

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.

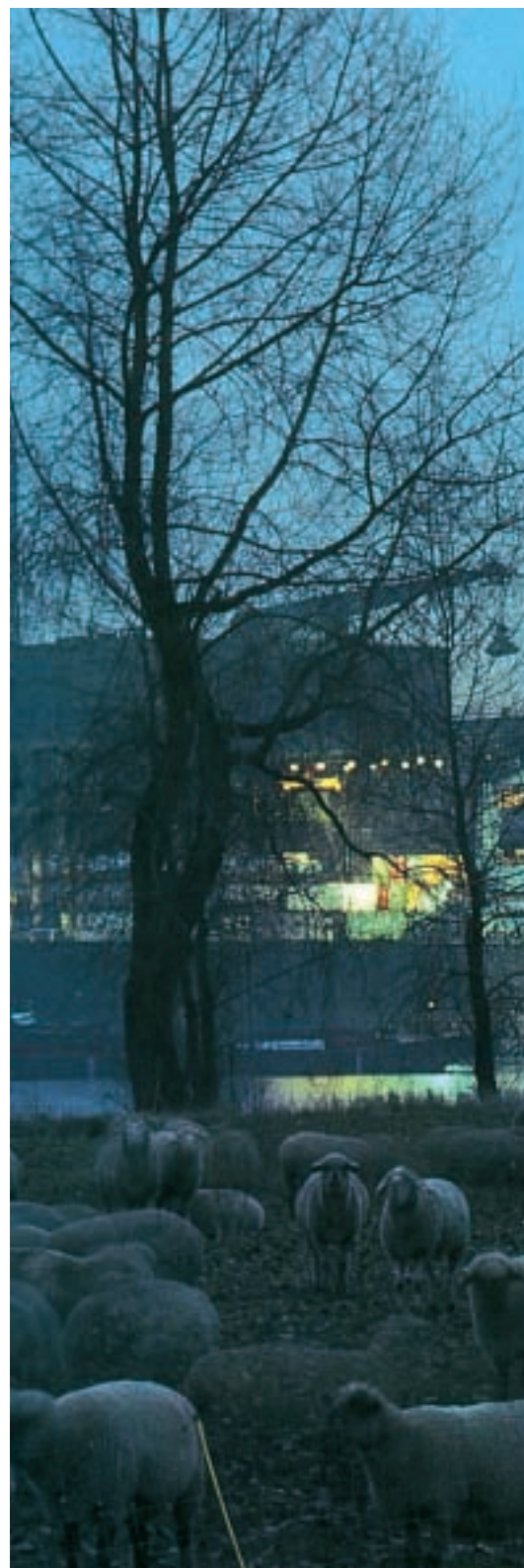
Le bassin versant des eaux du Rhin couvre 190 000 kilomètres carrés, où vivent 50 millions de personnes. Plus

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

