

observons dans les situations de locomotion réelle : nous pensons que les circuits que nous avons décrits représentent les éléments essentiels de l'appareil locomoteur de la lamproie.

Nos simulations ont retrouvé les commandes nerveuses des contractions alternées, d'un côté et de l'autre, de la colonne vertébrale, et elles ont précisé nos premières idées sur le délai d'activation des segments successifs de la moelle. Ce délai provient des neurones qui s'étendent le long de la colonne vertébrale et qui inhibent les segments dans la direction de la queue. Les segments proches de la tête, les plus excitable, sont activés avant les autres. L'activation des segments de la moelle, l'un après l'autre, tout le long du corps de l'animal, est ainsi retardée de la tête vers la queue. Ce comportement est réversible : lorsque l'excitabilité est plus forte vers la queue, la lamproie nage à reculons. Malgré son câblage préexistant, le réseau spinal de la lamproie conserve un degré de flexibilité considérable. Des travaux plus récents, de modélisation complète de la lamproie, prennent en compte les propriétés contractiles des fibres musculaires et la viscosité de l'eau : ils montrent que les réseaux de neurones que nous avons décrits suffisent pour que la lamproie nage.

La lamproie s'est individualisée à partir de la lignée principale des vertébrés, il y a environ 450 millions d'années, alors que les vertébrés n'avaient pas encore de membres. Les mécanismes de sa locomotion se retrouvent-ils chez les vertébrés plus évolués ?

À l'Université de Bristol, Alan Roberts a étudié les mécanismes cellulaires de la locomotion chez un autre

vertébré, le têtard, et il a retrouvé des systèmes nerveux analogues à ceux de la lamproie. L'organisation neuronale d'autres vertébrés, des poissons aux primates, ressemble à celle que nous avons identifiée : des régions particulières du tronc cérébral commandent les mouvements, et la moelle épinière traite les signaux correspondants à l'aide de réseaux de neurones spécialisés.

Les mécanismes cellulaires utilisés pour la locomotion de ces autres animaux restent toutefois mal connus. Des générateurs de patrons locomoteurs ont été identifiés, et certains de leurs composants ont été testés, mais on est encore loin de connaître leur organisation interne. De nouvelles techniques d'isolement de la moelle épinière chez d'autres classes de vertébrés (mammifères, oiseaux et reptiles) sont toutefois apparues ces dernières années : bientôt, sans doute, nous comprendrons comment ces animaux marchent, courent ou volent.

Comme les premiers vertébrés se déplaçaient par une nage ondulatoire, les réseaux de neurones qui ont évolué pour la commande des nageoires, des pattes ou des ailes ne devraient pas différer beaucoup de ceux que nous avons décrits pour la lamproie. L'évolution invente peu : elle modifie et améliore ce qui existe déjà. Nous serions surpris que les systèmes de commande de la locomotion chez l'homme diffèrent beaucoup de ceux de la lamproie. Pour soigner des lésions de la moelle épinière, on pourrait rechercher et activer chez les malades des générateurs de patrons locomoteurs rendus silencieux. Un tel progrès est peut-être plus proche qu'on ne le pense : une Ferrari à moteur turbo n'est jamais qu'une voiture un peu perfectionnée.

Sten GRILLNER dirige l'Institut Nobel de neurophysiologie, à Karolinska.

S. GRILLNER, *Neurobiological Bases of Rhythmic Motor Acts in Vertebrates*, in *Science*, vol. 228, pp. 143-149, 12 avril 1985.

Jean-Pierre GASC, *Les déplacements des vertébrés*, in *Pour la Science*, juillet 1989.

Ian STEWART, *Les règles de la locomotion*, in *Pour la Science*, juin 1994.

La marche humaine et sa pathologie, sous la direction de Jacques Péliissier et Vincent Brun, éditions Masson, 1994.

Sabine RENOUS, *Locomotion*, Éditions Dunod, 1994.

Daniel RICHARD et Didier ORSAL, *Neurophysiologie*, Tome 2 : *Motricité et grandes fonctions du système nerveux central*, éditions Nathan, 1994.

Ö. EKEBERG, A. LANSNER et S. GRILLNER, *The Neural Control of Fish Swimming Studied through Numerical Simulations*, in *Adaptive Behavior*, vol. 3, n° 4, pp. 363-384, printemps 1995.

S. GRILLNER, T. DELIAGINA, Ö. EKEBERG, A. EL MANIRA, R.H. HILL, A. LANSNER, G.N. ORLOVSKI et P. WALLÉN, *Neural Networks That Co-ordinate Locomotion and Body Orientation in Lamprey*, in *Trends in Neuroscience*, vol. 18, n° 6, pp. 270-279, juin 1995.

L'assainissement du Rhin

KARL-GEERT MALLE

Les pays européens qui se partagent le Rhin s'efforcent, ensemble, de nettoyer cette ressource économique et écologique vitale.

Dans les années 1960 et au début des années 1970, en plein redéploiement économique de l'Europe, la pollution organique et inorganique du Rhin atteignit des niveaux assez élevés pour décimer des dizaines d'espèces de poissons ou d'autres animaux qui vivaient dans le fleuve depuis des milliers d'années. La majeure partie du fleuve devint impropre à la baignade, et la production d'eau potable fut menacée.

Il fallut dix ans pour que les mesures prises par les pays riverains parviennent à assainir progressivement des segments de plus en plus longs du fleuve, de sorte que, s'il reste encore beaucoup à faire, ce travail apparaît aujourd'hui comme une remarquable coopération internationale de contrôle de la pollution. L'assainissement du Rhin est un modèle que l'on cherche à appliquer à d'autres pollutions échappant aux cadres nationaux.

Aujourd'hui les travaux d'assainissement ont redonné vie à l'une des plus belles rivières du monde. D'innombrables poètes et écrivains ont chanté ce fleuve fabuleux, qui baigne cinq pays avant de se déverser dans la mer du Nord, aux Pays-Bas. Né dans les Alpes suisses, le Rhin coule vers le Nord et vers l'Ouest sur 1 320 kilomètres, à travers des montagnes escarpées, le lac de Constance, la Forêt noire, les larges vallées alsaciennes, les villes de Strasbourg, de Bonn, de Düsseldorf et de Rotterdam. La Volga et le Danube sont plus longs et plus puissants que le Rhin, mais leur débit est moins régulier et leur importance économique est inférieure.

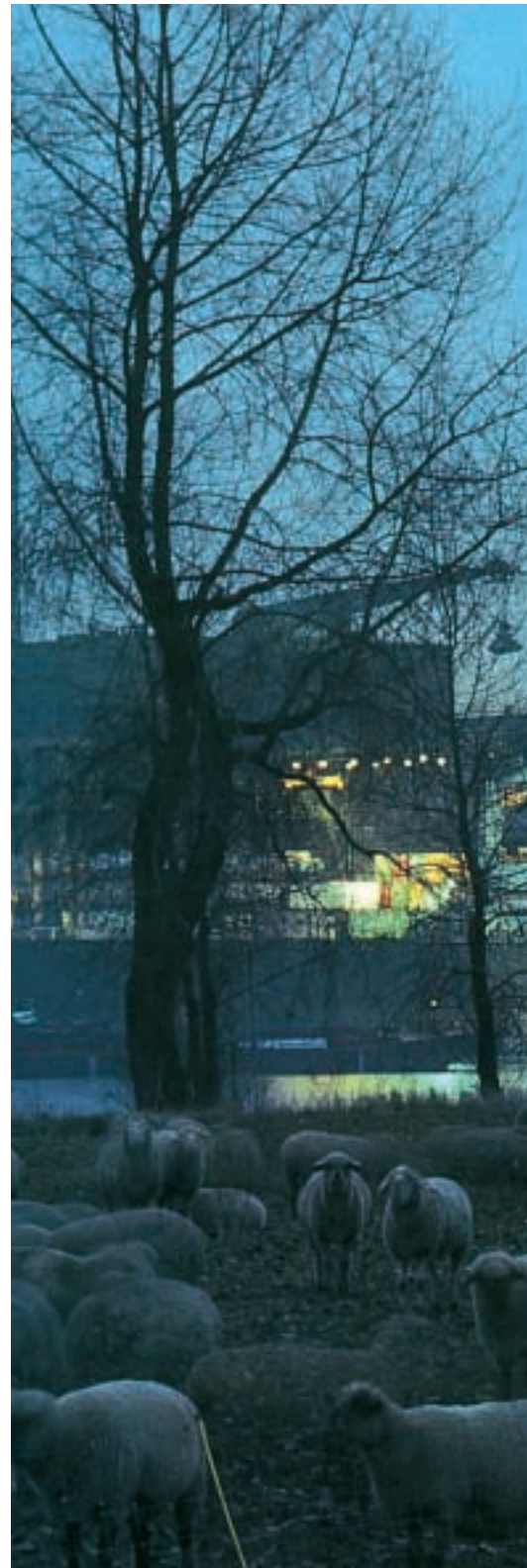
Le bassin versant des eaux du Rhin couvre 190 000 kilomètres carrés, où vivent 50 millions de personnes. Plus

de huit millions d'entre elles tirent leur eau potable du fleuve, tandis que le lac de Constance abreuve dix autres millions de personnes. En tout, 20 pour cent de l'eau du Rhin est détournée et utilisée, soit pour la consommation humaine, soit pour des usages industriels. En outre, des usines hydroélectriques, construites après la Première Guerre mondiale sur le territoire français, fournissent 8,7 millions de mégawattheures par an.

Le fleuve est navigable sur 800 kilomètres, de la mer du Nord jusqu'aux chutes d'eau de Schaffhouse, en aval du lac de Constance. Chaque jour, plus de 500 péniches y transportent des carburants, des dérivés du pétrole, du sel, des phosphates, du charbon, du gravier, des automobiles, etc. ; chaque année, 150 millions de tonnes de biens sont ainsi transportées sur le Rhin.

L'une des principales raisons de l'importance du Rhin est la régularité de son débit. En hiver et au printemps, le fleuve est alimenté par les précipitations en plaine et dans les parties les plus hautes du bassin versant ; en été, la fonte des neiges alpines prend la relève. Le lac de Constance et d'autres lacs suisses font office de réservoirs. Entre 1925 et 1992, le débit moyen du fleuve a été de 2 350 mètres cubes par seconde, avec un rapport de 2,1 seulement entre le débit annuel maximal (3 170 mètres cubes par seconde en 1966) et le débit annuel minimal (1 510 mètres cubes par seconde en 1971).

Avant la fin de la Seconde Guerre mondiale, le Rhin était quasi dépourvu d'usines d'épuration. Seules les principales villes déversaient directement



1. L'INDUSTRIE ET L'AGRICULTURE ont beaucoup pollué le Rhin, mais des réglementations industrielles plus contraignantes, des efforts individuels des riverains et des subventions accordées aux fermiers qui limitent l'utilisation de certains produits chimiques ont récemment réduit l'impact des activités économiques sur le fleuve.

leurs eaux sales et malodorantes dans le fleuve. Toutefois, après la guerre, quand l'économie de l'Europe centrale se rétablit, la pollution s'intensifia tant qu'il fallut réagir. En 1963, la France, l'Allemagne, le Luxembourg, les Pays-Bas et la Suisse créèrent une «Commission internationale contre la pollution du Rhin», afin de coordonner les efforts et de limiter la contamination du fleuve.

Cette commission surveille aujourd'hui la qualité de l'eau en plusieurs

points, situés principalement aux frontières. Le point de contrôle le plus important est situé entre l'Allemagne et les Pays-Bas, car cette région est juste en aval du bassin industriel de la Ruhr : ainsi nommée d'après un petit affluent du Rhin, cette zone d'activités houillères, sidérurgiques et chimiques est l'une des sources majeures de pollution. En outre, après son entrée aux Pays-Bas, le fleuve traverse une région assez rurale, sans sources de pollution importantes, jusqu'au moment où il

rejoint les grands ports hollandais de Rotterdam et d'Amsterdam. Là, le régime des eaux change considérablement : après avoir traversé la Suisse, la France et l'Allemagne en sept ou huit jours, les eaux du Rhin séjournent 70 à 80 jours aux Pays-Bas, en raison du système complexe de digues, de canaux et d'équipements fluviaux (tels les deux grands lacs artificiels que sont l'IJsselmer et le Haringvliet). Très peu de temps après son entrée aux Pays-Bas, le Rhin forme un delta com-



La vallée du Rhin

2. LE RHIN parcourt 1 320 kilomètres, de sa source, dans les Alpes suisses, jusqu'au port de Rotterdam, en mer du Nord. En chemin, il traverse le lac de Constance, puis la France et l'Allemagne. Les positions respectives de certaines sources majeures de pollution ainsi que quelques repères géographiques sont indiqués sur cette carte.

portant trois estuaires distincts : le Waal, le Lek et l'IJssel.

La Commission internationale pour la protection du Rhin publie chaque année un rapport comprenant des données analytiques, revues et confirmées par chacun des pays membres de la commission, mais elle sert surtout à proposer et à appliquer des mesures pour améliorer la qualité des eaux du fleuve. Deux projets importants, signés en 1976, sont la Convention pour la protection du Rhin contre la pollution chimique et la Convention pour la protection du Rhin contre la pollution par les chlorures. Une autre convention, qui devait traiter la pollution thermique, a été préparée, mais n'a jamais été ratifiée par l'ensemble des États membres. Bien que le Rhin se réchauffe progressivement, l'effet (1,8 °C depuis 1925) n'a pas été jugé suffisant pour mériter une action internationale.

Les polluants inorganiques

Les rivières renferment bien plus de sels inorganiques que de substances organiques. Certains de ces sels proviennent du sol : ils sont dissous par les pluies, avant d'être entraînés jusqu'au fleuve. Toutefois les eaux des égouts, les rejets industriels et les eaux de ruissellement qui proviennent des terres cultivées ont considérablement augmenté leurs concentrations. En 1992, la concentration en sels (chlorures, carbonates, sodium, calcium, etc.) attei-

gnait 581 milligrammes par litre à la frontière germano-hollandaise ; elle n'a pas changé notablement au cours des deux dernières décennies. Comme l'élimination de ces sels est extrêmement coûteuse quand ils sont dilués, on ne dessale l'eau qu'en cas de besoin particulier, par exemple avant son utilisation pour l'irrigation.

Les activités humaines libèrent surtout des ions chlorure. Les analyses effectuées en 1992 indiquent que 311 kilogrammes d'ions chlorure entrent chaque seconde dans le Rhin, à com-

parer aux 15 à 75 kilogrammes d'origine naturelle. Les plus importantes sources de chlorures sont les mines alsaciennes de potasse qui, à elles seules, libèrent 130 kilogrammes d'ions chlorure par seconde.

Le chlorure de sodium (le sel de table) est un sous-produit indésiré





INDUSTRIE

de cette exploitation minière ; il est entassé sur terre en de gigantesques terrils, ou dissous et transporté jusqu'à la mer par le Rhin. Durant des décennies, le déversement du sel dans le fleuve a exaspéré les horticulteurs hollandais, qui utilisent l'eau du Rhin pour irriguer leurs orchidées, leurs glaïeuls et d'autres fleurs qui supportent mal les ions chlorure. La Convention de 1976 sur les chlorures stipulait que la France devait stocker une partie des sels sur son territoire, le surcoût de ce stockage étant partagé avec l'Allemagne et avec les Pays-Bas. Toutefois les Alsaciens s'op-

posèrent à cette disposition, et le Parlement hollandais refusa de payer. Un accord n'a été obtenu qu'en 1991 : il impose un contrôle des rejets miniers, de sorte que la concentration en ions chlorure ne dépasse pas 200 milligrammes par litre à la frontière germano-hollandaise. En pratique, les mines doivent interrompre leurs rejets pendant quelques jours, à deux ou trois reprises par an. Les cultivateurs hollandais ne sont pas enchantés de cette solution, mais le problème a peu de chance d'être résolu avant l'épuisement des mines de potasse, d'ici 10 ou 20 ans.

Aussi gênants soient-ils, les ions chlorure ne sont pas parmi les pollutions qui gênent le plus les Pays-Bas. L'azote et le phosphore, qui proviennent surtout des eaux des égouts, favorisent la prolifération des algues et stimulent artificiellement la chaîne alimentaire. Ce phénomène d'eutrophisation est surtout gênant aux Pays-Bas, où les eaux sont lentes et où les algues forment parfois des masses épaisses qui entravent la navigation et bouchent les pompes. En outre, quand les algues meurent en automne, leur décomposition absorbe l'oxygène de l'eau, asphyxiant les poissons et les autres organismes aquatiques.

Le retraitement des eaux usées, qui réduit notablement les quantités d'azote et de phosphore rejetés, s'est généralisé à partir de la constitution de la Commission internationale pour la protection des eaux du lac de Constance, en 1959. Depuis le début des années 1970, le retraitement des eaux usées et l'utilisation de détergents sans phosphates ont progressivement réduit la quantité de phosphore dans le fleuve. En 1992, la concentration moyenne en phosphore mesurée à la frontière germano-hollandaise atteignait 0,21 milligramme par litre ; elle était inférieure aux concentrations des années précédentes, mais restait dix fois supérieure à la concentration mesurée dans le lac de Constance.

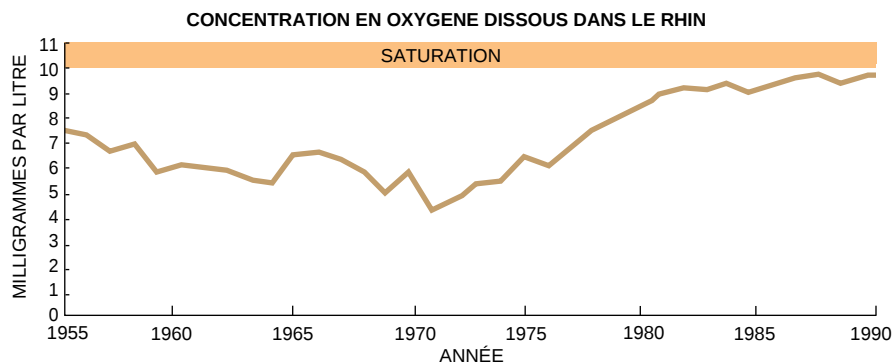
Pour des raisons assez complexes, la concentration en azote, elle, n'a pas beaucoup diminué. Dans le fleuve, l'azote est principalement présent sous forme d'ions ammonium (NH_4^+) et d'ions nitrate (NO_3^-). Au cours des 20 dernières années, le traitement des eaux usées a ramené la concentration en ions ammonium à environ 0,27 milligramme d'azote par litre, mais la concentration en nitrates a augmenté ; en 1992, elle atteignait 3,8 milligrammes d'azote par litre. La plupart des nitrates semblent provenir des engrais utilisés dans les cultures voisines du fleuve. Diverses mesures devraient lutter contre l'accroissement de la concentration en nitrates. L'Union européenne, par exemple, octroie des primes aux agriculteurs



LAC DE CONSTANCE

CHUTES DE SCHAFFHOUSE

ALPES



3. LA CONCENTRATION EN OXYGÈNE fut minimale, dans le Rhin, au cours de l'été 1970 : dans certaines parties du fleuve, elle devint trop faible pour assurer la survie de beaucoup de créatures.

qui mettent des terres en jachère. L'Allemagne, d'autre part, subventionne les fermiers qui évitent d'utiliser des engrais dans les zones proches du fleuve et qui réduisent globalement leur usage d'engrais.

Les métaux lourds sont d'autres polluants inorganiques qui ont des effets importants sur les organismes vivants. À l'état de traces, certains de ces métaux sont essentiels à la vie, mais à des concentrations supérieures, ils causent des troubles nerveux, et perturbent la croissance et le métabolisme des animaux et des végétaux. Le mer-

cure, le cadmium, le cuivre et une partie du chrome, rejetés principalement par les usines métallurgiques et chimiques, sont facilement identifiables et, par suite, contrôlés. En revanche, le nickel, le zinc et le reste du chrome arrivent dans le fleuve par les eaux résiduaires ; on limite plus difficilement leur arrivée dans le Rhin, parce qu'ils proviennent de la corrosion de canalisations et d'équipements domestiques ou industriels. Les rejets de plomb ont été réduits par l'élimination du plomb de la plupart des carburants, et les infimes traces d'or présentes dans le fleuve ne sont pas dangereuses (au début du XIX^e siècle, un grand nombre d'orpailleurs lavaient le gravier à la batée sur les rives du cours supérieur du Rhin, entre la frontière suisse et la ville allemande de Worms).

Au total, la quantité de ces métaux dans le Rhin a diminué de plus de 90 pour cent depuis les années 1970 : les stations d'épuration ont contribué à cet assainissement en piégeant de grandes proportions de métaux dans leurs boues résiduaires, et des programmes mis en place dans les décharges industrielles récupèrent sélectivement les métaux en vue de leur réutilisation dans les rejets industriels.

Aujourd'hui les métaux présents dans les eaux du Rhin ne menacent plus les riverains ni la vie aquatique, mais les sédiments accumulés dans certaines parties du lit du fleuve et de ses affluents contiennent toujours des concentrations métalliques assez élevées. La pollution par les métaux reste notamment problématique dans le port de Rotterdam, où des dragages ont ramené en surface des sédiments chargés de métaux, qui se sont redéposés en aval. Des négociations entre les autorités portuaires et certaines industries chimiques et métallurgiques

situées en amont ont conduit à des accords pour réduire encore les rejets de métaux.

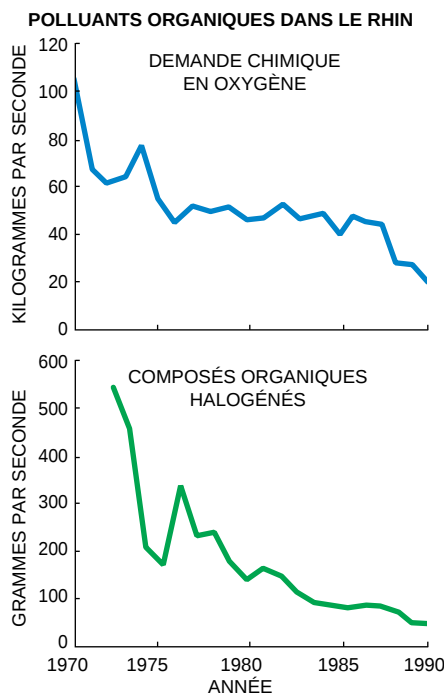
Les menaces organiques

Si les limitations des rejets de composés inorganiques sont utiles, l'effort doit surtout porter sur la pollution par les composés organiques. Bien que ces substances représentent généralement moins de un pour cent de la pollution d'une rivière, elles captent l'oxygène dissous dans l'eau et rendent celle-ci impropre à la vie.

Entre 1969 et 1976, les pollutions organiques ont été fréquentes dans le Rhin, réduisant souvent la concentration en oxygène dissous à moins de deux milligrammes par litre, durant les mois d'été, dans certaines parties du fleuve. À de telles concentrations, de nombreux organismes aquatiques meurent. L'Allemagne ayant dépensé 250 milliards de francs dans des usines de traitement qui éliminent 90 pour cent des polluants organiques, la concentration en oxygène dissous est revenue à des valeurs plus saines de neuf à dix milligrammes par litre (soit 90 pour cent de la concentration d'équilibre dans l'eau pure).

Le contrôle des polluants organiques est beaucoup plus difficile que celui des composés inorganiques. Alors que le nombre de ces derniers est de quelques dizaines, dans les cours d'eau pollués, celui des composés organiques d'origine naturelle et artificielle est de plusieurs milliers. Comme on ne peut isoler et analyser chacun d'eux, les chimistes considèrent des groupes de composés, qu'ils dosent par des méthodes variées. On peut notamment rechercher les effets ou les caractéristiques de toutes les substances organiques dans l'eau. On peut aussi déterminer les concentrations de familles de composés. Associées, ces deux techniques donnent des estimations précieuses sur l'état organique d'un échantillon d'eau et peuvent être complétées, selon les besoins, par des dosages de substances organiques précises.

Une mesure classique de l'effet biologique des composés organiques est la demande biologique en oxygène, mesurée généralement sur une période de cinq jours (notée DBO₅) : après avoir ajouté des bactéries et des éléments nutritifs à un échantillon d'eau, on dose l'oxygène dissous. Dans la mesure de



4. L'OXYGÈNE absorbé par l'oxydation des polluants organiques (représenté par la demande chimique en oxygène) a diminué spectaculairement depuis 1970 (en haut). De même, les mesures prises par les États riverains ont permis une nette réduction de la concentration (en bas) en composés organiques halogénés (surtout chlorés).

la «demande chimique en oxygène» (DCO), on ajoute de l'acide sulfurique concentré et du chrome à l'eau analysée, afin d'établir la consommation maximale possible d'oxygène par l'échantillon. En 1992, à la frontière germano-hollandaise, la DBO₅ était de trois milligrammes par litre, et la DCO de dix milligrammes par litre.

Les substances organiques sont habituellement groupées en quatre grandes catégories : les halogènes organiques adsorbables (qui comprennent principalement des composés chlorés), les détergents, les hydrocarbures et les acides humiques. Même quand ils sont présents dans de grandes molécules, le chlore et les autres halogènes (le brome, l'iode ou le fluor) sont particulièrement gênants, parce qu'ils sont toxiques et persistants. Les composés chlorés proviennent de plusieurs sources, notamment de l'industrie papetière, qui blanchit au chlore la cellulose brute. Toutefois la plupart des papiers sont converties à de nouveaux procédés de blanchiment, où l'utilisation de chlore est réduite. Le chlore pénètre aussi dans la rivière sous forme d'insecticides tels que le DDT (le dichlorodiphényltrichloroéthane), l'hexachlorocyclohexane, l'hexachlorobenzène et le pentachlorophénol. Plusieurs pays européens ont interdit l'utilisation de ces produits et d'autres composés chlorés persistants. Les mesures prises depuis 1970 ont contribué à réduire les concentrations en certains composés organochlorés, mesurées à la frontière germano-hollandaise, de facteurs compris entre 5 et 15.

La recherche de détergents plus biodégradables contribue également à réduire la pollution par les composés organiques. Depuis 1964, les pays européens ont des réglementations de plus en plus strictes, imposant des biodégradabilités des détergents de plus en plus importantes, ce qui a permis de ramener la proportion de tensioactifs anioniques (les molécules qui assurent la fonction de détergence), à Düsseldorf, de 650 grammes par seconde en 1964 à 80 grammes par seconde en 1987 ; en 1992, la concentration en tensioactifs anioniques, à la frontière germano-hollandaise, était supérieure à 0,05 milligramme par litre.

Les hydrocarbures sont plus biodégradables que les composés halo-

génés. Les produits pétroliers comme l'essence et le kérosène représentent environ 20 pour cent de tout le trafic marchand à travers la frontière hollandaise. En outre, les milliers de bateaux qui parcourent le Rhin chaque année utilisent, pour remplir leur fond de cale, quelque 20 000 mètres cubes d'un mélange d'huile et d'eau qui, pour la plus grande part, est fourni et récupéré par des bateaux approvisionneurs. Les mesures prises pour limiter les rejets d'hydrocarbures permettent de maintenir la concentration de ces composés à 0,01 milligramme par litre, à la frontière germano-hollandaise.

La quatrième famille de substances organiques – les acides humiques – sont les produits à court terme de la biodégradation. Qu'elle soit mise en œuvre dans les stations d'épuration ou qu'elle ait naturellement lieu dans le fleuve, la biodégradation est un processus inachevé ; seule une partie des substances organiques consommées par les bactéries est totalement métabolisée et rejetée sous forme de gaz carbonique ; le reste est seulement partiellement oxydé et transformé en acides humiques. Ces derniers sont produits par les stations d'épuration, mais ils ont toujours été présents dans le fleuve. En 1973, 25 pour cent de la pollution organique résiduelle du Rhin était due aux acides humiques. Plus récemment, cette proportion a augmenté, encore qu'elle soit difficile à déterminer avec exactitude, faute de méthodes d'analyse précises. Les acides humiques sont toutefois jugés inoffensifs, car ils sont produits naturellement à un stade précoce de l'oxydation des matières organiques.

Un accident fondateur

Quel que soit le soin apporté au contrôle de certains polluants, le Rhin, comme toute voie d'eau utilisée pour le transport de marchandises, peut être accidentellement pollué. Jadis le fleuve était si pollué que les accidents se remarquaient à peine, mais aujourd'hui des systèmes de surveillance les détectent facilement ; cette détection permet des réactions rapides, qui limitent les dégâts.

Quelques incidents désolants ont eu pour conséquence utile de déclencher la création de ce système de contrôle. L'un des pires eut lieu le



5. UNE ÉCUME MALSAINE et des poissons morts apparaissaient encore souvent sur le Rhin, en 1980 (à gauche). Aujourd'hui la même



région du fleuve, ici au pied de l'usine de production d'électricité de Voerde, dans le bassin industriel de la Ruhr, est bien plus propre.

2 novembre 1986, lorsqu'un entrepôt de pesticides de la Société *Sandoz* prit feu à Schweizerhalle, près de Bâle. L'eau pulvérisée sur le feu entraîna les produits chimiques dans la rivière, où l'un d'eux, le Disulfoton, empoisonna même les anguilles, qui sont des animaux résistants.

Ce désastre suscita des efforts sans précédents pour suivre le rétablissement du Rhin et déterminer son état biologique. Durant le projet, des biologistes utilisèrent des cloches de plongée pour étudier systématiquement les poissons, les macro-invertébrés et les autres occupants du fleuve : on découvrit ainsi que la faune du fleuve s'était complètement rétablie dès le mois d'octobre 1988, soit moins de deux ans après l'incendie.

Les études ont montré la présence de 155 espèces de macro-invertébrés, qui se regroupaient près des rives, entre Bâle et Düsseldorf. Les espèces les plus courantes étaient les éponges d'eau douce, les sangsues, les moules d'eau douce, les amphipodes benthiques (de petits crustacés), les éphémères, les phryganes et leurs larves, et des larves de chironomes (ou vers de vase). Certaines espèces comme l'éphémère *Ephron virgo* et l'escargot *Theodosius fluviatilis*, qui semblaient avoir disparu du Rhin, ont été trouvées en grand nombre. D'autres espèces qui étaient autrefois communes, comme la moule *Spaerium solidum* ou la mouche *Euleuctea geniculata*, étaient représentées par quelques individus et commencent seulement aujourd'hui à réapparaître en plus grand nombre. En revanche, l'amphipode *Corophium curvispinum*, qui vient de la mer Caspienne et de la mer Noire, s'est récemment établi dans

le Rhin et y prolifère au point qu'il chasse certaines espèces d'éponges et de mollusques.

Certains poissons, également, réintègrent le fleuve : une étude récente a répertorié 40 des 47 espèces endémiques connues pour peupler le Rhin. Environ 75 pour cent des poissons identifiés individuellement étaient des espèces communes, tels le gardon, l'ablette et la brème. Les zoologistes ont également noté la présence de carpes, de perches, d'anguilles, de brochets, de chevesnes et de vandoises (ou dards), et ils ont recensé 15 espèces qui avaient été introduites dans la rivière, notamment la perche-brochet, la truite arc-en-ciel et la môle. En 1992, pour la première fois depuis des décennies, des saumons *Salmo salar* ayant atteint leur maturité sexuelle ont été pris dans le Rhin. Ils avaient été lâchés, encore immatures (au stade de tacons), dans les affluents du fleuve un ou deux ans auparavant, et avaient survécu à leur migration dans la mer du Nord. Même l'esturgeon, qu'on pensait disparu du Rhin depuis 40 ans, y a été vu occasionnellement.

L'étude du fleuve n'est pas le seul héritage de l'incendie de Bâle. Les États riverains ont lancé un Programme commun d'assainissement à quatre objectifs : la préservation de l'eau potable, la décontamination des sédiments, la réintroduction des poissons supérieurs (tels les saumons ou les truites de mer), la protection de la mer du Nord. Pour commencer, les États ont recensé les décharges de 30 substances dangereuses. De 1986 à 1995, les rejets de 15 d'entre elles furent réduits de plus de 50 pour cent. En outre, des mesures ont été prises pour

que les rejets en rivière soient évités ou limités en cas d'accident industriel. Dans les prochaines années, la construction d'échelles à poissons devrait aider les saumons à remonter le fleuve jusqu'à leur site de frai, et l'amélioration de ces frayères permettra de rétablir les montaisons.

En 1991, lors d'une conférence sur les travaux effectués dans le bassin versant des eaux du Rhin, le ministre hollandais de l'environnement proposa d'utiliser l'expérience acquise avec le Rhin pour assainir la Meuse et l'Escot. À la fin de la guerre froide, des commissions internationales ont été créées pour purifier l'Elbe, qui coule de la République tchèque et la Pologne à travers l'Allemagne, jusqu'à la mer du Nord, et l'Oder, qui forme une partie de la frontière germano-polonaise. Même la Volga a bénéficié des leçons tirées du Rhin. Pour le Danube, l'assainissement commencera dès que possible, également. Ainsi, au cœur de l'Europe, le Rhin est devenu un symbole de coopération internationale. Le succès des efforts communs d'assainissement est de bon augure.

Karl-Geert MALLE est membre de la Commission allemande de protection du Rhin.

William M. STIGLIANI, Peter R. JAFFÉ et Stefan ANDERBERG, *Heavy Metal Pollution in the Rhine Basin*, in *Environmental Science and Technology*, vol. 27, n° 5, pp. 786-793, mai 1993.

Rehabilitation of the River Rhine, sous la direction de J.A. van de Kraats, numéro spécial de *Water Science and Technology*, vol. 29, n° 3, 1994.
