor dans les chaînes alimentaires des animaux domestiques et de l'homme. En France, dans la vallée de la Maurienne et sur le plateau de Lannemezan, où sont implantées des usines qui produisent de l'aluminium, les bovins sont atteints de fluorose, affection caractérisée par des déformations osseuses puis une cachexie fatale.

Les chlorofluorocarbures, encore dénommés *Fréons*, sont des dérivés chlorofluorés du méthane et de l'éthane chimiquement inertes, utilisés comme gaz réfrigérant ou propulseur dans les bombes aérosols. La production mondiale était encore de l'ordre du million de tonnes par an à la fin des années 1980, malgré les conventions internationales destinées à réduire puis à supprimer l'usage de ces composés.

Les Fréons s'accumulent dans la stratosphère, où ils se décomposent sous l'action des rayons ultraviolets en libérant du chlore, lequel réagit à son tour avec l'ozone qu'il dissocie en oxygène. On a pu calculer que le maintien de la production de CFC au niveau qu'elle atteignait au cours des années quatre-vingt pourrait provoquer une véritable catastrophe écologique due à une réduction significative du bouclier d'ozone stratosphérique. L'humanité est dès à présent confrontée au problème qui résulte de l'accumulation constatée des CFC dans la haute stratosphère, dont le temps de demi-vie est supérieur à soixante-quinze ans pour les Fréon 11 et 12, et peut même atteindre cinq cents ans pour certains composés tels que les halons.

Depuis la fin des années 1970, on assiste en conséquence à une diminution de la teneur en ozone stratosphérique particulièrement marquée au-dessus de l'Antarctique, où apparaît lors de chaque printemps austral un trou d'ozone d'ampleur et d'étendue croissante .

Étude du trou dans la couche d'ozone



Des centaines de chercheurs se sont réunis pendant l'hiver de 2002-2003 à Kiruna, dans le nord de la Suède, pour une nouvelle campagne internationale d'étude de l'ozone au-dessus de l'Arctique. Les scientifiques ont utilisé trois avions - dont l'un appartenant à la N.A.S.A. - avec de nombreux instruments à leur bord. Ils ont ainsi pu ...

La réduction de la couche d'ozone s'accompagne d'un accroissement de l'intensité des rayonnements ultraviolets (UV) de courte longueur d'onde à la surface des continents et des océans, accroissement dont la nocivité est telle qu'ils pourraient détruire toute vie terrestre. La biosphère se retrouverait alors dans les conditions qui prévalaient il y a plus d'un milliard d'années où, en l'absence de couche d'ozone d'épaisseur suffisante, les êtres vivants ne pouvaient pas se développer en milieu aérien, ni même dans les couches superficielles de l'océan pénétrées par les rayonnements UV dangereux.

Dérivés du carbone

Les *hydrocarbures imbrûlés* constituent des contaminants prépondérants dans les atmosphères polluées des grandes agglomérations ; certains d'entre eux sont des polluants secondaires qui se forment dans les combustions incomplètes. Tel est le cas des hydrocarbures polycycliques carcinogènes : benzopyrène, benzanthracène, fluoranthrène, etc., qui sont particulièrement abondants dans les fumées, les suies et les échappements de moteurs (diesels notamment).

L'*oxyde de carbone* (CO), également produit par les combustions incomplètes, représente le principal polluant de l'air (en masse). Il se rencontre usuellement à des teneurs comprises entre 20 et 40 ppm dans les atmosphères urbaines polluées, le seuil de toxicité étant fixé à 100 ppm. Il s'agit d'un toxique respiratoire très puissant qui bloque la fixation de l'oxygène par l'hémoglobine en se combinant à cette dernière de façon irréversible.

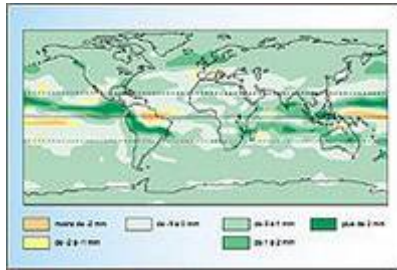
Le *gaz carbonique* (CO₂), bien qu'il soit un constituant normal de l'atmosphère, est rejeté dans l'air en quantités considérables par suite de l'usage des combustibles fossiles.

En 1993, on estimait que les combustions avaient rejeté quelque 6,4 milliards de tonnes de CO₂ (en équivalent carbone) dans l'atmosphère ; en 1960, les quantités produites atteignaient 10,5 milliards de tonnes, en 1990, 23 milliards de tonnes.

En conséquence, on observe une croissance continue de la teneur de l'air en CO₂, au rythme actuel de 1,5 ppm par an. Les mesures effectuées à l'observatoire de Mauna Loa (Hawaii) et l'étude des bulles d'air emprisonnées dans les calottes polaires montrent que la concentration est passée d'environ 270 ppm dans les années 1850 (début de la civilisation industrielle) à 357 ppm en 1993. La civilisation technologique a donc déjà perturbé le cycle du carbone à l'échelle globale. En outre, cette augmentation de la teneur en CO₂ atmosphérique est susceptible de provoquer d'importantes modifications climatiques. Le CO₂ est responsable d'un effet de serre en retenant au voisinage du sol les rayonnements infrarouges, calorifiques. Tout accroissement de sa concentration atmosphérique induit automatiquement un réchauffement des basses couches de la troposphère. On a pu calculer qu'un doublement de sa teneur dans l'air

pourrait augmenter de $2,8^{\circ}\text{C}$ la température moyenne superficielle de la Terre (actuellement de 15°C). Simultanément se produirait une baisse moyenne des précipitations de l'ordre de 15 % dans deux bandes comprises, d'une part, entre 30° et 55° N et, d'autre part, entre l'équateur et 20° S. Selon certains experts du climat global, le réchauffement général et les autres modifications climatiques associées à cette augmentation de la teneur de l'atmosphère en CO_2 sont déjà perceptibles.

Augmentation de la teneur en CO_2 : conséquences



Variations de la température superficielle terrestre et des précipitations engendrées par un doublement dans l'atmosphère de la teneur en dioxyde de carbone (d'après H. Le Treut et R. Kandel, « Que nous apprennent les modèles du climat ? », in « L'Effet de serre », « La Recherche », n° 243, p. 577, mai 1992).

Particules solides

On les classe en catégories de taille décroissante, les plus petites, dites insédimentables, car incapables de se déposer au sol sous l'effet de la gravitation, possèdent un diamètre inférieur à 0,1 micron. Ce sont les plus dangereuses pour la santé humaine car elles sont susceptibles de pénétrer dans les alvéoles pulmonaires. Par ailleurs, elles contaminent les plus hautes couches atmosphériques et sont donc responsables d'une pollution globale.

Deux types de « particules » soulèvent des problèmes d'hygiène publique des plus préoccupants en milieu urbain, celles qui dérivent du *plomb* ou de l'usage des fibres d'*amiante*.

Utilisés comme additif des supercarburants, divers composés plombiques sont transformés par les combustions en particules de plomb généralement insédimentables. On détecte couramment dans l'air des grandes villes européennes des concentrations de plomb particulaire égales ou supérieures à 5 microgrammes par mètre cube alors que le taux maximal réputé non toxique pour l'homme est de l'ordre de $0,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

L'amiante est un matériau isolant et ignifuge qui a été fort utilisé dans les industries métallurgiques et dans le bâtiment, avant d'être interdite dans de nombreux pays (dont la France, le 1^{er} janvier 1997). L'inhalation des fibres d'amiante polluant l'atmosphère induit une affection redoutable, le mésothéliome pulmonaire.

La pollution des eaux continentales

La pollution des eaux continentales constitue sans aucun doute un des problèmes les plus graves auxquels sont confrontés les pays industrialisés. Aux États-Unis, on estime que 90 % des eaux fluviales servent à transporter des déchets vers l'océan. En ex-U.R.S.S., plus de 400 000 kilomètres de cours d'eau sont soumis à une pollution chronique. En France, malgré les efforts entrepris depuis la fin des années 1960, l'essentiel de notre réseau hydrographique, et en particulier les grands fleuves (Rhin, Seine, Rhône, partie inférieure des cours de la Loire et de la Garonne), présente toujours un état de pollution préoccupant.

Pollution « biologique »

La pollution « biologique » des eaux, qui vient au tout premier rang des causes de dégradation des écosystèmes dulçaquicoles, résulte du rejet dans ces derniers d'effluents chargés de *matières organiques fermentescibles* et de nombreux *agents pathogènes* qui leur sont généralement associés.

Les eaux d'égout chargées d'effluents domestiques, celles qui sont produites par de nombreuses industries alimentaires, par les papeteries, etc., exercent une influence catastrophique sur la qualité des eaux fluviales dans lesquelles elles sont rejetées, en l'absence de traitement épurateur.

Une conséquence quasi immédiate de la pollution des eaux par des matières organiques fermentescibles tient en la diminution de la teneur en oxygène dissous. Celle-ci résulte de l'action des bactéries aérobies qui se mettent à dégrader par voie oxydative les matières organiques polluantes. Il en résulte une demande biochimique d'oxygène, dite DBO₅, car elle se mesure après cinq jours, qui sert d'étalon pour évaluer la charge de pollution en matières organiques d'un cours d'eau ou d'une nappe phréatique. Si Q est le débit de l'effluent pollué rejeté par une industrie, on peut évaluer la pollution organique exprimée en équivalent-habitant par la formule $DBO_5 (X)/Q \times DBO_5 (A)$ où DBO₅ (X) est la DBO de l'effluent industriel et DBO₅ (A) la pollution organique correspondant aux eaux usées produite par habitant en moyenne. Lorsque la pollution organique des eaux par des matières fermentescibles est par trop importante, elle provoque leur désoxygénation totale avec pour conséquence la mort massive des poissons et autres animaux qui les peuplent. Ces accidents, souvent spectaculaires, surviennent pendant la saison estivale, époque où la teneur en oxygène est la plus basse et l'activité bactérienne maximale en raison de l'échauffement des eaux.

Pollution des eaux douces



Conséquences biochimiques (b) et biologiques (c, flore ; d, faune) de la pollution des eaux douces (a).

Notons, en outre, que certains polluants organiques (tanins, par exemple) ne seront pas toujours dégradés par voie biologique mais par oxydation chimique. On parle alors de DCO, demande chimique en oxygène de l'effluent pollué.

Pollution « chimique »

Les sels minéraux représentent, à la fois par les masses mises en cause et par leurs effets biologiques, des polluants majeurs des eaux continentales.

Rejets polluants



Un émissaire rejette des résidus chimiques dans l'estuaire de la Mersey, en Grande-Bretagne.



Le rejet de *chlorure de sodium* par diverses installations minières nuit à la potabilité des eaux superficielles et même aux usages industriels s'il est important. En France, plusieurs millions de tonnes de sel ont été déversées annuellement dans le Rhin par les Potasses d'Alsace pendant plusieurs décennies et ont soulevé de graves problèmes d'environnement avec les autres États riverains.

Les engrais chimiques, *nitrates* et *phosphates*, provenant du lessivage des terres cultivées, représentent aussi une importante cause de pollution des eaux continentales. Dans les régions d'agriculture intensive, les rivières, les lacs, les nappes phréatiques renferment des concentrations anormalement élevées de ces sels minéraux nutritifs tant en Europe occidentale qu'en Amérique du Nord. Il s'agit donc de la conséquence directe de la fertilisation des sols. Dans les zones céréalicoles du Bassin parisien et de la Garonne, la plupart des nappes phréatiques renferment des teneurs en nitrates, supérieures à 9 ppm (exprimée en azote nitrique), dose maximale considérée comme tolérable dans l'eau de boisson par l'Organisation mondiale de la santé (O.M.S.). L'excès de nitrates dans l'alimentation humaine est susceptible de provoquer une anémie, la méthémoglobinémie. En outre, les nitrates en excès sont suspectés de provoquer la formation, dans le tube digestif, de nitrosamines, composés hautement cancérigènes.

Cependant, la conséquence la plus préoccupante de la pollution des eaux continentales par les nitrates et les phosphates tient à présent dans l'induction du phénomène de dystrophisation (parfois dénommée à tort eutrophisation).

La plupart des lacs et même les fleuves à débit très lent (le Rhône dans la région de Lyon, par exemple) sont exposés à une dystrophisation chronique. Celle-ci résulte de l'apport direct ou secondaire de ces sels minéraux aux eaux superficielles par suite de l'usage des engrais en agriculture, mais aussi de divers effluents industriels, et surtout, de façon certes paradoxale, par suite des rejets des stations d'épuration. Celles-ci ont en effet précisément pour rôle de minéraliser, c'est-à-dire de transformer en sels dérivés de l'azote et du phosphore les matières organiques fermentescibles.

La dystrophisation des eaux lacustres ou fluviales se manifeste par une multiplication anarchique du phytoplancton et des phanérogames aquatiques résultant de cette surfertilisation en sels minéraux nutritifs.

Les masses colossales de matières végétales produites par l'activité photosynthétique accrue qui en résulte vont s'accumuler au fond du lac. Les bactéries aérobies vont alors se mettre à dégrader par voie oxydative ces masses considérables de matières organiques fermentescibles, engendrant une DBO très importante, dite secondaire, car c'est une conséquence de la pollution primaire par les sels minéraux. Il en résulte une désoxygénation totale des eaux du lac à l'exception des parties les plus superficielles où la photosynthèse est très active, avec pour corollaire la mort massive des animaux benthiques et la disparition des poissons nobles (Salmonidés) qui exigent une bonne oxygénation des eaux. Un stade ultime de dystrophisation peut être atteint, caractérisé par l'apparition de fermentations anaérobies dans les sédiments et les couches profondes avec dégagement de méthane et de divers gaz putrides (SH_2 et NH_3 en particulier).

La plupart des Grands Lacs nord-américains, la quasi-totalité des lacs alpins de quelque importance sont atteints à des degrés divers par la dystrophisation. En Amérique du Nord, le coût de la lutte contre la dystrophisation des Grands Lacs a été évalué à plus de 10 milliards de dollars pour la période 1968-1986.

Les eaux continentales sont également polluées de façon permanente ou épisodique par divers composés minéraux et organiques fortement toxiques.

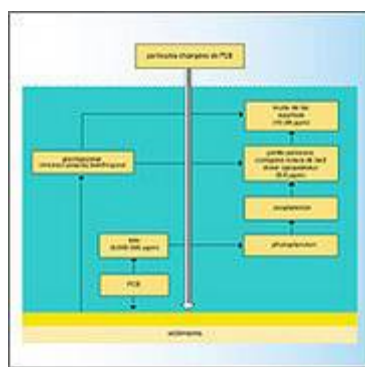
Parmi ces derniers, nous citerons des métaux lourds : cadmium, mercure, plomb, zinc, vanadium, d'origine agricole (pesticides, impuretés des engrais) ou industrielle, ainsi que des anions toxiques (dérivés arséniés, cyanures, chromates en particulier).

Parmi ces composés organiques, les détergents de synthèse et certains pesticides (insecticides organohalogénés, herbicides dérivés de l'acide phenoxyacétique) représentent les micropolluants le plus souvent détectés dans les sols comme dans les eaux.

La pollution des eaux continentales et des eaux littorales (mais à un degré moindre) par les composés organiques de synthèse pose également de redoutables problèmes écotoxicologiques. Il s'agit, en règle générale, de substances dites xénobiotiques (micropolluants qui présentent une forte toxicité pour les êtres vivants), présentes dans le milieu aquatique (eaux et sédiments) à l'état de traces, toujours inférieures à la fraction de ppm, voire de ppb. Parmi ces substances, les composés organochlorés (insecticides, solvants, PCB, dioxines) sont les plus ubiquistes.

Les Grands Lacs nord-américains présentent, par exemple, une pollution chronique qui se traduit par une bioamplification importante des PCB dans les réseaux trophiques des poissons d'intérêt halieutique. Alors que la teneur en PCB des eaux des Grands Lacs atteint en moyenne 0,005 ppb, elle s'élève à environ 20 ppm dans les tissus des truites de lac (sommet de la pyramide écologique), soit un facteur de concentration supérieur à 4 millions. De même, la teneur en dioxine des tissus des mouettes du lac Ontario était comprise, au cours des années 1980 entre 40 et 100 nanogrammes par kilogramme, certains poissons, près de la zone industrielle de Buffalo, renfermant plus de 400 nanogrammes par kilogramme.

Bioamplification des polychlorobiphényles



Bioamplification des polychlorobiphényles (PCB) dans le réseau trophique des poissons du lac Michigan (in F. Ramade, « Les Catastrophes écologiques », McGraw-Hill, 1987).

Cette pollution d'un grand nombre d'écosystèmes aquatiques de l'est des États-Unis et du Canada a conduit les autorités responsables de l'hygiène publique des États concernés à interdire la consommation des poissons pêchés dans les lacs ou les cours d'eau concernés.

La pollution des mers

Bien que les eaux marines soient exposées aux mêmes grandes catégories de polluants que les écosystèmes dulçaquicoles, la pollution des mers comporte quelques particularités.

Le rejet intempestif de *métaux lourds* en milieu marin pose des problèmes majeurs. L'affaire du Minamata au Japon, qui a provoqué l'intoxication de 2 000 personnes, provenait de la bioconcentration du mercure dans les chaînes trophiques marines (cf. ÉCOTOXICOLOGIE , OCÉANS ET MERS).

Le *pétrole* répandu en mer constitue une pollution encore plus préoccupante à l'échelle globale. La moitié des quelque 3 milliards de tonnes de pétrole extraites annuellement emprunte les grandes voies maritimes sous forme brute ou raffinée. En outre, plus du cinquième de la production pétrolière mondiale est extrait de gisements off shore. En conséquence, les accidents survenus pendant l'extraction et le transport des hydrocarbures constituent une cause fondamentale de pollution des eaux marines . La plus grande marée noire d'origine accidentelle fut celle de la tête de puits sous-marine d'Ixtoc One, dans le golfe du Mexique, qui a rejeté dans celui-ci quelque 600 000 tonnes de pétrole brut entre juin 1979 et février 1980 (soit environ trois *Amoco-Cadiz* !

Nettoyage des plages polluées



Nettoyage d'une plage polluée par une marée noire, aux États-Unis, en 1990.

Marée noire : le Torrey canyon, 1967



On avait annoncé à grands cris la marée du siècle, c'est la marée noire qui est venue. La Bretagne figure aujourd'hui parmi les victimes du naufrage du Torrey Canyon. Lorsque le plan Orsec s'est déclenché, l'attaque surprise de la nappe de pétrole avait déjà porté ses coups sur les Côtes-du-Nord [Côtes-d'Armor] et l'Ille-et-Vilaine ; Ouessant et ...

Une cause supplémentaire de contamination chronique de l'océan par les hydrocarbures résulte du « déballastage » des pétroliers. Ces derniers nettoient en effet leurs soutes avec de l'eau de mer après déchargement. Quelque 20 % des tankers se débarrassent toujours de cette eau souillée de pétrole en la rejetant en haute mer, ce qui est légalement toléré, ou parfois dans les eaux littorales, mais alors de façon clandestine. Comme environ 1 % de la cargaison reste dans les

soutes, on estime à plus de 1 million de tonnes par an la pollution océanique qui en résulte dans les principales voies maritimes empruntées par les pétroliers. Au total et toutes sources confondues, on évalue à 6 millions de tonnes par an la quantité totale d'hydrocarbures introduite dans l'océan mondial par les activités humaines. Comme une tonne de pétrole peut recouvrir 12 kilomètres carrés d'océan, des surfaces considérables du milieu marin sont de la sorte contaminées de façon permanente ou épisodique par un film d'hydrocarbures.

Lors des marées noires, l'impact de la pollution pétrolière sur les êtres vivants benthiques et pélagiques est considérable.

Les oiseaux de mer paient aussi un lourd tribut à la pollution pétrolière. Dans l'ensemble de l'Atlantique Nord, celle-ci provoquerait chaque année la mort de quelque 500 000 individus, les familles les plus atteintes étant les Procellariides (pétrels, puffins) et les Alcides (pingouins, guillemots, macareux). Au cours de ce siècle, la colonie de macareux des îles Scilly en Cornouailles, par exemple, a connu une régression particulièrement spectaculaire, passant de 100 000 oiseaux au début du siècle à 100 individus en 1967 !

Sauvetage des oiseaux



Ramassage d'oiseaux de mer mazoutés, dans les îles Shetland.

La pollution chronique de l'océan par le pétrole exerce aussi des effets pernicioeux sur les ressources vivantes marines. On a pu montrer que des doses modérées de pétrole diminuent l'activité photosynthétique des algues et du phytoplancton. Les poissons qui vivent dans des zones contaminées accumulent des hydrocarbures dans leurs muscles, ce qui les rend inconsommables.

Enfin, en période de couvaion, le pétrole qui souille les plumes des oiseaux adultes contamine les œufs et provoque la mort des embryons. On a pu montrer, par exemple, que 20 milligrammes de fuel déposés sur des œufs d'eider présentent déjà une forte toxicité pour ces derniers.

Apports telluriques

Les apports telluriques constituent une cause très importante de pollution des eaux marines. Des quantités colossales de matières solides en suspension et de substances dissoutes sont amenées dans l'océan par des rejets d'effluents domestiques et industriels provenant des émissaires d'égout qui se déversent dans des fleuves ou directement dans les eaux littorales. Une autre cause de pollution des milieux néritiques résulte des exploitations minières, des opérations d'endiguage et d'autres grands travaux qui mettent en suspension dans l'eau de grandes quantités de particules solides.

Rejets d'effluents urbains

Les rejets d'effluents urbains sont constitués par des eaux usées d'origine domestique et industrielle. Ainsi, sur la côte nord-méditerranéenne, depuis Gibraltar jusqu'à la frontière turque, les rejets s'accroissent en permanence sous l'effet conjugué de l'afflux des touristes et de la migration de la population vers le littoral. Pendant la saison estivale, l'activité de ces villes touristiques se surajoute aux rejets des cités plus anciennes, ce qui accroît la pollution des eaux marines par des matières organiques fermentescibles d'autant que, même s'il existe des stations d'épuration, ces dernières sont saturées par les variations de charge intempestives qu'elles subissent.

Les conséquences de la pollution organique engendrée par ces rejets d'eaux usées d'origine urbaine sont catastrophiques pour la quasi-totalité des organismes constituant les peuplements des milieux néritiques. Des études effectuées dans la zone de rejet du grand émissaire de l'agglomération toulonnaise, au cap Sicié, ont montré que le déversement d'effluents urbains à raison de « seulement » $7,5 \text{ m}^3 \cdot \text{sec}^{-1}$ a suffi pour dégrader, voire pour détruire totalement les peuplements sous-marins sur plus d'une centaine d'hectares, les dégâts étant décelables jusqu'à des profondeurs excédant 40 mètres. Ces dégâts se manifestent en réalité bien au-delà de la nappe de pollution visible et se traduisent par des destructions, entre autres celle des herbiers de Posidonies, ces grandes plantes à fleur sous-marines qui constituent une des communautés vivantes les plus riches et les plus productives de toutes les eaux littorales méditerranéennes. Les rejets du grand émissaire de Cortiou, qui déverse les effluents urbains de la région marseillaise, ont provoqué des dégâts encore plus catastrophiques. Les peuplements infra-littoraux à *Cystoseira stricta*, une grande algue brune, étaient altérés par cette pollution dès 1975, à des degrés divers, sur une vingtaine de kilomètres carrés. La mise en service, en 1989, d'une station qui traite l'ensemble des eaux usées de la région de Marseille avec un coefficient d'épuration moyen de l'ordre de 53 % a déjà contribué de façon significative à une reconstitution des communautés marines sur une partie importante de la zone dégradée, bien que la dépollution soit encore insuffisante pour éliminer les risques écotoxicologiques dus aux xénobiotiques et les effets dus à la DBO résiduelle.

Effets d'eaux résiduaires sur le benthos

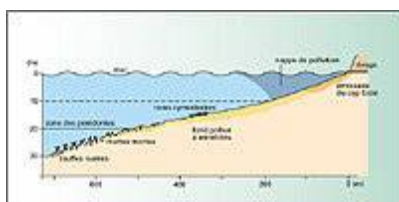


Schéma montrant les effets de l'apport d'eaux résiduaires sur le benthos de la côte provençale.

Le développement touristique des côtes des mers chaudes bordées de récifs coralliens présente également un impact désastreux sur les écosystèmes. La pollution organique des eaux due aux rejets des hôtels et des habitations résidentielles provoque la mort des coraux en raison de la turbidité des eaux induite par le déversement de ces effluents pollués.

Rejets de matières solides d'origine industrielle

Au cours des dernières décennies, plusieurs affaires de décharges en milieu marin de boues résiduaires d'origine

industrielle ont suscité des mouvements d'opinion en Europe occidentale. Il s'agit, en règle générale, de résidus du traitement de minerais non ferreux (d'alumine ou de bioxyde de titane).

Les boues rouges provenant de l'extraction de l'alumine à partir de la bauxite ont été déchargées par exemple en Méditerranée, au large de Cassis, au fond d'un canyon sous-marin dont la partie supérieure débouche à 350 mètres de profondeur et descend rapidement au-delà de 800 mètres. Les boues alcalines déversées ne paraissent pas avoir eu une influence catastrophique, de nombreux Invertébrés se développant au voisinage du point de rejet.

En revanche, il n'en est plus de même avec les boues rouges acides, qui proviennent du traitement des minerais de titane. Ces résidus de fabrication, déversés en particulier dans la mer Tyrrhénienne entre l'île d'Elbe et la Corse, constituent une cause importante de pollution des eaux marines par le vanadium, le cadmium, le mercure et d'autres métaux lourds toxiques contenus dans ces résidus. Notons aussi que l'apport de micropolluants métalliques constitue une cause probable de contamination des réseaux trophiques marins.

Pollution de l'océan par les composés organiques de synthèse

On a pu montrer que les composés organo-chlorés (D.D.T., polychlorobiphényles) contaminaient la biomasse marine même dans les zones les plus reculées de l'océan mondial. Des requins capturés en plein centre de l'Atlantique en 1972 renfermaient dans leur foie plus de 1 ppm (partie par million) de D.D.T. et de ses dérivés (D.D.E., par exemple) et jusqu'à 13 ppm de polychlorobiphényles. On a également mis en évidence des traces dosables de ces substances chez des animaux marins et des manchots qui vivent dans l'océan Austral, à la limite du pack de glaces, donc dans une des zones les plus reculées de la planète.

La flore et la faune marines les plus contaminées se rencontrent évidemment dans les zones littorales des pays les plus industrialisés. Le record de concentration de ces polluants organiques persistants est détenu par des moules (*Mytilus galloprovincialis*) du littoral méditerranéen français, dans la région de Fos-sur-Mer, près de Marseille, qui renfermaient 680 000 fois plus de PCB que l'eau de mer dans laquelle elles se développaient (d'après Arnoux in Gerlach, 1981). On estime que plus de 1 million de tonnes de D.D.T. ont été rejetées dans l'océan, essentiellement au niveau du plateau continental, depuis le début de son usage (1943), et que, même dans l'hypothèse d'un arrêt immédiat et total de l'emploi de cet insecticide, il y persistera des siècles. En effet, le temps de demi-vie du D.D.T. dans l'eau de mer est estimé à plus de cinquante ans.

Pollution nucléaire

Les usages pacifiques de l'énergie nucléaire et a fortiori ses applications militaires soulèvent toute une série de problèmes spécifiques liés aux particularités qu'elle présente et à son fantastique potentiel de pollution.

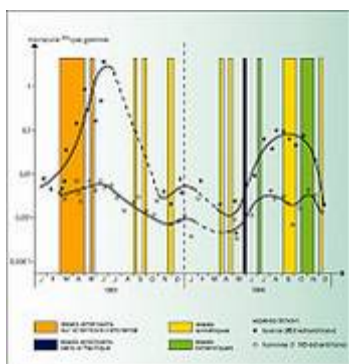
Causes

Depuis les premiers travaux du projet Manhattan jusqu'au milieu des années 1960, les essais atmosphériques d'armement nucléaire ont constitué, de fort loin, la principale cause de pollution radioactive de la biosphère. Cette cause de pollution a considérablement régressé après le traité de 1962 qui interdit ce genre d'expérimentation, bien qu'il n'ait pas été ratifié par tous les États. Cependant, d'autres préoccupations provoquées par la crise pétrolière de 1973 sont apparues, liées au spectaculaire développement de l'industrie électronucléaire intervenu depuis cette date. À titre d'exemple, la puissance électronucléaire française qui atteignait 3,5 GW électriques en 1970 a atteint 61 GW en 1994.

Plusieurs sujets de préoccupations se sont manifestés face à de telles prévisions. Celles-ci concernent les effets biologiques, chroniques et à long terme des radiations, ainsi que les risques écologiques inhérents au problème des déchets radioactifs, en particulier ceux qui sont associés à leur rejet sous forme d'effluents dilués dans les eaux continentales ou marines.

La connaissance du *cycle du « combustible » nucléaire* est indispensable pour comprendre où se situent les principaux risques de pollution .

Risques de pollution nucléaire



Risques de pollution nucléaire inhérents au cycle de traitement des matières fissiles.

Au niveau des mines d'uranium, il existe un danger d'irradiation des mineurs par un gaz rare radioactif, le radon, lequel émet un rayonnement α . Par ailleurs, il a été montré que les rejets de roches dites « stériles » par ces mines étaient susceptibles de provoquer une pollution des eaux superficielles par divers actinides, le radium en particulier.

Les *réacteurs électronucléaires* constituent, même en fonctionnement normal, une cause de pollution radioactive de l'air et des eaux. Le type de réacteurs de loin le plus courant est dénommé R.E.P. (réacteur à eau pressurisée). Ces derniers sont refroidis par de l'eau légère sous pression, qui sert aussi de ralentisseur de neutrons. Comme il existe, en fonctionnement normal, une certaine fréquence de rupture des gaines qui isolent de façon étanche le « combustible » nucléaire (uranium enrichi à 3 % d'uranium 235), l'eau du circuit de refroidissement est contaminée par divers produits de fissions. En outre, l'intensité du flux neutronique à l'intérieur du cœur du réacteur est telle qu'elle engendre, par irradiation des matériaux qui le constituent, des produits d'activation extrêmement dangereux (manganèse 54, cobalt 60, par exemple). On est donc obligé de renouveler périodiquement l'eau du circuit de refroidissement, ce qui entraîne une pollution de l'air et des eaux de surface dans lesquelles les effluents dilués sont déversés. Cependant, les principaux problèmes de contamination de l'environnement propres à l'industrie nucléaire se situent au niveau des *usines de retraitement des combustibles irradiés* (la Hague, en France, par exemple).

Celles-ci ont pour objet de séparer la matière fissile résiduelle (uranium 235 non brûlé) ainsi que le précieux

plutonium, qui s'est formé par capture neutronique dans les éléments combustibles, et les divers déchets radioactifs inclus dans ces derniers. En sus des produits de fission qui proviennent de la désintégration de l'uranium (les uns ayant une masse atomique voisine de 90 : krypton 85, strontium 90, par exemple ; les autres une masse atomique voisine de 130 : iode 131, césium 137, par exemple), ces déchets nucléaires renferment des produits d'activation (tritium, divers matériaux activés). En outre, comme aucune technique de récupération n'est efficace de façon absolue, on trouve dans les résidus du retraitement du plutonium 239 et d'autres transuraniens (americium, curium), dont la période se chiffre en milliers d'années.

Le développement de l'énergie atomique conduit à la production de quantités considérables de déchets par les usines de retraitement. Ainsi, le programme électronucléaire français nécessitera le retraitement annuel de quelque 2 200 tonnes de combustibles irradiés dans les années 2000. Aux États-Unis, les autorités responsables du nucléaire ont décidé, depuis le début des années 1980, de ne pas procéder au retraitement des combustibles irradiés et de les stocker dans des piscines. Cette décision est, entre autres raisons, justifiée par le prix relativement bas de l'uranium sur le marché depuis plusieurs années.

Le fait de ne pas retraiter immédiatement les combustibles irradiés présente l'avantage de permettre une baisse considérable de radioactivité de ces derniers avec le temps par le jeu de la désintégration spontanée des radioéléments.

Conséquences

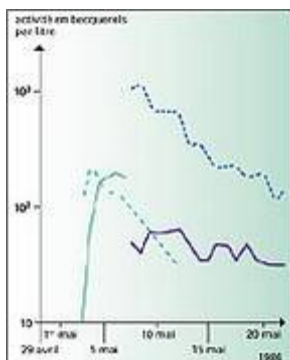
La pollution nucléaire se traduit par une augmentation de la quantité d'irradiation à laquelle l'homme est en moyenne soumis dans son environnement par exposition externe ou interne (respiration, alimentation). Cette pollution ajoute en effet son action à celle de l'irradiation naturelle (rayons cosmiques, « vents » solaires, radioactivité de l'air, des roches, etc.) à laquelle tous les êtres vivants sont soumis en milieu terrestre. En l'absence de guerre nucléaire, la seule cause d'irradiation aiguë à laquelle les populations humaines peuvent être exposées résulterait d'un accident qui surviendrait à des installations nucléaires civiles. Jusqu'à présent, seule la catastrophe de Tchernobyl, d'avril 1986, a donné lieu à de telles conséquences.

Le principal risque auquel l'espèce humaine est exposée – en l'absence de conflit thermonucléaire – provient de la contamination de sa nourriture par le jeu des phénomènes de bioconcentration des radionucléides dans les chaînes trophiques terrestres et aquatiques. Les radioéléments les plus dangereux de ce point de vue sont, en règle générale, ceux qui possèdent une activité biologique spécifique intense (iode 131 par exemple, qui se fixe en quelques heures dans la thyroïde), ou/et qui présentent une période longue, supérieure à l'année, qui leur permet donc d'irradier l'organisme qu'ils contaminent pendant une durée prolongée. Tel est par exemple le cas du strontium 90 (période de 28 ans), qui se fixe dans les os car il est chimiquement voisin du calcium, ou du césium 137 (analogue du potassium), de période de trente-deux ans, qui se fixe dans les muscles.

On a pu de la sorte observer une concentration de tels éléments dans diverses chaînes alimentaires de l'homme, soit en raison de la pollution de sols par des retombées radioactives, soit à cause du rejet, dans les eaux, d'effluents dilués par des usines de retraitement de combustibles irradiés. Lors de l'accident de Tchernobyl, on a pu assister à une contamination – importante en Europe centrale et septentrionale – du lait et de la viande des animaux domestiques.

Plusieurs milliers de rennes ont dû être abattus en Laponie, car leurs muscles renfermaient des doses excessives de césium 137, ce qui interdisait leur consommation. Pour la même raison, plusieurs milliers de tonnes de lait en poudre ont été détruits en Allemagne.

Contamination radioactive du lait



Contamination du lait de vache et de chèvre dans le sud-est de la France pour l'Iode 131 (131I) et le Césium 137 (137Cs) libérés par la catastrophe de Tchernobyl (d'après I.P.S.N., in F. Ramade, « Les Catastrophes écologiques », McGraw-Hill, 1987).

Pour les populations humaines exposées, la pollution nucléaire se traduit par une augmentation de la probabilité d'effets carcinogènes et de l'induction de mutations génétiques provoquées par l'exposition permanente à de faibles doses de radiations. Les experts estiment qu'un doublement de la dose d'irradiation naturelle à laquelle l'homme est soumis augmenterait de 20 % le taux de mutation, et qu'une exposition à une dose de 2 rems par an pendant toute une vie accroîtrait de 10 % la mortalité par cancer.

En conséquence, la Commission internationale de radioprotection a établi des normes qui stipulent que l'on ne doit pas dépasser une dose d'irradiation annuelle de 3 rems chez les travailleurs de l'industrie nucléaire, de 0,3 rem chez les « individus isolés » qui vivent au voisinage d'installations nucléaires, enfin de 17 à mrem (le double de la dose moyenne d'irradiation naturelle) pour l'ensemble des populations humaines. Enfin, une autre conséquence redoutable de la pollution nucléaire pour les populations humaines tient, en certaines circonstances, en la contamination des sols qui peut rendre certaines zones inhabitables pendant des décennies (cas de la zone d'exclusion de Tchernobyl).

Catastrophe de Tchernobyl : Pripjat, ville fantôme



La ville ukrainienne de Pripjat, où résidaient près de cinquante mille personnes, pour la plupart des employés de la centrale de Tchernobyl et leurs familles, est désormais une ville fantôme. La population fut évacuée le lendemain de la catastrophe, puis relogée à Kiev. L'explosion de Tchernobyl provoqua l'évacuation de cent vingt mille personnes qui habitaient ...

Le problème des déchets radioactifs

Le problème des déchets radioactifs constitue certainement, dans le long terme, la question la plus préoccupante

Toute vie est source de déchets. Chaque civilisation produit des résidus inutilisés qui, avec le temps, deviennent des informations sur le mode de vie comme en témoignent les fouilles archéologiques. Cependant, il existe de grandes variations selon les pays : ce qui est déchet pour certaines populations, en raison de leurs habitudes et de leur niveau de vie, demeure utilisable pour d'autres. Dans les pays développés, les déchets de toute nature – ménagers, agricoles ou industriels – ne cessent de croître en quantité, de devenir plus complexes, voire plus nocifs. À l'origine de pollutions et de nuisances, ils sont aussi sources d'énergie et de matières premières. Divers modes d'élimination et de traitement ont été généralisés, et de nombreux équipements de dépollution ont été mis au point. Mais, quels que soient les efforts collectifs entrepris pour la protection de l'environnement, notamment sur le plan réglementaire, ils ne peuvent réussir que si la lutte contre le gaspillage et la pollution devient véritablement l'affaire de chacun.

La France produit chaque année environ 600 millions de tonnes de déchets qui se répartissent en résidus urbains (40 millions de tonnes), en déchets industriels (150 millions de tonnes) et en déchets produits ou recyclés dans l'agriculture et les industries agro-alimentaires (400 millions de tonnes).

Le problème des résidus industriels ne sera pas envisagé ici, car il a été abordé dans un précédent chapitre : 2 *Les principales causes de pollutions* (exception faite des résidus de l'industrie atomique, dont la neutralisation pose des problèmes particuliers examinés dans l'article : réacteursNUCLÉAIRES).

La réglementation

Le cadre communautaire et national

Prévue au traité de Rome (1957), l'harmonisation pour le traitement et la gestion des déchets a débuté avec l'adoption de la directive n° 75/442/C.E.E. du 15 juillet 1975 relative aux déchets. Avec l'entrée en vigueur de l'Acte unique européen (1987), plusieurs directives de la Communauté relatives à l'environnement et aux déchets ont été successivement publiées. Avec les dispositions du traité de Maastricht (1993), l'adoption des directives ou des règlements qui concernent les déchets sera généralement prise à la majorité qualifiée et non plus au consensus général des États membres.

En France, les principaux moyens juridiques d'intervention découlent de nombreux textes législatifs et réglementaires :

- la loi-cadre du 15 juillet 1975 complétée par celle du 13 juillet 1992, et ses nombreux décrets d'application ;
- la loi du 19 juillet 1976 relative aux installations classées pour la protection de l'environnement dont les dépôts et les établissements de traitement des déchets ;
- un certain nombre d'articles du Code des communes, du Code pénal, du Code de la santé publique, du Code rural, du Code de l'urbanisme, du Code de la route, etc. ;
- les règles générales d'hygiène prises par décrets ou celles des règlements sanitaires départementaux ;
- les arrêtés pris par les maires dans le cadre de leur pouvoir de police.

S'y ajoutent les règles de mise en jeu de la responsabilité civile de droit commun (Code civil, art. 1382 et suivants) pour les dommages et nuisances causés par des particuliers ou des industriels, ainsi que celles qui sont relatives à la responsabilité administrative de l'État, des collectivités locales ou des organismes publics.

Définition du déchet

Si le déchet est habituellement défini comme un résidu abandonné par son propriétaire car inutilisable, sale ou encombrant, le déchet a, au regard de l'environnement, une définition juridique. Selon la loi de 1975, est considéré comme déchet « tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon ». Cependant, la loi ne retient pour les réglementer que les déchets qui sont « de nature à produire des effets nocifs sur le sol, la flore et la faune, à dégrader les sites ou les paysages, à polluer l'air ou les eaux, à engendrer des bruits ou des odeurs et, d'une façon générale, à porter atteinte à la santé de l'homme et à l'environnement ».

Tout producteur ou détenteur de déchets doit en assurer l'élimination dans des conditions propres à éviter les effets précités : opérations de collecte, transport, stockage, tri et traitement nécessaires à la récupération des éléments et des matériaux réutilisables ou de l'énergie ainsi qu'au dépôt ou au rejet dans le milieu naturel. Récupération et valorisation sont des objectifs économiques essentiels que la crise énergétique a bien mis en évidence. Mais la technologie propre a des limites. D'où la notion de déchet ultime que le législateur a récemment retenue (loi du 13 juillet 1992). Est ultime un déchet « qui n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux ». Ceux-ci peuvent alors être stockés dans des installations spécifiques sans risque pour l'environnement.

Les grands principes

L'élimination des déchets doit être assurée dans des conditions propres à faciliter la récupération des matériaux ou de l'énergie. Il s'agit d'en assurer l'élimination, d'en réduire la production et, surtout, de les valoriser.

La responsabilité d'une personne peut être engagée en raison des dommages causés à autrui du fait de l'élimination des déchets détenus, transportés ou provenant de produits qu'elle a fabriqués. Si des déchets sont abandonnés, déposés ou traités contrairement aux prescriptions réglementaires, les pouvoirs publics peuvent en assurer d'office l'élimination aux frais du responsable sans préjudice des sanctions encourues, ou encore consigner entre les mains d'un comptable public une somme correspondant au montant des travaux à réaliser.

Toute personne a le droit d'être informée sur les effets préjudiciables pour la santé de l'homme et de l'environnement, à propos du ramassage, du transport, du traitement et du stockage des déchets, ainsi que sur les mesures prises pour prévenir ou compenser ces effets nocifs. Les communes ont obligation d'assurer l'élimination des déchets des ménages dans le cadre de plans départementaux ou interdépartementaux.

L'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (A.D.E.M.E.) a, entre autres tâches, pour mission la limitation de la production de déchets, leur élimination, leur récupération et leur valorisation, ainsi que la prévention de la

pollution des sols. Établissement public à caractère industriel et commercial, l'A.D.E.M.E. s'est substituée à l'Agence nationale pour la récupération et l'élimination des déchets (A.N.R.E.D.). Ses missions sont de trois types : orientation et animation de la recherche, prestation de services et incitation et information.

Déchets ménagers et assimilés

Définition et composition

Les déchets ménagers sont les résidus solides issus de la vie domestique qui incluent : les ordures ménagères collectées porte-à-porte ou déposées par les habitants en des lieux désignés à cet effet ; les déchets volumineux ou encombrants ; les déblais et gravats, ainsi que les déchets spéciaux en raison de leurs caractéristiques ou propriétés (inflammabilité, toxicité ou pouvoir corrosif, etc.) ; les déchets d'origine commerciale, artisanale ou industrielle qui peuvent être éliminés avec les ordures ménagères et qui y sont assimilés.

Les déchets médicaux et hospitaliers, qui présentent un risque infectieux, ne peuvent être éliminés avec les ordures ménagères. Il est possible de les incinérer dans certains centres pourvus de dispositifs spécifiques, sous réserve de conditions de transport. En outre, quelques procédés, qui permettent de décontaminer ces déchets, ont été homologués afin de pouvoir les assimiler aux ordures ménagères après traitement.

La composition des ordures ménagères est très hétérogène et variable selon le lieu et la saison. Pour une production moyenne de 1 kilogramme par habitant et par jour, un peu plus dans les villes et un peu moins en milieu rural, la composition moyenne des déchets ménagers, en poids, est la suivante :

Déchets ménagers	
papers et cartons	de 20 à 35 %
matières végétales et animales	de 15 à 35 %
verres	de 5 à 10 %
métaux	de 5 à 8 %
plastiques	de 3 à 6 %
textiles	de 1 à 5 %
éléments fins (cendres)	de 10 à 20 %

Déchets ménagers.

Même si ces données varient avec une certaine régularité, les principaux composants peuvent être classés en deux grandes catégories : les déchets organiques fermentescibles et ceux qui ne le sont pas. Leur connaissance est importante car elle conditionne le mode de traitement et les possibilités de récupération.

Évacuation et collecte

Dans les immeubles, l'évacuation des ordures peut se faire soit automatiquement par voie humide ou par voie sèche, soit manuellement au moyen de conteneurs.

L'évacuation par voie humide exige un broyage préalable et une installation raccordée sur le réseau des eaux-vannes de l'immeuble. Il s'agit d'une solution coûteuse qui a de nombreux inconvénients. En outre, cette solution augmente notablement la quantité de matières fermentescibles rejetées dans le réseau d'égouts. Le règlement sanitaire

départemental interdit les évier broyeur d'ordures, sauf dérogation préfectorale.

En revanche, l'évacuation par voie sèche au moyen de vide-ordures offre une solution plus valable, généralement adoptée dans les immeubles neufs. Quelques installations sont indispensables pour améliorer le fonctionnement de ces dispositifs du point de vue de l'hygiène : dépression du vide-ordures pour éviter les odeurs, ventilation des loges de réception, système de ramonage. On peut aussi y adjoindre un broyeur qui rend les ordures plus compactes et diminue les manutentions. Dans certaines cités, un procédé de collecte pneumatique permet une évacuation discrète et économique des ordures qui évite toute nuisance.

Le ramassage des ordures peut aussi se faire au moyen d'emballages perdus : sacs en papier kraft ou en polyéthylène, enfermant les résidus de l'endroit de production au lieu d'élimination. La collecte doit être assurée au moins une fois par semaine, en porte-à-porte : ramassage des ordures contenues dans des récipients déposés devant les immeubles pour les transporter au lieu de leur traitement. Les collectivités utilisent généralement des bennes closes à collecte hermétique et des conteneurs standardisés qui permettent un vidage automatique.

Les installations de traitement

Un traitement convenable des déchets est effectué dans une installation aménagée et exploitée conformément à la législation sur les installations classées pour la protection de l'environnement, qu'il s'agisse de décharges contrôlées, d'usines d'incinération ou de compostage, afin de réduire au minimum les risques de pollutions et de nuisances pour les tiers. L'autorisation administrative donnée après enquête publique fixe les conditions d'exploitation et les normes de rejets.

La mise en décharge brute ou déversement direct des ordures, soit sur le sol, soit dans un trou ou une ancienne carrière, est rigoureusement interdite. Les risques d'incendies et tous les inconvénients qui en résultent (aspect repoussant, mauvaises odeurs, pullulation des rongeurs et des insectes, pollution de l'air, des eaux et du sol, etc.) ne sont plus à démontrer pour en motiver la suppression.

Décharge contrôlée. La méthode de la décharge contrôlée implique la mise en œuvre de moyens qui évitent les principaux inconvénients énumérés précédemment. Les ordures sont mises en décharge et recouvertes ensuite d'une couche homogène de terre. La fermentation aérobie, dont le principe sera détaillé ultérieurement, peut avoir lieu grâce à l'air contenu dans les ordures versées en vrac. La couche de couverture les préserve des rats, des oiseaux et des insectes ; elle permet aussi le maintien de l'humidité nécessaire à la fermentation. Dans son principe, la décharge contrôlée est relativement simple. Mais, en pratique, l'exécution matérielle comporte certaines difficultés : mise en place des ordures, circulation des engins, constitution de la couverture. Le terreau ainsi obtenu peut être utilisé ultérieurement comme amendement et engrais pour le sol.

Bien que le risque de nuisance soit considérablement réduit, l'ouverture d'une décharge contrôlée est subordonnée à une enquête géologique, pour éviter la pollution des nappes souterraines par l'infiltration des eaux pluviales, et à une autorisation administrative, car il s'agit d'une installation classée pour la protection de l'environnement.

Compostage en fermentation accélérée. Le compostage utilise la fermentation aérobie des ordures ménagères en vue de la préparation d'un compost utilisable comme amendement en agriculture. Les matières organiques

fermentescibles sont alors rapidement oxydées, avec élévation de température et dégagement de dioxyde de carbone. Les matières organiques azotées donnent lieu à la formation d'azote ammoniacal, nitreux et nitrique. Les micro-organismes disposent ainsi de substances nutritives pour l'élaboration de leur protoplasme cellulaire. L'énergie indispensable à la fixation de l'azote moléculaire et à la constitution de leurs protéines est fournie par la combustion du carbone organique. En outre, la minéralisation du carbone organique entraîne une consommation d'azote organique. Cela montre l'importance du rapport C/N, qui diminue au fur et à mesure du processus de fabrication du compost, et la nécessité de contrôler ce rapport, car un compost trop riche en carbone épuisera les réserves d'azote disponibles dans le sol au détriment des plantes.

L'aération et l'humidité sont deux éléments indispensables pour entretenir les conditions de l'aérobiose et assurer l'élévation de température. Ce sont d'ailleurs leurs modifications qui distinguent les différents procédés industriels de fermentation, réalisés soit en cellules, soit en digesteurs. La plupart d'entre eux nécessitent un triage préalable des ordures ménagères, ainsi qu'un broyage.

Incinération. L'incinération constitue un moyen particulièrement commode et hygiénique d'élimination des résidus urbains. Aussi, de nombreuses villes choisissent actuellement ce procédé, car l'urbanisation rend de plus en plus difficile l'exploitation d'une décharge contrôlée ou celle d'une usine de compostage. L'évolution de la composition des déchets urbains, due à une forte diminution des cendres, a amélioré leur pouvoir calorifique. Cela permet une bonne combustion des ordures. Il s'agit cependant d'un combustible relativement médiocre, qui dégage des fumées et des odeurs ; de multiples précautions doivent être prises pour éviter la pollution atmosphérique.

Pour que l'incinération des ordures soit convenablement réalisée, certaines conditions sont indispensables : séchage sur une grille spéciale, soit au moyen des gaz chauds de combustion, soit par rayonnement dans le four lui-même ; homogénéisation au moment de la combustion, pour éviter les coups de feu ou, au contraire, un abaissement de la température dans le four ; combustion en couches suffisamment minces et ventilation en vue d'assurer leur combustion complète ; récupération des mâchefers, qui représentent environ 30 % du poids des ordures ; épuration des fumées.

Le dégagement des fumées par le four lui-même est évité en régularisant le cheminement et la combustion des ordures. La température idéale de combustion se situe aux environs de 900 °C. Si cette température n'est pas atteinte, la combustion n'est pas totale, et les fumées contiennent des gaz malodorants. En revanche, si elle est supérieure, les cendres entrent en fusion et collent aux grilles qu'elles détériorent.

La chaleur dégagée lors de la combustion des ordures peut être récupérée. Dans la région parisienne, la majeure partie est vendue pour le chauffage urbain, alors que, pendant l'été, elle est transformée en électricité revendue à l'E.D.F.

L'incinération des ordures n'est pas à l'origine de nuisances pour le voisinage si l'installation est bien entretenue et si le traitement des fumées est convenablement réalisé. Dans la composition des fumées entrent, outre une quantité de poussières, de la vapeur d'eau, du dioxyde de carbone, des oxydes d'azote, du chlore, de l'acide chlorhydrique, etc. Ces dernières substances, qui proviennent de la décomposition des matières plastiques à base de chlorure de polyvinyle, posent le plus de problèmes.

Déchetterie. La mise en Déchetterie (nom déposé) pour recueillir les déchets des ménages, qui ne peuvent être présentés à la collecte habituelle, et les déchets industriels banals est une initiative récente qui s'avère intéressante. La

Déchetterie est un espace aménagé, clos, gardienné, où les particuliers déposent leurs déchets encombrants et gravats, ainsi que leurs déchets recyclables (verres, cartons et papiers, bois, huiles de vidanges, etc.) ou spéciaux. Cet équipement se présente sous la forme d'une plate-forme de déchargement accessible aux voitures, où les usagers peuvent jeter leurs déchets en contrebas dans des bennes consacrées chacune à une catégorie de déchets. Un conteneur spécial est destiné aux huiles de vidange. Les piles-boutons sont généralement recueillies dans une petite boîte placée dans le poste de surveillance. Les déchets ainsi triés sont ensuite soit valorisés, soit traités dans des centres adaptés.

Récupération et valorisation

Compte tenu de l'intérêt représenté par le tri et la récupération de certains composants des déchets ménagers et assimilés, comme les matériaux et les emballages, diverses solutions de valorisation sont en développement ou encore à l'étude. La récupération consiste à sortir le déchet de son circuit traditionnel de collecte ou de traitement, comme mettre les bouteilles de verre ou les journaux dans un conteneur spécial. Elle nécessite une collecte séparée après un tri préalable. La valorisation consiste à redonner une valeur marchande aux déchets par divers moyens : le recyclage ou la réintroduction directe du déchet dans le cycle de production dont il est issu, en remplacement d'une matière première neuve (bouteilles) ; le réemploi est un nouvel emploi du déchet pour un usage analogue ; la réutilisation consiste à utiliser un déchet pour un usage différent de celui du premier emploi ou à faire un autre produit à partir de ce déchet ; la régénération consiste à redonner à un déchet ses caractéristiques initiales pour l'utiliser comme une matière première neuve (huiles, solvants, papiers, etc.).

Tous ces procédés conduisent à des économies de matières premières et contribuent directement à la sauvegarde de l'environnement.

La récupération des *papiers* et des *cartons* a pour objectifs essentiels de réduire la balance commerciale de filière bois-papier et de limiter leur destruction par les filières classiques de traitement des déchets. Si la récupération de fibres cellulosiques de récupération est en augmentation constante ces dernières années, la récupération des vieux papiers n'a pas suivi la même progression. La différence entre ces deux évolutions conduit à un déficit en vieux papiers. La part de collecte auprès des habitants est encore très faible et l'essentiel provient de la collecte rendue obligatoire auprès des professions de l'impression-édition.

Les déchets de *matières plastiques* qui comprennent des déchets de consommation et de transformation ne sont pas tous recyclables. Si les thermoplastiques le sont (polyéthylène, polypropylène, polychlorure de vinyle), les thermodurcissables ne peuvent être régénérés (Bakélite, résines époxydes), et il n'y a pas de technique de recyclage des plastiques mélangés.

Déchets



Bouteilles, boîtes, cartons, autant de possibilités de recyclage.

La valorisation des matières plastiques nécessite des opérations professionnelles spécialisées. Elle ne concerne actuellement qu'une faible part des produits rejetés.

La récupération du *verre* a connu une très forte augmentation ces deux dernières décennies. La croissance des collectives sélectives municipales est particulièrement remarquable, puisqu'elle concerne 80 % du verre récupéré. Les résultats seront encore améliorés par la sensibilisation du public et, surtout, par une amélioration du service et une augmentation du nombre des conteneurs de collecte.

Pour ce qui concerne les *métaux*, les ferrailles comprennent les objets métalliques mis au rebut (appareils électroménagers, épaves automobiles, éléments de charpente, etc.) ainsi que les chutes de la sidérurgie et des usines de transformation. Elles sont valorisées en quasi-totalité par la sidérurgie et par les fonderies de fonte et d'acier ; le solde est exporté.

La récupération des métaux non ferreux permet de couvrir 35 % des besoins français en cuivre, plomb, aluminium et zinc. La majorité est écoulee vers les entreprises d'affinage (producteur du métal), et le reste est orienté vers les fondeurs et les industries chimiques.

La récupération de l'aluminium des emballages ménagers se développe par la mise en place de techniques spécifiques de tri dans les centres de traitement d'ordures ménagères.

Les batteries de voitures mises au rebut sont récupérées à 90 %. Elles fournissent près de la moitié du plomb recyclé.

Le rechapage des *pneumatiques* est la meilleure valorisation envisageable ; il économise de substantielles importations de caoutchouc et de dérivés pétroliers.

Les pneumatiques non rechapables et les déchets de fabrication sont potentiellement valorisables par divers procédés de réutilisation, mais cela reste marginal. Seule est significative la pratique de lestage des silos avec des pneus, mais les agriculteurs finissent trop souvent par brûler les vieux pneus, malgré les épaisses fumées noires ainsi produites.

Les *déchets textiles* qui proviennent des chiffons et des textiles usagés ainsi que des déchets neufs des entreprises artisanales ou industrielles sont largement récupérés. Un tri après collecte permet de les réutiliser en vêtements d'occasion ou de les valoriser en essuyage industriel, effilochage et cartonnerie.

Le rejet de *déchets* et de *cadavres animaux* dans les ordures ménagères est expressément défendu. En France, leur élimination est strictement réglementée par le Code rural. Pour les cadavres d'animaux d'un poids global excédant 40 kilogrammes, l'équarrissage est obligatoire. Il permet, entre autres choses, la récupération des peaux, des os dont la

gélatine sert à la fabrication de colles, de graisses qui sont utilisées par les stéarineriers ou les savonneries, de la viande qui est desséchée et réduite en poudre. La farine animale ainsi produite peut être utilisée comme engrais ou servir, après stérilisation, à la fabrication d'aliments conservés pour les animaux.

Les *médicaments* inutilisés préoccupent depuis longtemps la profession pharmaceutique soucieuse d'éviter des intoxications accidentelles, d'assurer une destruction correcte des médicaments non récupérables et de permettre une aide humanitaire des populations démunies.

La nécessité de contribuer ou de pourvoir à la destruction des emballages ménagers a conduit l'ensemble des pharmaciens qui interviennent dans la chaîne du médicament – industriels, grossistes-répartiteurs et pharmaciens d'officine – à mettre en place une filière qui a pour objet, d'une part, de contribuer à l'élimination des emballages de spécialités pharmaceutiques et des médicaments périmés et, d'autre part, de traiter la question des médicaments non utilisés. Une association, dite Cyclamed, a été créée à cet effet. Des sacs sont remis par les pharmaciens à leurs clients pour les inciter à rapporter à la pharmacie les déchets issus des médicaments. Ces sacs sont ensuite triés par les pharmaciens pour en extraire les médicaments susceptibles d'être réutilisés. L'ensemble est collecté par les grossistes-répartiteurs. Les déchets d'emballages et de médicaments sont incinérés dans les centres de traitement de déchets, alors que les médicaments récupérables sont remis à des associations humanitaires qui effectuent, sous contrôle pharmaceutique, un autre tri avant d'envisager leur acheminement vers les populations intéressées.

Les déchets végétaux et agricoles

Les déchets agricoles et leur dépôt ne font pas l'objet d'une réglementation spéciale, mais, selon les circonstances, les dépôts peuvent être interdits ou soumis à certaines conditions. Les dépôts sont notamment interdits sur le terrain d'autrui, dans les excavations et sur certains terrains de cultures. L'installation des fumiers ou de fosses à purin est libre, à condition que soient respectées les dispositions du règlement sanitaire départemental. Certains dépôts liés aux activités agricoles peuvent être soumis à autorisation ou déclaration au titre de la législation des installations classées pour la protection de l'environnement ; c'est le cas des élevages d'animaux et particulièrement des porcheries.

L'utilisation agricole des déchets est soumise aux prescriptions du règlement sanitaire départemental sous réserve d'autres législations éventuellement applicables. Les risques de l'utilisation des déchets en agriculture donnent lieu à diverses mesures qui visent, d'une part, la prévention de l'incendie et, d'autre part, la protection des sols et des produits agricoles soumis à des normes de qualité.

Les résidus végétaux de toute nature qui proviennent de l'entretien des arbres, des espaces verts publics, des terrains de sports, etc., représentent un volume très important (plusieurs millions de mètres cubes par an). Brûlés ou mis en dépôt sauvage, ils constituent une nuisance pour l'environnement et un gaspillage de matière organique fort utile pour l'amendement des sols. La valorisation de ces déchets est tout à fait souhaitable. Un procédé de traitement a été mis au point et breveté par l'A.D.E.M.E., la solution *végéterre*. Celle-ci consiste à stocker, broyer, composter et affiner ces résidus pour en faire un amendement végétal de haute qualité (riche en matière organique, magnésie, calcium), sans odeur ni risques pour les cultures. D'autres postes de valorisation sont actuellement envisagés, tels que la transformation du bois en charbon de bois ou la solution qui consiste à valoriser localement les pailles plutôt que de les brûler sur place.

Aspects économiques

L'impact économique des pollutions a longtemps été ignoré par les divers acteurs de la civilisation industrielle, qui tenaient la nature et ses ressources comme inépuisables.

Cependant, les effets défavorables voire désastreux des pollutions sur les activités humaines sont devenus de plus en plus manifestes depuis le début des années 1970. En effet, les polluants, en dégradant des ressources naturelles hier encore considérées comme surabondantes et gratuites (telles que l'eau ou l'air, par exemple), constituent en termes économiques des « utilités négatives » dont il faut déduire le coût de l'épuration à la valeur finale de la production industrielle considérée. Par ailleurs, ces mêmes pollutions altèrent ou font même disparaître des ressources naturelles, en particulier biologiques, qui sont exposées par inadvertance à ces pollutions ; ce qui accroît le caractère gaspilleur de certaines activités propres à la civilisation moderne.

Comme le souligne R. Passet : « Aussi longtemps que les interventions de l'économie n'étaient pas susceptibles de remettre en cause les mécanismes de régulation de la biosphère, elle pouvait être considérée comme un univers clos possédant sa propre logique et ses règles d'optimisation. D'un côté les hommes produisaient et échangeaient, de l'autre la nature – inaltérable dans son principe – assurait spontanément sa propre reproduction. Il n'en va plus de même lorsque des populations plus importantes, dotées de techniques efficaces, bouleversent et menacent de détruire le milieu qui les porte. »

On peut certes considérer en termes d'économie classique comme des externalités – donc sans effets sur les prix de revient des industries concernées – le fait que les pluies acides, engendrées par l'utilisation des combustibles fossiles lors de la production d'électricité aux États-Unis, provoquent la destruction de pêcheries de saumon, ou le fait que la production d'ozone, due à la pollution atmosphérique résultant de la circulation des véhicules, cause une perte annuelle de 3 milliards de dollars à l'agriculture américaine. Il n'empêche que ces destructions de ressources naturelles se traduisent inéluctablement pour les collectivités nationales concernées par des dommages importants, qui sont parfaitement comptabilisables en termes monétaires et donc économiques.

Il convient, sur ce point, de noter combien, aujourd'hui encore, la conservation des ressources naturelles indispensables aux activités industrielles reste, malgré les progrès accomplis, fort loin d'être recherchée de façon systématique dans les pays développés.

Malgré les chocs pétroliers et les déclarations des pouvoirs publics concernant la prise en compte des objectifs de prévention des pollutions, l'obsolescence est souvent incorporée aux biens de consommation dès le stade de la fabrication, conduisant le consommateur au renouvellement d'un objet entier dès qu'une pièce infime est défectueuse. Parfois, même les politiques commerciales, relayées par la publicité, incitent au changement fréquent des objets non point parce qu'ils sont usagés, mais parce qu'ils sont simplement passés de mode.

Ces comportements justifiés par des raisonnements économiques à court terme conduisent notre civilisation vers d'énormes problèmes dus à la raréfaction des ressources minérales et énergétiques – voire biologiques – qui lui sont indispensables.

Malgré les incontestables progrès accomplis au cours des années 1980 par le recyclage, de nombreux efforts restent à faire. En effet, au milieu des années 1990, moins du quart du papier est recyclé. 40 % de l'argent (le métal) utilisé par l'industrie dans le monde est perdu dans les eaux de surface avec les rejets d'effluents, alors que, depuis plusieurs années, sa production mondiale est inférieure à sa consommation. Ce déficit est régulièrement comblé par la Chine et l'Inde, qui refondent leur stock de monnaie, ce métal constituant en effet depuis la plus haute antiquité l'étalon monétaire de ces deux pays.

Le taux de recyclage est encore plus faible pour des métaux moins nobles mais très polluants (le plomb, le mercure, le cadmium).

Ces exemples montrent le double paradoxe sur le plan économique du laisser-faire qui conduit, d'une part, aux dommages dus aux pollutions et, d'autre part, à la perte de ressources naturelles que représentent la dispersion de ces polluants dans le milieu naturel, ces matières premières étant indispensables aux activités économiques de l'homme.

Le coût des pollutions

Les dommages causés par les divers types de pollutions aux activités économiques sont de plus en plus élevés et atteignent en fait, depuis plusieurs décennies, des valeurs très importantes. Ainsi, par exemple, les dommages causés par les pollutions (à l'exception de la pollution des sols qui n'a pas été prise en compte) sur l'économie allemande sont évalués à 33,9 milliards de dollars américains par an, soit près de 170 milliards de francs.

On comprendra dans ces conditions que les pays développés soient contraints de consacrer une part croissante de leur produit intérieur brut (P.I.B.) à la lutte contre les pollutions. L'Allemagne et les États-Unis allouent 1,5 % de leur P.I.B. à la lutte contre les pollutions, contre 1,25 % par la Grande-Bretagne et moins de 0,9 % par la France.

La part de l'État dans ces dépenses varie beaucoup ; elle approche 0,7 % en France, alors qu'elle est inférieure à 0,3 % en Allemagne et à 0,1 % aux États-Unis, où les entreprises privées assurent l'essentiel des dépenses de lutte contre les pollutions.

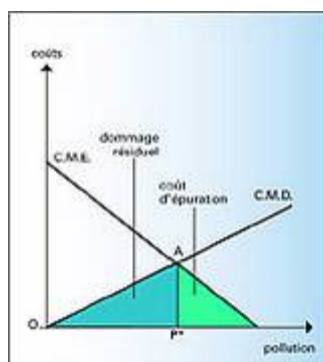
Cependant, la mise en œuvre, dans certains pays comme le nôtre, du principe *pollueur-payeur* biaise quelque peu ces données. Les agences de l'air et celles de l'eau (autrefois appelées agences financières de bassin), qui sont des établissements publics, réutilisent en fait des fonds privés (collectés sous forme de taxes sur la pollution) pour des actions de lutte contre les pollutions menées par l'État. Une augmentation croissante de l'assiette des prélèvements effectuée par ces agences constitue une efficace incitation des industries concernées à investir pour épurer elles-mêmes leurs effluents pollués – ou, mieux, à fonctionner en circuit clos. Elle permet aussi d'allouer des masses financières considérables à des travaux de protection contre les pollutions. Ces sommes atteignaient, par exemple, 14 milliards de francs pour la seule agence de l'eau Seine-Normandie en 1993.

En réalité, la notion pollueur-payeur est beaucoup moins précise qu'elle n'apparaît au premier abord en raison de l'ambiguïté de ce que l'on inclut dans celle-ci. En termes économiques, ce n'est pas la même chose de demander au pollueur d'indemniser les victimes d'une pollution, de prévenir les dommages qu'il cause à l'environnement ou encore – a fortiori – de réparer totalement – si tant est que cela soit possible – les dommages causés aux écosystèmes contaminés

sur le plan écologique.

En pratique, le paiement du coût d'épuration conduit non point à éliminer totalement la pollution, mais à déterminer un niveau optimal de pollution, ce que font les autorités responsables. Ce niveau est situé à l'intersection de la droite du coût marginal d'épuration et de celle du coût marginal de dommage .

Modèle du concept pollueur-payeur



Modèle économique d'optimisation du concept « pollueur-payeur » (d'après P. Barde, « Économie et politique de l'environnement », P.U.F., 1992).

En conclusion, les temps ne sont donc plus où l'impact économique de la protection de l'environnement était considéré comme nécessairement négatif. Il existe actuellement de nombreux indicateurs qui montrent que la lutte contre les pollutions – a fortiori leur prévention – ne signifie pas, tant s'en faut, automatiquement une perte de croissance ou/et des pertes d'emploi.

Cependant, il ne semble pas que les effets directs d'une politique volontariste de lutte contre les pollutions induisent un complément significatif de croissance économique à long terme dans les entreprises. Des recherches économétriques fines ont montré que ces politiques, après une stimulation, dans une première phase, de l'activité économique conduisent à plus long terme à une légère contraction de l'activité économique par suite de la réduction de l'investissement productif qui survient au cours du temps. Toutefois, les effets directs d'une telle politique de lutte contre les pollutions sur la croissance et le P.I.B. restent très faibles et ne justifient pas le chantage à l'emploi fait par certains industriels face aux réglementations de contrôle des pollutions, qui ont été mises en œuvre au cours des années 1980 et 1990.

Par ailleurs, une estimation plus rigoureuse des effets sur l'emploi exige non seulement d'évaluer les effets directs au niveau des industries polluantes, mais aussi les emplois collatéraux et le supplément d'activité induit créés par les mesures de dépollution et de prévention.

Le recyclage crée aussi des emplois et, dans le même temps, se traduit par un effet positif sur la balance des comptes d'un pays en diminuant les importations de matières premières. Cela est tout aussi évident en ce qui concerne les politiques d'économie d'énergies importées.

En France, pays qui pourtant est loin d'être en pointe dans ce domaine, on estimait, par exemple en 1990, que les activités de protection de l'environnement assuraient déjà quelque 359 000 emplois.

Un autre facteur de société intervient comme incitation économique à la lutte contre les pollutions. Sous la pression des consommateurs conscients des exigences de protection de l'environnement sont apparus un nombre croissant de produits dits « verts ». En Allemagne, la fabrication de tels biens de consommation, dits *Umweltfreundlich*, connaît une

vogue croissante. En France, les « écoproduits » ont commencé à apparaître à la fin des années 1980. Des normes ont dû être définies par l'Association française de normalisation (Afnor) pour éviter les fraudes. De tels produits doivent impérativement être non polluants lorsqu'il s'agit de substances à usage dispersif. En outre, leur cahier des charges impose qu'ils soient conçus de sorte à minimiser la consommation d'énergie et les pollutions au cours de leur fabrication ; ils doivent aussi être sans danger pour l'environnement lorsqu'ils sont usagés et autant que possible recyclables.

Les distorsions de concurrence pouvant résulter de la popularité croissante des écoproduits – si leur vogue actuelle devait se confirmer – a conduit dès à présent la plupart des grandes firmes à entreprendre des écobilans de leurs fabrications classiques et de se reconvertir au moins *pro parte* vers la production d'écoproduits. Ces actions sont justifiées par la nécessité qu'elles éprouvent d'éviter de se trouver en situation d'infériorité dans la compétition économique, qui n'a pas manqué d'apparaître à la suite de la commercialisation de ce type de biens de consommation.

François RAMADE

La pollution et le droit

Il n'est pas dit qu'il existe, au sens propre, un droit des pollutions. Les grands accidents polluants qui ont marqué les mémoires – le *Torrey Canyon*, Seveso, Bhopāl, l'*Amoco Cadiz*, Tchernobyl – sont des catastrophes au même titre que la rupture d'un barrage ou l'écrasement d'un avion gros porteur. Quant aux règles destinées à prévenir les pollutions, elles s'apparentent au droit technique. Ne suffirait-il donc pas, plutôt que parer ces règles d'une autonomie factice, de les traiter comme par le passé, au titre de l'hygiène et de la sécurité ?

L'intérêt du propos existe bien pourtant. Mais il tient, plus qu'aux solutions, aux questions juridiques posées par les pollutions, lesquelles présentent une originalité remarquable. Celle-ci tient, d'abord, à une particularité physique : la capacité de dilution des effluents dans le milieu récepteur. Cela seul explique l'inadaptation des mécanismes juridiques classiques et la nécessité d'innover. Cette particularité complique en effet singulièrement les problèmes de preuve, empêche d'identifier à coup sûr l'origine d'une pollution, son ou ses responsables, la part de chacun dans sa survenance. L'établissement des causalités est souvent impossible : ainsi comment dire quel pollueur a causé l'asthme de tel habitant dans le smog de Los Angeles ?

La dilution d'un effluent toxique entraîne encore des difficultés pour agir en justice : les victimes éparpillées sur une vaste étendue, relevant de milieux socioprofessionnels différents, parfois de nationalités différentes, ont le plus grand mal à grouper leur action. Pis, au vu de ces difficultés, les victimes de dommages mineurs, ou insuffisamment établis, renoncent à agir ; or la somme de ces maux équivaut largement aux dommages qui résultent de sinistres majeurs. La faculté de dispersion d'un effluent toxique explique enfin qu'en ce domaine le moindre incident risque de dégénérer en catastrophe. Et ce trait seul justifie à son tour l'attention portée au phénomène : il explique notamment l'importance en la matière de la phase de l'accident proprement dit, par-delà la prévention en amont, des systèmes d'alerte et de l'efficacité des plans d'urgence préparés par les services de la Protection civile : Orsec (Organisation des secours), Tox (substances toxiques), Polmar (pollution marine), Rad (substances radioactives).

Une autre particularité caractérise les pollutions au regard du droit : celles-ci proviennent parfois de produits chimiques dont les caractéristiques étaient ignorées ou sous-estimées lorsque le risque a été créé. Ainsi, pour les cancers

de l'amiante, pour les pollutions industrielles d'antan qui s'avèrent aujourd'hui avoir gravement contaminé les sols. Le risque en cause, dit de développement, est lié à l'innovation scientifique et technologique. Du coup, le droit, habitué à raisonner, à sanctionner, à imposer sur des bases sûres, se trouve pris au dépourvu. Confronté à l'incertitude, il lui faut aujourd'hui repenser sa démarche et prévoir un dispositif adapté à cet enjeu inédit.

De nos jours, les pollutions, devenues préoccupation majeure, ont suscité une prise de conscience de la société, désormais décidée à préserver son environnement : le droit fait partie des instruments destinés à traduire cette réaction dans les faits. À la faveur de ce développement, le droit de l'environnement s'est scindé : pollution et nuisances n'en constituent aujourd'hui qu'un volet, l'autre étant consacré à la protection de la nature. On objectera que l'un n'étant que la cause et l'autre l'effet, la distinction est artificielle. Mais, dans les sciences humaines, les clivages se décident dans la tête des hommes. Or, entre les deux approches, tout diffère : le tempérament des spécialistes, leurs modes de vie et leurs méthodes, souvent même la philosophie qui anime leur démarche. Le droit obéit à cette distinction : aussi nous limiterons-nous ici à la seule pollution.

Vision classique : problèmes de voisinage

La pollution est un mot fort ancien, auquel les effets fâcheux de l'industrialisation et de la pression démographique ont valu une nouvelle carrière.

Sous l'Antiquité, la pollution, effusion de sang dans un lieu sacré, est punie comme souillure religieuse ; sous d'autres vocables, la dégradation de l'eau, du champ, le dépôt de déchets sont partout sanctionnés au titre de l'hygiène. Cette fonction restera : tout au long de l'histoire on punit ceux qui, polluant la Seine, y détruisent le saumon, les ports, le boucher et le tanneur qui incommodent les voisins avec leurs détritiques. Mais jusqu'à nos jours la pollution n'est prise en compte qu'à titre accessoire et sanctionnée qu'au titre d'une autre valeur privilégiée par le droit. Au premier rang, la propriété foncière : depuis le milieu du XIX^e siècle, la pollution d'un étang, celle des douves d'un château ou de l'air environnant une blanchisserie sont traitées comme atteintes à la propriété. Et c'est à ce titre que ces nuisances se trouvent sanctionnées, pour réguler les conflits entre voisins. Le droit des Écoles, qui impose à l'époque une lecture exégétique de l'article 544 du Code Napoléon, ne conçoit pas d'atteinte à la propriété, droit absolu et exclusif : la défense contre les pollutions est l'œuvre des tribunaux, qui sanctionnent le propriétaire pollueur pour avoir abusé de son droit ou indemnisent la victime d'une pollution qui excède les « inconvénients normaux du voisinage ». Cette jurisprudence restera longtemps le seul recours pour les victimes de pollutions de rivières et d'odeurs nauséabondes de voisinage. On note encore que la protection ainsi accordée est purement individuelle : la victime de la pollution se confond avec le voisin incommodé. Avec l'industrialisation, le voisin voit d'ailleurs sa protection sacrifiée : en France, comme aux États-Unis ou en Angleterre, les tribunaux lui opposent que l'intérêt individuel doit ici s'effacer devant l'intérêt général du développement industriel. Seule exception à cette conception individualiste, les professions insalubres sont, depuis toujours, réglementées par l'autorité publique, mises à l'écart, comme à Athènes, soumises à enquête publique *de commodo et incommodo*, comme dans la coutume de Metz au XVII^e siècle. Dans cette tradition, la législation des installations classées, issue d'un texte napoléonien de 1810, soumet les industries polluantes au contrôle d'ingénieurs de l'État, le corps des inspecteurs des installations classées.

Approche moderne : technique, économie, démocratie

Depuis les années 1970, l'environnement ayant été reconnu comme valeur digne de protection pour elle-même, les nuisances font l'objet d'un traitement autonome. Il est également devenu clair, au vu de l'intérêt à protéger autant que des causes à éradiquer, que ce traitement doit être, pour une large part, collectif. Cela dit, la légitimité d'un droit des pollutions et des nuisances autonome demeure incertaine. Son originalité tient, semble-t-il surtout, à la conjonction de trois influences étonnamment distinctes. On y trouve d'abord la marque de la technique : seuils, normes, valeurs-limites gouvernement prévention et répression et influencent les indemnisations. En deuxième lieu, cette branche du droit subit, comme beaucoup, l'omniprésence de l'économie. Elle y trouve un fondement, avec la doctrine élaborée par A. C. Pigou, puis R. H. Coase (*The Social Cost*, 1960) : pour remédier aux nuisances, sous-produits pervers de l'activité économique, non marchands, donc exclus de la théorie du marché, il s'agit de les y intégrer. Cette démarche, dite d'internalisation, suppose donc l'évaluation monétaire des ressources et des espèces naturelles dégradées par la pollution. Ainsi, par la grâce de l'économie, la lutte contre les pollutions s'inscrit dans le système ; de son côté, l'économie trouve, dans ce nouveau point d'application, un renforcement de sa propre légitimité. La troisième influence qui marque le droit des pollutions est celle de l'opinion publique. Le développement de ce droit est inséparable d'une quête de transparence de l'information et de participation du public aux choix affectant son environnement : un trait commun à tous les textes modernes sur les pollutions est l'importance assignée à l'information du public. En France, la Commission d'accès aux documents administratifs (C.A.D.A.) veille à la mise en œuvre du droit à l'information du citoyen.

Cette attente semble liée à l'aspiration démocratique d'une société. Aussi la trouve-t-on d'abord dans les pays industrialisés, forts d'une opinion publique qui cherche, par exemple, à comprendre, en 1978, l'impact de la marée noire de l'*Amoco Cadiz* sur les côtes bretonnes ; en 1986, celui des radiations de la centrale de Tchernobyl sur les lavandes provençales. Mais elle se fait également sentir dans les sociétés privées de démocratie, inquiètes des incidences de leur industrialisation : en Europe de l'Est, dans les années 1980, les grandes grèves des pays miniers, qui traduisaient l'inquiétude suscitée par les pollutions et leurs effets inconnus, préparaient les événements de 1989.

L'Amoco-Cadiz



Avec le naufrage de l'Amoco-Cadiz (16 mars 1978), qui a pollué près de 300 kilomètres de côtes bretonnes et affecté profondément la faune et la flore de cette région, se posait à nouveau la question des risques inhérents au transport des hydrocarbures en mer.

Sources

Les sources reflètent cette évolution. Jusqu'à peu, la pollution n'intéressait pas le droit noble : les textes applicables étaient de modestes règlements d'hygiène municipaux, des arrêtés chimiques ou autres dispositions mineures – tel le célèbre article 434 du Code rural, destiné à sanctionner ceux qui braconnent dans les rivières en jetant du poison, qui

servit de seul fondement à la lutte contre la pollution des rivières pendant plus d'un siècle. Quelques dispositions enfin provenaient de l'ancien droit, leur objet intéressant si peu que le législateur révolutionnaire n'avait pas songé à les remplacer, tel le livre IV de l'ordonnance de la Marine de Colbert à propos de la pollution des ports. Depuis lors, le législateur a rattrapé le temps perdu : le 16 décembre 1964, une loi sur l'eau, novatrice, donne sa priorité à la lutte contre la pollution et institue des redevances à la charge du pollueur ; dix jours plus tard, une loi réprime les déversements d'hydrocarbures en mer. Dans les années 1970, le législateur multiplie les textes : en 1975, les déchets ; en 1976, les immersions ; en 1977, les installations classées ; en 1988, les déchets ; en 1991, les stockages des déchets nucléaires ; en 1992, la loi sur l'eau et, à nouveau, sur les déchets. Par produits, par actions, par milieu, toutes les formes de pollutions se trouvent à leur tour réprimées.

À l'insuffisance succède la pléthore. Mais l'incertitude n'a pas disparu pour autant. Car le droit des pollutions, accumulation de textes disparates, date d'époques très différentes, surtout d'époques où la nature était conçue par le droit de manières très différentes. La matière manque de cohérence, de concepts pour brocher le tout. Curieusement, le droit romain antique convenait mieux. Son appareil de concepts prévoyait en effet un ordre des choses très élaboré : il distinguait la *res nullius*, qui n'appartient à personne, la *res communis*, qui, devant servir à l'usage de tous, doit être réglementée, et les *res sacrae, sanctae*, dignes de respect ; ces qualifications permettaient de prévenir ou de sanctionner leur dégradation en ce qu'elle affecte des intérêts privés ou publics. Puis ce souci s'est perdu : sous l'influence judéo-chrétienne et la volonté de domination cartésienne, la nature a été occultée, banalisée au rang de chose objet de droit. Aujourd'hui seulement, on s'avise de ce vide juridique, creusé depuis des siècles. Et le droit des pollutions souffre de ses sources hétérogènes, créées de bric et de broc : une disposition régit l'émission, une autre le produit polluant et une troisième le milieu pollué. Aussi, la codification du droit français des pollutions, en cours de 1994, présente peu d'intérêt, dès lors qu'elle se limite à collationner les textes, sans y toucher. Par contraste, le droit international ne souffre pas d'une telle faiblesse : neuf, lui n'est pas encombré par son passé.

Droit international

La pollution n'est plus simple affaire de voisinage. Les marées noires, pluies acides et les effluves radioactives ignorent les frontières. Pour y répondre, les États ont adopté des conventions internationales, soit pour légitimer leur intervention en cas de menace grave de pollutions, comme en haute mer (Bruxelles, 1969), soit pour organiser la coopération et l'assistance en cas d'accident : ainsi, après Tchernobyl, une convention sur la notification rapide en cas d'accident nucléaire (26 sept. 1986), et une autre sur l'assistance en cas de situation d'urgence radiologique (27 oct. 1986) ou, en cas de pollution marine, la convention de Londres de 1990. D'autres accords visent à contrôler la circulation des déchets par-delà les frontières (Bâle, 1989) ; d'autres, enfin, la réparation des dommages : par exemple, après une marée noire (convention de Bruxelles, 1969-1971).

Le plus grand nombre de ces accords sont intervenus sur le plan régional, entre États unis d'intérêt face à une pollution : ainsi, une convention cadre sur la pollution de l'air à longue distance a été adoptée en Europe (Genève, 1979), et la lutte contre la pollution des mers a donné lieu à des séries d'accords régionaux entre États riverains des mêmes mers.

Les années 1980 ont, enfin, vu monter la peur de changements climatiques planétaires sous l'effet des pollutions. La

dégradation de la couche d'ozone de la stratosphère a entraîné l'adoption d'une convention (Vienne, 1985), puis d'un protocole (Montréal, 1987) qui visent à tarir la production des chlorofluorocarbures (CFC), substances auxquelles est attribué le phénomène.

L'ensemble de ce processus a eu pour effet de porter atteinte à la souveraineté étatique, dogme de base du droit international classique. Face aux pollutions transfrontières, les États sont désormais tenus de s'informer et de coopérer. Un principe s'est enfin imposé, à la suite d'une pollution frontalière entre le Canada et les États-Unis en 1941 : un État ne doit pas autoriser d'activités susceptibles de causer des nuisances à ses voisins.

À la charnière entre droit international et droit interne, deux organisations régionales complètent l'appareil. L'une et l'autre sont des organisations à vocation économique. Elles se sont intéressées aux pollutions de manière indirecte ; du fait que les entreprises respectueuses de l'environnement souffrent d'une concurrence anormale de la part de celles qui n'en ont cure, cette distorsion doit être supprimée. Sur cette seule base, à partir des années 1970, l'O.C.D.E. et la Communauté européenne ont commencé à élaborer leur dispositif de lutte contre la pollution. À l'O.C.D.E., on doit en particulier le principe pollueur-payeur, énoncé en 1972, inscrit depuis lors dans l'ensemble du droit des pollutions et jusque dans l'Acte unique européen de 1986. Expérimentation et mise en œuvre du principe ont été effectuées à propos des marées noires, puis des déchets. Ce principe n'est pas juridique, mais il dicte au législateur la politique à suivre et au juge le sens de son interprétation.

La Communauté européenne poursuit, depuis 1970, une ambitieuse politique de lutte contre les pollutions. Au cours des cinq programmes qui jalonnent son effort de 1972 à 2002, plus de deux cents textes, directives ou règlements auront été adoptés à propos de pollutions.

Plutôt qu'une énumération fastidieuse des innombrables textes européens, et pour permettre de saisir l'articulation entre droit communautaire et droit français, on s'arrêtera sur un exemple : la question des déchets, source majeure de pollution.

Droit communautaire et droit interne : l'exemple des déchets dangereux

Pour répondre à cette préoccupation récente, mais majeure, droit communautaire et droit français ont fait leur apprentissage en parallèle, au fil des mauvaises nouvelles. Le 15 juillet 1975, une directive communautaire et une loi interne visent ensemble l'élimination et la récupération des déchets. Pour définir le déchet, la directive s'en remet au droit de chaque État membre. Les concepts, les catégories manquaient ; les mécanismes, imprécis, resteront inachevés ; le ramassage par des spécialistes agréés se heurtera au principe communautaire de libre circulation des marchandises. Survient l'accident de Seveso : une directive traite alors des déchets toxiques et dangereux (n° 78/319 du 20 mars 1978) et, lorsque les fûts de déchets provenant du nettoyage du site sont retrouvés en France au terme d'une course-poursuite, une directive organise le contrôle des transferts transfrontaliers de déchets dangereux (n° 84/631 du 6 déc. 1984), elle entraînera une proposition de directive sur la responsabilité, révisée, mais sans succès. Enfin, l'affaire de la décharge de Montchanin (Saône-et-Loire) invite le législateur à revoir sa copie : à la directive de 1975 s'en substitue, en 1991, une nouvelle plus précise et plus sévère, qui régit installations et exploitants (n° 91/56 du 18 mars 1991). La loi française du

13 juillet 1992, qui lui répond, organise des plans d'élimination, décentralisés, institue une taxe sur les déchets ménagers, ainsi qu'un fond de modernisation pour la gestion des déchets. Le progrès de la réflexion se note encore à l'affinement des concepts : ainsi, l'élimination sera-t-elle, en 2002, réservée aux déchets « ultimes », susceptibles de valorisation.

Outre ce régime général, le législateur communautaire, relayé au niveau national, s'est soucié de certaines catégories de déchets dits « spéciaux » particulièrement préoccupants. Ainsi, les huiles usagées, dont l'élimination repose sur une directive du 16 juin 1975, transposée par décrets depuis 1979, les PCB (directive du 6 avr. 1976 et du 1^{er} oct. 1985) et les déchets hospitaliers.

Seuls échappent pratiquement à l'emprise communautaire les déchets de l'industrie nucléaire. Hormis une directive Euratom du 3 février 1992 réglementant les transferts de déchets radioactifs entre États membres, ceux-ci obéissent à une réglementation nationale dérogatoire, tant pour leur définition que pour leur manipulation. Une loi du 30 décembre 1991 organise les recherches en vue du stockage souterrain des déchets radioactifs à vie longue.

La mise en œuvre de cet appareil revient, pour l'essentiel, à la jurisprudence du Conseil d'État. Celui-ci a élaboré, sur le fondement du régime des installations classées, une théorie spécialement pertinente, suivant laquelle l'exploitant d'une installation est tenu de veiller à l'élimination des déchets issus de son industrie : celle-ci constitue le « prolongement direct de son activité », et il ne peut s'en décharger sur un tiers, par exemple un transporteur (C.É. du 24 mars 1978, La Quinoléine) et alors même qu'il aurait cédé la propriété du site où sont déposés les déchets (C.É. du 20 mars 1991, Rodanet).

La Cour de justice des Communautés est ici saisie de conflits de principes : la libre circulation des marchandises, prévue par l'article 100 A du traité de Rome, se heurte au souci de réserver le monopole de l'élimination à des opérateurs agréés, ce qui a posé problème en matière d'huiles usagées, ainsi qu'au principe de proximité, suivant lequel les déchets doivent, autant que possible, être éliminés auprès de leur source. Il y a là un terrain d'élection pour le principe de subsidiarité, édicté par le traité de Maastricht.

Sur la pollution en général, il est surtout demandé à la Cour de Luxembourg de sévir à l'encontre des États membres qui tardent à transposer les directives communautaires.

Entre ces strates de textes de sources et d'inspiration si différents, régissant des acteurs si différents, il est illusoire de prétendre dresser des priorités. Car la gravité est ici relative : la pollution la plus grave est, pour chacun de nous, celle qui nous touche de plus près ; entre l'ozone de la planète et l'eau de mon robinet, cette dernière m'importe plus. Il est vain également de chercher à répertorier ici l'ensemble des innombrables textes consacrés à la lutte contre les pollutions. Force est de se limiter à l'essentiel, de se contenter d'indiquer les grandes lignes du système juridique de lutte contre les pollutions et de souligner quelques obstacles auxquels il se heurte, d'une part, au stade de la prévention, d'autre part, une fois l'accident survenu, pour réparer et punir.

Prévention des pollutions

La voie technologique

Mieux vaut prévenir que guérir. La prévention idéale des pollutions intervient à la source. Lorsque les sources de pollution sont multiples et disséminées, le contrôle des pollueurs est illusoire. La seule action efficace réside alors dans le progrès technique, qui permet de réduire la nocivité de l'effluent ou de le filtrer à l'émission. Ainsi, les interdictions fulminées en matière de pollution de l'air, en 1932 comme en 1961, sont restées des vœux pieux tant que les moyens techniques n'étaient pas au point. Depuis lors, la technologie le permettant, des séries d'arrêtés fixent des normes et en organisent le contrôle. Ces normes portent, d'une part sur le milieu (normes de qualité de l'air, assorties de réseaux de surveillance et d'alerte dans les zones sensibles) ; d'autre part sur les sources de pollution (normes de fabrication et d'émission, pour les installations fixes, et les véhicules, quel qu'en soit le carburant). Ces normes, souvent révisées, sont généralement inspirées par Bruxelles. Ainsi, la directive du 20 mars 1985 sur la teneur en plomb dans l'essence, à l'origine du développement de l'essence sans plomb, et la directive du 3 décembre 1987 permettent d'imposer des pots d'échappement catalytiques sur certains véhicules.

En règle générale, la prévention des pollutions implique la maîtrise de l'ensemble du processus de production et de distribution des substances chimiques, puis du stockage et de l'élimination des déchets. Dans certains pays, cette approche technique et réglementaire de la lutte est le seul remède contre les pollutions, comme au Japon (loi du 19 nov. 1969, art. 16 et suivants). Elle présente cependant des inconvénients qui devraient conduire à en limiter l'emploi. Les règles élaborées par des bureaux, ésotériques, sont inaccessibles au citoyen, tenu de les subir sans comprendre ; passif, il n'est donc pas incité à modifier son comportement, ce qui est pourtant la première clé du succès en matière de lutte contre les pollutions.

Instruments économiques

Une approche toute différente vise à influencer sur le comportement des agents économiques au moyen de mécanismes incitatifs ou dissuasifs. Les instruments économiques se différencieraient des instruments dits réglementaires par leur souplesse, la réaction des acteurs économiques obéissant aux mécanismes du marché.

Il en existe deux sortes. Les taxes, les redevances, les subventions ou les aides permettent d'influer sur les comportements, en même temps que de financer des équipements préventifs, des installations d'épuration ou d'incinération par exemple. Citons la redevance sur l'eau instituée en 1969, à la fois fonction de la quantité prélevée et de la qualité rejetée (art. 14 de la loi du 16 déc. 1964), la taxe sur les déchets ménagers, instituée en 1992 (loi du 13 juill.) ; sur le plan international, la perspective d'un réchauffement climatique global a suscité la proposition d'une taxe sur les émissions de CO₂, responsables de l'effet de serre. Ces redevances, en principe conçues dans un but pédagogique, devraient être modulées afin de faire pression sur les pollueurs ; en pratique, pour la redevance sur l'eau, la crise a gommé cette fonction, et ne reste que la source de subsides.

Plus récemment, à l'initiative de l'école économiste néo-libérale américaine, des instruments économiques d'un genre nouveau ont été imaginés : il s'agit de droits à polluer, permis octroyés, puis vendus aux entreprises, libres par la suite de commercialiser leur quota. Ainsi, un marché expérimental de droits à polluer a été inauguré, à la Bourse de Chicago, pour les industries polluantes d'air.

Répression et réparation des dommages

Intérêt limité de la répression pénale

Tous les textes qui portent sur la pollution sont assortis d'une panoplie de sanctions pénales, concernant soit le rejet lui-même, soit l'absence d'autorisation, soit le résultat ; soit encore le dépassement des seuils de tolérance. Chacun s'accorde pourtant à souligner la faible effectivité du droit pénal en la matière.

Cela tient à diverses causes. La modicité des peines a longtemps ôté toute valeur dissuasive aux sanctions pénales pour pollution. Aujourd'hui, le législateur a fortement réévalué ces peines. Un second obstacle à la répression pénale tient aux difficultés de preuve, souvent ici rédhibitoires. Faute de correspondance dûment établie entre les éléments requis par le texte légal et les circonstances du déversement, l'infraction ne peut être retenue. La probabilité de relaxe augmente avec la technicité des exigences légales : ainsi, en matière de pollution des mers, la convention Marpol retient, pour punir le déversement d'hydrocarbures par les navires, un triple critère, fondé sur la teneur du rejet en ppm d'hydrocarbures, le dépassement d'une quantité de rejets par mille parcouru et d'une quantité globale pour le voyage considéré. Une difficulté de preuve plus redoutable encore tient enfin à l'élément intentionnel, volonté coupable sans laquelle un délit ne peut être constitué ; seules échappent à cette condition les contraventions. En matière de pollution, l'intention coupable est spécialement difficile à prouver ; pis, le plus souvent, elle n'existe pas : le rejet est le fruit d'un mélange de laxisme, d'imprudence et de hasard.

Aussi, pour la pollution des cours d'eau, la jurisprudence a, de longue date, pris des libertés avec l'exigence d'un élément. Depuis 1970, le délit de pollution des eaux (art. de la loi 232-2 du Code rural) était tenu pour matériel, indépendant de tout élément moral. Grâce à cette facilité, le contentieux de la pollution des cours d'eau s'est révélé beaucoup plus efficace que tout autre. Et, bien que le nouveau Code pénal de 1993 prohibe en principe le procédé, un correctif bienvenu prévoit que les délits non intentionnels réprimés par des textes antérieurs demeurent constitués (art. 339 du Code pénal).

Difficultés de la réparation des dommages en cas de préjudice écologique

La force dissuasive des condamnations pécuniaires infligées aux pollueurs en fait souvent la meilleure des dissuasions. Aussi, cet aspect du droit des pollutions revêt-il un intérêt particulier, hormis même la satisfaction des victimes. Les difficultés du droit face à la pollution sont clairement illustrées par le développement du préjudice écologique. Celui-ci a connu une fortune singulière. Il ne visait jusqu'à nos jours que le préjudice certain et direct causé à un propriétaire foncier par une pollution. Avec les grandes marées noires, *Torrey Canyon* et surtout *Amoco Cadiz*, il s'est étendu au coût des mesures de lutte et de nettoyage entreprises lors de l'accident de pollution ; on y a également inclus le manque à gagner des secteurs touchés par l'accident, la pêche ou le tourisme. Avec Seveso et Tchernobyl s'ajoute le coût de la décontamination des terres polluées, de l'évacuation des populations, de leur relogement. Récemment, enfin, la prise de conscience de la pollution, historique, des friches industrielles du passé ajoute au problème une dimension

temporelle : la détermination du responsable appelé à supporter cette charge imprévue est un choix de société, qui reste à trancher d'ici à la fin du siècle.

Par ailleurs, le regard porté par le droit sur les effets des pollutions a changé. On s'avise aujourd'hui que l'atteinte portée à des milieux naturels non appropriés, ou à des ressources sans équivalent monétaire, appelle réparation dans certaines circonstances, notamment si cette atteinte est irréversible. Le droit s'emploie donc actuellement à déterminer les méthodes susceptibles de permettre une indemnisation équitable, sans frapper injustement le pollueur ; il lui faut notamment, à cette fin, identifier un tuteur de la nature, représentant qualifié pour représenter les intérêts lésés, et le doter des moyens utiles pour remplir sa tâche. Il lui faut également imaginer des moyens d'attribuer une valeur pécuniaire aux ressources naturelles dégradées.

Collectivisation des risques : fonds d'indemnisation

L'ampleur des dommages de pollution oblige aujourd'hui à faire feu de tout bois : outre le contentieux traditionnel, l'indemnisation fait ici appel à des mécanismes de redistribution des risques (assurances, redevances) propres à étaler la charge sur le plus grand nombre. Parmi eux, les fonds d'indemnisation ont connu le plus grand succès : leur avantage tient à ce qu'ils opèrent alors même que l'auteur de la pollution est resté inconnu, qu'il est insolvable ou qu'il bénéficie d'une exonération de responsabilité, par exemple si la pollution provient d'un cataclysme imprévisible ou d'un acte terroriste. Les difficultés de preuve propres à la pollution rendent cet avantage précieux. Sur le plan de l'équité, le système des fonds présente également un intérêt majeur : face à une pollution causée par inadvertance ou malchance par un industriel en difficulté, dont l'entreprise est utile socialement et économiquement, la condamnation paraît frapper un bouc émissaire. Le fonds, au contraire, ne condamne personne : il s'agit de financement, non de responsabilité. Faisant peser la charge liée à un risque de pollution sur l'ensemble du groupe qui en est l'auteur, il représente l'expression exacte du principe pollueur-payeur. En règle générale, les fonds d'indemnisation ont vocation à combler les défaillances du système juridique traditionnel pour assurer la couverture des risques de pollution que la société entend voir réparés.

Le premier fonds en matière de pollution fut le Fonds international d'indemnisation sur les pollutions pétrolières (Fipol), institué en 1971 par une convention de Bruxelles pour compléter l'indemnisation des dommages de marée noire fournie par les armateurs pétroliers, ou s'y substituer en cas de défaillance.

Pollutions du passé : l'inconnue

Avec les pollutions historiques héritées par les vieux pays industriels, le problème prend une nouvelle dimension. En effet, le propriétaire actuel ignore le plus souvent que sa terre a été dégradée, et il n'a aucun moyen de le savoir, si diligent ait-il été. Il est victime du risque dit « de développement », celui qui, impensable à l'instant où il est créé, ne se découvre que des années plus tard, par l'effet du progrès des sciences et des techniques, alors qu'il est trop tard et que le mal est fait. Du coup, la responsabilité du propriétaire, rétroactive, semble une injustice.

Telle est pourtant la solution retenue par les États-Unis en 1980, lorsque ce pays décida d'en finir avec les sites pollués : face à l'identification improbable de l'auteur de la pollution, le propriétaire fut choisi comme celui qui devait payer ;

son innocence ne lui fut reconnue comme cause d'exonération qu'en 1986, et au prix de coûteuses enquêtes. Depuis lors, les filiales américaines ont semé la crainte dans le reste du monde industrialisé : Danemark, Royaume-Uni, Pays-Bas ont connu de rudes procès. En Allemagne, la menace d'une responsabilité de l'acquéreur, de nature à faire fuir les investisseurs à l'Est, menaçait la réunification en 1991. Partout, désormais, le législateur cherche à réparer les pollutions du passé, erreur de ses pères, pour préserver les générations futures.

Martine RÉMOND-GOUILLOUD

Le rôle des États

À l'égard du phénomène de la pollution, la responsabilité de l'État est d'abord d'assurer la sécurité et la santé de ses ressortissants en interdisant ou en contrôlant les activités susceptibles d'y porter atteinte. Beaucoup de pollutions étant liées aux processus de production, l'État doit veiller à ce que le coût des pollutions soit autant que possible supporté par leurs auteurs, conformément à un principe reconnu depuis 1972 par l'O.C.D.E., par l'Union européenne et inscrit en 1992 pour le monde dans la Déclaration de Rio. L'économie de marché requiert en effet l'inclusion dans les prix de l'ensemble des éléments constituant le coût de production. Toutefois, le rôle de l'État moderne déborde le domaine de la répression et celui de la réglementation. Il est amené, en effet, à prendre en considération dans ses décisions non seulement la création d'un cadre favorable au développement de la production et de la consommation de biens et de services marchands, mais aussi la sauvegarde et l'amélioration du patrimoine naturel et du cadre de vie. Ainsi, la lutte contre la pollution fait-elle partie de l'action en vue de protéger l'environnement naturel, qui est elle-même inséparable de nombreux aspects de la politique des États : politique d'encouragement au développement scientifique, technologique et industriel, politique agricole, politique des transports, politique sociale et de la santé, protection des espaces verts, des sites et des monuments.

Pour réduire la pollution, les États ont recours à différentes méthodes : mise en place de services administratifs et de cadres réglementaires ou législatifs concernant les produits dangereux, les modes de production, le stockage, le recyclage ou l'élimination des déchets, la réutilisation des emballages, la gestion des ressources (redevances pour usage, objectifs de qualité, réalisations d'installations d'épuration), l'encouragement aux technologies propres, les études d'impact, la protection des biens naturels et, de plus en plus, l'exercice d'une politique fiscale appropriée (écofiscalité, etc.).

Enfin, les États s'efforcent d'organiser leur coopération, soit par conventions particulières, soit au sein d'organisations internationales, en particulier pour assurer la protection des milieux naturels qui échappent aux frontières, pour lutter contre le commerce international des espèces menacées, ou encore comme élément de régulation et de renforcement des politiques nationales au sein de groupes régionaux d'États engagés dans un processus d'intégration économique et sociale (Union européenne).

Principales politiques intérieures

Depuis la fin des années 1960, tous les États industriels ont élaboré progressivement une politique de lutte contre la pollution et de protection de l'environnement, qui s'est traduite d'abord par l'adoption de réglementations nouvelles et la

mise en place de nouveaux services administratifs.

Le souci d'une meilleure qualité de vie, les agressions sonores causées par la circulation automobile et par les autres moyens de transport, la pollution de l'atmosphère dans les zones industrielles et urbaines, le dépérissement des forêts, principalement en Europe centrale, la destruction accélérée des forêts tropicales (Amazonie) et de la faune sauvage (Afrique), la répétition de catastrophes écologiques et la prise de conscience des menaces pesant au niveau planétaire sur les climats (effet de serre, atteintes à la couche d'ozone de la haute atmosphère) ont mis la protection de l'environnement au premier rang des préoccupations dans les pays industrialisés. La prise de conscience a été plus tardive dans les pays en développement qui, cependant, connaissent des conditions d'environnement particulièrement dégradées en raison de la désertification de certaines zones (Sahel), du développement anarchique de grandes agglomérations urbaines ou d'une industrialisation très rapide sans égards suffisants pour l'environnement (Asie du Sud-Est).

Les pays issus de l'ancien empire soviétique (ex-U.R.S.S. et pays satellites d'Europe centrale) souffrent également d'un environnement très dégradé en raison de la totale négligence dont faisaient preuve dans ce domaine les anciennes autorités.

La France

La politique française en matière de protection de l'environnement avait ouvert la voie par le contrôle des « établissements classés » (loi de 1917). Les premières lois visant à organiser la lutte contre la pollution datent de 1961 (eaux) et de 1964 (air).

La création d'un ministère de l'Environnement est intervenue en 1971. Il dispose d'un Fonds d'intervention pour la qualité de la vie (F.I.Q.V.) et de crédits budgétaires mis en place par l'administration centrale ou par l'agence A.D.E.M.E. (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) créée en 1993.

L'action la plus remarquable entreprise par la France est la création de six agences de bassin, chargées de la gestion et de l'assainissement des rivières, à l'aide de redevances perçues auprès des utilisateurs et des pollueurs des eaux. Au cours des dernières années, la politique française a été marquée par la construction de nombreuses stations d'épuration (taux d'épuration de plus de 65 %), l'encouragement aux technologies propres, la gestion des ressources (économies d'énergie, recyclage des déchets), la lutte contre le bruit, l'amélioration de l'information (comptes du patrimoine naturel, tableaux de bord régionaux et départementaux).

Station d'épuration



Une station de traitement des eaux usées.

Les problèmes les plus préoccupants sont aujourd'hui la pollution du sol et du sous-sol par les déchets toxiques, les engrais et les pesticides, le contrôle des transports de matières dangereuses et la dégradation de l'espace rural en raison soit d'une industrialisation de l'agriculture dans les zones fertiles, soit de l'abandon de la culture dans les zones moins favorisées. La poursuite du drainage des zones humides, l'artificialisation des rivières, le développement de nouveaux axes de transport (autoroutes et trains à grande vitesse) et les aménagements touristiques en montagne contribuent également à la dégradation des milieux naturels.

L'ambitieux programme nucléaire français a été ralenti en raison d'un développement des besoins en énergie électrique moindre que prévu. Bien que l'énergie d'origine nucléaire ait été mieux acceptée en France que dans la plupart des pays occidentaux, elle n'en est pas moins l'objet d'une vive contestation des milieux « écologistes », à l'intérieur et à l'extérieur. Les critiques les plus vives concernent les centrales proches des frontières (Cattenom, près de Luxembourg) et le réacteur surrégénérateur Phénix à sodium de Creys-Malville, dont l'exploitation avait repris en 1989 après un arrêt de deux ans. Il a été décidé, en 1993, d'abandonner l'exploitation économique de ce réacteur et de le conserver seulement en tant qu'instrument de recherche.

La république fédérale d'Allemagne

La protection de l'environnement est devenue une priorité majeure de la politique allemande depuis l'entrée des Verts dans les parlements régionaux ainsi qu'au Bundestag en 1983. La structure fédérale du pays entraîne une répartition complexe des compétences entre le *Bund* (État fédéral) et les *Länder* (États fédérés). La compétence du Bund s'est manifestée par l'adoption d'une série de lois qui concernent notamment l'air, l'eau, les déchets et les études d'impact. Les responsabilités principales appartenaient au ministère de l'Intérieur jusqu'à la création, en 1988, d'un ministère fédéral de l'Environnement. La plupart des services chargés de l'environnement, notamment ceux des études et recherches, sont installés à Berlin.

Les priorités de la politique allemande ont été l'élimination ou le recyclage des déchets industriels et, surtout, la lutte contre la pollution atmosphérique à l'origine probable des pluies acides, qui ont causé des ravages dans la forêt allemande. Bien que les causes de la dégénérescence des résineux soient sans doute multiples, le gouvernement a décidé l'introduction immédiate de carburants sans plomb, en vue de permettre la généralisation des pots d'échappement catalytiques.

Avec l'appui du Danemark, des Pays-Bas et du Parlement européen, l'Allemagne a obtenu que les pots catalytiques soient progressivement rendus obligatoires dans la Communauté européenne et dans l'Association européenne de libre-échange.

Elle s'est cependant refusé jusqu'à présent à accepter d'imposer une limitation de la vitesse autorisée sur les autoroutes allemandes.

Enfin, la R.F.A. utilise très largement les possibilités offertes depuis 1985 par la réglementation communautaire de verser aux agriculteurs des subventions destinées à compenser les contraintes liées à la protection de l'environnement.

Depuis la réunification du pays en 1990, la lutte contre la pollution dans les Länder de l'Est est devenue la

préoccupation essentielle. Dès à présent, la fermeture de nombreuses industries polluantes y contribue ainsi que la substitution progressive du gaz naturel au lignite.

La Grande-Bretagne

Le développement ancien de l'industrie autour des mines de charbon et, plus récemment, l'extension des banlieues résidentielles autour des villes ont provoqué une dégradation considérable des terrains et des eaux. Les premières lois sur l'approvisionnement en eau et sur les rejets de gaz nocifs dans l'atmosphère ont été adoptées dès le milieu du XIX^e siècle. La politique britannique se caractérise par son pragmatisme et par le rôle important dévolu aux autorités locales. La méthode dite des *best practical means*, ou « meilleurs moyens pratiques », consiste à rechercher la solution la mieux adaptée à chaque problème particulier, et en tenant compte de la capacité de réception et d'auto-épuration du milieu. Elle fait confiance au dialogue entre autorités locales et entreprises. Seules les pollutions les plus dangereuses font l'objet de prescriptions nationales. La lutte contre la pollution relève, pour l'essentiel, du ministère de l'Environnement.

Les Britanniques, très attachés à la nature, ont une expérience très réussie de conciliation de la modernisation agricole et de la protection des sites et des paysages. Ils font usage, comme l'Allemagne, des possibilités de compensation des contraintes d'environnement aux agriculteurs des zones qui présentent un intérêt ou une fragilité écologique particulière.

Autres pays d'Europe

Les pays nordiques attachent beaucoup de prix à leur environnement. Leurs forêts de résineux ont subi, comme celles d'Allemagne, de sérieux dégâts, dus aux pluies acides, de même que les lacs et la faune aquatique.

La Suède a institué une taxe sur les engrais ainsi qu'une écotaxe sur l'énergie destinée à remplacer partiellement les impôts qui frappent le travail et le capital.

L'Italie, en raison de la faiblesse de son armature politico-administrative compensée cependant par le dynamisme de la justice, marque un certain retard dans la lutte antipollution. Elle a subi, en 1976, une catastrophe écologique d'une ampleur exceptionnelle à la suite de la diffusion accidentelle de dioxine, produit d'une extrême toxicité, à l'usine Hofmann-Laroche de Seveso.

Europe centrale et orientale

Les pays d'Europe centrale et orientale connaissent une situation écologique désastreuse, qui ne s'est guère améliorée depuis la chute des régimes communistes et l'éclatement de l'U.R.S.S.

La catastrophe de Tchernobyl en Ukraine (avr. 1986) avait confirmé de manière dramatique le manque de fiabilité des installations nucléaires soviétiques. Cancers et naissances d'enfants mal formés se sont multipliés dans les zones contaminées. Cependant, les autorités ukrainiennes qui font face à une pénurie sévère d'énergie causée par le ralentissement des livraisons russes ont maintenu en activité les éléments encore utilisables de la centrale. Plusieurs

dizaines de centrales du même type sont en service dans l'ex-U.R.S.S. Leurs conditions d'exploitation font peser la menace permanente d'accidents, qui pourraient avoir des conséquences catastrophiques.

Les exemples les plus spectaculaires de pollution sont dans l'ex-U.R.S.S. les fuites d'hydrocarbures dans les zones de production et de transport de pétrole et de gaz ou encore l'assèchement progressif de la mer d'Aral où toute vie aquatique a disparu à la suite du pompage des eaux fluviales et de leur pollution par les exploitations cotonnières.

Les pollutions qui proviennent des pays d'Europe centrale et orientale sont la principale cause des pluies acides et du dépérissement des forêts, non seulement dans ces pays mais également en Allemagne et dans certaines zones d'Europe occidentale. C'est pourquoi la réduction des pollutions est un élément essentiel des programmes communautaires et internationaux (Banque européenne de reconstruction et de développement, Banque mondiale) d'aide aux pays d'Europe centrale et orientale.

La revendication écologique a été un moment associée à la contestation des régimes communistes, y compris en Russie. La chute de la production et celle du niveau de vie imposent aujourd'hui d'autres priorités, et le seul facteur d'amélioration paraît être la chute de la production. On note cependant l'adoption de mesures antipollution dans les pays d'Europe centrale, en particulier en Hongrie. En Bulgarie, où le mouvement écologiste a joué un rôle important dans la chute du régime communiste, le maintien en exploitation d'une centrale nucléaire du type Tchernobyl est une source de sérieuses préoccupations, en dépit de l'aide technique occidentale.

Les États-Unis d'Amérique

La loi de 1969 concernant la politique américaine de l'environnement a institué un Conseil de la qualité de l'environnement, composé de trois membres nommés par le président. La plupart des services administratifs qui s'occupent de lutte contre la pollution ont été regroupés au sein de l'Agence pour la protection de l'environnement. Les principales lois qui intéressent l'air, l'eau, les déchets et les produits toxiques ont été adoptées entre 1963 et 1977.

Après l'établissement de normes du milieu ambiant, contrôlées par un réseau de surveillance très développé, la réglementation américaine s'est orientée vers l'adoption de normes d'émission ou de la meilleure technologie de contrôle disponible.

Les résultats obtenus sont considérables en ce qui concerne la pollution de l'air par les oxydes de soufre en milieu urbain. Des progrès restent à faire pour ce qui est des oxydes et des oxydants photochimiques, en particulier dans les agglomérations (à Los Angeles, notamment), sujettes au phénomène de l'inversion atmosphérique qui, dans certaines conditions, fait obstacle à la diffusion de l'air pollué. L'introduction de pots d'échappement catalytiques sur les voitures a été rendue obligatoire à partir de 1979. Cependant, on estime que 40 % des automobilistes continuent à utiliser du carburant contenant du plomb.

La catastrophe de l'*Exxon Valdez* qui a provoqué, en mars 1989, la pollution de la baie du prince William, sur la côte Sud de l'Alaska, et des dommages considérables au milieu marin, a révélé une fois encore l'insuffisance des précautions prises par les grandes compagnies pétrolières qui utilisent des navires sous pavillon de complaisance.

Après l'administration Reagan marquée par la politique de déréglementation visant à substituer des mécanismes de

marché aux procédures contraignantes, l'administration Bush a marqué un certain retour à l'interventionnisme fédéral en matière d'environnement. Le retour des démocrates à la présidence en 1993 ne peut qu'accentuer cette tendance, d'autant que le vice-président, Albert Gore, a de fortes convictions écologistes et une compétence reconnue dans ce domaine. Cependant, l'environnement ne figurait pas parmi les premières priorités de l'administration Clinton, qui étaient la réduction des déficits budgétaires et commerciaux et la réforme du système de santé. Aucune mesure n'a été prise pour réduire le gaspillage de l'énergie qui caractérise l'économie américaine et qui justifierait l'institution d'une écotaxe.

Le Japon

Depuis trente ans, le Japon a connu un prodigieux développement économique, qui lui a permis de devenir la deuxième puissance industrielle du monde.

Ce développement s'est fait pendant longtemps au détriment de l'environnement. La pollution de l'air dans les grandes agglomérations a atteint un niveau inquiétant, tandis que de très graves intoxications provoquaient à plusieurs reprises de nombreux décès de personnes ayant consommé des poissons pollués par des résidus de mercure et de cadmium déversés dans la mer. Le principal accident de cette sorte fut celui de Minamata en 1956, qui entraîna la mort de six cent soixante-huit personnes et donna lieu à plusieurs milliers de dossiers d'indemnisation, dont certains étaient encore à l'examen trente ans plus tard.

À partir de la fin des années 1960, les autorités japonaises ont engagé des actions très vigoureuses de lutte contre la pollution de l'air et de l'eau. Les normes les plus sévères du monde ont été prescrites à l'industrie automobile japonaise. Un contrôle très strict est imposé aux véhicules en service, et l'usage des carburants additionnés de plomb a pratiquement disparu.

L'effort de lutte contre les diverses pollutions industrielles a été encore accentué au cours des années 1980, notamment après le rapport Maekawa (1987) qui avait mis en lumière le retard du Japon en matière d'équipements publics. Cependant, des problèmes subsistent en ce qui concerne la qualité des eaux, qu'il s'agisse des cours d'eau, de la mer intérieure ou des eaux littorales.

La crise économique sévère que connaît le Japon depuis 1992 n'est pas favorable à une intensification des efforts en faveur de l'environnement. Cependant, le Japon a décidé, en 1992, de se placer en position de leader pour la protection de l'environnement planétaire. Mais les contributions financières annoncées à l'occasion de la conférence de Rio ne semblent pas avoir été versées. De même, le M.I.T.I. s'est, jusqu'à présent (1994), opposé à l'institution d'une écotaxe.

Les pays du Tiers Monde

Les pays du Tiers Monde ont longtemps refusé de voir leur croissance économique affectée par la lutte contre la pollution. Cependant, plusieurs d'entre eux ont commencé à prendre conscience de la nécessité de mieux gérer leurs ressources naturelles et de se mettre à l'abri des catastrophes écologiques. On peut dire aujourd'hui que la prise de conscience est générale.

La situation dans le Tiers Monde demeure néanmoins très préoccupante. En Afrique, la zone sahélienne est affectée par des sécheresses qui, allant de pair avec le déboisement, ont pour effet l'extension du désert vers le sud et des famines meurtrières, comme celle qui a frappé l'Éthiopie en 1984-1985. L'anarchie et les luttes tribales, qui se développent en plusieurs régimes de ce vaste continent, ne sont évidemment pas favorables à l'environnement.

Plusieurs pays du Tiers Monde ont été victimes d'accidents écologiques liés à l'industrialisation. Les plus importantes ont affecté le golfe du Mexique en 1979 (déversement de 400 000 tonnes de pétrole en mer à partir d'une plate-forme de recherche pétrolière), la ville de Mexico en 1984 (explosions de gaz ayant causé 450 morts), la ville de Bhopāl, en Inde, également en 1984 (fuite de gaz toxique à l'usine de pesticides d'Union Carbide, ayant causé 2 500 morts).

La destruction accélérée de la forêt amazonienne a ému l'opinion mondiale. Elle a pour conséquence l'élimination de la couche fragile d'humus et contribue, par les incendies provoqués, à augmenter la teneur de l'atmosphère en gaz carbonique, elle-même à l'origine de l'effet de serre dont on craint qu'il n'aboutisse à un réchauffement général du climat terrestre.

Cultures sur brûlis, Brésil



Incendies pour permettre des cultures sur brûlis dans la forêt équatoriale du Para, au Brésil.

Plusieurs pays asiatiques et l'Indonésie subissent également une déforestation rapide, génératrice d'érosion et destructrice des milieux naturels.

L'altération des milieux naturels est la conséquence de l'explosion démographique du Tiers Monde. S'ajoutant au braconnage qui sévit même dans les parcs et réserves, parfois stimulé par le trafic des animaux sauvages, des peaux, de l'ivoire, elle menace de disparition de nombreuses espèces animales (éléphants, rhinocéros, félins tachetés, singes anthropoïdes, nombreuses espèces d'oiseaux, etc.). Seule une politique associant et intéressant les populations à la sauvegarde du patrimoine naturel paraît de nature à renverser ce processus, concurremment avec une lutte renforcée contre les trafiquants et le boycott par les consommateurs occidentaux des productions provenant du braconnage, notamment les produits en ivoire et les fourrures d'animaux sauvages. La France a décidé, en 1989, d'interdire l'importation de l'ivoire.

La Chine

La Chine, qui représente à elle seule environ le quart de la population mondiale, est engagée depuis 1992 dans un processus de croissance économique accélérée mais très déséquilibrée. L'« économie socialiste de marché » est génératrice d'énormes disparités entre les régions côtières, dont certaines se développent au rythme de 20 % par an, et les régions de l'intérieur où la masse des paysans sans terre, réduite à la misère, émigre vers les zones urbaines et

industrielles. Ces dernières subissent, faute de réglementation appropriée et de contrôles, une pollution (air et eau) qui met en danger la santé des populations. Le recours massif à l'énergie tirée du charbon dont la Chine est très bien pourvue contribue à aggraver la situation.

De manière générale, l'explosion d'immenses métropoles dans de nombreux pays du Tiers Monde (Le Caire, São Paulo, Mexico, Bombay, Calcutta, Shanghai...), où des populations misérables vivent dans des conditions sanitaires désastreuses, est l'un des problèmes d'environnement les plus préoccupants.

Aspects internationaux

La coopération internationale s'impose pour la protection des milieux naturels communs à plusieurs États : atmosphère, mers, cours d'eau internationaux, lacs, nappes phréatiques, ainsi que tous les espaces naturels fractionnés par des frontières politiques. Elle peut également viser à prévenir les entraves au commerce international qui pourraient résulter des mesures adoptées par les États en vue de lutter contre la pollution, si ces mesures n'étaient plus ou moins harmonisées.

La coopération internationale se développe soit dans le cadre d'organisations au niveau mondial ou régional, soit par accords bilatéraux ou multilatéraux entre États.

À la suite de la conférence tenue à Stockholm en 1972 par l'O.N.U., une nouvelle organisation spécialisée a été créée : le Programme des Nations unies pour l'environnement dont le siège est à Nairobi (Kenya).

La conférence de Rio de Janeiro et les grandes organisations internationales

Vingt ans après la conférence de Stockholm, le sommet de la planète Terre a réuni, en juin 1992, à Rio de Janeiro, cent dix chefs d'État ou de gouvernement. Cette conférence, qui aura marqué une prise de conscience des liens entre environnement et développement, avait été précédée et préparée par une commission internationale présidée par une éminente femme d'État norvégienne, Gro Bruntland, qui a imposé la notion de développement durable (en anglais, *sustainable growth*). Dès 1988 avait été conclue, à Montréal, une convention ayant pour objet de protéger la couche d'ozone de la haute atmosphère contre les chlorofluorocarbures (CFC), qui sont aussi des gaz à effet de serre. De même, une conférence avait été réunie à La Haye à l'initiative de la France, des Pays-Bas et de la Norvège afin de promouvoir l'idée de mesures supranationales en vue de la protection des climats et de la haute atmosphère.

1989 à 1999. Le monde contemporain



Effondrement des régimes communistes.
Mondialisation. Regroupements régionaux.
Poussées nationalistes.

Le sommet de Rio de Janeiro a adopté une déclaration de principes, parmi lesquels ceux de responsabilité, de précaution, du pollueur-payeur, ainsi qu'un programme d'action en trente-huit chapitres appelé agenda ou calendrier 21. Une commission mondiale du développement durable est chargée de suivre l'exécution de ce programme et, en particulier, de faciliter les transferts de technologie au profit des pays moins avancés.

Deux conventions importantes ont été signées. L'une a pour objet de lutter contre l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre en vue de faire face au danger du changement climatique. L'autre a pour objet la sauvegarde de la biodiversité, c'est-à-dire celle des nombreuses espèces végétales ou animales menacées de disparition par suite des atteintes au milieu naturel.

De nombreuses organisations internationales concourent à la lutte contre la pollution et en faveur de l'environnement. On peut citer l'organisation maritime internationale (pollution des océans encore mal contrôlée), l'U.N.E.S.C.O. (programme M.A.B. : Man and Biosphere, principalement orienté sur la gestion des ressources naturelles des pays du Tiers Monde), la F.A.O. (Organisation pour l'alimentation et l'agriculture), l'Organisation météorologique mondiale, qui concourt aux recherches sur le climat, ainsi que de nombreuses organisations ou associations scientifiques internationales. La nouvelle Organisation mondiale du commerce appelée à se substituer au G.A.T.T., à la suite de l'accord du 15 décembre 1993 confirmé en avril 1994 à Marrakech, devra prendre en considération la protection de l'environnement dans la réglementation des échanges.

L'O.C.D.E., qui groupe les pays industrialisés occidentaux, le Mexique et le Japon, produit des études sur les rapports entre les politiques économiques et fiscales et la protection de l'environnement. Elle a fait adopter le principe pollueur-payeur dès 1972. Depuis 1989, l'O.C.D.E. met en place, à la demande du groupe des sept pays les plus industrialisés (G7), un ensemble d'indicateurs de l'environnement.

L'Europe

Le Conseil de l'Europe, forum parlementaire qui s'est largement ouvert à l'Europe centrale et orientale depuis la chute des dictatures communistes, fournit le cadre de conventions qui visent principalement la protection de la faune sauvage.

Mais l'action la plus importante est de très loin celle que développe la Communauté européenne, devenue Union européenne depuis l'entrée en vigueur, le 1^{er} novembre 1993, du traité de Maastricht. Le premier programme

communautaire dans le domaine de l'environnement remonte à 1972. C'est l'Acte unique de 1986, qui a expressément reconnu la compétence de la Communauté dans ce domaine. La Communauté a pour objet de protéger l'environnement, la santé et d'assurer une utilisation prudente des ressources naturelles. Le traité de Maastricht a ajouté à ces objectifs celui de « la promotion, sur le plan international, de mesures destinées à faire face aux problèmes régionaux ou planétaires d'environnement ». Les modalités sont l'action préventive, la correction par priorité à la source, le principe du pollueur-payeur, la considération de l'environnement comme composante des autres politiques. Des dérogations temporaires sont prévues au profit des pays les moins riches ainsi que des aides (fonds de cohésion). En revanche, les pays sont libres d'adopter des mesures plus sévères, à la condition de ne pas en faire un outil de protection commerciale.

Une Agence européenne de l'environnement a été établie, à la fin de 1993, à Copenhague. Elle constitue la tête d'un réseau de recueil de données à partir de « points focaux » nationaux. Elle fournira aux autorités de l'Union les éléments nécessaires à la définition de leur politique en ce domaine.

Les résultats de l'action communautaire ont été particulièrement remarquables dans le domaine de la lutte contre la pollution de l'air (épuration des fumées, pots d'échappement catalytiques) et de l'eau (directives multiples), ainsi que dans la prévention des accidents industriels majeurs (à la suite de la catastrophe de Seveso) et dans le contrôle des substances dangereuses. Il reste, cependant, de grands efforts à faire pour améliorer le traitement des déchets, dont la circulation transfrontière est en principe interdite, et surtout en ce qui concerne la prise en compte de l'environnement par la politique agricole (pollution des eaux, dégradation des paysages), par celle des transports (développement excessif des transports routiers de marchandises en raison de la sous-taxation du coût des infrastructures), enfin, par celle de l'énergie (projet d'écotaxe sur les énergies dont la combustion produit du dioxyde de carbone, proposé par la Commission européenne en 1992).

La réforme de la politique agricole commune décidée en 1992 a notamment pour objet d'encourager les formes d'agriculture et d'élevage extensifs. Cependant, la jachère, quasi obligatoire, a été préférée à la taxation ou au contingentement de l'usage des produits chimiques comme moyen de limiter les excédents.

L'Union soutient et coordonne de nombreuses recherches dans le domaine de l'environnement auxquelles des pays tiers sont associés, en particulier dans le cadre de l'Espace économique européen. Elle apporte une aide aux pays d'Europe centrale et orientale ainsi qu'aux pays d'Afrique, des Caraïbes et du Pacifique signataires de la convention de Lomé.

Enfin, elle a contribué activement à la conférence de Rio de Janeiro et à sa préparation. Elle participe à ses suites ainsi qu'à la plupart des activités internationales dans le domaine de l'environnement.

Les écorégions

On doit signaler enfin quelques tentatives de coopération entre pays ayant des situations et des problématiques environnementales analogues.

Ainsi, une vingtaine de pays ont signé à Paris, en 1992, un accord en vue de la lutte contre la désertification au Sahel. De même, vingt États riverains de la Méditerranée et de l'Union européenne ont signé à Barcelone, en 1975-1976, une

convention sur la protection de la mer et engagé une coopération sur l'environnement et le développement durable : le Plan d'action pour la Méditerranée. Il existe aussi des programmes concernant des mers régionales engagés sous l'égide du Programme des Nations unies pour l'environnement (P.N.U.E.), au Caraïbes, dans le Pacifique ou l'océan Indien. Ces coopérations constituent d'utiles démultiplicateurs pour l'action internationale.

La lutte internationale contre la pollution, qui s'inscrit dans le cadre plus général de la préservation à long terme des conditions de la vie et de la civilisation à la surface de la Terre, en est encore à ses débuts. Il est à craindre que le refus des États d'accepter l'autorité d'organismes supranationaux, régionaux ou mondiaux ne fasse obstacle à toute action efficace. Pour atteindre son objet, cette action devrait comporter non seulement l'établissement d'une police internationale, mais encore un contrôle beaucoup plus rigoureux de l'expansion démographique, qui supposerait à son tour un effort massif d'aide de la part des pays les plus riches.

On peut espérer cependant que l'existence de menaces globales aideront à l'émergence d'une problématique environnement-développement. Dès à présent, la Banque mondiale et les banques régionales de développement subordonnent leurs décisions de financement à une appréciation de l'impact environnemental des projets.

Ainsi, la pollution fait partie, comme la course aux armements, des grandes menaces que fait peser sur l'humanité le décalage entre le progrès des sciences et des techniques et celui des mœurs et des institutions. Envisagée sur le plan mondial, la lutte contre la pollution est inséparable du combat pour le développement et le maintien de la paix, c'est-à-dire pour l'instauration, désormais nécessaire à la survie de l'humanité, d'un ordre juridique et politique universel qui devra se construire à partir de regroupements régionaux de nations.

Robert TOULEMON

Thèmes associés

- . CAUSES DE POLLUTION
- . CHANGEMENTS DE L'ENVIRONNEMENT GLOBAL
- . DROIT DE L'ENVIRONNEMENT
- . DÉCHETS DOMESTIQUES, AGRICOLES ET INDUSTRIELS
- . ENVIRONNEMENT, théorie économique
- . LUTTE CONTRE LA POLLUTION
- . NUISANCES
- . POLITIQUE DE L'ENVIRONNEMENT
- . POLLUTION DES MILIEUX
- . POLLUTION ET ACCIDENTS NUCLÉAIRES
- . POLLUTION ET ÉCOTOXICOLOGIE
- . RISQUES ET CATASTROPHES TECHNOLOGIQUES
- . TRAITEMENT DES DÉCHETS

Bibliographie

- . P. BARDE, *Économie et politique de l'environnement*, P.U.F., Paris, 1992

- . P. BOURDEAU, J. A. HAINES, W. KLEIN & K. MURTI, « Ecotoxicology and climates », in *Scope*, n° 38, John Wiley and Sons, 1989
- . B. HENDERSON-SELLERS & H. R. MARKLAND, *Decaying Lakes : the Origin and Control of Eutrophication*, John Wiley, Chichester-New York, 1987
- . INTERNATIONAL INSTITUTE OF ENVIRONMENT & DEVELOPMENT (I.I.E.D.), *World Resources 1992/1993*, Oxford Univ. Press, Washington, 1992
- . H. LE TREUT & R. KANDEL, « L'Effet de serre », in *La Recherche*, vol. XXIII, 1992
- . P. MATHY et al., *Air Pollution and Ecosystems*, Reidel Publ., Dordrecht, 1988
- . J. MC CORMICK, *Acid Earth, the Global Threat of Acid Deposition*, Earthscan, Londres, 1990
- . A. MISCH, « Assessing Environmental Health Risks », in L. Brown et al., *State of the World 1994*, Norton and Co., New York, 1993
- . O.C.D.E. *L'État de l'environnement*, Paris, 1991
- . PROGRAMME DES NATIONS UNIES POUR L'ENVIRONNEMENT (P.N.U.E.), *Environmental Data Report, 1991-1992* M.A.R.C., Kings College, Londres, 1992 ; « Les Pollutions globales », in *Les Catastrophes écologiques*, Mc Graw Hill, Paris, 1987 ; *Ecotoxicology*, John Wiley, Chichester-New York, 1987 ; *Écologie appliquée* Mc Graw Hill-Ediscience International, 4^e éd. 1992 ; *Précis d'écotoxicologie*, Masson, Paris, 1992 ; *Dictionnaire encyclopédique de l'écologie et des sciences de l'environnement*, Ediscience International, Paris, 1993
- . R. S. STOLARSKI, « The Antarctic Ozone Hole », in *Scient. Amer.*, vol. CCLVIII, n° 1, 1988
- . J. C. WHITE, *Global Climate Change Linkages : Acid Rains, Air Quality and Stratospheric Ozone*, Elsevier, 1989.
- . P. BILLET, *Production, stockage et élimination des déchets*, Jurisclasseur Environnement, fasc. 810, 1992
- . *Code permanent environnement et nuisances, parties Eau, déchets, produits chimiques, air, installations classées*, Éd. législatives et administratives
- . J. FROMAGEAU, *La Police de la pollution à Paris de 1666 à 1789*, thèse, univ. de Paris-II, 1990
- . P. GUTTINGER & J. FROMAGEAU, *Droit de l'environnement*, Eyrolles, Paris, 1993
- . LE DEAUT, Rapport de l'Assemblée nationale n° 2295 sur le Protocole de Montréal 1987 relatif aux substances qui appauvrissent la couche d'ozone (doc. 2347)
- . A. KISS, *Droit international de l'environnement*, Pédone, 1989
- . L. KRÄMER & P. KROMAREK, « Chroniques de droit communautaire de l'environnement », in *Rev. jur. Env.*
- . *L'O.C.D.E. et l'environnement*, publ. O.C.D.E., 1986 ; *Législation sur les déchets dangereux dans les pays de l'O.C.D.E.*, *ibid.*, 1988
- . M. PRIEUR, *Droit de l'environnement*, Dalloz, 2^e éd. 1991 ; *Les Plans Orsec, droit et ville*, colloque, Toulouse, 1995
- . M. RÉMOND-GOUILLOUD, *Le Préjudice écologique*, Jurisclasseur Environnement, 1992
- . J. H. ROBERT, *Droit pénal de l'environnement*, Masson, Paris, 1983
- . R. ROMI, *Droit et administration de l'environnement*, Domat, 1994 ; « Chroniques de droit sur l'eau », in *Revue juridique de l'environnement* ; *L'Europe et la protection de l'environnement*, Litec, 2^e éd. 1993

- . P. ROQUEPLO, *Pluies acides, menaces pour l'Europe*, Economica, 1988
- . L. SCHAPIRA, *Les Déchets nucléaires*, Document. franç., Paris, 1991.
- . *Cahiers du G.E.R.M.E.S. (Groupe d'exploitation et recherches multidisciplinaires sur l'environnement et la société) :*
« Politiques de l'environnement comparées », déc. 1981 ; « Les Politiques de l'environnement face à la crise », déc. 1984
- . « Centenaire du Service d'inspection des établissements classés du département de la Seine », in *Bull. Assoc. nat. Inspect. Établ. classés*, n° 1, 1963
- . « Circulaire du 4 avril 1962 relative à l'évacuation et au traitement des ordures ménagères », in *Journal officiel*, 2 mai 1962 et 17 juillet 1962
- . « Circulaire du 7 juillet 1970 relative à l'assainissement des agglomérations et à la protection sanitaire des milieux récepteurs », *ibid.*, 7 août 1970
- . COMMISSION DES COMMUNAUTÉS EUROPÉENNES, *Dix Ans de politique communautaire de l'environnement*, mars 1984
- . A. COMOLET, *L'Évaluation de la comptabilisation du patrimoine naturel*, coll. Environnement, L'Harmattan, Paris, 1994
- . C. DOUAY, *Compte rendu des travaux du Comité juridique de l'O.M.C.I. à l'Association française du droit maritime*, polygr., Paris, 1971
- . *Établissements dangereux, insalubres ou incommodes*, éd. Journaux officiels, broch. n° 1001, Paris, s.d.
- . « Environnement et développement : le rendez-vous de Rio », in *Universalis 1993*, Encyclopædia Universalis, Paris, 1993
- . L. FERRY, *Le Nouvel Ordre écologique*, Grasset, Paris, 1992
- . M. FORTUIT, *Les Problèmes de pollution et d'environnement*, rapport n° 1554 de l'Assemblée nationale, annexe au procès-verbal de la séance du 17 déc. 1970, Paris, 1970
- . *Fosses septiques et appareils équivalents* (circulaire des 18 juin et 19 févr. 1965), éd. Journaux officiels, broch. n° 1086, s.d.
- . P. GOUSSET, *Le Droit des établissements classés dangereux, insalubres et incommodes*, Paris, 1977
- . P. HOGGER, *Comparaisons de législations nationales*, conférence européenne sur la pollution de l'air, Strasbourg, 1964
- . *Hygiène et sécurité. Loi et textes réglementaires*, manuel pratique, Union des industries métallurgiques et minières, 11^e éd., Paris, 1970
- . R. KEMPF, *Aspects juridiques de la pollution des cours d'eau par les entreprises industrielles*, Paris, 1954
- . « Lettres des programmes interdisciplinaires de recherche », in *Environnement*, oct. 1992
- . « Loi du 16 décembre 1964 sur la protection des eaux », in *Journal officiel*, n° 195, 18 déc. 1964
- . J. LOPUSKY, *Legal Aspects of Problem Connected with the Implementation of International Control of Pollution in the Marine Environment*, doc. O.N.U., New York, 1970
- . E. R. MALAKOFF, *Water Pollution Control : National Legislations and Policy*, doc. F.A.O., Rome, 1966
- . « Message du président des États-Unis au Congrès en date du 10 févr. 1970 », in *Informations et documents*, 15 févr. 1970
- . MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT, *Rapports sur l'état de l'environnement*
- . *L'O.C.D.E. et l'environnement*, Paris, 1979
- . O.M.S., *Aperçu de la législation actuelle : la Pollution de l'air*, Genève, 1963 ; *La Pollution de l'eau*, Genève, 1967

- . *La Politique de l'environnement aux États-Unis*, Document. franç., Paris, 1970
- . *Politique de la Communauté européenne en matière d'environnement. Première communication*, Paris, juill. 1971
- . E. DU PONTAVICE, *La Pollution des mers par les hydrocarbures*, Paris, 1967
- . *The President's 1971 Environmental Program*, Domestic Council, Washington, 1971
- . A. QUEVAUVILLER, « L'Hygiène de l'environnement industriel. Les établissements classés », in *Protection civile et sécurité industrielle*, n° 150, 1967
- . *Règlement sanitaire départemental*, éd. Journaux officiels, broch. n°s 63-157, s.d.
- . M. RÉMOND, *Problèmes juridiques posés par l'exploration pétrolière en mer*, Paris, 1970
- . J. F. THÉRY, *Législation, réglementation et organisation administrative dans le domaine de l'eau*, Paris, 1970
- . *Umweltschutz Sofortprogramm der Bundesregierung*, Bonn, 1970
- . *Umweltsprogramm der Bundesregierung* (programme approuvé par le Bundeskabinett, le 29 sept. 1971, discuté au Bundestag le 3 décembre 1971), Bonn, 1971.