



HAL
open science

L'eau, la matière première du XXI^e siècle

Jean Dercourt, Ghislain de Marsily, Claude J. Allègre, Jean Dausset, Claude Weisbuch, Michel Pouchard, Hélène Raffy, Pierre Buser, Bernard Bru, Marc Yor, et al.

► **To cite this version:**

Jean Dercourt, Ghislain de Marsily, Claude J. Allègre, Jean Dausset, Claude Weisbuch, et al.. L'eau, la matière première du XXI^e siècle. La lettre de l'Académie des Sciences, 2, 2001. hal-04860046

HAL Id: hal-04860046

<https://academie-sciences.hal.science/hal-04860046v1>

Submitted on 31 Dec 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

la lettre n° 2/2001
de l'Académie des sciences



l'eau

la matière première du ^{xxi}^{ème} siècle

Sommaire

Éditorial

La Recherche en France, ses liens avec l'État, les régions et l'Europe

Jean Dercourt

page 2

Dossier

L'eau du XXI^{ème} siècle, objet de toutes les ingénieries, miroir de tous les égoïsmes

Ghislain de Marsily

page 3

L'eau, la matière première du XXI^{ème} siècle

Entretien avec Claude Allègre

page 8

L'eau et la santé

Jean Dausset

page 10

Questions d'actualité

Les nanotechnologies

Claude Weisbuch

page 11

Perspectives des piles à combustible

Michel Pouchard

page 13

Un supraconducteur conventionnel à haute température critique: MgB₂

Hélène Raffy

page 14

La vie des commissions

Du passé au présent: les plis cachetés

Pierre Buser

page 15

La vie de W. Doebelin et le pli cacheté 11 668

Bernard Bru et Marc Yor

page 16

Le Comité de l'environnement

Jean-Yves Chapron

page 17

La vie de l'Académie

Energies et climat

Claude Lorius et Bernard Tissot

page 19

Création d'un Conseil Académique Européen

Yves Quéré

page 19

Visite du Bureau de la Royal Society

Yves Quéré

page 19

L'immunité innée

Jules Hoffmann

page 20

Risques potentiels pour la santé associés aux progrès de la technologie

Jean-François Bach

page 20

Editorial

Le traité de Rome, signé en 1957, organisait l'Europe de l'Ouest. La loi sur la décentralisation (1982) créait 22 régions en France. Depuis lors, ces deux voies se sont renforcées et ont bouleversé la relation entre les citoyens et les pouvoirs publics notamment l'enseignement supérieur et la recherche publique. Fortement centralisés, ceux-ci reçoivent de l'État le budget de leur masse salariale.

La recherche en France, ses nouveaux liens avec l'État, les régions et l'Europe¹

Certes, les universités sont autonomes (1968) mais les diplômes et les programmes sont nationaux ; les emplois sont créés par l'État ; leurs ressources propres sont rares et les

établissements publics, comme le CNRS, le CEA, l'INRIA, ou l'INSERM, qui sont tous régis nationalement par des structures fortes, décident et organisent la politique de recherche ; tous signent des contrats quadriennaux avec l'État.

Cet état de fait a évolué très rapidement. Toutes ces transformations, n'ont d'ailleurs pas toujours été perçues : certaines favorisent la diversité de la recherche, d'autres interviennent dans la programmation des équipes. La plupart des laboratoires publics associent universités et établissements de recherche. L'évolution actuelle de leur financement retentit donc sur leur programmation. Les salaires, la maintenance des locaux et des gros équipements relèvent de l'État seul, alors que les crédits de fonctionnement, c'est à dire ceux qui accompagnent la programmation,

crédits sur contrats. Le volume des financements sur programme croît et les crédits de base diminuent, ce qui nuit à la recherche libre.

Le rôle des régions grandit, ce qui implique deux mouvements parfois antagonistes :

- d'une part les universités et les écoles doivent présenter un ensemble régional lisible,

- d'autre part les établissements nationaux de recherche s'efforcent de régionaliser leurs centres de décision et non plus seulement leurs centres de gestion.

Cette nouvelle structure de la Recherche devrait favoriser le développement de la science mais il doit d'abord gagner l'adhésion populaire et celle des élus. Les scientifiques en s'insérant dans le réseau de la communication régionale, y font connaître leurs travaux, leurs méthodes de travail, leurs hésitations, leurs blocages. Le prestige d'un savoir lointain ne suffit plus à justifier l'adhésion des citoyens. Si nous n'y remédions pas, l'activité scientifique fera peur. Pour l'éviter, les scientifiques eux-mêmes devront se rendre disponibles, pour une mission consubstantielle de notre métier de chercheur, faire connaître l'évolution scientifique, ses possibilités, ses limites, ses dangers.

Voilà donc une nouvelle manière de vivre notre vocation qu'imposent les liens nouveaux tissés entre l'État, la région et l'Europe. Ce bouleversement est une chance à saisir : ou bien la science est acceptée par le citoyen, ou bien, la société craindra la Recherche et la freinera. La peur ne doit pas s'installer, l'espoir doit éclater, la vocation de l'Académie est d'y contribuer.



Jean Dercourt
Secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences

relèvent de plus en plus, et de l'Europe, des régions et des industries. Ces crédits de fonctionnement sont les seuls à dépendre directement des chercheurs qui doivent s'adapter pour en bénéficier.

Ainsi, au sein des laboratoires, de petites équipes très efficaces, novatrices et souples acquièrent une forte autonomie. C'est l'une des rares voies qui permettent, en France, à de jeunes scientifiques de devenir rapidement des animateurs et des gestionnaires. Le pilotage de la recherche des établissements nationaux devient de plus en plus difficile et pour contrebalancer l'attrait des contrats européens, régionaux et industriels, chacun d'eux tend à attribuer lui aussi ses

¹ D'après un extrait de la Séance solennelle du 18 juin 2001

avaient jusqu'alors su s'accommoder de son abondance ou de sa rareté, force est de constater aujourd'hui que la croissance démographique et les changements climatiques programmés ont rompu ces équilibres; il appartient aux ingénieurs de tenter de les rétablir, en harmonie avec les rapports parfois très différents que les diverses civilisations ont établi avec l'eau.

Cela constituera mon sujet principal.
L'eau est,

mation domestique. Jusqu'au XVIII^{ème} siècle, elle était prise sur place ou là où elle était naturellement abondante, et distribuée par aqueduc, fontaines ou corvée d'eau. Quelques rares machines utilisaient l'énergie hydraulique pour remonter l'eau vers les points hauts (béliers, roues...). Dans les pays arides, des citernes collectant l'eau pluviale étaient très répandues. Au XIX^{ème}, la dégradation de la qualité des eaux des rivières par l'activité industrielle naissante et le développement de grandes épidémies transmises par l'eau, telle que le choléra, dans les grands centres urbains (Londres, Paris.) ou dans les pays calcaires ont conduit à la mise en place de longues adductions d'eau potable que l'on allait rechercher là où elle était naturellement pure (captage des sources de la Vanne dans l'Yonne et

phytosanitaires en agriculture ou des antibiotiques, anabolisants, et autres éléments à usage sanitaire en élevage. Cette politique possède quelques travers; par exemple, trente ans après les avoir sereinement distribuées, on s'est aperçu que les eaux chlorées trop tôt avant l'élimination de la matière organique naturelle, produisait des organochlorés cancérigènes... Aujourd'hui on s'interroge sur les effets sanitaires potentiels de ce qu'on appelle pudiquement des "perturbateurs endocriniens", dont la présence est constatée dans les eaux distribuées, mais dont les effets sont encore inconnus. Ils sont issus de l'emploi de certains médicaments, de la dégradation de certains pesticides, de l'altération de certains plastiques... Une autre crainte, qui semble pourtant peu préoccuper les acteurs, est l'éventuelle

L'eau du XXI^{ème} siècle objet de toutes les ingénieries, miroir de tous les égoïsmes...



Par Ghislain de Marsily ¹

On dit que le XXI^{ème} siècle sera celui de l'eau. Oui, mais quelle eau? A l'échelle de la planète, celle-ci est avant tout la cause principale de la transformation continue de l'écorce terrestre, et le véhicule des produits de cette transformation. Je n'en parlerai pas. A l'échelle humaine, l'eau est devenue un objet aux mains des ingénieurs. Elle est, ici ou là, utile ou néfaste, enjeu de pouvoir et source de conflits. Si les civilisations

enfin, un bien des milieux naturels, une nécessité pour la vie et la diversité des écosystèmes, un dernier bastion de la nature préservée. Cet aspect prend de plus en plus de place dans les processus décisionnels d'aménagement mais, là encore c'est l'ingénierie des territoires qui aujourd'hui façonne, maintient ou développe les écosystèmes "naturels".

L'eau potable dans les pays industrialisés

Pour la Société, l'eau utile remplit quatre fonctions principales: 1- la satisfaction des besoins de l'homme en eau domestique, agricole, industrielle, et maintenant en activité de loisir; 2- l'élimination des déchets et sous-produits de l'activité humaine par l'assainissement, 3- un chemin pour le transport par bateau, 4- une source d'énergie. Ces quatre domaines sont entièrement sous le contrôle de la technologie. Prenons l'exemple de l'eau destinée à la consom-

construction de l'aqueduc les amenant à Paris, par exemple). Au début du XX^{ème} siècle, avec la découverte du pouvoir stérilisateur de l'eau de Javel, la fourniture d'eau potable est revenue aux prises d'eaux locales, en rivière ou en nappe. Depuis, on a pris le parti de faire de l'eau potable avec de l'eau polluée: on admet qu'il suffira de faire évoluer les technologies de traitement avec la nature des polluants rencontrés, et avec la sévérité des normes de potabilité, dès que des polluants ou micropolluants nouveaux auront été détectés. Les techniques de traitement de l'eau ont dès lors fait des progrès considérables. Les sources de polluants, d'abord locales et d'origine urbaine et industrielle, sont peu à peu devenues diffuses et d'origine agricole, en raison de la fertilisation sans contraintes et l'emploi généralisé des

transmission des prions dans l'environnement via l'eau. Tel Maire de telle commune de l'Ouest, alerté de la présence d'un abattoir ayant traité des viandes contaminées à l'amont de la prise d'eau de sa commune, n'a pas jugé bon de la déplacer...

Les Parcs Naturels Hydrologiques

Je suis intimement convaincu de la perversité de cette approche et de l'urgence de revenir à des systèmes où les eaux de consommation publique sont naturellement potables et protégées, et non pas polluées puis dépolluées. Le Président de la République, lorsqu'il était Maire de Paris, ne disait pas autre chose quand il a proposé ce qu'on a appelé le "tuyau Chirac", qui consistait à vouloir

¹ Membre de l'Académie des technologies, de l'Académie d'agriculture de France, de l'Academia Europea, de l'International Water Academy, Foreign Associate de l'US Academy of Engineering, Correspondant de l'Académie des sciences, Professeur à Paris VI.

transférer par conduite à Paris les eaux des grands barrages construits en amont de la Capitale (Aube, Seine, Marne) plutôt que de les faire circuler par les rivières, et de les capter après qu'elles aient été polluées le long du trajet. Les signes précurseurs des dangers auxquels nous expose la politique actuelle sont à mon sens déjà présents parmi nous. Outre les exemples de la présence de micropolluants préoccupants dans les eaux distribuées dont je viens de parler, on peut citer la contamination accidentelle du réseau de la Ville de New-York en 1996 par des cryptosporidiums, les risques d'émergences de maladies nouvelles dont les modes de transmission seraient initialement inconnus et la fragilité croissante de la population constatée face aux agresseurs chimiques générateurs d'allergies. L'alternative peut se concevoir de deux façons : la première serait de créer ce que j'appelle depuis dix ans des "Parcs Naturels Hydrologiques", où certaines parties du territoire seraient réservées à la production d'eau potable pour la transférer aux agglomérations, en y excluant toute activité anthropique polluante (on pense alors à des territoires forestiers, que pourrait gérer l'Office National des Forêts); de tels "Parcs" existent déjà, sans en porter le nom, en Australie, en Belgique, en Irlande. Cette approche est cohérente avec la déprise agricole actuelle en Europe de l'Ouest, et qui risque de s'amplifier si l'Europe de l'Est, aux méthodes agricoles archaïques, venait rejoindre la Communauté Européenne, en décuplant ses rendements. L'autre façon serait de distribuer l'eau de boisson et de cuisson des aliments par un autre canal, des bouteilles, bonbonnes, éventuellement une seconde canalisation (qui a cependant des effets pervers); ces eaux de boisson étant issues de sources également totalement protégées. Ce double système existe déjà dans certains pays, où les eaux du réseau sont de mauvaise qualité. L'emploi de l'eau des réseaux publics serait alors limité à l'hygiène. Quoiqu'il en soit, il est urgent d'assurer une protection totale par des "parcs hydrologiques" aux principales eaux encore à peu près naturellement potables aujourd'hui, si on veut pouvoir en bénéficier dans le futur. Je pense en particulier aux eaux minérales ou de source, que les habitants de pays latins affectionnent, et qui peu ou prou sont toutes condamnées, à terme plus ou moins lointain, par la généralisation de

la pollution diffuse agricole ou par l'urbanisation. Si les eaux de source ou minérales sont en général des systèmes hydrogéologiques un peu particuliers, ils ne sont en rien miraculeusement épargnés par la pollution, leur temps de réponse est simplement un peu plus long que celui des nappes superficielles, de l'ordre de quelques dizaines d'années; certains d'entre eux manifestent déjà des signes précurseurs de contamination. Il est scandaleux que les pouvoirs publics rechignent toujours à permettre la protection de ces sources, en prétextant qu'une Déclaration d'Utilité Publique pour permettre d'exproprier ou d'imposer des mesures de protection reviendrait à soumettre à l'intérêt particulier un territoire appartenant à d'autres (le projet de la nouvelle Loi sur l'Eau, par exemple, n'en dit rien). Il est encore plus scandaleux que les mêmes pouvoirs publics se proposent en revanche, au prétexte de satisfaire à une règle communautaire imposée par les Anglo-Saxons, de permettre par décret aux eaux de source et minérales s'appelant toujours "naturelles" d'être traitées pour en enlever les éléments dits "indésirables". Alors qu'au XVIII^{ème} siècle, en France, chaque ville était prise ou méprisée par le goût de son eau, nos amis anglo-saxons tentent d'imposer, par le truchement de l'Europe, une eau embouteillée standardisée entièrement artificielle, qui serait produite à partir de n'importe quelle eau, polluée ou non, par double ou triple osmose inverse, stérilisation, puis ajout de sels pour en fixer la composition chimique dans des normes strictes et uniformes. Ces eaux existent déjà sur les étalages des marchés américains, et séduisent ces épris de technicité, hélas souvent étrangers aux nuances du goût... En outre, avec la suppression des bactéries non pathogènes naturellement contenues dans les eaux non traitées, et non nuisibles sinon utiles à l'homme, elles ne possèdent plus les mêmes qualités de conservation, car les dites bactéries s'opposent au développement des bactéries pathogènes.

Les eaux usées

La seconde vocation utile de l'eau, l'élimination des déchets n'échappe pas aux mêmes contradictions. Notre société est entièrement construite sur l'utilisation de l'eau comme milieu de transport (dans les égouts) et de dilution (dans les rivières) d'une large fraction des déchets

qu'elle produit. La qualité des eaux des rivières et des écosystèmes qui en dépendent en a été si fortement affectée que depuis 50 ans environ ont été mis en place des systèmes de traitement des eaux usées qui éliminent le plus gros (mais pas tout, loin s'en faut) de la pollution. Dans les zones côtières, certaines villes, insoucieuses ou inconscientes, rejettent encore en mer, de plus en plus loin mais sans traitement, leurs eaux usées. La qualité du milieu récepteur et des écosystèmes s'en ressent, et, le long d'une rivière, les usagers aval sont contraints à traiter l'eau ou à ne pas l'utiliser (aucune grande rivière européenne en aval d'une agglomération, par exemple, n'est aujourd'hui utilisable pour la baignade à cause de la pollution bactérienne rejetée par les stations d'épuration, dont on ne comprend pas encore bien les cycles). Est-ce raisonnable? Un simple exemple permet de montrer qu'il est permis d'en douter. Il y a quelques années, un distributeur de produits phytosanitaires d'une petite ville le long de la Marne a décidé de rincer les cuves où il stockait ses produits. Les eaux de lavage sont parties à l'égout, et la Marne entière en fut si polluée que les usines

encore à définir le cahier des charges (Décantation? Filtration? Traitement?). Faut-il concevoir d'autres systèmes d'assainissement? Assurément. Certaines villes ont expérimenté des systèmes d'assainissement domestiques à air, sous vide, qui ne consomment presque pas d'eau et produisent peu d'effluents, un peu comme dans les avions. Mais les fuites sont nombreuses, le coût est très élevé, la généralisation difficile. D'autres civilisations ont basé l'hygiène sur la chaleur (sauna, four solaire des indiens d'Amérique) plutôt que sur l'eau. Il faut au moins remettre en question nos méthodes d'assainissement quand il s'agit de les transposer dans les pays en voie de développement. De même que l'on a créé le tri sélectif à la source pour les déchets solides, la politique du "tout à l'égout" doit à mon avis être repensée, et certains rejets exclus des systèmes d'assainissement. La société crée cependant deux autres types de contamina-

Il était après tout normal que dans un pays où l'eau froide coulait chaude on n'eût pas jugé utile de dépenser de l'argent pour installer un second circuit.

Claude SIMON, le Palace.

de production d'eau potable situées en aval et alimentant la région parisienne furent arrêtées pendant plusieurs jours. Autre exemple, dans Paris, en été, quand un orage survient, le débordement des égouts par les eaux de ruissellement (qui aboutissent au même réseau, dit unitaire) apportent à la Seine des flux de polluants domestiques si intenses que la faune aquatique en est éradiquée. En hiver, les mêmes orages se déversent dans un fleuve au débit plus fort, et où la demande en oxygène pour dégrader la matière organique est moins intense du fait de la plus faible température. Paris et sa banlieue ont mis provisoirement en place des rampes d'injection d'oxygène dans la Seine, pour "sauver" les poissons en cas d'orage, en quelques havres de paix où ils viennent se réfugier; on prévoit aussi de construire, à des coûts dirimants, des installations de traitement des eaux usées de temps de pluie, très chargées en métaux et en micropolluants organiques, dont on travaille

tion des milieux par ses déchets, qui interagissent avec l'eau: celle des nappes dans le cas de décharges mal contrôlées et celle de l'atmosphère puisque de nombreux micropolluants ont un cycle atmosphérique avant de se retrouver dans les eaux météoriques à la suite du "lessivage" de l'air par la pluie. La pollution de l'eau pluviale en Île de France, par exemple, engendrée par les pesticides utilisés en agriculture, dépasse largement les normes de potabilité pendant les périodes d'épandages, par volatilisation directe de ces produits. La combustion des ordures ménagères, la circulation automobile génèrent aussi d'autres micropolluants que l'on retrouve dans les eaux.

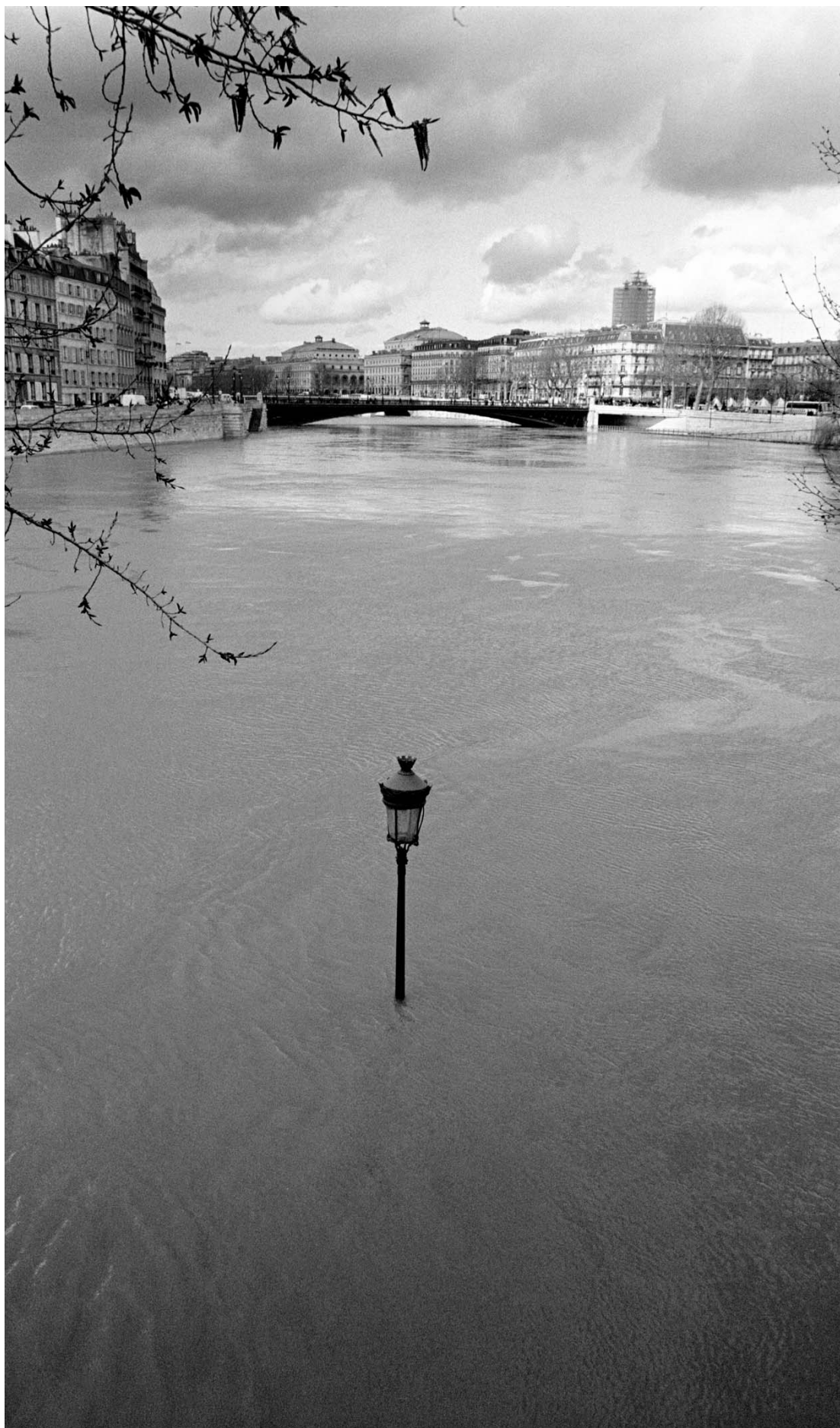
La navigation, l'hydroélectricité

J'aborderai peu les deux dernières fonctions utiles de l'eau que j'ai citées, à savoir le transport et la production d'énergie. La voie d'eau est, en coût énergétique, de loin préférable aux autres modes de transport. Si la limitation des émissions de CO₂ devient véritablement une préoccupation majeure, cette utilisation de la voie d'eau devrait

connaître un nouvel essor. Elle n'entre en conflit qu'avec les fonctions écologiques des fleuves, la chenalisation et la régulation étant néfaste aux habitats et à la reproduction de la faune. Mais des recherches sont conduites pour contrebalancer ces effets (échelles à poissons, zones annexes pour rétablir l'habitat, crues artificielles pour maintenir les zones de frayères...). En matière de production d'énergie, les réserves hydroélectriques encore exploitables se situent dans les pays en voie de développement, les conflits sont importants avec le fonctionnement naturel des écosystèmes. Dans les pays déjà équipés, il est probable que la production d'énergie hydroélectrique diminuera, avec le vieillissement des barrages, et leur remplissage par les sédiments, il est peu probable qu'arrivés en fin de vie ils puissent être reconstruits, pour des raisons environnementales.

Les inondations

L'eau néfaste, aux yeux des hommes, ce sont les crues, les inondations. Tout a déjà été dit sur l'urbanisation dans le lit majeur des fleuves. Je ne rappellerai qu'un aspect : lors de la crue de l'Oder, en Pologne, en 1997, crue relativement lente à se mettre en place (donc prévue) mais très dévastatrice, le nombre de morts en Pologne dus à la crue a été d'environ 70, pour l'essentiel par suicide après la fin de la crue, devant le désespoir de l'œuvre de toute une vie dévastée. Il faut cependant prendre en compte deux éléments nouveaux. D'abord, il est maintenant établi que les méthodes classiques de prévision des événements rares, par calage d'une loi statistique en général de type exponentiel sur les historiques, sous-estiment les crues de faible probabilité. Il faut probablement passer à de nouvelles lois, de type algébrique, basées sur des approches de type multifractales. Ensuite, le changement climatique rend *a priori* caduque le principe de la prévision du risque de crue à partir de l'analyse d'un historique, puisque la série à évaluer n'est plus stationnaire. Il faudrait innover. Or certains pensent que le changement climatique jouera non seulement sur les moyennes des séries pluviométriques, mais aussi sur les écarts types. Et personne ne sait dire aujourd'hui de façon sûre si les événements extrêmes vont l'être encore davantage avec la perturbation du climat. A ces défis, la réaction de l'ingénieur peut être multiple. barrage amont, endiguements renforcés, curage et rectification des cours d'eau pour accélérer la vidange. On parle ainsi d'un tunnel sous le Mont Valérien pour couper la boucle de Gennevilliers après Paris, et ainsi faire baisser l'eau dans la capitale, aux dépens



des habitants de l'aval, lors de la prochaine grande crue. Il faut savoir que celle-ci sera probablement aussi dévastatrice que celle de 1910, car les mesures prises depuis pour protéger la Ville (barrages) sont d'un effet modeste et ont été en partie contrecarrées par la mise au grand gabarit de la Seine amont. La crue à Paris est lente, donc sans risque de perte directe de vie humaine, mais très coûteuse en dégâts. Une alternative est un meilleur aménagement des bassins amont, pour y retenir l'eau, naturellement ou artificiellement : réduction du ruissellement à la parcelle, maintien

Le bruit, l'éclat de l'eau, sa blancheur transparente, D'un voile de cristal alors peu différente.

LA FONTAINE, Psyché.

de champs d'expansion des crues, sur-stockage dans les plaines, éventuellement par relèvement des eaux, celui-ci déjà mis en pratique en Alsace, dans les Rieds. Encore faut-il pouvoir convaincre les régions rurales concernées de l'intérêt de telles pratiques, dont ils pâtissent mais ne bénéficient pas. Rappelons à ce propos les édits de Napoléon III interdisant en Chautagne la construction de digues sur le Rhône et obligeant à détruire celles qui y avaient été édifiées après le rattachement de la Savoie à la France, après que celles-ci eurent engendré une crue catastrophique dans Lyon. Mais la Puissance Publique était, à cette époque, impériale.

Une troisième voie pourrait être d'imposer, à ceux qui persistent à vouloir construire en zone inondable, des installations qui résistent à la crue : bâtiments sur pilotis, pourquoi pas rétractables (véris), ou encore sur butte de terre artificielle, bâtiments aux huisseries et murs presque étanches que l'on maintiendrait à sec par une installation d'exhaure... On impose bien des normes de construction parasismique devant le risque de tremblement de terre, pourquoi ne pas imposer des normes de construction spécifiques pour le risque inondations ? Il deviendrait ainsi moins attractif, car plus cher, de construire en zone inondable...

Les écosystèmes aquatiques

Outre l'utilisation qu'elle fait de l'eau, la société s'attache maintenant à préserver ses écosystèmes aquatiques. Préserver la biodiversité, c'est préserver tant la qualité de l'eau dans les milieux, que la diversité même de ceux-ci. Et là encore le bat blesse. En premier lieu, la dégra-

de la qualité des eaux par les activités humaines (pollution diffuse agricole, principalement) altère fortement les milieux aquatiques par l'excès de nutriments (nitrates agricoles, phosphates domestiques et agricoles) en engendrant l'eutrophisation, dans les rivières et les lacs, mais aussi le long des zones côtières. Si l'on excepte la pollution urbaine de temps de pluie et dans certaines zones, l'élimination encore à mettre en place de l'ammoniaque et de métaux, la pollution urbaine et industrielle a été en grande partie maîtrisée au cours des quarante dernières années. Le problème des phosphates dans les lessives reste préoccupant, car devant l'excès de nitrates agricoles, le phosphore est souvent l'élément limitant de la croissance des algues. On envisage maintenant de déphosphorer les eaux usées domestiques, avant de les dénitrifier. Mais le problème des nitrates agricoles devra être, un jour ou l'autre, pris de front. Il se décompose en deux : la trop forte densité, dans certaines régions, de l'élevage, (ce que l'on appelle les excédents structurels) et la surfertilisation. En Hollande, par exemple, l'excès de nitrates dans les sols a conduit à une modification de la flore naturelle, sans parler de la détérioration de la qualité des eaux. Les ques-

tionnements sur les dangers réels des nitrates sur la santé me paraissent être, à ce propos, un faux débat : quand bien même un doublement de la norme en nitrates dans l'eau de boisson (actuellement de 50 mg/l en NO₃) serait tolérable, ce qui reste très controversé, et ne va sûrement pas dans le sens de la sécurité, il conduirait inévitablement à une détérioration encore plus sévère de la qualité écologique des milieux, déjà très fortement dégradés. Il faut concevoir, comme on est en train de le faire pour les émissions de CO₂, des outils pour que les flux de nitrates dans l'environnement soient limités. *Volens-nolens*, le monde agricole devra s'y soumettre. Un système de quotas sur les quantités d'azote, comme dans l'accord de Kyoto, pourrait être une alternative efficace afin de répartir entre les bénéficiaires (l'environnement, c'est à dire le public) et les producteurs, le coût de ces mesures. Il faut aussi prendre en compte la capacité du milieu à réduire par dénitrification naturelle le flux de nitrates, en particulier dans les zones humides bordant les cours d'eau, si l'on s'avise de les maintenir ou de les développer. Cependant, cette dénitrification naturelle est soupçonnée d'induire en partie la formation de N₂O (au lieu de N₂), un gaz à effet de serre très néfaste. Des recherches à ce sujet sont en cours. Le problème des micropolluants est également préoccupant. Les flux de pesticides dans l'environnement, déjà évoqués, ont un effet sur les écosystèmes qui est encore mal connu. Les flux de métaux lourds d'origine principalement urbaine et industrielle (Cd, Zn, Pb, Hg, Cr...), sont encore notables bien qu'en forte réduction. Le cadmium est parfois lié aux engrais phosphatés. Dans certains fleuves, la pollution ancienne par les métaux est intense, et migre essentiellement par le

mouvement des matières en suspension lors des crues C'est notamment ce qui a été observé dans le Lot puis la Garonne où la pollution est liée à d'anciennes activités minières.

L'ingénierie écologique des territoires

Au-delà de la qualité des eaux, c'est la nature des milieux où l'eau circule qui doit être préservée. Il ne s'agit pas de dire ici que ces milieux sont des milieux naturels : dans les pays industrialisés au moins, il n'en existe pratiquement plus ; tout l'espace a été aménagé et transformé par l'homme, depuis des siècles sinon des millénaires. Nous avons par exemple étudié à l'Université Paris VI le fonctionnement des zones humides bordant le cours de la Seine moyenne, pour nous apercevoir que ces zones, dans leur fonctionnement actuel, se sont mises en place pour l'essentiel au Moyen Age, par érosion des plateaux et versants lors de la première mise en culture. C'est en effet le remplissage des vallées par des sédiments fins qui a permis aux zones humides de s'installer et d'être façonnées par l'homme pour la production de foin, le transport du bois par flottage, la mise en place de moulins, d'étangs de pêche etc. Il n'existe pas de biodiversité naturelle, il y a aujourd'hui une nature entièrement façonnée par l'homme : celui-ci souvent ne s'est pas intéressé ou n'a pas su anticiper les conséquences des aménagements qu'il a construits. Plus proche de nous, les grands réservoirs de la Seine, de la Marne et de l'Aube en sont un bel exemple. Construits pendant la deuxième moitié du XX^{ème} siècle en amont de Paris pour limiter les inondations, ils sont devenus des hauts lieux de passage et de préservation des oiseaux migrateurs européens (grue cendrée,...); une retombée économique importante de la construction de ces retenues, totalement inattendue, a été le tourisme venu d'Europe du Nord pour observer cette faune... Pour tenter de prévoir ou d'orienter l'évolution des milieux " naturels ", une " ingénierie écologique " se développe, dont en France le CEMAGREF est le fer de lance, cherche à savoir aménager l'espace fluvial, rural ou les zones humides afin d'y restaurer ou d'y établir un écosystème pérenne aux caractéristiques voulues. Cela va de l'habitat et du micro-habitat, aux zones de reproduction et à la gestion artificielle de la vitesse des cours d'eau par aménagement des sections, des bras morts et gestion des retenues. Au Kenya, la Société des Ciments Lafarge a créé un écosystème tropical entièrement artificiel, sur le carreau d'une ancienne exploi-

tation de calcaire. La publication, en décembre 2000, d'une nouvelle Directive Européenne qui impose aux pays membres de prendre les mesures appropriées pour que soit rétablie d'ici quinze ans la qualité "originale" des eaux des milieux "naturels" va exiger, outre des efforts financiers importants, de véritablement mettre en oeuvre cette ingénierie écologique à grande échelle, pour déterminer quelles sont les mesures à prendre, pour atteindre cet objectif qu'il appartient à chaque pays de définir et de décliner.

L'agriculture et les pays en voie de développement

La consommation d'eau est principalement due à l'agriculture. Elle seule "consomme" réellement l'eau, c'est à dire l'évapore; les autres activités la restituent en général souillée ou dégradée au milieu naturel. L'agriculture est le plus gros consommateur au niveau mondial: environ 70 % des 5000 km³ d'eau consommés annuellement, et qui représentent environ la moitié des ressources mondiales facilement utilisables. L'eau domestique ne représente que 10 % de la consommation, et l'eau industrielle 20 %. Dans les pays tempérés, il n'y a pas de véritables conflits d'usage de l'eau, même si les besoins agricoles peuvent être en conflit avec les besoins "écologiques" de l'eau évoqués plus haut. En pays arides, les besoins agricoles sont dominants. J'ai limité jusqu'ici le propos aux pays industrialisés en climat tempéré. Il est clair que les problèmes de l'eau sont d'une autre dimension dans les pays en développement, souvent situés en zones arides et où la croissance démographique est encore, même si elle semble quelque peu s'essouffler, largement excédentaire. Le problème majeur est celui de l'irrigation; tous les pays concernés ont pris ou prennent des mesures lourdes d'augmentation de la disponibilité en eau pour satisfaire aux besoins croissants en produits agricoles. Cela va de la construction de grands barrages (par exemple les Trois Gorges, en Chine) à l'exploitation des eaux fossiles du Sahara (la Rivière Verte, en Libye) en passant par la petite hydraulique (les mille barrages, en Tunisie, où l'on veut éviter de "perdre" la moindre goutte d'eau douce en mer, aux dépens des écosystèmes côtiers). Certains pays du Golfe ont même irrigué avec des eaux de mer dessalées par osmose inverse (dont le coût arrive aujourd'hui à moins d'un demi-dollar par mètre cube). D'autres ont construit d'énormes canaux de transfert d'eau de bassins à bassins. On parle en Europe d'un transfert d'eau du Rhône

à Barcelone. Certains recherchent des cultures plus efficaces vis-à-vis de la consommation en eau, d'autres optimisent les méthodes d'irrigation. Les Canadiens proposent aux Mexicains de leur livrer, par bateau, l'eau douce du Saint Laurent, mais les coûts de transport sont trop élevés. D'autres se proposent de transporter, vers les pays défavorisés, de "l'eau virtuelle", c'est à dire du blé produit dans des pays où l'eau est abondante, sachant qu'il faut environ mille tonnes d'eau pour produire une tonne de blé, et donc qu'il serait moins cher de transporter le blé que l'eau. Pour une tonne de viande, il faut encore environ dix fois plus d'eau... Encore faut-il que l'acheteur ait les moyens de payer le blé transporté, et accepte sa dépendance économique et même politique vis-à-vis de son fournisseur. C'est ainsi que l'île de Malte a refusé l'eau potable venue en bateau de Marseille, pour lui préférer l'eau de mer dessalée par osmose inverse, pourtant plus chère, pour préserver son autonomie.

Ces mesures vont-elles suffire? Si la démographie continue de croître au rythme actuel (cent millions d'individus de plus sur terre par an), probablement pas. Par ailleurs, trois dangers me semblent menacer ces pays. Le premier est la salinisation des sols. Par excès d'irrigation, le niveau des nappes peut remonter très près du niveau du sol; l'évaporation fait alors s'accumuler dans les sols superficiels les sels contenus dans l'eau, conduisant très vite à la perte de la fertilité. Ce phénomène est malheureusement observé à grande échelle en Australie. Même en l'absence de remontée de nappe, une irrigation qui ne s'accompagne pas d'un drainage pour éliminer, par un apport volontairement excessif d'eau, les sels que l'évaporation et la transpiration des végétaux accumulent, conduit de même à la salinisation des sols. On estime ainsi qu'en Tunisie, un million de tonnes de sels, qui étaient autrefois lessivés et rejetés à la mer, s'accumulent chaque année dans les sols. Le second danger est l'épuisement des ressources en eaux souterraines. C'est le cas dans de nombreux pays, en Inde par exemple, où le niveau des nappes est en baisse régulière, du fait de la généralisation des prélèvements souterrains dans le cadre de la "révolution verte" qui a pourtant permis

au pays d'atteindre l'autosuffisance alimentaire. Le troisième danger est l'incapacité à faire face, dans une situation déjà tendue, à une variation climatique naturelle (par exemple le retour des dix ans de sécheresse au Sahel des années 75 à 85), ou aux variations climatiques dues à l'effet de serre, qui risque, dit-on, de réduire la pluviométrie précisément dans les zones déjà à déficit hydrique, pour l'augmenter dans les zones équatoriales et les hautes latitudes. Les réserves mondiales de céréales seront-elles suffisantes pour faire face aux besoins en cas de crise, et saurons-nous les mobiliser assez vite? Un pays au moins, la Tunisie, a déjà préparé son plan de lutte en cas de sécheresse: importation massive et immédiate de blé, pour d'une part éviter la spéculation et d'autre part éviter à tout prix que les variétés de blé adaptées au climat tunisien, uniques et inexistantes sur le marché international, soient consommées pour l'alimentation, compromettant les semences de l'année suivante. Un minimum de deux ans de semences est en permanence maintenu en stock pour parer à ce risque.

L'eau potable des pays en voie de développement

Les problèmes de l'eau des pays en voie de développement portent aussi, et peut-être surtout, sur la fourniture d'eau potable et l'assainissement. Si, comme en pays industrialisés, la qualité de l'eau prélevée sur place est souvent déplorable, les techniques pour assurer un traitement adéquat sont souvent également absentes ou trop onéreuses. Le premier problème, responsable de l'essentiel des maladies hydriques, est la contamination bactérienne (un quart de l'humanité est atteint de dysentérie), puis viennent des maladies parasitaires. Enfin les problèmes liés aux concentrations naturellement excédentaires en certains éléments toxiques, comme l'arsenic dans la vallée du Gange en Inde et au Bangladesh, ou le fluor dans les régions de socle, ont des conséquences sani-

taires tragiques. Il faut ajouter à cela que se créent sous nos yeux d'inquiétants rassemblements humains: il y avait trois villes de plus de dix millions d'habitants en 1950, il y en a 21 aujourd'hui (dont 17 dans les pays en développement), on en attend 50 en 2025. Les conditions sanitaires y sont le plus souvent déplorables, et le premier problème y est l'assainissement, avant même l'adduction d'une eau de qualité. On a en effet constaté que sans assainissement, la fourniture en quantité d'eau de bonne qualité à un effet négatif sur l'état sanitaire de la population desservie. Que faire? Lors du dernier Forum Mondial de l'Eau à La Haye, en 2000, la Commission Mondiale de l'Eau a tenté de chiffrer les dépenses que l'humanité dans son ensemble devrait consentir pour résoudre, en vingt-cinq ans, les problèmes de l'eau potable. Ils sont estimés à 180 milliards de dollars par an, alors que le budget actuel de l'humanité pour l'eau, toutes dépenses confondues, est à peine de 80 milliards de dollars par an. Qui va payer la différence? Nul ne sait... Les pays riches se sont bien gardés, à La Haye, de prendre le moindre engagement là-dessus, préférant garder leur or, qui pour construire des boucliers anti-missiles, qui pour réduire la durée du travail hebdomadaire, qui pour organiser des jeux dispendieux. On parle de solliciter l'investissement du secteur privé, qui est à même de régler certains problèmes dans les pays en mesure de payer l'eau, mais pas dans les pays déjà en deçà du seuil de pauvreté.

La crise?

Je suis persuadé que l'humanité attend une crise majeure pour se résoudre à agir. Celle-ci peut être une terrible famine, une épidémie meurtrière, un conflit armé ayant l'eau pour objet. Pourtant les solutions du problème de l'eau existent, dès lors que la croissance démographique ne vient pas chaque jour amputer les progrès faits. L'eau existe, il faut simplement commencer à l'économiser là où elle fait défaut, s'abstenir de la contaminer, la transporter, l'épurer, éventuellement la dessaler. Il faut peut-être repenser, pour les pays non encore équipés, les principes de l'adduction d'eau potable et de l'assainissement, comme je l'ai indiqué précédemment. Les technologies existent, il faut sans cesse les optimiser, les adapter, les améliorer, mais c'est le financement de ces technologies qui est à l'évidence problématique. A moins que ne se réveille un jour, devant la crise, un sentiment de solidarité des habitants de la planète face au problème de l'eau...

L'Eau, la matière première du XXI^{ème} siècle

Entretien avec Claude Allègre¹



Question :

Vous avez dit et écrit dans vos livres que la question de l'eau allait devenir le sujet n° 1 de l'économie du XXI^{ème} siècle et que l'eau jouerait un rôle équivalent au pétrole aujourd'hui, pouvez-vous nous détailler votre pensée

Réponse de C. Allègre :

L'eau est indispensable à la vie, à l'agriculture, à l'industrie, à la régulation du climat, au maintien des équilibres écologiques. Pendant longtemps l'eau a été disponible en abondance. Or dans le futur, l'eau va sans doute manquer tant en quantité qu'en qualité. Il tombe globalement 40 000 km³ d'eau de pluie sur les continents. 25 000 km³ sont évacués vers l'océan lors des orages et des crues, mais il s'agit donc d'eau boueuse inutilisable par l'homme. 5 000 km³ tombent dans des régions inaccessibles. Restent 10 000 km³. L'homme en utilise aujourd'hui 5 000 km³ soit la moitié de l'eau disponible. C'est déjà préoccupant mais ce qui l'est plus c'est qu'en 50 ans la consommation a augmenté d'un facteur 5. Dans ce domaine comme pour l'énergie, les disparités entre les pays sont considérables. Un américain consomme 2 000 m³ par an, un européen 500 m³, un africain 20 m³ ! Que va-t-il se passer si

comme il est souhaitable les pays du tiers-monde se développent ? L'avenir me paraît difficile. Cette eau à quoi est-elle utilisée ? L'usage domestique représente dans les pays développés de 10 à 20 %. L'industrie représente 40 à 50 %, l'agriculture le reste. Comment économiser l'eau ? Deux pistes importantes.

1) Recycler les eaux industrielles. Cette voie bien sûr existe déjà, mais elle doit être développée à l'avenir. Toutefois dans l'industrie agroalimentaire, l'une des plus grandes consommatrices, le recyclage de l'eau même très propre est psychologiquement très difficile à faire accepter par les citoyens. Il faudra pourtant probablement le faire dans l'avenir.

2. Dans l'agriculture, 70 % de l'eau d'arrosage est perdue pour les plantes par évaporation. Pour augmenter les rendements on préconise bien sûr l'arrosage par le goutte-goutte, mais c'est difficile et cher. Et dans le tiers-monde, il n'est pour l'instant pas question d'utiliser des processus si sophistiqués.

Alors l'espoir est bien sûr du côté des OGM. Inventer des plantes qui consomment moins d'eau et l'absorbent plus efficacement.

Tout cela concerne l'eau à l'échelle de la Terre globale. Mais dès qu'on examine la géographie, on constate que le problème devient encore plus dramatique. Les inégalités entre les pays ou les régions devant les ressources en eau sont encore plus importantes que devant la nourriture. Déjà aujourd'hui des régions entières sont en manque d'eau même dans les pays développés. Pensons à la Californie, au Texas, au Mexique, au Sertao au Brésil, ou même au Sud de la France sans parler de l'Afrique ou de la Turquie.

Mais la situation s'aggrave encore avec le problème du changement climatique. Le

cycle de l'eau se modifie comme sa répartition géographique et aussi sa modulation temporelle. Les périodes de pluies intenses alternant avec des périodes de sécheresse se généralisent dans les pays tempérés. La fréquence des inondations augmente. Bref, la géographie de l'eau est vraiment très préoccupante.

Du coup la gestion des fleuves devient un problème aigu. Le partage des eaux du Tigre, de l'Euphrate, du fleuve Sénégal ou du Jourdain sont des questions politiques bien connues. Mais désormais il faudra aller plus loin. D'abord réguler le cours des fleuves pour éviter les inondations qui rendent l'eau turbide. Ensuite répartir équitablement l'eau de tous les grands fleuves, y compris le Rhône et la Seine, avec dans l'avenir, des transports d'eau à grande distance dans des sortes de pipeline avec à la clef des problèmes redoutables : fuites, évaporation, corrosion, contrôle de qualité etc.

Il faudra sans doute à l'avenir comme on a le GATT pour le commerce, créer une instance internationale de régulation et d'arbitrage de l'eau.

Question :

Le tableau que vous dressez est très alarmant. Pourrons-nous faire face à ces défis ?

C. A. :

Avant d'esquisser des éléments de réponse, il nous faut parler un peu de l'autre aspect, celui de la qualité. Car il ne suffit pas de disposer d'eau en quantité, encore faut-il que cette eau soit utilisable, qu'elle soit potable ou au moins non toxique, non huileuse etc... Or, la pollution de l'eau se généralise, par les industries (souvent agricoles), par l'agriculteur et les excès d'engrais (nitrate, phosphate, potassium), par l'activité domestique (détergents). La réglementation va devenir de

plus en plus stricte, mais tant qu'il y aura des engrais en masse et des détergents non biodégradables, elle sera en partie non appliquée.

Nous allons donc devoir nettoyer de plus en plus d'eau avec les procédés chimiques et biologiques que l'on connaît et que maîtrisent très bien les grandes compagnies d'eau. Le recyclage de l'eau va donc se généraliser. Je reviens à votre question. Y a-t-il des solutions, si oui, lesquelles ? Les solutions techniques existent. Quelques mots vont être essentiels dans le futur : Recyclage, Nettoyage, Stockage. Tous les moyens techniques existent déjà. Mais cela veut dire que l'eau va devenir de plus en plus chère. L'eau vaut déjà plus que le pétrole, ce sera plus vrai encore demain. Parmi les procédés de nettoyage, il faut bien sûr inclure le dessalement de l'eau de mer qui permet aujourd'hui de préparer de plus en plus d'eau douce au Moyen-Orient et va se généraliser. Mais cette eau dessalée se prépare bien en été. Malheureusement à cette saison l'eau s'évapore et l'on en perd la moitié au moins. Comment conserver l'eau purifiée pour son utilisation en hiver ?

Réponse : Il faut la stocker dans des réservoirs géologiques profonds, réalimenter les nappes phréatiques par injection comme on le fait pour le pétrole. L'eau imprègne la roche qui est un milieu poreux. On l'injecte dans le réservoir et on le pompe lorsqu'on en a besoin. Pour cela on crée dans le réservoir des fractures par surpression hydraulique et ce réseau de fractures joue ensuite le rôle de drain. Ainsi un nouveau secteur scientifique et technologique est en train de naître. La gestion des réservoirs aquifères, qu'il s'agisse des réservoirs naturels alimentés par la pluie ou des réservoirs réalimentés par la réinjection, le recyclage d'eau nouvellement purifiée et préparée. Toutes les techniques de

¹ Membre de l'Académie des sciences, Professeur à l'université Denis Diderot

contrôle des réservoirs pétroliers (imagerie, mesures de débit, etc.) seraient transférables mais bien sûr avec des adaptations spécifiques. Ainsi la tomographie sismique sera utilement complétée par la tomographie électromagnétique car l'eau est un excellent conducteur.

Nous allons donc avoir un nouveau secteur qui va se développer la *Géophysique* de l'eau qui combinera dynamique des fluides en milieu poreux et techniques tomographiques.

Question :

Tout cela va-t-il stimuler la recherche ?

C. A. :

Oui, la purification de l'eau a été pendant longtemps une vaste entreprise de chimie en solution, mais à présent on tend de plus en plus à faire appel à la biologie, à des bactéries ou des algues OGM qui remplissent tel ou tel rôle de nettoyage. C'est un secteur en plein essor et les grandes compagnies d'eau travaillent déjà en collaboration avec les géopôles.

L'autre secteur, on l'a dit, est la géophysique et enfin, un troisième, la chimie des eaux. Celle-ci devient essentielle dès lors qu'on s'intéresse à la qualité et qu'on parle de pureté. Les pollutions multiples, qu'elles soient minérales ou organiques, offrent aujourd'hui des sujets d'études importants au géochimiste. D'abord pour les identi-

fier, pour remonter à leurs sources et pour trouver des moyens de les éviter.

Question :

Mais lorsqu'on parle de l'eau ne faut-il pas aussi inclure le rôle qu'elle joue dans le cycle externe (au sens géologique du terme) ?

C. A. :

Certainement. On parle beaucoup du rôle du CO₂ et du réchauffement du globe, mais on est beaucoup plus discret sur l'influence de l'eau atmosphérique sur le climat. Il est pourtant essentiel. D'abord, parce que selon qu'il y a des cirrus ou des cumulus le rayonnement solaire est réfléchi (refroidissement) ou absorbé (réchauffement) or on ne connaît pas bien le déterminisme qui contrôle la formation des divers types de nuages. Ensuite, et c'est peut-être le plus important parce que la chaleur latente de vaporisation de l'eau est 580 calories/grammes.

Les transports d'eau, les changements de phases constituent un élément essentiel pour définir le climat et sa géographie. La modélisation à la fois hydrodynamique et thermodynamique du cycle de l'eau, mais aussi ses modifications est un domaine de recherche privilégié pour les prochaines années. Toutes les méthodes de traçage isotopique permettant de comprendre les cycles de l'eau présents et passés vont-elles aussi jouer un rôle plus grand encore qu'au-

jourd'hui. Reconstituer les circulations d'eau du présent et du passé, comprendre le cycle isotopique de l'eau sont des sujets qu'on est loin d'avoir épuisés.

Un autre secteur où des progrès considérables vont être faits concernent l'interaction de l'eau avec la surface rocheuse de la Terre.

L'eau qui ruisselle agit sur les roches en les érodant. Ce processus est le résultat d'un double processus chimique et physique. L'eau dissout des ions solubles Na⁺ K⁺ Ca²⁺ Mg²⁺ Si⁴⁺ et de ce fait désorganise les roches qui deviennent pulvérulentes et transportables mécaniquement vers la mer. On parle d'érosion chimique et d'érosion mécanique, mais elles sont indissociables. L'érosion mécanique transporte cinq fois plus de matière que l'érosion chimique mais elle ne pourrait agir si cette dernière n'avait pas au préalable altéré les roches.

En fait le phénomène est encore plus complexe car la végétation et les bactéries interviennent-elles aussi, d'un côté pour accélérer l'érosion chimique, de l'autre pour retenir les particules grâce à l'action des racines créant par la même un sol. Ces sols constituent la partie fertile, cultivable de l'interface Eau-Terre interne. Il faut 10000 ans pour fabriquer un sol mais il ne faut que quelques années pour le détruire. Allons-nous préserver les sols ou devons-nous enre-

gistrer patiemment leur disparition ?

Les fleuves transportent chaque année 2 km³ de matériaux vers la mer sous forme soluble et particulaire. C'est ce processus qui est à l'origine de l'érosion et de la sculpture des reliefs terrestres étudiés par la Géomorphologie.

Cette discipline qui bien sûr a bénéficié des photographies de satellite est en plein essor car on y trouve des applications essentielles de l'auto-organisation. L'eau qui ruisselle sur les pentes tend en effet spontanément à s'organiser en réseaux fluviaux qui ressemblent à des nervures de feuilles d'arbre et dont les études ont montré qu'elle obéissait à des lois fractales. Il y a là un travail en plein développement.

Par ailleurs, chimiquement parlant, l'érosion est une pompe à CO₂, car ce sont les acides carboniques formés par dissolution du CO₂ qui sont les ingrédients essentiels de l'érosion chimique. C'est sans doute par ce processus que le CO₂, très abondant dans l'atmosphère terrestre il y a 4 milliards d'années s'est retrouvé stocké dans les roches carbonatées et que l'atmosphère terrestre est devenue riche en azote puis plus tard en oxygène. Comme on le voit la question de l'Eau sur la terre et son comportement offre aujourd'hui un champ de recherches fondamentales extrêmement intéressant avec en perspective des applications fructueuses pour la société de demain.



Quelques chiffres suffisent à saisir l'ampleur du drame qui se joue chaque jour sous nos yeux indifférents ou résignés alors que tant de choses pourraient être faites pour y remédier. Un milliard d'hommes surtout enfants et personnes âgées meurent chaque année par manque d'eau en quantité ou en qualité. Vingt à trente fois plus en portent des séquelles, sans compter les incapacités au travail, permanentes ou temporaires qui grèvent les économies. Dans les

Une première catégorie comporte les maladies infectieuses contractées dans les eaux de boisson ou par consommation de légumes ou de fruits contaminés. Pasteur ne disait-il pas : " Nous buvons 80 % de nos maladies ". C'est encore vrai pour une grande part de

Le passage à travers la peau constitue une seconde voie de contamination. Les schistosomes sont un risque majeur pour les cultivateurs obligés de séjourner les pieds dans l'eau dans les rizières. Les parasites sont les agents de bilharzioses. On estime à 500 millions les personnes qui en sont atteintes.

Enfin, la troisième catégorie est celle où l'eau, stagnante ou vive, joue un rôle dans le développement des agents pathogènes. Le paludisme est transmis à l'homme par la femelle d'un moustique dont les larves se développent dans l'eau stagnante. Sa forme la plus sévère due au *Plasmodium falciparum* est avec le Sida le fléau le plus grave auquel l'humanité est

provoquer la méthémoglobinurie du nourrisson mais le risque pour l'adulte est pratiquement nul. Par contre le fluor à forte dose peut être toxique. A l'inverse, une eau saine doit être faiblement minéralisée. La carence en iode est responsable de goitres endémiques L'essentiel des toxiques rejetés par les collectivités locales est constitué par les solvants halogènes, trichloréthylène, chloroforme, tétrachlorure de carbone. Enfin les nombreuses et diverses molécules utilisées dans les cultures (pesticides et phytosanitaires) ont sur l'homme des effets nocifs de nature et d'intensité variable.

Cette énumération non exhaustive montre l'énorme effort demandé à l'humanité aussi bien en amont qu'en aval. En amont parce que l'eau naturellement saine devient devant la poussée démographique de plus en plus précieuse. Il faut donc la collecter, l'analyser et le plus souvent la traiter, d'où son coût. En aval parce que un système efficace d'évacuation est essentiel. La généralisation du tout à l'égout est encore utopique pour bien des pays. Et même les eaux usées doivent-t-elles encore être traitées avant d'être rejetées à la rivière afin d'éviter la pollution en aval.

La réponse à cet immense défi est à la fois politique et scientifique mais peut être encore plus dans l'EDUCATION à l'hygiène en particulier celle des femmes et naturellement dans la lutte contre la misère et la pauvreté.

L'eau et la Santé

L'opinion de Jean Dausset'

pays en voie de développement un tiers des décès sont dus à de l'eau contaminée. Peut-on rester indifférent devant de telles constatations surtout à l'heure où les menaces de pénurie s'accroissent avec le changement de climat dûment constaté.

L'eau est LA molécule de la vie. Elle constitue 70 % du poids corporel (80 % chez les enfants). Une perte de 10 % entraîne des troubles graves, et 20 % la mort. Mais la quantité d'eau ne suffit pas, il faut encore qu'elle soit non seulement douce mais saine : une eau exempte de germes pathogènes, de substances minérales et de toxiques au delà de teneurs précises.

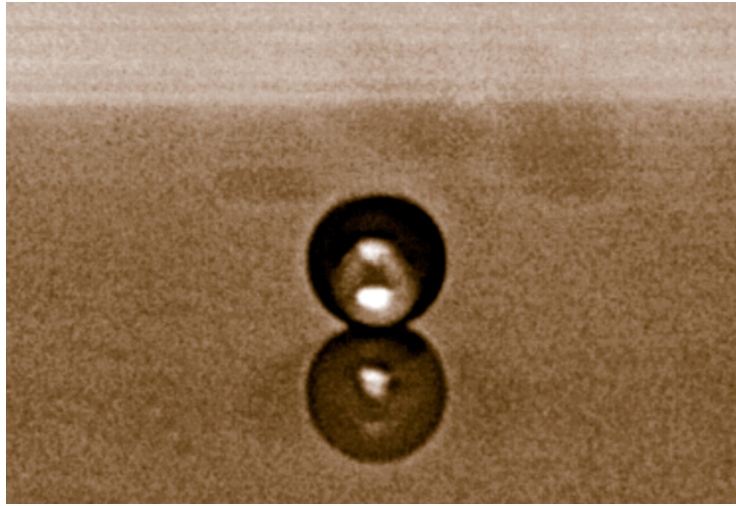
Il faut aussi que les eaux usées soient évacuées correctement, grâce à un assainissement efficace évitant les contaminations, car l'eau polluée est un immense réservoir de bactéries, de virus et de parasites, la source essentielle de dissémination de maladies. Quelles sont-elles ?

l'humanité, malgré la découverte par Berthollet de la puissante action désinfectante de l'hypochlorite de soude, l'eau de Javel. Que de maux pourraient être évités par son usage systématique ! Mais, les kystes de *Giardia* et les oocystes de *Cryptosporidium*, résistants à la désinfection posent un problème grandissant au traitement de l'eau. Une panoplie de bactéries (*Vibrio cholérique*, shigella, salmonelles) sont à l'origine de la plupart des dysenteries, un fléau très répandu et responsables d'épidémies. Parmi les virus, celui de la poliomyélite est heureusement contrôlé par la vaccination. Il n'en va pas de même pour ceux de la typhoïde ou des hépatites A et E. L'eau peut aussi contenir des parasites tels que des amibes ou des vers (*ascaris*, vers de Guinée)

actuellement confrontée. Il semblait devoir être éradiqué grâce au DDT. Celui-ci a été écarté par crainte de sa toxicité. Mais a-t-on bien pesé le rapport bénéfice/risque et ne faut-t-il pas réexaminer cette décision devant ce constat : trois millions d'individus, surtout des enfants meurent chaque année de paludisme et des millions, chroniquement infestés, restent invalides à vie. Les souches de *Plasmodium falciparum* devenues résistantes aux nouvelles drogues se répandent dans le monde aidées par l'extension du transport et du tourisme. L'onchocercose ou cécité des rivières est également transmise par un moustique qui se reproduit, celui là, dans une eau vive, 80 millions de personnes, surtout en Afrique en sont atteintes. A ce tableau déjà suffisamment tragique il convient d'ajouter encore les effets à long terme de la composition chimique de l'eau. Le plomb à haute dose peut provoquer le saturnisme. On évoque aussi le cadmium. Le nickel est connu comme allergisant. Les nitrates sont souvent incriminés. Ils peuvent certes



1 Membre de l'Académie des sciences, Professeur honoraire au Collège de France



Goutte

Les nanotechnologies

Par C. Weisbuch¹

A lors que l'on vit tous les jours les mutations induites par les micro-technologies, on entend aujourd'hui parler partout des nanotechnologies. S'agit-il de la même chose, simplement en plus petit ou y-a-t'il un changement radical des propriétés? Prévoit-on le même impact, voire une révolution encore plus profonde? Comment résoudre les questions de l'effort public à mettre dans ce domaine, et des modalités de cet effort?

Il faut d'abord définir le champ des nanotechnologies. C'est un domaine qui a certainement une existence propre, mais qui se définit aussi comme sous-domaine de nombreux autres domaines d'activité scientifique de grande ampleur: il s'agit souvent de faire à l'échelle nanométrique ce que l'on faisait à des échelles plus grandes!

L'approche "bottom-up", construction atome par atome

Le domaine propre doit son explosion actuelle à la possibilité extraordinaire, imprévue il y a seulement dix ans, d'ob-

server et de mesurer la matière atome par atome, par les microscopies en champ proche (microscopes à effet tunnel, à force atomique, à champ proche optique, à force magnétique, etc.). À partir de cette capacité d'observation, il devient aussi possible de fabriquer atome par atome, et de suivre le résultat de la fabrication. Enfin, cette capacité permet d'atteindre aux mécanismes de fonctionnement à l'échelle atomique de nombreux objets micro- et nanométriques. Ce domaine propre est donc représenté par l'approche "bottom-up",

¹ Académie des technologies Directeur de Recherches CNRS, Ecole polytechnique
² L'OFTA (observatoire français de techniques avancées) vient de réaliser une synthèse du domaine: Nanocomposants et nanomachines, Arago vol. 26, Tech Doc. Un prochain rapport (4^e trimestre 2001) traitera des nanomatériaux.

visant à la construction d'objets intéressants, voire utiles, "atome par atome". On peut citer comme exemples la construction d'édifices par manipulation d'atomes au bout d'une pointe (le "corral atomique"), l'observation de fonctionnalités logiques sur des molécules uniques dans la démarche de l'électronique moléculaire, les moteurs moléculaires, etc.²

L'approche "top-down", de diminution des structures et systèmes jusqu'au nanomètre

À l'opposé, l'échelle nanométrique apparaît dans de nombreux domaines comme un sous-domaine de l'activité, dans une approche "top-down", où l'on cherche à poursuivre à l'échelle du nanomètre les recherches que l'on fait d'habitude à plus grande échelle. On peut ainsi énumérer succinctement un certain nombre d'exemples qui

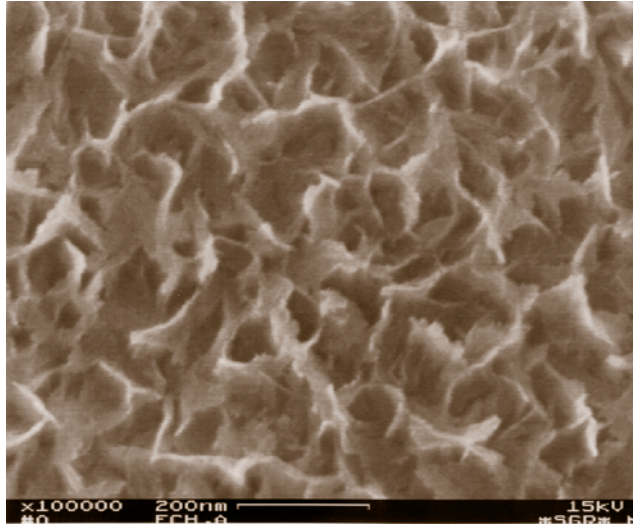
montrent l'impact des nanostructures, sans prétendre à l'exhaustivité, dont certains pourront aussi apparaître triviaux, mais qui montrent l'existence d'une certaine unité des nanosciences.

Les matériaux passifs, structuraux, peuvent être élaborés avec une structuration à l'échelle du nanomètre (nanograins, nanophases...). Les propriétés mécaniques en particulier, mais pas seulement elles (par exemple la corrosion...), sont souvent grandement améliorées, avec certainement de grandes différences dans le changement des lois de comportement entre métaux, céramiques, et autres matériaux. Deux exemples: les nanocéramiques sont ductiles, les joints de nanograins bloquant la propagation de fissures, alors que les céramiques habituelles, micro structurées, sont cassantes, donc fragiles, ce qui limite beaucoup leur emploi. Les composites métalliques ont des résistances mécaniques à chaud fortement améliorées, ce qui étend leur domaine d'utilisation dans un secteur critique. Les travaux actuels en matériaux passifs portent sur la fabrication, l'étude de la nanostructure, les relations propriétés-structure etc.

Les matériaux actifs ont des propriétés fonctionnelles qui dépendent de manière cruciale de la structure à l'échelle atomique. L'exemple le plus frappant actuellement est celui des supraconducteurs à haute température critique, où l'agencement des plans atomiques peut faire varier dans de grandes proportions la température critique. Les effets piézo-électriques, magnéto-strictifs etc. reposent sur l'agencement atomique, et soit un meilleur contrôle des solutions existantes, soit de nouvelles formulations peuvent permettre d'atteindre à des performances bien supérieures. De nombreuses applications sont à la recherche de matériaux meilleurs, comme l'enregistrement optique, dont la solution passe par la nanostructuration, puisque le bit d'information doit être stocké à l'échelle du nanomètre pour être compétitif avec les solutions actuelles ;

Les composants électroniques et optiques font depuis longtemps usage de matériaux et structures à l'échelle du nanomètre, puisque certains composants quantiques sont largement commercialisés dans les lecteurs de compact-discs (lasers à puits quantiques) et les tuners de réception de satellites télé (transistors à haute mobilité). L'enregistrement magnétique (disques durs d'ordinateurs) se situe déjà dans un environnement nanométrique, qu'il s'agisse de la taille des grains magnétiques portant l'information ou de la distance entre tête de lecture et disque magnétique tournant. La nanoélectronique explore de nombreuses voies (électronique à un électron, transistors balistiques, composants à interférence quantique...). La nano-optique se développe suivant deux grands axes, celui où l'on confine les électrons à trois dimensions (les "boîtes quantiques"), l'autre où l'on contrôle les modes de rayonnement (les "micro cavités optiques" ou les "cristaux photoniques", où l'on contrôle le mouvement des photons de la même manière que les électrons sont contrôlés dans un solide cristallin). L'élaboration de matériaux actifs tridimensionnels nanométriques est, bien entendu, "facilement" permise par les voies de la synthèse chimique et l'on rejoint là le domaine de l'électronique moléculaire.

Les matériaux intelligents, en fait des "matériaux-systèmes", font grand usage des nanostructures, que ce soit pour les capteurs, les actionneurs (gels électrorhéologiques par exemple) ou les matériaux "décideurs" (matériaux à transition de phase, matériaux à changement



Exemple de nouvelles propriétés par nanostructuration : en s'inspirant de la feuille de nénuphar, une surface d'alumine est rendue hydrophobe par nanostructuration [document Saint-Gobain].

de couleur, de composition chimique...) car c'est l'agencement contrôlé de la structure à l'échelle nanométrique qui permet les meilleures fonctionnalités.

Les microtechniques, visant à fabriquer des micro systèmes intégrés par les méthodes de la microélectronique, sont de grands utilisateurs de nanotechnologies : un des défis du domaine, celui de la tribologie, peut être enfin étudié de manière détaillée, voire maîtrisée, grâce aux nanotechniques. De grands progrès restent à faire pour obtenir les bons matériaux systèmes capteurs et actionneurs, et cela peut sans doute provenir de la capacité à concevoir et mesurer des matériaux à l'échelle nanométrique.

La chimie n'est pas en reste, ne serait-ce que par le fait qu'elle est depuis longtemps nanométrique, l'échelle des molécules. Certains objets macroscopiques sont nanostructurés volontairement, comme les catalyseurs. On cherche aussi à construire des édifices atome par atome grâce à la sélectivité de la réaction chimique comme les agrégats ou les dendrimères. Poursuivant l'organisation à plus grande échelle, on espère bien parvenir par la chimie à résoudre de très grands défis de nos sociétés comme la fabrication à grande échelle de cellules photovoltaïques à haut rendement ou de piles à combustible, des systèmes de dessalement de l'eau de mer, etc., tous exploitant d'une manière ou d'une autre les nouvelles propriétés de la matière nanostructurée.

Les sciences du vivant ouvrent un immense domaine aux nanotechnologies, ne serait-ce que parce que la fonctionnalité des objets biologiques est

déterminée à l'échelle moléculaire, et que donc par essence même tout le biologique est "nano". Un premier champ d'action est celui de l'imagerie à l'échelle atomique, où l'on peut explorer dans le détail toute la complexité de la machinerie du vivant. Les nouveaux moyens d'observation permettront de plus l'observation directe dans le vivant, sans faire de prélèvement, en suivant l'évolution temporelle. Ensuite, dans une démarche bio mimétique, il est sans doute extrêmement prometteur d'aller voir comment la nature s'y prend pour satisfaire un certain nombre de fonctions : la "machinerie neuronale" vient tout de suite à l'esprit, mais aussi les moteurs biologiques, leur déclenchement / contrôle, les modes de fabrication des biomatériaux, qui atteignent souvent aux limites intrinsèques des propriétés (cellulose des coquilles de noix, parfaits composites tridimensionnels, chitine de la coquille des crabes, aiguilles des oursins etc.).

La pharmacopée prédictive ouvre aussi un champ immense d'investigations. La mesure et la caractérisation tridimensionnelle des molécules du vivant peuvent permettre à terme de synthétiser des molécules encore plus sélectives dans leur action grâce à la parfaite adéquation entre la molécule "médicament" et les sites à contrôler.

Pourquoi et comment agir ?

Comme on le voit, on pourrait presque se convaincre que tout est ou va devenir "nano" puisqu'il s'en fait déjà beaucoup, de manière implicite. Comme on l'a vu sur les exemples précédents, l'importance des nanotechnologies vient de ce

que pour tous les domaines, les lois de comportement changent à cette échelle, le plus souvent de manière très bénéfique. C'est en cela que les nanotechnologies vont sans doute avoir un impact encore plus important que les microtechnologies.

Que faut-il faire ? Il existe manifestement une nanoscience. Dans chaque champ disciplinaire, il est intéressant et utile d'aller à la dimension du nanomètre. Comment aller au delà pour mettre en œuvre des nanotechnologies, c'est-à-dire des corpus de savoir-faire applicables, souvent pluridisciplinaires, permettant de réaliser des produits / procédés commercialisables ? Bien qu'il existe déjà clairement de nombreux champs d'application où l'on fait plus ou moins explicitement de la nanotechnologie, la plupart des états, ainsi que la commission européenne (pour le prochain 6^e PCRD), ont adopté des démarches volontaristes pour promouvoir les activités en nanotechnologies. Le programme américain, fort de 500 millions de dollars en 2001 a des objectifs très détaillés, soutenu par une analyse des motifs extrêmement riche : il s'agit de créer la base technologique de l'industrie à un horizon de 10-20 ans. En effet, ceux qui maîtriseront les nanotechnologies à cette échéance seront dans la course. Les autres...

Le programme américain est subtil dans ses modes opératoires : il identifie plusieurs types d'actions diversifiées et complémentaires : une bonne partie du financement est réservée au chercheur individuel, car dans ce domaine comme dans beaucoup d'autres, les bonnes idées viennent souvent de chercheurs isolés, travaillant dans les diverses disciplines. Le programme a aussi identifié dix grands défis pour les nanotechnologies (purification de l'eau, doublement du rendement des cellules solaires, nouvelles thérapies contre le cancer, etc.) qui font l'objet de grands programmes coordonnés. Les infrastructures sont développées, à la fois dans de grands centres nationaux pluridisciplinaires et de manière décentralisée avec des réseaux. Enfin, les secteurs de l'éducation, des études d'impact sur la société, etc. sont l'objet de programmes particuliers.

Le programme américain montre bien qu'il y a une diversité de démarches à encourager si l'on souhaite mobiliser au mieux les capacités intellectuelles et matérielles au bénéfice des nanosciences et des nanotechnologies.

3 Voir les documents sur le site web : www.nano.gov

Perspectives des piles à combustible

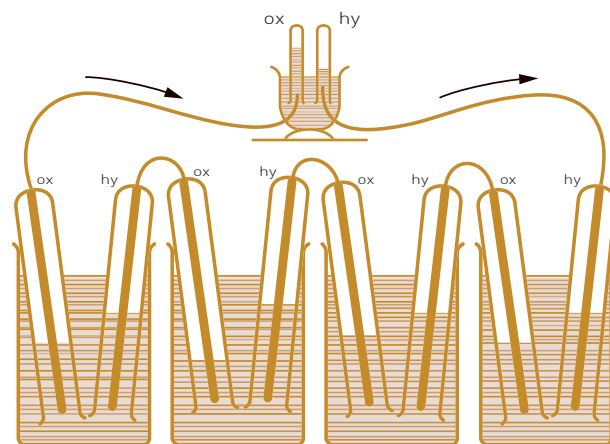
Par Michel Pouchard¹

Il a fallu attendre plus d'un siècle pour que l'idée lumineuse de R. GROVE (l'électrolyse inverse de l'eau) (1839), se concrétise par la production industrielle de piles à combustibles (PAC) destinées aux vols spatiaux habités.

Une pile à combustible est un générateur électrochimique produisant non seulement de l'électricité et de l'eau grâce à une alimentation en continu en carburant (hydrogène par ex.) et comburant (air généralement), mais encore de la chaleur, puisque les rendements en électricité varient actuellement, selon les filières, entre 35 et 60 % environ.

Les filières actuellement connues fonctionnent à des températures très diverses et sont à des états de développements très différents : la filière alcaline (80 °C) du spatial n'est guère représentée aujourd'hui que par l'européen ZETEK, la filière à acide phosphorique (200 °C) est à un stade de pré-développement stagnant malgré des opérations de démonstration comme celle d'EDF à Chelles, la filière carbonate fondu (600 °C) initialement très développée au Japon et destinée à des centrales de quelques MW marque le pas.

En revanche les filières à électrolyte solide, que ce soit celle à membrane polymère (PEMFC ; 80 °C) ou celle à membrane à base d'oxyde (SOFC) telle que la zircon (1000 °C) sont en très forte croissance, la première sous l'impulsion du canadien BALLARD et des grands constructeurs automobiles qui voient en les PAC des générateurs électrochi-



Pile à combustible (Stack of fuel) construite par Sir William Robert GROVE en 1839.

miques performants et non polluants (chimiquement et phoniquement). Outre ce marché potentiel important on voit se développer aux Etats Unis et en Europe un intérêt pour une cogénération électricité-chaleur à l'échelle de l'habitat particulier (quelques KW). La filière SOFC (membrane oxyde) devrait déboucher à plus long terme, sans doute associée à une récupération de chaleur plus exploitable, soit directement et transportable, soit par le biais de micro turbines, augmentant ainsi le rendement (70 % Siemens-Westinghouse aux USA). Parallèlement à la filière PEMFC se

développe aussi une version à alimentation directe en méthanol liquide, extractible de la biomasse, qui ne pose pas de problème particulier de distribution et qui est plus particulièrement destinée aux applications dans le secteur de l'électronique portable (téléphone, micro ordinateurs etc...).

En revanche les autres filières basse température doivent être alimentées en hydrogène. Celui-ci peut être stocké à bord du véhicule sous forme liquide, comprimée ou adsorbée sur des matériaux appropriés. Sa pureté doit être

compatible avec l'utilisation de métaux précieux. Sa production (réformage-shift du gaz naturel ou électrolyse de l'eau) et sa distribution constituent autant de problèmes s'ajoutant à ceux des PAC (gestion de la chaleur et de l'eau pour les PEMFC, vieillissement et propriétés thermomécaniques pour les SOFC). Un autre avantage des SOFC est la possibilité d'être alimentées directement par du gaz naturel.

La phase d'industrialisation pourrait s'échelonner de 2005 à 2010 environ, pour le portable, le petit stationnaire et le transport. Le transport lourd devrait logiquement précéder l'application automobile grand public, les spécifications de coût et de durée de fonctionnement différant pratiquement d'un facteur 10. Le cas du transport fluvial et maritime est à l'étude.

Si les PEMFC doivent logiquement s'imposer les premières, les piles alcalines peuvent également trouver quelques niches spécifiques. Les SOFC devraient finalement s'imposer lorsque leur température de fonctionnement pourra en être suffisamment abaissée (600 °C).

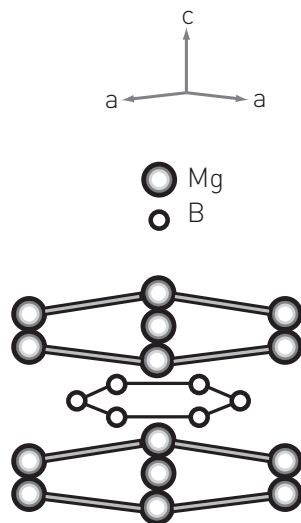
¹ Membre de l'Académie des sciences, Professeur à l'université de Bordeaux 1

Un supraconducteur conventionnel à haute température critique :

MgB₂

Par Héléne Raffy¹

En janvier 2001, J. Akimitsu annonçait au Japon que le composé binaire MgB₂ était supraconducteur au-dessous de 40K. Une nouvelle étonnante, pour un composé aussi simple, connu depuis les années 50, disponible dans le commerce sous forme de poudre. Ce serait en étudiant le composé Ca_{1-x}La_{1-x}B₆ (ferromagnétique pour $x > 0$) et en essayant la substitution Ca/Mg, faisant intervenir MgB₂, que cette découverte aurait été faite. Après six mois d'intenses recherches, il reste peu d'inconnues sur les propriétés électroniques de ce matériau. La supraconductivité de MgB₂ paraît s'expliquer comme celle des supraconducteurs conventionnels (Nb, Pb...): interaction électronique attractive via les vibrations thermiques du réseau cristallin (phonons), décrite par la théorie B.C.S. Comme attendu dans ce modèle la température critique T_c augmente (de 1K) si on remplace ¹¹B par son isotope ¹⁰B et diminue sous l'effet d'une pression hydrostatique. L'originalité de MgB₂ est l'observation de deux gaps supraconducteurs qui a été reliée soit à une



Structure cristalline de MgB₂ (a = 3,086 Å, c = 3,524 Å)
d'après : M. Jones et R. Marsh, J. Am. Chem. Soc. 76, 1434-1436, 1954 et J. Nagamatsu, N. Nakagawa, T. Muranaka, Y. Zenitani & J. Akimitsu, Nature 410, 63-64, 2001.

couche de surface à plus faible T_c, soit plus récemment à la forme particulière de la surface de Fermi.

Outre T_c, les propriétés vitales pour les applications sont les champs magnétiques critiques et les densités de courant critique. Pour des échantillons polycristallins de MgB₂, les champs critiques supérieurs, au delà desquels la supraconductivité disparaît, sont à 4.2K proches de ceux de Nb-Ti, dont T_c est 4 fois plus faible, mais inférieurs à ceux de Nb₃Sn (T_c = 18K). Ils atteindraient 15-18Teslas à T = 0K. L'anisotropie électronique de MgB₂, de l'ordre de 2, est faible malgré sa structure planaire. Avantage très important, les joints de grain ("calamité" des cuprates anisotropes) ne paraissent pas limiter le passage du courant. Les courants critiques, ou courants les plus élevés que le supraconducteur peut transporter sans perte, sont de l'ordre de quelques 10⁵ A/cm² à 4.2K, résultat fonction de l'échantillon. Champs critiques et courants critiques pourraient être augmentés, les premiers en augmentant la résistivité à l'état normal par des impuretés, les seconds en créant des défauts dans la structure cristalline

susceptibles d'empêcher le mouvement du flux magnétique, à l'origine de la dissipation.

Quelles sont les perspectives d'application pour ce composé ? Mg étant très volatil et très oxydable, la synthèse des couches minces reste difficile et la technique utilisée ne permet pas encore la réalisation d'hétérostructures utiles en électronique. La préparation de fils par la méthode éprouvée de "la poudre dans le tube" est déjà à l'étude. D'une part il semble plus facile et moins onéreux de préparer des conducteurs à base de MgB₂ qu'à base de cuprates (par ex. gaine métallique en fer au lieu d'argent pour les cuprates). D'autre part si MgB₂ pouvait permettre un fonctionnement à 25K, le coût de réfrigération pourrait être abaissé de façon significative par rapport à celui des supraconducteurs conventionnels à base de niobium. MgB₂ apparaît donc aujourd'hui surtout comme un bon candidat pour la réalisation de conducteurs supraconducteurs, si on peut optimiser ses champs critiques et ses courants critiques. Gageons que ces développements pourraient cette fois être très rapides.

¹ Directeur de recherche, Laboratoire de Physique des Solides, Université Paris-Sud Orsay

Les plis cachetés

du passé au présent

Par **Pierre Buser**¹

La tradition, pour l'Académie des sciences, d'accepter le dépôt de plis cachetés dans ses archives n'est pas récente puisqu'elle date de la création de l'Institution sous Louis XIV. "Le but est de donner une date certaine aux découvertes qu'ils sont supposés contenir sans avoir recours à leur publication. Si le pli est accepté, la date d'acceptation du dépôt est dûment inscrite sur le pli et notifiée à l'auteur. Celui-ci peut en demander le retrait. Il peut aussi en demander l'ouverture. Lorsque l'auteur du pli est décédé, ses héritiers peuvent en demander l'ouverture. Enfin l'Académie se réserve le droit, cent ans après le dépôt, d'ouvrir les plis."

Tel est, sèchement résumé, l'essentiel de nos règles officielles de fonctionnement d'une Commission dite des Plis cachetés, créée par Paul Germain et

qui depuis, se réunit régulièrement tous les 6 mois environ et qui comporte des représentants des grandes disciplines scientifiques, y compris l'histoire des sciences.

La tâche principale de la Commission reste d'ouvrir les plis centenaires. En séance, les plis ouverts sont rapidement évalués et, si leur contenu retient l'attention de l'un des membres, celui-ci accepte de procéder à un examen plus détaillé et éventuellement de faire un court rapport. A défaut, le pli est adressé à un rapporteur extérieur. Ces rapports seront le cas échéant publiés dans un numéro de la série des Comptes Rendus que le thème concerne. Sinon ils sont classés.

Il faut hélas constater que le contenu des plis est très souvent décevant, à telle enseigne que le nombre de plis retenus en vue d'un rapport ultérieur est extrêmement faible. Le fait est sociologique, nous devons accepter cette curieuse médiocrité. Certes il y a eu quelques heureuses exceptions : il y a plusieurs années, fut ouvert et devint l'objet d'un rapport, une intéressante note de Duchesnes de Boulogne, ce médecin

neurologue un peu atypique qui devint célèbre par la suite, mais qui en ses heures difficiles, avait tenu à confier l'essentiel de ses théories à un pli qu'il déposa. Tout récemment encore, nous voici devant le pli déposé en 1940 par Vincent Doebelin, un grand mathématicien décédé l'année du dépôt, et dont l'ouverture a récemment été demandée par son frère. Il lui est consacré une note dans ce même numéro de la Lettre.

Sont-ce là les seuls événements marquants ? Non car de plus en plus de déposants, vivants, sollicitent non seulement l'ouverture de leur pli mais aussi sa publication. De bonne foi, ils espèrent de la sorte voir leur papier imprimé, sans se soumettre pour autant aux procédures de revue par des spécialistes, auxquels sont maintenant soumis tous les manuscrits proposés aux Comptes Rendus. La Commission des plis se trouve ainsi devant une difficulté qui nécessite de la part de ses membres, une vigilance permanente. Ceci d'autant plus que les documents dont la publication est demandée n'ont en règle générale ni la concision ni surtout le niveau exigé par les Comptes Rendus.

¹ Membre de l'Académie des sciences, Professeur émérite à l'Université Pierre et Marie Curie.

de l'Académie des sciences, [Doebelin 2000], retranscrit intégralement le pli 11 668, avec un commentaire historique et scientifique relativement détaillé. Nous en résumons ci-dessous certains aspects.

La vie de Wolfgang.

Wolfgang Doebelin est né le 17 mars 1915 à Berlin. Son père, Alfred Döblin (1878-1957), issu d'une famille juive de Stettin, est médecin-psychiatre. Il s'est fait un nom dans la littérature allemande d'avant-garde et connaît bientôt une renommée internationale avec son roman Berlin Alexanderplatz, publié en 1929.

La famille Döblin doit fuir l'Allemagne en mars 1933. Après un bref séjour à Zürich,

de Markov. Dès le début de l'année 1936, Wolfgang Doebelin rivalise avec les meilleurs, Kolmogorov, Khinchin et Paul Lévy notamment, et, en 1937, il propose une théorie générale des schémas markoviens en temps discret, publiée en 1940 dans les Annales de l'ENS, d'une prodigieuse richesse d'idées nouvelles qui inspireront les principaux spécialistes de ces questions dans les années 50 et 60. Le cas "continu", lorsque le mouvement s'écoule continuellement dans le temps, comme le cours d'un torrent ou celui de la rente à la Bourse de Paris, et qu'à chaque instant il est soumis au hasard des circonstances, nécessite des techniques mathématiques nouvelles. En 1931, le grand mathématicien russe A. N. Kolmogorov (1903-1987) publie un mémoire fondamental dans lequel il

tionnels de la théorie des probabilités au moins depuis Laplace (les résultats de l'accumulation de petites erreurs sont généralement distribués suivant la loi de Gauss, etc.). Ce mémoire publié en 1940 et 1947 influence beaucoup les travaux d'après guerre sur ces sujets.

À la déclaration de guerre, Vincent Döblin est affecté comme soldat téléphoniste au troisième bataillon du 291^e RI, cantonné à Sécheval, non loin des méandres de la Meuse dans les Ardennes. Il est repris par le cafard, le doute aussi. Il est décidé à mourir plutôt que vivre sous la domination nazie. Mais il sait aussi que son oeuvre mathématique est unique; la théorie des probabilités des années trente est alors toute neuve, un champ de recherche immense

Par Bernard BRU¹ et Marc YOR²

Le 18 mai 2000, à la demande de Claude Döblin représentant la famille, la Commission des plis cachetés de l'Académie a procédé à l'ouverture du pli cacheté n° 11.668, accepté en la séance du 26 février 1940 et adressé par le soldat Vincent Döblin, téléphoniste au 291^e RI alors stationné en Lorraine près de Nancy.

Le pli 11 668 contient un mémoire intitulé "Sur l'équation de Kolmogoroff" écrit à l'encre bleu noir sur un cahier d'écolier de cent pages. Il donne une solution extrêmement avancée pour l'époque d'un des problèmes centraux de la théorie des probabilités des années trente, qui se trouve occuper encore actuellement une place importante dans une discipline mathématique elle-même au coeur de la science moderne. Cet événement singulier, susceptible a priori d'intéresser une douzaine d'historiens des mathématiques dans le monde, prend une toute autre dimension lorsqu'on sait que Vincent Döblin est le nom francisé de Wolfgang Doebelin, né en 1915 à Berlin qui a fui le nazisme et qui, en juin 1940, pris au piège dans les Vosges, a préféré se donner la mort plutôt que se rendre aux troupes allemandes victorieuses. De sorte que le pli 11 668, écrit au cantonnement dans des conditions matérielles et morales aussi peu favorables que possible, témoigne du dernier combat, de la lutte obstinée, solitaire, d'un jeune mathématicien exceptionnellement doué, Wolfgang Doebelin, né Allemand et mort pour la France. Il rappelle aussi l'histoire culturelle européenne de l'entre deux guerres, Wolfgang Doebelin étant le fils du grand écrivain allemand Alfred Döblin, et son double, épris de poésie, de musique, de hautes mathématiques et de liberté. C'est probablement la conjonction de tous ces facteurs qui explique l'intérêt suscité dans le monde entier, pour l'histoire de Wolfgang Doebelin, depuis l'annonce de l'ouverture du pli en mai 2000. Un numéro spécial des Comptes Rendus

les Döblin s'installent à Paris. Wolfgang, qui vient de terminer ses études secondaires dans un Gymnasium protestant de Berlin, s'inscrit à la rentrée universitaire d'octobre 1933 en licence de mathématiques à la Sorbonne. En novembre 1935, il commence des recherches sur la théorie des probabilités sous la direction de Maurice Fréchet. Paris est alors, avec Moscou, l'un des principaux centres mathématiques intéressés par la nouvelle théorie des probabilités. À l'Institut Henri Poincaré travaillent alors Borel, Fréchet, Darmon, Paul Lévy, Francis Perrin, mais aussi un groupe de jeunes mathématiciens, Fortet, Ville, Loève, Dugué, Malécot, Doebelin qui vont tous soutenir, à la fin des années trente, des thèses mathématiques sur des thèmes probabilistes.

Le jeune Doebelin va obtenir très rapidement des résultats de tout premier plan, notamment dans l'étude à peine ébauchée des processus de Markov, ces mouvements soumis à l'intervention constante du hasard et dont l'avenir ne dépend du passé que par l'intermédiaire du seul présent. On rencontre de tels schémas, en temps discret (1, 2, 3, etc.) ou continu, dans presque tous les domaines de la science théorique ou appliquée, en physique statistique, par exemple dans les phénomènes de diffusion, en génétique des populations, en finance, en actuariat, en téléphonie, etc. C'est vers la fin des années vingt que les mathématiciens, indépendamment de toute idée d'application, entreprennent une étude systématique des processus

montre que les mouvements continus de type markovien, sans mémoire, dépendent essentiellement de deux coefficients qui expriment, à chaque instant, l'amplitude de la composante purement aléatoire (de type gaussien) et la vitesse du déplacement non aléatoire (la "dérive", due par exemple au champ de gravitation ou à la pente du terrain). Ces coefficients, sous des hypothèses analytiques convenables, déterminent la loi de probabilité du mouvement par l'intermédiaire d'une équation aux dérivées partielles, "l'équation de Kolmogoroff", qu'il s'agit de résoudre. En 1938, Wolfgang Doebelin aborde ce problème, l'un des plus difficiles de l'analyse mathématique de cette époque. Il publie une première note sur le sujet à l'automne de la même année.

Les Döblin acquièrent la nationalité française en 1936. Wolfgang, sous le nom de Vincent Döblin, doit faire un service militaire de deux ans. Après la soutenance de sa thèse d'état, il est incorporé en novembre 1938 dans un régiment d'infanterie qui tient garnison à Givet dans les Ardennes. C'est la première fois que Wolfgang quitte ses parents, la première fois aussi qu'il ne peut plus travailler; on sait combien la vie de caserne est peu propice aux recherches théoriques. Vincent est sujet à de profondes crises de cafard. Toutefois, au printemps 1939, alors qu'il suit un peloton d'élèves caporaux, il reprend ses travaux mathématiques et rédige un important mémoire sur la théorie asymptotique des sommes de variables indépendantes, l'un des thèmes tradi-



encore inexploré dont il est l'un des seuls parmi les savants de son temps à apercevoir les beautés et les richesses infinies. Or très peu de ses recherches sont publiées et une part importante n'est pas même rédigée. En novembre 1939, il trouve la force de se remettre au travail, une heure par jour tout au plus et sans doute pendant ses gardes à la cabine téléphonique. Il rédige ses résultats sur le problème de Kolmogoroff. En janvier 1940, après l'alerte sur la Belgique, son régiment est affecté au secteur défensif de la Sarre, et c'est dans un tout petit village lorrain, Athienville, qu'il termine la rédaction du pli cacheté fin février 1940 et qu'il l'envoie à l'Académie. C'est le dernier mémoire de Wolfgang Doebelin. Peu après, son régiment est déplacé à Oermingen dans le Bas-Rhin sur la ligne Maginot. Wolfgang Doebelin entreprend encore de rédiger plusieurs notes sur les processus de Markov généraux dont une seulement sera publiée en mai 1940. Le 17 avril 1940, le 291^e RI monte en ligne sur la boucle de la Blies près de Sarregue-

¹ Directeur de recherche, Laboratoire de statistique, Université René Descartes
² Membre Correspondant de l'Académie des sciences, Professeur à l'Université Pierre et Marie Curie

mines, Wolfgang Doeblin ne peut plus travailler. En mai, il est décoré de la croix de guerre pour avoir rétabli les communications de son bataillon sous le feu de l'ennemi et à partir du 14 juin il participe, avec bravoure et un réel mépris de la mort, aux combats très durs du front de la Sarre jusque dans les Vosges où son régiment, décimé, encerclé, est sur le point de se rendre. Dans la nuit du 20 au 21 juin, il tente de traverser, seul, les lignes allemandes, mais il n'y parvient pas et se tire une balle dans la tête le matin du 21, après avoir détruit tous ses papiers. Ce n'est qu'en avril 1944 que son corps sera identifié, à la suite des recherches entreprises par son amie d'université, Marie-Antoinette Tonnelat, qui deviendra professeur de Physique théorique à la Sorbonne.

dépasse pas une certaine valeur, disons y , en un temps ultérieur t . Tel est le problème de Kolmogorov. Les méthodes employées par Kolmogorov et ses émules sont "analytiques", elles consistent à résoudre une certaine équation vérifiée par la probabilité dont il s'agit. L'approche de Wolfgang Doeblin est tout à fait différente, elle est "trajectorielle" et annonce la théorie moderne des processus développée à partir des années cinquante. Doeblin montre que le mouvement le plus général se décompose en deux parties, dont l'une, la plus stochastique des deux, est une martingale et suit les trajectoires d'un mouvement brownien muni d'une horloge particulière. Le mouvement brownien mathématique est le plus simple des mouvements continus sans mémoire,

démonstration, qui consiste à se ramener à des propriétés de martingale, une notion qui vient juste d'être introduite par J. Ville en 1939, est très novatrice. Elle ne sera pleinement comprise que vingt ans plus tard, lorsqu'il aura été prouvé que toute martingale continue est un mouvement brownien changé de temps. En outre, apparaît dans le pli une ébauche originale du calcul différentiel stochastique, qui avec l'apport d'Itô et de sa célèbre formule, deviendra la clé de voûte de l'édifice probabiliste moderne.

Qu'a-t-on découvert à l'intérieur du pli 11 668, une fois ouvert ? Une vie, trop vite interrompue, qui renaît, et l'esquisse, clairement dessinée, de l'analyse stochastique des années 1950-2000...

Le Comité de l'environnement

Par Jean-Yves Chapron¹

Créé en 1989, le Comité de l'environnement est à l'origine d'une dizaine de rapports de l'Académie des sciences. Il se penche actuellement sur trois dossiers principaux : la surexploitation des ressources biologiques marines, la question des déchets en liaison avec la santé, et l'éducation à l'environnement et à la santé.

Les deux premiers thèmes feront l'objet d'une présentation ultérieure dans ces colonnes.

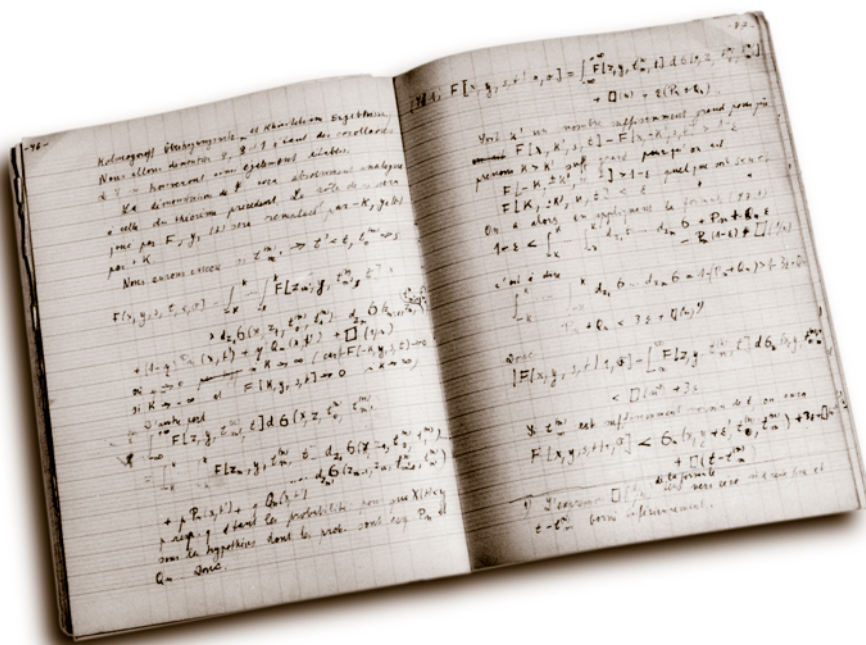
Les travaux sur le troisième thème doivent aboutir à l'automne.

En effet, le Comité a constaté que la perception des problèmes environnementaux et de santé par le public se forme selon une approche simplificatrice et souvent teintée de sensationnalisme. Le propos n'est pas de faire le procès de la presse mais d'insister sur l'importance d'une bonne formation de nos concitoyens pour leur permettre de décoder et d'évaluer les messages médiatiques, et de mettre ainsi en perspective, dans leur complexité, les questions de santé et d'environnement.

Après avoir procédé à plusieurs auditions, le Comité a conclu que le socle des connaissances de base en la matière devait être construit dès l'école élémentaire, et que, précisément, on constatait une insuffisance de la part scientifique de la formation, naturellement polyvalente, délivrée aux professeurs d'écoles. C'est pourquoi, en accord avec les responsables ministériels, et en liaison avec l'Académie de médecine, il a été décidé de rédiger deux "livrets de l'enseignant", l'un consacré à l'environnement, l'autre à la santé. Ces textes, de taille limitée (une trentaine de pages chacun), seront conçus comme des aides pratiques pour les enseignants, et regrouperont des items transversaux. Ils sont destinés à figurer parmi les documents d'accompagnement des nouveaux programmes.

¹ Chargé de mission à l'Académie des sciences

et le Pli cacheté 11 668



Que contient le pli 11 668 ?

On considère une particule soumise à l'action continue du hasard et d'une dérive déterminée. Mathématiquement, la façon dont la particule poursuit son mouvement à partir d'une certaine position x atteinte en un temps donné s peut être décrite par deux coefficients, le coefficient de diffusion et celui de dérive. On se propose de calculer, par exemple, la probabilité que cette particule ne

son étude fine est connue déjà à l'époque de Doeblin, notamment grâce aux travaux remarquables de Paul Lévy. De sorte que le théorème de représentation de Doeblin permet une étude précise des mouvements les plus généraux : étude locale en un point, branches infinies, probabilité d'atteinte de grandes valeurs, etc.

Le théorème de Doeblin ne sera retrouvé que vingt ans plus tard. Sa méthode de

1 Bibliographie

COHN (Harry) Ed.

[1993] Doeblin and Modern Probability, Blaubeuren 1991, Contemporary Mathematics 149, Providence : Amer. Math. Soc., [1993].

DOEBLIN (Wolfgang)

[2000] Sur l'équation de Kolmogoroff, Pli cacheté déposé le 26 février 1940, ouvert le 18 mai 2000, C. R. Acad. Sci. Paris, Série 1, 331 [2000], pp. 1031-1187.

LINDVALL (Torgny)

[1991] W. DOEBLIN 1915-1940, Ann. Prob., 19 [1991], pp. 929-934.

LÉVY (Paul)

[1955] W. Doeblin (V. Doblin) [1915-1940], Rev. Histoire Sci., [1955], pp. 107-115.

La vie des séances



L'académie des sciences et les problèmes de société : "énergies et climat"

Par Claude Lorius¹ et Bernard Tissot²

Au cours de la séance publique du 23 avril 2001 organisée avec la participation des Académies des technologies et des sciences morales et politiques onze exposés ont permis d'engager une réflexion sur un sujet qui représente un défi majeur et très actuel pour notre Société.

Les thèmes successivement abordés touchent d'abord au réchauffement climatique attendu au cours de ce siècle, à la suite des émissions anthropiques des gaz à effet de serre et notamment du dioxyde de carbone (CO₂). Ce réchauffement pourrait être de plusieurs °C, une estimation qui dépend notamment du choix des sources d'énergie ; il aurait de nombreux impacts sur les conditions de vie des populations, liés par exemple à une hausse du niveau des mers et à des épisodes de fortes précipitations dans certaines zones et de sécheresse dans d'autres. Face à de telles conséquences possibles il existe un consensus pour les scientifiques sur la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre, et tout d'abord celles concernant le CO₂.

Ces émissions proviennent pour l'essentiel de l'utilisation des carburants fossiles – gaz naturel, pétrole, charbon – pour la produc-

tion d'énergies nécessaires au développement économique et répondant aux besoins d'une population mondiale de plus en plus nombreuse. Dans ce contexte, économies d'énergie et progrès technologiques ne peuvent et statuer sur le devenir du nucléaire.

les impacts du réchauffement climatique il faudra développer de façon significative les potentialités d'énergies dites renouvelables (solaire, éolienne,...)

La "pollution climatique" liée aux émissions de gaz à effet de serre ne connaît pas de frontière et a des implications politiques planétaires. Les enjeux économiques, qu'il s'agisse de la commercialisation des sources d'énergie ou du coût des impacts liés aux instabilités climatiques, sont considérables. C'est aussi un sujet de préoccupation majeur des médias et du citoyen.

Au terme de cette journée il est apparu nécessaire de poursuivre et de développer la réflexion sur ce thème, "Energie et Climat", dont de nombreux aspects n'ont pu être abordés. Pour n'en citer que quelques uns, agriculture, santé et éducation sont aussi concernés et il est apparu que l'Institut de France et ses cinq Académies pourraient conduire sur ce sujet une réflexion qui associe compétence et indépendance. De plus, les liens que l'Académie des sciences entretient avec l'Académie des technologies et les Académies nationales de médecine et d'agriculture permettraient de participer plus largement au débat sur la mise en place d'un développement durable pour notre Société.

Création d'un Conseil Académique Européen (European Academies' Science Advisory Council)

Par Yves Quééré¹

Diverses initiatives ont été prises, lors des trois dernières années, en vue de doter l'Europe "des 15" d'une instance de conseil scientifique de nature académique. La création d'une Académie européenne (autre que *Academia Europaea*) avait été envisagée, ainsi que diverses autres formules liant de façon plus ou moins formelle – via, ou non, l'Alliance Européenne des Académies, ALLEA – les Académies des sciences existantes.

Une réunion s'est tenue à Stockholm (à l'Académie royale des sciences) les 10 et 11 juin dernier sur ce thème.

La plupart des Académies concernées étaient représentées (la nôtre par Yves Quééré, DRI, et Janine Rondet), ainsi que ALLEA et l'*Academia Europaea* (AE). Le Dr Rainer Gerold représentait la Commission européenne et le Professeur Helge Sorensen, Euro-CASE. Décision a été prise, lors de cette réunion, de créer un Conseil dont le rôle sera de donner des avis, sollicités ou non, aux principales instances européennes (notamment Commission et Parlement) relativement à des questions de nature scientifique ou technique, sous forme de notes ou de rapports rédigés par des experts proposés par les Académies concernées. Les statuts de ce Conseil ont été discutés, amendés et adoptés. Les dix-sept membres du Conseil seront les Présidents des Académies des sciences, ou leur représentant, ainsi que le Président de EA et celui d'ALLEA. Ce dernier devra jouer un rôle important

puisqu'il sera chargé de représenter les Académies des pays européens non-membres de l'Union.

Sur proposition de notre Académie, ont été élus : Président, le Professeur Uno Lindberg, *Foreign Secretary* de l'Académie de Suède ; et Vice-Présidents, les Professeurs Eduardo Vesentini, Président de l'*Accademia dei Lincei*, et Niceas Schamp, Secrétaire perpétuel de l'Académie (flamande) des sciences, lettres et beaux arts de Belgique.

La *Royal Society* accueillera à Londres le secrétariat. Quelques sujets d'études initiales possibles – tels, en particulier, que suggérés par des membres du Parlement européen – ont été évoqués, notamment concernant 1/La réalité physique du réchauffement par effet de serre, 2/Les stratégies, pour l'Europe, en vue de le combattre, et 3/Les nuisances des produits chimiques et les procédés à mettre en œuvre pour les réduire.

¹ Membre de l'Académie des sciences

Visite du Bureau de la Royal Society

Par Yves Quééré

Le Président de la *Royal Society* (RS) Sir Robert May, les deux Vice-Présidents Sir Eric Ash et le Prof. John Enderby, ainsi que le Dr Peter Collins, *Director of Science Policy*, ont rendu visite à l'Académie des sciences (AS) où ils ont été reçus le 6 juin par le Bureau et par le délégué aux Relations Internationales. Cette réunion, qui s'est déroulée dans un climat très chaleureux, entrait dans le cadre des rencontres régulières que les deux Académies pratiquent depuis plusieurs années.

Après description respective des principales activités des deux Académies, en présence des plusieurs Chefs de service de l'AS, les échanges de vues se sont concentrés sur quelques questions particulières et notamment :

- la prochaine création d'un Conseil Académique Européen, composé des Présidents des Académies des sciences des pays membres de l'Union Européenne, ainsi que des Présidents de ALLEA et de *Academia Europaea*, ce Conseil devant nommer des groupes d'experts en vue de rédiger des rapports destinés à la Commission et au Parlement de l'Union ;

- le rôle de l'InterAcademy Panel (IAP) dans la dissémination des informations et le cas échéant, des Déclarations du type de celle que nos Académies ont récemment signée relativement au réchauffement global et au Protocole de Kyoto ;

- la participation de l'AS et de la RS aux travaux de l'IAP, notamment dans le domaine du soutien aux Académies des pays en développement et dans celui de la préparation, en liaison avec l'ICSU, du Sommet de Johannesburg (2002) souvent appelé Rio + 10.

Enfin, diverses actions communes ont été décidées, envisagées, en particulier la rédaction en commun d'un prochain rapport (divers sujets possibles ont été évoqués), l'organisation de colloques AS/RS dont l'un sur les nanotechnologies et notamment sur "l'après silicium", et l'établissement de liens solides entre les deux services d'archives qui sont parmi les plus riches d'Europe dans le domaine des sciences.

¹ Membre de l'Académie des sciences

² Membre Correspondant de l'Académie des sciences, Directeur général honoraire de l'Institut français du pétrole



Drosophile mutante pour un gène de la réponse immunitaire innée n'ayant pas résisté à une infection fongique.

L'immunité innée

Par Jules Hoffmann¹

Dans le domaine de l'immunologie, la quasi-totalité des travaux des derniers 50 ans ont porté sur l'immunité adaptative. Les caractéristiques majeures de cette réponse immunitaire sont la reconnaissance de l'agression microbienne par des récepteurs issus du réarrangement somatique de gènes des immunoglobulines ou du récepteur des cellules T dans les lymphocytes et l'expansion clonale de certaines populations de lymphocytes. Or ces caractéristiques ne sont apparues au cours de l'évolution que chez les poissons vers - 450 millions d'années et l'immunité adaptative est l'apanage de quelque 45000 espèces de vertébrés à l'heure actuelle. Près de 5 millions d'autres espèces animales sont obligées de résister quotidiennement à une infinité d'agressions microbiennes sans disposer d'immunité adaptative. Pour cette résistance, ils se servent de mécanismes généralement regroupés sous le terme d'immunité innée. Les études récentes chez la drosophile ont jeté une lumière nouvelle sur cette immunité et, fait inattendu, on conduit différentes équipes à montrer que cette

forme de l'immunité est conservée chez l'homme chez qui elle joue un rôle extrêmement important dans la stimulation et l'orientation de la réponse adaptative. Un exemple frappant de ces nouveaux développements est la famille des récepteurs Toll. La découverte que le récepteur transmembranaire Toll de la drosophile, décrit initialement pour son rôle dans le développement embryonnaire de cet organisme, contrôle également la défense immunitaire antifongique, a conduit la recherche de molécules homologues chez l'homme et la souris. Aujourd'hui, neuf récepteurs Toll sont connus chez la drosophile et dix récepteurs Toll-like chez les mammifères. Ces derniers reconnaissent et lient différents déterminants structuraux de bactéries (exemples : Toll-like receptor-2 reconnaît le peptidoglycane, Toll-like receptor-4 le lipopolysaccharide). Cette liaison conduit à l'activation de la protéine transactivatrice NF- κ B qui à son tour contrôle l'expression de cytokines pro-inflammatoires et de protéines co-stimulatrices des lymphocytes. Les parallèles entre les voies de signalisation dépendant de Toll chez la drosophile et des récepteurs Toll-like chez l'homme sont frappants au point qu'on évoque ici une réponse immunitaire ancestrale contre les microorganismes, apparue avant la séparation des ancêtres des insectes et des mammifères.

Risques potentiels pour la santé associés aux progrès de la technologie

Par Jean-François Bach¹

La biotechnologie a permis la synthèse de nouveaux médicaments essentiels et l'accès à la modification du génome par le transfert de gènes (transgénèse). Le problème s'est récemment posé des risques pour la santé humaine de l'utilisation alimentaire de plantes transgéniques. La possibilité d'induction de résistance à certains antibiotiques est désormais exclue. Seul persiste le risque de provoquer une réaction allergique au produit du transgène. Mais, en fait, celui-ci est contrôlable pour l'essentiel et ne paraît donc pas justifier l'émoi créé récemment dans le public. Les vaccinations pourraient, en théorie, provoquer certaines maladies auto-immunes selon divers mécanismes, en particulier par mimétisme moléculaire entre l'antigène vaccinal et un antigène du soi. En dépit de certaines affirmations, reposant sur des observations isolées mais non confirmées par des études épidémiologiques à grande échelle, notamment dans le cas récent du vaccin contre l'hépatite B, rien n'indique aujourd'hui que les vaccinations actuelles puissent induire ou aggraver une maladie auto-immune. Il ne faut pas sous-estimer l'effet délétère d'affirmations non contrôlées qui peuvent faire arrêter des campagnes de vaccinations et, par là-même, être à l'origine de la résurgence des maladies infectieuses.

A l'inverse, la diminution des maladies infectieuses, liée aux progrès de l'hygiène et de la médecine, pourrait jouer un rôle essentiel dans l'augmentation des maladies allergiques et auto-immunes observées dans les pays développés au cours de ces trois dernières décennies. D'importantes données épidémiologiques, fondées sur la comparaison de la fréquence de ces maladies dans différents pays et sur l'étude des populations migrantes, le suggèrent fortement. L'hypothèse est corroborée par des données expérimentales et une première confirmation thérapeutique dans la dermatite atopique après infection délibérée par un lactobacille non pathogène. Trois situations médicalement sensibles, où l'objectivité scientifique est de rigueur et peut déboucher sur des mesures de grande portée pour la Santé Publique.

Prix et nominations

Le mathématicien français **Alain Connes**, Membre de l'Académie des sciences, Professeur au Collège de France, a reçu le 25 septembre le **Prix Crafoord 2001** " pour ses travaux importants dans le domaine de la théorie des algèbres d'opérateurs et pour avoir été l'un des fondateurs de la géométrie non-commutative ". Ce prix décerné par l'Académie royale des sciences de Suède est doté d'une médaille d'or et de 500 000 dollars. Le Prix Balsan est décerné chaque année depuis 1961 par la Fondation internationale Balsan à raison de deux prix dans le domaine des lettres, sciences morales et arts et deux autres prix dans celui des sciences physiques, mathématiques et médicales. Les **Prix Balzan 2001** dans les domaines scientifiques ont été attribués à MM **Jean-Pierre Changeux**, Membre de l'Académie des sciences, Professeur au Collège de France et **Claude Lorius**, Membre de l'Académie de recherche et Directeur de recherche émérite au CNRS.



la lettre n° 2/ 2001
de l'Académie des sciences

Publication de l'Académie des sciences

23, quai de Conti 75006 PARIS
Tel : 01-44-41-43-68
Fax : 01-44-41-43-84
http : www.academie-sciences.fr

Directeur de publication :
Nicole Le Douarin

Directoire :
Nicole Le Douarin
Jean Dercourt

Rédacteur en chef :
Jean-Didier Vincent

Secrétariat général de rédaction :
Marie-Christine Brissot

Conception graphique
Direction artistique
Nicolas Guilbert/Tatou

Photographies :
Pages 1, 5, 9, 18, 20 Nicolas Guilbert
Pages 2, 3, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 16,
17, 20 D.R.

Comité de rédaction :
Jean-François Bach, Roger Balian,
Jack Blachère, Edouard Brézin,
Pierre Buser, Paul Caro,
Jules Hoffmann, Alain Pompidou,
Pierre Potier, Eric Spitz,
Jean-Christophe Yoccoz

Photogravure & impression :
Edipro/Printreference™
01 41 40 49 00

¹ Membre de l'Académie des sciences,
Directeur de recherche CNRS

¹ Membre de l'Académie des sciences,
Professeur à l'Université René Descartes