

N° 211 JUIN 2000

SCIENCE & VIE

HORS SÉRIE

| | | |
|---------------|-------|---|
| Dépouillement | 2 | 2 |
| Photocopies | 69/00 | 0 |
| Numérisation | | 0 |
| Présaisie | 02 | 0 |

**Le bilan
de l'eau
en France**
Pollution,
hausse
des prix, etc.

**L'eau dans
le monde**
Pénurie :
comment fixer
les priorités

**Exclusif
Texas :**
des fermiers
high-tech luttent
contre le désert



Menaces sur l'eau

Comment éviter
une crise mondiale

T 2579 - 211 - 25,00 F - RD



PASSIONNEMENT

Les chercheurs et les équipes de Lyonnaise des Eaux ouvrent, chaque jour, de nouvelles voies à l'assainissement pour que les eaux soient rendues encore plus propres à la nature

BEAUCOUP

D'ici 2002, la France
aura renforcé ses
normes pour améliorer
la qualité des eaux
rejetées



LYONNAISE
DES EAUX
PAR RESPECT DE L'EAU

N PEU

aujourd'hui, en

Les crises de l'eau

Aussi vitale qu'inégalement répartie par la nature à la surface de la planète, l'eau est de plus en plus souvent évoquée comme un, voire LE problème majeur du XXI^e siècle : à terme, nous explique-t-on, on va devoir la partager non seulement entre des populations mais aussi entre des usages. C'est en effet probable, pour autant qu'on réussira à s'entendre.

Ce problème revêt en fait des formes très différentes. Il varie dans ses termes selon la zone géographique concernée, le degré de développement économique des nations qui s'y trouvent, ainsi que leur croissance démographique et leurs relations de voisinage. Tous ces facteurs se combinent pour générer des crises de gravité variable et qui n'impliquent d'ailleurs pas le même type de solutions.

Dans les pays industrialisés, situés, pour la plupart, sous les latitudes bien arrosées de l'hémisphère Nord, la crise ne provient pas d'un manque de précipitations. La difficulté ne porte pas sur la rareté de l'eau mais sur l'état dans lequel elle se trouve. En France, par exemple, la qualité des eaux de surface et des eaux souterraines s'est en moyenne dégradée à la suite de plusieurs décennies de densification de la production industrielle et d'agriculture à haut rendement. Ce type de problèmes, cependant, ne constitue pas forcément un défi irrelevable pour un pays comme le nôtre, où, sauf cas accidentels, la question de l'eau ne se pose plus depuis longtemps en termes de santé publique. Ce qui est ici en jeu, c'est en réalité l'édiction et le respect de normes portant sur la qualité de l'eau dans ses différents usages, dans des nations qui rassemblent à la fois les compétences techniques, les capacités financières et des pouvoirs de contrôle et de régulation efficaces. Un processus de renforcement de ces normes est d'ailleurs déjà enclenché dans les nations riches du Nord et il commence à porter ses fruits.

Tout autres sont les situations dans les pays du Sud où, souvent, facteurs naturels, démographiques et économiques se combinent pour créer les plus mauvaises conditions d'accès à l'eau.

N'était l'ampleur des efforts à faire, le cas le moins difficile à résoudre, en principe, serait celui où, l'eau existant en quantité suffisante, la question ne porte que sur la construction de réseaux d'adduction d'eau propre et d'évacuation des eaux usées. Là, l'enjeu est moins de nature technique, voire financière, que politique et administrative : pouvoirs centraux débordés par la croissance d'une urbanisation sauvage qu'ils veulent tenir pour éphémère; incapacité d'organiser un service minimal de l'eau.

Par nature beaucoup plus difficiles à résoudre sont, en revanche, les cas, nombreux, où, aux facteurs précédents, vient s'ajouter la rareté des précipitations. Là, comme un vent violent propage toujours plus efficacement l'incendie, tous les facteurs négatifs se renforcent mutuellement. Il résulte de cette conjugaison une tension permanente sur la disponibilité en eau, situation toujours susceptible de dégénérer en catastrophe.

Le pire, dès lors, est-il le plus sûr? Pas nécessairement, ce que ce numéro vise à expliquer. A l'émergence de technologies de dessalement de l'eau de mer économiquement plus accessibles, s'ajoutent aujourd'hui des perspectives de gestion à la fois plus économe et plus efficace de l'eau. En la matière, les fermiers texans ne représentent sans doute pas l'avenir du monde. Ils sont d'ailleurs les premiers à en convenir. Certains, dans le monde, auraient cependant tort de ne pas s'intéresser de près à ce qu'ils font.

PUBLIÉ PAR EXCELSIOR PUBLICATIONS S.A.
1, RUE DU COLONEL PIERRE AVIA 75503 PARIS
CEDEX 15 — TEL : 01 46.48.48.48

EXCELSIOR PUBLICATIONS S.A.
CAPITAL SOCIAL : 10 733 500 F — DURÉE 99 ANS

PRINCIPAUX ASSOCIÉS :
MELLE YVELINE DUPUY, M. PAUL DUPUY.

DIRECTION ET ADMINISTRATION :
PRÉSIDENT-DIRECTEUR GÉNÉRAL : PAUL DUPUY,
DIRECTRICE GÉNÉRALE : YVELINE DUPUY,
DIRECTEUR GÉNÉRAL : JEAN-PIERRE BEAUVALET,
DIRECTEUR GÉNÉRAL ADJOINT : FRANCOIS FAHYS,
DIRECTEUR FINANCIER : JACQUES BÉHAR,
DIRECTRICE MARKETING : MARIE-HÉLÈNE ARBUS,
DIRECTEUR COMMERCIAL MD : PATRICK-ALEXANDRE SARRADEIL,
DIRECTRICE DES VENTES : CHANTAL CONTANT,
DIRECTEUR DES ÉTUDES : ROGER GOLDBERGER,
DIRECTEUR DE LA FABRICATION : PASCAL RÉMY.

RÉDACTION :
JEAN-PIERRE ICIKOVICS (RÉDACTEUR EN CHEF),
ANNE LEFÈVRE, LAURE SCHALCHLI (RÉDACTRICES EN
CHEF-ADJOINTES), PATRICIA CHAIROPOULOS, ALICE
ROLLAND, EMMANUEL MONNIER, GUILLAUME ORVAS
(RÉDACTEURS), NAJAT NEHME (SECRÉTAIRE DE
RÉDACTION), SOPHIE DORMOY (ICONOGRAPHE), ALINE
HOUILLOIN (SECRÉTAIRE),
DENIS MALARTRE, JEAN-LOUIS BOUSSANGE
(MAQUETTISTES), MONIQUE VOGT (SERVICE LECTEURS)

SERVICES COMMERCIAUX :
RELATIONS EXTÉRIEURES : MICHELE HILLING; ABONNEMENTS :
PATRICK SARRADEIL. COMMANDES D'ANCIENS NUMÉROS ET
RELIURES : CHANTAL POIRIER TEL : 01 46 48 47 18 RELATIONS
CLIENTÈLES ABONNÉS : TEL : 01 46 48 47 08 OU 47 11 SERVICE
DES ABONNEMENTS 1 RUE DU COLONEL PIERRE AVIA 75503
PARIS CEDEX 15, CHEF DE PRODUIT MARKETING : CAPUCINE
JAHAN TEL : 01 46 48 47 30, VENTE AU NUMÉRO : CHANTAL
CONTANT ASSISTÉE DE MARIE CRIBIER, RÉASSORT ET
MODIFICATIONS : TERMINAL E 91, TÉL. VERT :
0 800 43 42 08 (RÉSERVÉ AUX DÉPOSITAIRES DE PRESSE).

PUBLICITÉ :
DIRECTEUR COMMERCIAL PUBLICITÉ : OLIVIER MEINVIELLE,
DIRECTEUR DE PUBLICITÉ : DIDIER DERVILLE (HORS-SÉRIE)
TEL: 01 46 24 16 66. FAX : 01 46 24 25 40.
EXCELSIOR-PUBLICITÉ INTERDECO 23 RUE BAUDIN — BP 311 —
92303 LEVALLOIS CEDEX — TEL : 01 41.34.82.00.
FAX : 01.41.34.82.83.

TARIFS D'ABONNEMENTS SUR SIMPLE DEMANDE
TÉLÉPHONIQUE AU 01 46 48 47 17 OU SUR abomag.com
Aux CANADA et U.S.A. PERIODICA INC. CP 444
OUTREMONTOUQUÉ, CANADA H2V 4R6; En SUISSE, NAVILLE
Case Postale 1211, GENEVE 1 - SUISSE;
EN BELGIQUE, PRESS-ABONNEMENTS AVENUE DES VOLON-
TAIRES 103 — BTE 11/12 1160 BRUXELLES,
TARIFS ET AUTRES PAYS NOUS CONSULTER.

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION : PAUL DUPUY —
DÉPÔT LÉGAL N° 84007 — N° DE COMMISSION PARITAIRE :
57284 DU 15 DÉCEMBRE 1975 — PHOTOGRAVURE GOUSTARD.
IMPRIMERIE NIAG — PRINTED IN ITALY.

ENCART ABONNEMENT BROCHÉ DANS SCIENCE
& VIE HORS-SÉRIE. DIFFUSION VENTE AU
NUMÉRO FRANCE MÉTROPOLITAINE

Menace

Éditorial 1

H₂O :
l'étoffe de la vie 4

PAR ALICE ROLLAND

Un cycle
en équations 12

PAR CAROLINE WITTEW,

Adjointe à la Direction de la
recherche au BRGM, Orléans
DOMINIQUE THIÉRY,
Chef de projet au BRGM, Orléans
JOËL NOILHAN,
Météo France, Toulouse

Qu'est-ce qu'une
nappe aquifère? 20

PAR THIERRY POINTET

Ingénieur au BRGM, Orléans

La longue route des
eaux minérales 26

PAR PHILIPPE NÉGREL

Chercheur au BRGM, Orléans

L'eau en France

Fleuves et rivières :
l'état des lieux 32

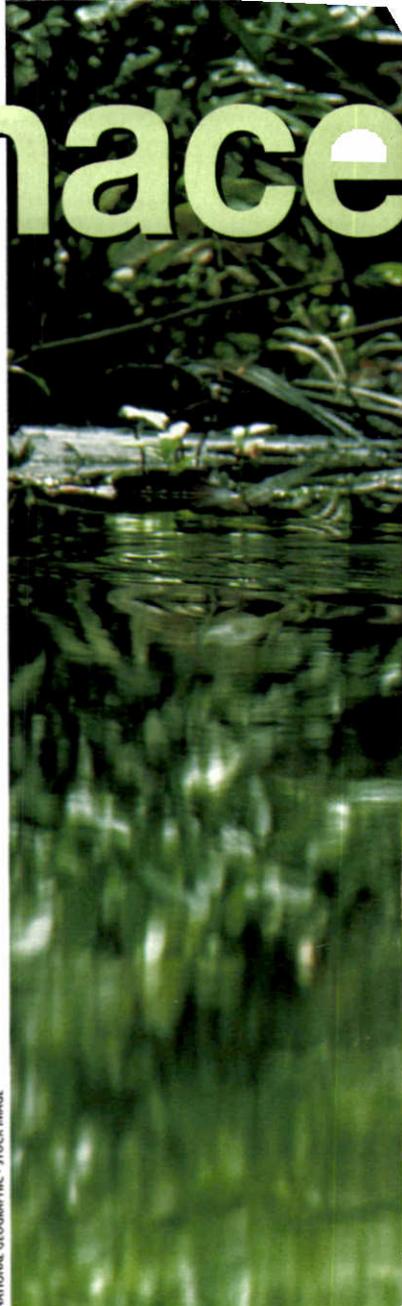
PAR MURIELLE VIGNEAU-
HERMELIN

L'eau des nappes :
il faut changer
de conduite 46

PAR THIERRY POINTET

Une gestion très
privée 56

PAR YVES LEERS



NATIONAL GEOGRAPHIC - STOCK IMAGE

Pollution agricole :
une gestion
impossible? 60

PAR ANNE DEBROISE

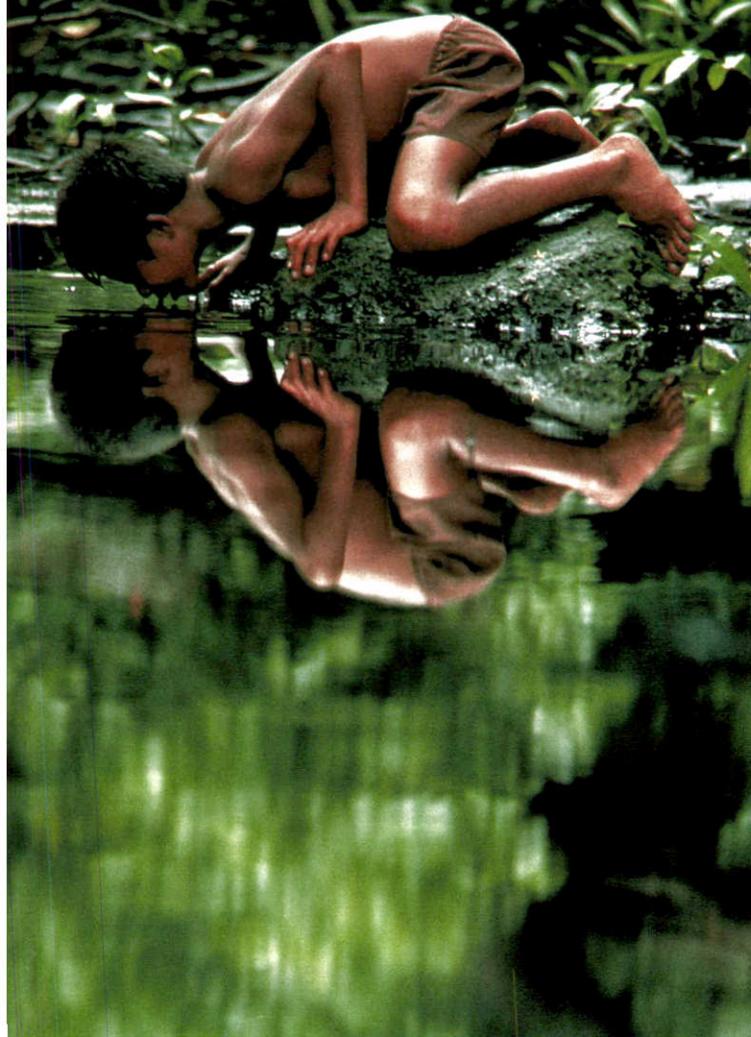
Industrie : la voie
du recyclage 68

PAR ANNE DEBROISE

PHOTOGRAPHIE DE COUVERTURE : SLIDE

s sur l'eau

67 / 15423
67115423



Entre source et robinet : un tamis serré de normes 76
PAR PATRICIA CHAIROPOULOS

Epurier, décanter, assécher 84
PAR HERVÉ LABAQUERRE
Ingénieur en chef à la Direction technique et de la recherche, Lyonnaise des eaux, Paris

Sous Paris, un vaste réseau 90
PAR JÉRÔME LABEYRE

Les métiers de l'eau 98
PAR MURIELLE VIGNEAU-HERMELLIN

Deux Français captent l'eau du monde 104
PAR DOROTHÉE BAYER

L'eau dans le monde

Les conséquences d'une pénurie annoncée 110
PAR SOPHIE COISNE

Cahier photos : Fleuves en sursis 117
PAR SOPHIE COISNE

Australie : un exemple à suivre ? 122
PAR DANIEL CONNELL
Murray-Darling Basin Commission, Australie

De l'eau pour tous 128
PAR SOPHIE COISNE

Brèches dans les barrages 134
PAR STÉPHANE FOUcart

Texas : produire plus avec moins d'eau 142
PAR EMMANUEL MONNIER

Dessaler, recycler, déplacer 154
PAR STÉPHANE FOUcart

**RECEVEZ
SCIENCE
ET VIE
CHEZ VOUS**

Votre bulletin d'abonnement se trouve en page 67

H₂O : l'étoffe

An aerial photograph of a vast, arid desert landscape. The terrain is a mix of light brown and tan colors, with numerous deep, dark cracks and fissures crisscrossing the ground, indicating extreme dryness. The horizon line is visible in the upper third of the image, with a clear blue sky above it. A black rectangular text box is positioned on the left side of the image, containing white and red text.

Un cycle perpétuel

Avec 1,35 milliard de kilomètres cubes, les océans constituent le principal réservoir d'eau, d'où démarre le cycle des précipitations qui « arrosent » notre planète. Sur les 430 000 km³ d'eau qui s'en évaporent, 40 000 retombent sur les continents.

de la vie

An aerial photograph of a vast, flat, arid landscape, possibly a salt flat or a desert. The terrain is a mix of light brown and tan colors, with scattered, low-lying clouds or patches of white. The horizon line is dark and straight, suggesting a high-altitude or high-angle view. The overall scene is desolate and emphasizes the scarcity of water in such an environment.

Apparue sur Terre il y a quelque 3,5 milliards d'années, l'eau se déplace en permanence, à des vitesses et des densités diverses. 97,5 % de ce stock d'or bleu sont salés, donc impropres à la consommation. Autant dire que la quantité d'eau douce dont nous disposons, indispensable à la vie, constitue l'un des biens les plus précieux de notre

Observons le parcours d'une simple goutte d'eau, évaporée, par exemple, des eaux chaudes du Gulf Stream. Transportée par les vents qui balaient l'Atlantique, elle va demeurer, en moyenne, 8-9 jours dans l'atmosphère – c'est ce que l'on appelle le temps de résidence. Emportée par les perturbations atmosphériques, elle se retrouve prisonnière de l'un de ces nuages qui recouvrent 60 % de la surface de la Terre. Devenue trop lourde pour être soutenue par l'air, notre goutte retombe en flocon de neige sur le sommet des Alpes. Si elle tombe du côté ombragé de la montagne, elle est incorporée au glacier, où elle peut rester piégée pendant des siècles. En revanche, si elle tombe du côté ensoleillé, elle fond en quelques mois et redescend vers la plaine par les rivières, ruisseaux et cours d'eau.

De là, une route directe l'entraîne de la rivière vers l'Isère, le Rhône, puis la mer, d'où elle s'évaporera de nouveau. D'autres voies, plus détournées, lui promettent des fins différentes. La première lui fait ainsi emprunter un cours d'eau et traverser une plaine, où, pompée par la végétation, elle contribue à la croissance des pommiers; la deuxième la fait pénétrer dans un lac, où elle restera piégée; enfin, la troisième l'entraîne dans les sous-sols, par lesquels, après un long ruissellement souterrain, elle pourra rejoindre les mers.

Cette eau, qui nous entoure et nous constitue, n'est cependant pas née de la dernière pluie. A contre-courant, remontons l'histoire.

Dans les premiers instants de l'Univers, les particules élémentaires se sont combinées pour donner naissance à des atomes d'hydrogène, d'hélium et de lithium. En quelques millions d'années, il s'est formé, dans le cœur incandescent de ces étoiles, le carbone, les métaux, l'oxygène et l'azote.

Lorsque les étoiles ont dispersé leur matière dans l'Univers (lors des explosions de supernovae), les atomes se sont liés entre eux. Ils ont ainsi formé les premières molécules (monoxyde de carbone, eau, méthane ou ammoniac), associant les quatre éléments chimiques de la matière vivante : l'hydrogène, l'oxygène, le carbone et l'azote.

Par un phénomène d'accrétion, les poussières cosmiques se sont accumulées pour donner naissance aux planètes, dont la nôtre. En s'échauffant, le noyau très dense de la Terre a libéré les particules. Par les fissures de la croûte terrestre, se sont ainsi échappés l'eau, le gaz carbonique et l'azote. A mesure que les températures se sont élevées, l'atmosphère s'est emplie de vapeur d'eau. Les nuages se sont accumulés. Et ce fut le déluge. Les eaux du ciel sont retombées pour former les océans. C'était il y a 3,5 milliards d'années. Et depuis, la planète gère une masse d'eau de 1,35 milliard de km³.

UNE QUANTITÉ FINIE, MAL RÉPARTIE

L'eau recouvre les trois quarts de notre planète. Sa quantité est finie. Elle ne disparaît pas, elle ne se crée pas non plus. 97,5 % de sa masse se trouvent dans les océans. L'eau douce ne représente que 37800 km³. Il y a quelque 15000 ans, la fonte des glaciers, précédant notre période actuelle, a fait monter le niveau de la mer de 120 mètres. Une petite proportion de cette énorme masse d'eau douce s'est alors infiltrée dans le sous-sol, mais la majeure partie a coulé vers la mer, par l'intermédiaire du cycle de l'eau passant par l'atmosphère.

L'eau, nous l'avons vu, se déplace en permanence des océans à la terre, puis de nouveau aux océans. Son cycle perpétuel complet se déroule donc en trois phases : évaporation (l'air humide



est réchauffé par l'énergie du Soleil) – précipitations – ruissellement et infiltration. En dépit de ce cycle immuable, l'eau est et sera toujours inégalement répartie. A cela, trois raisons majeures. La rotation de la Terre, qui engendre une distribution non uniforme de la chaleur nécessaire à l'évaporation. La dérive des continents et l'émergence des plaques, qui ont entraîné une répartition irrégulière des océans, beaucoup plus présents au Sud qu'au Nord. Enfin, les précipitations, qui sont toujours liées à la convergence des masses d'air humide.

De fait, notre planète n'est pas uniformément « arrosée ». Au-dessus de l'Équateur, l'air chaud et humide perd son eau en s'élevant. Ainsi, au niveau des Tropiques, vers 23° de latitude nord et sud, l'air est totalement sec lorsqu'il redescend. L'absence de précipitations à cette latitude a donc entraîné l'apparition de vastes étendues désertiques en Australie, au Sahel, dans le sud-ouest des États-Unis et au Mexique. De la même manière, mais avec des températures trop froides cette fois-ci, il ne pleut quasiment jamais aux pôles.

A contrario, d'autres régions du globe connaissent d'abondantes précipitations. C'est le cas du nord de l'Équateur, de la côte nord-ouest des États-Unis, du sud du Chili, ou des contreforts de l'Himalaya, en Inde.

Entre les deux, l'Europe parvient à tirer son épingle du jeu. Située à l'est de l'océan, elle reçoit les masses d'air humides issues de l'évaporation des parties les plus chaudes de l'Atlantique. Cependant, comme partout ailleurs sur le globe, ses chaînes montagneuses, en bloquant les eaux, orientent inégalement les précipitations.

Ces disparités climatiques créent fatalement de fortes inégalités quant aux ressources hydriques

Puissant dissolvant

Infiltrées dans les sols, les eaux souterraines (8 200 000 km³ au total) dissolvent les sels minéraux, en particulier le calcaire. Celui-ci, en précipitant dans les grottes, se dépose sous forme de stalactites ou de stalagmites.

Passage obligé

La croissance des végétaux mobilise une très grande quantité d'eau. La majeure partie ne fait que les traverser, et réintègre le cycle de l'évapotranspiration, qui, sur une année, représente 70 000 km³ d'eau.

dont disposent les pays. Or, l'eau et le vivant sont intimement liés, le second s'étant construit dans le premier. L'occupation des terres émergées, par les végétaux, a débuté il y a 3 milliards d'années. Des arthropodes y ont fait leur apparition, il y a 550 millions d'années, suivis, 100 millions d'années plus tard, par les vertébrés. Tous les systèmes vivants comportent une proportion remarquable d'eau. L'ensemble des processus physiologiques et biochimiques de la vie se déroule en milieu aqueux. De l'embryon à l'adulte, de l'herbe à l'arbre centenaire, de la fourmi à la baleine, tous se construisent autour et avec de l'eau.

LA CRAINTE DU STRESS HYDRIQUE

Trois grandes activités se répartissent l'utilisation des 2,5 % de la réserve totale d'eau douce. L'agriculture en consomme 70 %, dont seulement 25 % retournent dans le pool des eaux de ruissellement, le reste réintégrant le cycle de l'eau, à la suite de l'évapotranspiration; les industries 20 %; la consommation domestique 10 %. En moyenne, un Américain consomme 700 litres d'eau par jour, un Européen 200, un Israélien 260, un Palestinien 70, un Africain 30, un Haïtien 20.

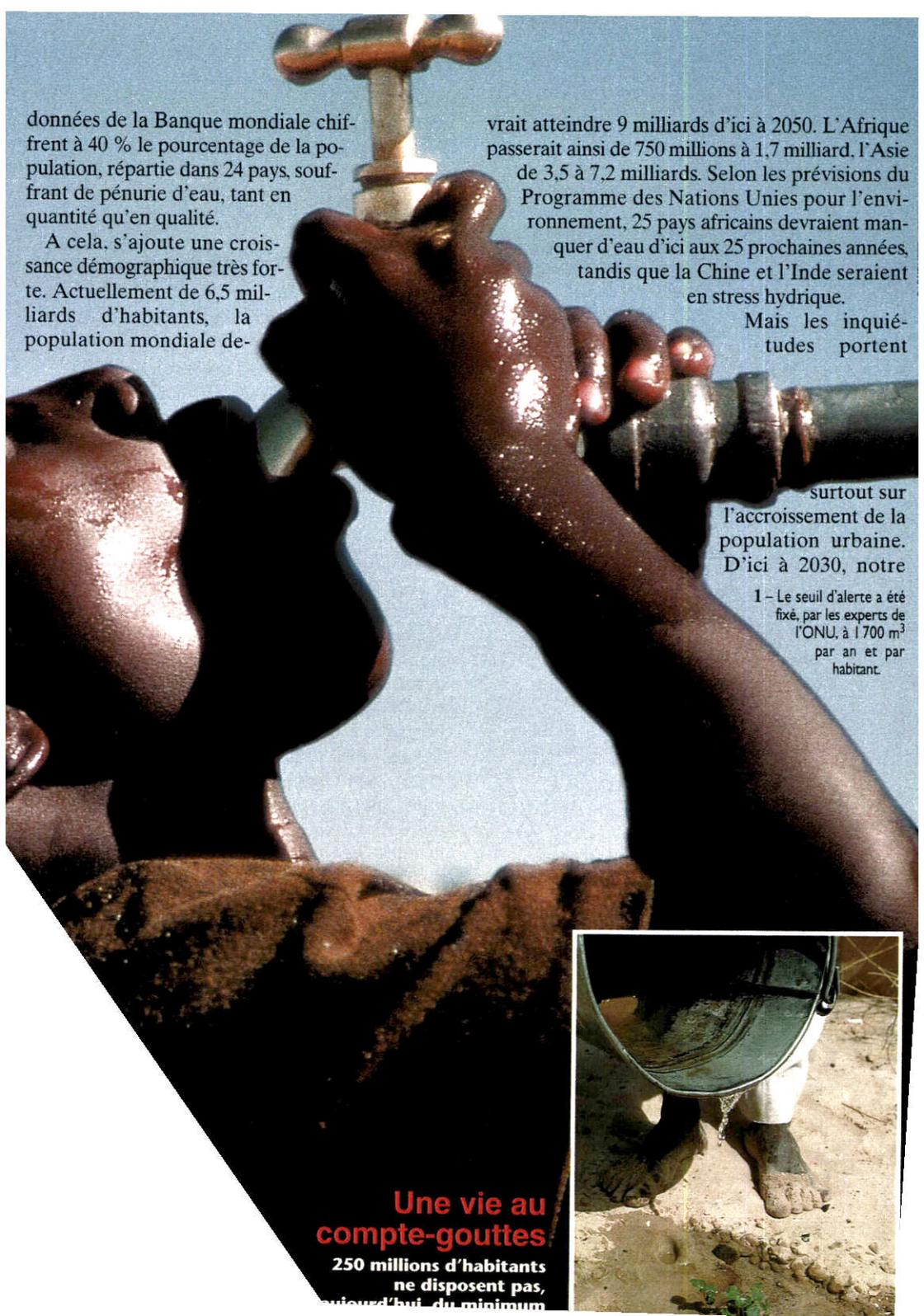
Sur les 40 000 km³ annuels d'eau de ruissellement, l'activité humaine en prélève et détourne 20 %. Mais entre États, les disparités sont, là encore, considérables. En Alaska, Guyane, Norvège, Islande et au Gabon, très riches en eau, le prélèvement est infime. En Europe, la ponction opérée par les nations s'échelonne de 5 % en Hongrie à 50 % en Bulgarie et en Ukraine, pour atteindre 70 % en Belgique. Mais dans la péninsule Arabique, en Israël, Libye, à Djibouti et dans certaines régions du sud-ouest des États-Unis, ce taux atteint et dépasse parfois les 100 %. Quant à l'Arabie Saoudite, elle pompe l'eau des nappes phréatiques à un pourcentage qui excède largement leur reconstitution (plus de 10 fois la ressource renouvelable).

En théorie, sur une population mondiale de 6 milliards d'individus, chacun devrait disposer de

6 700 m³ annuels d'eau. Or, les variations du volume des précipitations et de la densité de population entraînent de très grands écarts. La Chine, qui concentre 21 % de la population, ne reçoit que 7 % des précipitations; l'Amazonie, elle, pour seulement 0,3 % d'habitants, en récolte 15 %. Autre problème, certains gisements d'eau douce, au Congo ou au Canada, sont inexploités car jugés inaccessibles, alors qu'en Afrique, les réserves accessibles sont à peine supérieures à la population.

Selon le Water Resources Institute, 26 pays – soit 250 millions d'individus – ne disposent pas,

aujourd'hui, du minimum vital d'eau, défini à 1 000 m³ par habitant et par an. 400 millions de personnes vivent en situation de « stress hydrique », estimé entre 1 000 et 2 000 m³ annuels par habitant ⁽¹⁾. Et les



données de la Banque mondiale chiffrent à 40 % le pourcentage de la population, répartie dans 24 pays, souffrant de pénurie d'eau, tant en quantité qu'en qualité.

A cela, s'ajoute une croissance démographique très forte. Actuellement de 6,5 milliards d'habitants, la population mondiale de-

vrait atteindre 9 milliards d'ici à 2050. L'Afrique passerait ainsi de 750 millions à 1,7 milliard, l'Asie de 3,5 à 7,2 milliards. Selon les prévisions du Programme des Nations Unies pour l'environnement, 25 pays africains devraient manquer d'eau d'ici aux 25 prochaines années, tandis que la Chine et l'Inde seraient en stress hydrique.

Mais les inquiétudes portent

surtout sur l'accroissement de la population urbaine. D'ici à 2030, notre

1 - Le seuil d'alerte a été fixé, par les experts de l'ONU, à 1 700 m³ par an et par habitant.

**Une vie au
compte-gouttes**

250 millions d'habitants
ne disposent pas,
aujourd'hui, du minimum



A vendre, à louer

Dans les pays en développement, l'agriculture accapare jusqu'à 95 % de l'eau disponible. Aussi, en Asie du Sud-Est, les industries n'hésitent pas à racheter ou louer leurs rizières aux exploitants dans le seul but de profiter des réserves d'eau.

planète devrait compter une quarantaine de mégapoles de plus de 10 millions d'habitants et 600 agglomérations de plus d'un million d'âmes. Les urbains formeraient ainsi 60 % de la population, contre 46 % en 1996.

DES USAGES CONCURRENTS

Face à ces nouveaux besoins domestiques et industriels, la demande d'approvisionnement en eau va croître dans des proportions similaires. Or, le volume actuel alloué à ces secteurs ne suffira pas à satisfaire leurs exigences. Des choix, relatifs aux usages à privilégier, vont alors s'imposer. Il est clair que l'agriculture devra céder une part du volume d'eau qu'elle utilise. Mais nul ne peut aujourd'hui en évaluer la mesure ni garantir une redistribution équitable. La Chine, par exemple, compte aujourd'hui 600 villes, contre 130 en 1949. Et les études des Nations Unies prévoient qu'en 2025, elles abriteront plus de la moitié de la population chinoise. Depuis plusieurs années, l'urbanisation galopante a donc contraint les autorités chinoises à transférer une partie du volume d'eau destiné à l'agriculture vers les villes. On estime en effet que le nombre d'emplois et la valeur économique induits par un seul mètre cube d'eau « industriel » sont 70 fois supérieurs à ceux d'un mètre cube d'eau « agricole ». Or, au nord du pays, cette redistribution s'est faite au détriment des fermiers. D'une part, leur réserve d'eau a largement diminué; d'autre part, les industries réinjectent, dans le pool de ruissellement, des eaux fortement polluées, que, de ce fait, le gouvernement chinois interdit aux agriculteurs d'utiliser.

L'Inde, le Pakistan et l'île de Java connaissent des situations identiques. Dans certaines régions, les industries rachètent ou louent leurs rizières aux agriculteurs, dans le seul but de profiter de leurs réserves d'eau – plantations qu'ils laissent en friche une fois l'affaire conclue. En Arizona, Californie et dans le Colorado, la compétition entre villes et campagnes s'intensifie. Les premières rachètent aux secondes leurs droits d'accès aux réserves d'eau. Contraints par des intérêts économiques supérieurs, les exploitants agricoles n'ont donc plus la possibilité et/ou les moyens de conserver des terres devenues improductives par manque d'eau. Ils rejoignent alors les villes, grossissant malgré eux le rang des urbains souffrant déjà de la rareté de l'eau. Alors qu'en Thaïlande, Malaisie, Indonésie, Corée du Sud et aux Philippines, on puise allégrement dans les sous-sols l'eau nécessaire à l'irrigation et l'entretien de quelque 550 parcours de golf, à Manille, les habi-

tants des quartiers pauvres s'approvisionnent directement à ces réservoirs que les mesures d'hygiène ignorent.

L'EAU, SOURCE DE CONFLITS

Car il est un autre problème que bon nombre de nations doivent affronter : bénéficier d'une eau de qualité (voir l'article de Sophie Coisne dans ce numéro), et d'accès facile. Plusieurs pays se sont en effet formés autour d'axes fluviaux. Aujourd'hui, le tiers des frontières entre États est délimité par des fleuves et des lacs, et on dénombre plus de 200 bassins. Alors que le débit des fleuves qui les parcourent suffit à couvrir leurs besoins, certains pays sont néanmoins confrontés aux limites d'approvisionnement que leur imposent les nations contrôlant les bassins de réception de ces mêmes fleuves. Cette situation, très courante, constitue l'un des éléments majeurs de la géopolitique de l'eau d'aujourd'hui. Et l'histoire a souvent fait d'elle l'un des enjeux des conflits entre États : bombardement des rizières au Vietnam durant la guerre, destruction des stations de pompage ou d'épuration au Liban, en Bosnie ou en Serbie, populations assoiffées au Kosovo.

Dans la crainte de pénuries à venir, les pays traversés par de grands fleuves transfrontaliers

tentent donc de s'appropriier les réserves d'eau encore disponibles. Le Soudan, l'Éthiopie et l'Égypte se disputent le bassin du Nil, réserve d'eau douce pour l'alimentation et l'irrigation. Au Proche-Orient, où le conflit hydropolitique est l'un des plus menaçants, la Palestine conteste à Israël l'usage des nappes phréatiques des Territoires occupés, dont elle tire les deux tiers de ses eaux. Près de la moitié des installations hydrauliques d'Israël sont en effet situées dans des régions qui, avant 1967, étaient hors de ses frontières. Parallèlement, l'État juif dispute le Jourdain à la Jordanie et contrôle le Golan, dont elle interdit l'accès à la Syrie et au Liban. La maîtrise des bassins du Tigre et de l'Euphrate, dont dépendent la Turquie, la Syrie et l'Irak, demeure l'une des priorités des États du « Croissant fertile », dont 50 % des habitants vivent de l'agriculture. Enfin, le fleuve Indus est l'un des composants du conflit entre l'Inde et le Pakistan, qui, par ailleurs, exerce déjà un contrôle sur le Gange et le Brahmapoutre.

Les Nations Unies estiment à une trentaine seulement le nombre d'États capables, en 2050, de subvenir à leurs propres besoins. Si, depuis une dizaine d'années, la question de l'eau s'est imposée comme l'une des priorités de la Communauté internationale, il reste, aux dires des experts de l'ONU, à la reconnaître comme un bien rare et stratégique, au même titre que le pétrole.

« En reconstituant le climat d'Afrique orientale au dernier millénaire, à partir d'indices recueillis dans les sédiments d'un lac, une équipe de chercheurs a confirmé que l'état des ressources hydriques des sociétés humaines est intimement lié à leur développement ou leur déclin » (2). Que faut-il ajouter? □

2 - Le Monde, 28 janvier 2000.

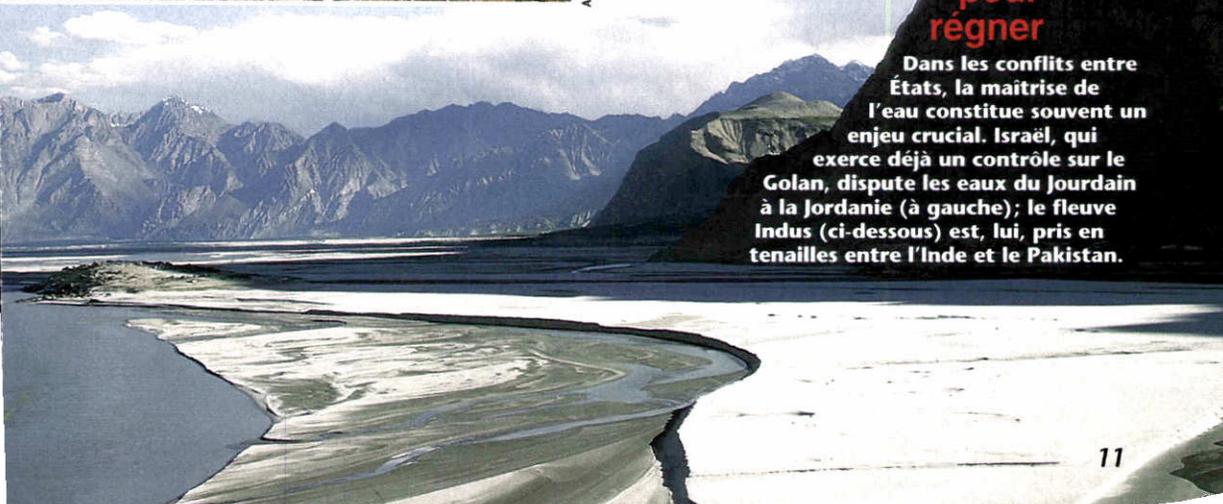


A. AVAKIAN - CONTACT PRESS IMAGES

BOISVEUX/NE - HOAQUI

Contrôler pour régner

Dans les conflits entre États, la maîtrise de l'eau constitue souvent un enjeu crucial. Israël, qui exerce déjà un contrôle sur le Golan, dispute les eaux du Jourdain à la Jordanie (à gauche); le fleuve Indus (ci-dessous) est, lui, pris en tenailles entre l'Inde et le Pakistan.



Un cycle en équations

L'eau de notre planète se trouve sous des formes diverses, en raison des conditions physiques et de la variété de notre environnement. L'état de l'eau le plus abondant est l'état liquide qui caractérise les océans, mais encore les cours d'eau et les lacs à la surface des continents. Une partie importante de l'eau douce est aussi stockée à l'état solide sous forme de glace et de neige dans les calottes glaciaires, les glaciers et les couvertures hivernales. Quant au troisième état, celui de vapeur, qui l'oublierait ? Bien que les quantités concernées soient relativement faibles, l'évaporation sur les surfaces d'eau libre donne naissance aux masses nuageuses qui transportent l'eau douce vers les continents. Ceci pour l'eau visible : il reste en effet celle qui ne l'est pas, du moins pas directement ; celle qui surgit des sources après un parcours souterrain, converge vers les puits, jaillit des forages artésiens ; bref, celle qui imbibé le sol et le sous-sol, au sein des couches géologiques.

L'eau circule donc inlassablement entre les grands réservoirs d'eau libre, l'atmosphère et les continents, dans des proportions différentes, mais aussi avec des temps de résidence extrêmement variables. Si une molécule d'eau séjourne en moyenne 10 jours dans l'atmosphère ou jusqu'à une année dans le sol, elle reste environ 4000 ans dans les océans et même jusqu'à plusieurs dizaines de milliers d'années dans les eaux souterraines profondes. Cette boucle perpétuelle qui suit la transformation de l'eau à partir des masses d'eau libre, dans l'atmosphère, et son écoulement à la surface des continents et sous terre forme le cycle de l'eau.

Qu'il s'agisse de phénomènes relativement simples, comme l'évaporation, ou très compliqués, comme l'interception des pluies par la végétation, chaque processus impliquant de l'eau peut être décrit mathématiquement. Une telle description met en relation les masses d'eau qui sont en jeu avant et après ce processus, et fournit une représentation de la dynamique du phénomène.

Parce que l'eau ne fait que circuler entre les océans, l'atmosphère et les continents, c'est presque tout naturellement qu'elle se prête à la mise en équations. C'est ainsi que l'on construit des modèles qui permettent de comprendre les spécificités du cycle de l'eau en tel endroit de la terre, ou les évolutions très anciennes du climat.

PAR CAROLINE WITTEW,
DOMINIQUE THIÉRY ET JOËL NOILHAN

Lorsque l'évolution spatiale ou temporelle des quantités d'eau doit être étudiée au niveau de tout ou partie du cycle de l'eau, les scientifiques appliquent ces relations à une description géométrique du milieu et créent ainsi des modèles. Ces derniers sont dits numériques si les solutions des milliers ou centaines de milliers d'équations que forment ces relations impliquent des ordinateurs.

Ces modèles constituent donc une représentation simplifiée de la nature. Entre autres avantages, ils permettent le calcul rigoureux du bilan des masses d'eau, la mise en évidence des insuffisances dans la connaissance de l'espace modélisé, et une meilleure prévision des besoins en acquisition de données. A ce jour, les modèles numériques sont les seuls outils dont nous disposons

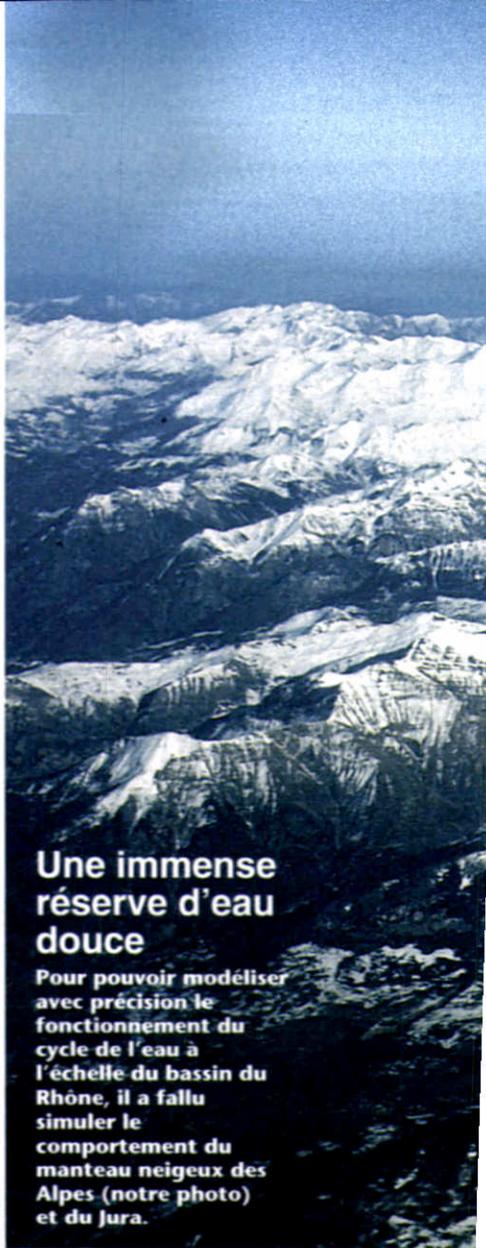


pour résoudre les importantes questions sur l'évolution présente et future des ressources en eau. Les exemples suivants vont illustrer leur puissance pour représenter à différentes échelles d'espace et de temps, l'évolution de l'eau dans notre environnement.

UN PROGRAMME AMBITIEUX POUR LE BASSIN DU RHÔNE

Modéliser le maillon continental du cycle de l'eau dans le bassin du Rhône, tel est l'ambitieux objectif du programme Gewex/Rhône⁽¹⁾ qui associe volets atmosphériques, hydrologiques et télédétection. Au cœur de ce projet, il s'agit de mettre en relation les cycles annuels énergétiques et hydriques du sol à l'échelle régionale, avec les débits des principaux cours d'eau et les réserves souterraines. Quelle part des précipitations est redistribuée par évapotranspiration vers l'atmosphère, transmise par ruissellement et drainage au réseau hydrographique ou aux aquifères? Pour répondre à cette question difficile, un nouveau modèle a été développé. Nommé Safran-Isba-Modcou, il prend en compte simultanément le cycle diurne des interactions surface - atmosphère (module Safran - Isba) et la circulation de l'eau dans les réseaux hydrographiques de surface et profonds (module Modcou ou Marthe). Le modèle utilise les données recueillies pour chaque journée et les traite sur de longues périodes, ici plusieurs cycles annuels. L'emprise spatiale du modèle est vaste : la totalité du bassin français du Rhône. Des climats et des régimes hydrologiques

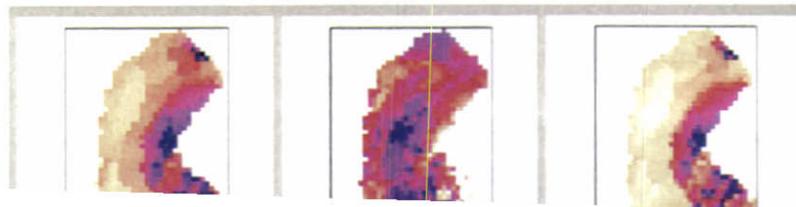
1 - Le groupe d'organismes de recherche qui travaille depuis plusieurs années sur le projet Gewex en France est formé de Météo-France, du Cemagref, du Centre d'informatique géologique de l'École des Mines de Paris et du Centre d'études des environnements terrestres et planétaires du CNRS. Le Laboratoire d'étude des transferts en hydrologie et environnement du CNRS et le BRGM s'y sont joints depuis peu.



Une immense réserve d'eau douce

Pour pouvoir modéliser avec précision le fonctionnement du cycle de l'eau à l'échelle du bassin du Rhône, il a fallu simuler le comportement du manteau neigeux des Alpes (notre photo) et du Jura.

ROZIER GALL



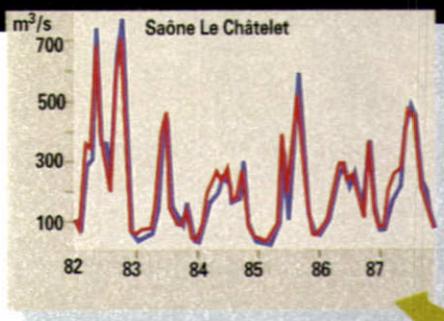
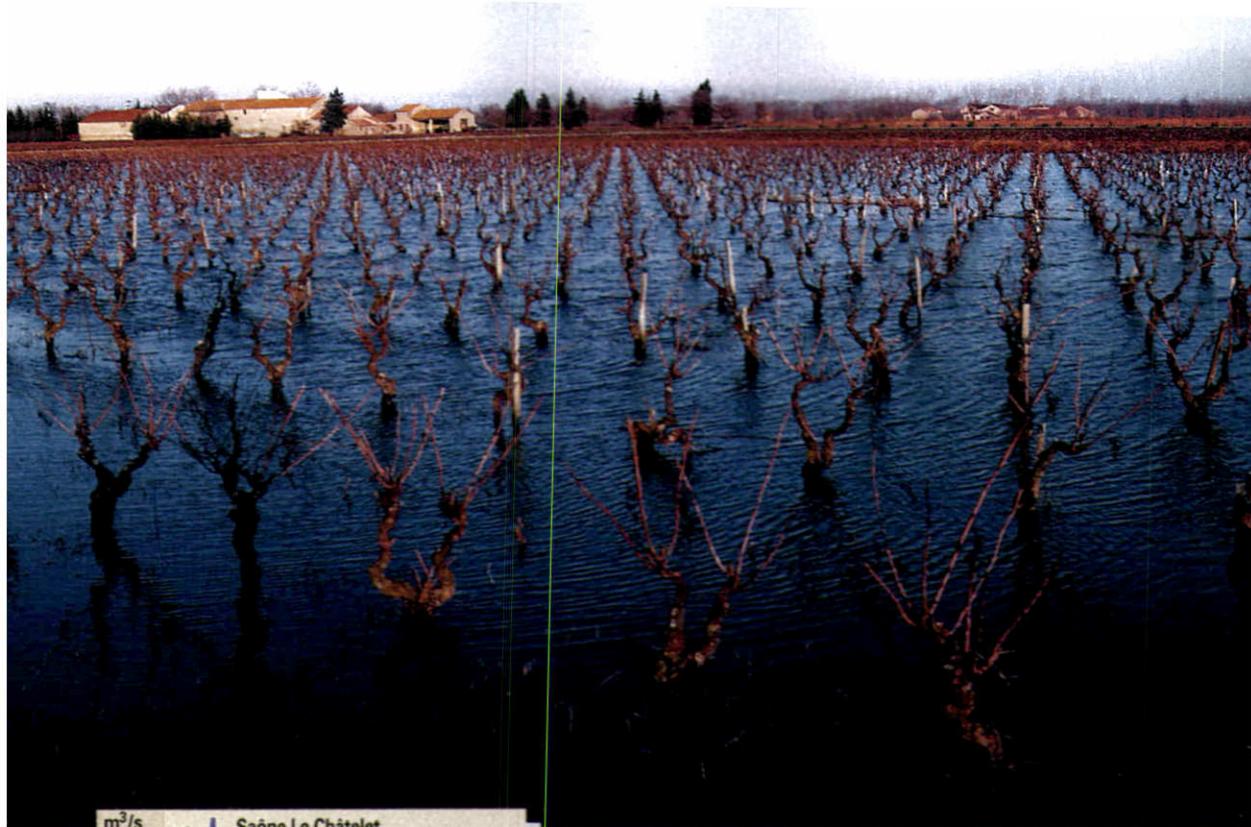
Ces trois cartes du bassin du Rhône montrent la distribution des précipitations, de l'évapotranspiration et des lames d'eau



très différents, notamment une composante nivale prédominante sur le massif alpin, s'y trouvent donc englobés. Pour prendre en compte la variabilité interannuelle de toutes les composantes, une volumineuse base de données (voir la figure p. 14) a été mise en place. Elle porte sur 15 années : de 1981 à 1995. Cette base est formée de l'ensemble des variables météorologiques horaires sur une grille régulière de 8 km. d'une centaine de chroniques journalières de débits, des hauteurs de neige mesurées sur 24 sites des Alpes, des cartes de végétation et de sol à la résolution kilométrique et enfin, d'une archive d'images de télédétection.

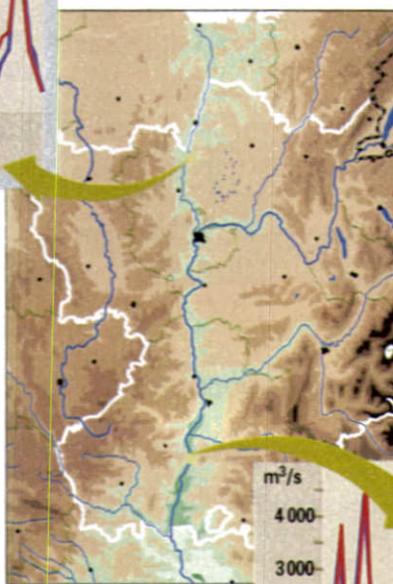
Les simulations des bilans énergétique et hydrique ont été analysées en détail en rapport avec

les débits journaliers de bassins versants de taille supérieure à 250 km². Quelle que soit l'année considérée, ces débits sont convenablement simulés, en particulier pour les bassins de surface supérieure à 2000 km² (voir la figure p. 16). Un tel résultat suppose une excellente simulation du manteau neigeux (module Crocus) sur les Alpes et le Jura, les principaux réservoirs d'eau du bassin. Cela a pu être vérifié sur 24 sites d'altitude. Pour la première fois, le contenu en eau des sols, les flux d'évaporation, de ruissellement et de drainage ont pu être quantifiés sur une grille régulière englobant une topographie extrêmement marquée. Sur les reliefs, seuls 30 % des précipitations sont évaporés vers l'atmosphère alors que ce rap-



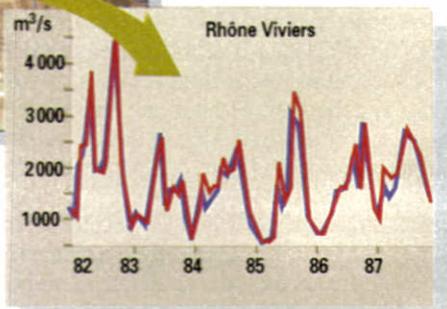
Simuler pour prévoir

Comparaison des débits mensuels observés (en bleu) et simulés (en rouge) dans la partie amont du bassin versant du Rhône au Châtelet, et en aval à Viviers. Le modèle permet de calculer les débits dans le réseau hydrographique au cours du temps, et de les comparer aux débits observés aux stations de jaugeage dispersées sur le bassin versant du Rhône. La coincidence des deux courbes montre la performance du modèle. (Ci-dessus des inondations dans le Gard).



port est en moyenne de 50 % sur l'ensemble du bassin. En outre, le modèle permet d'examiner en détail la contribution des divers processus physiques mis en jeu au pas horaire et sur 15 ans : accumulation et fonte de la neige, influence de la végétation, de la profondeur et de la texture du sol, ruissellement de surface, drainage et alimentation des réserves en eau profonde.

Cet outil de modélisation peut encore être amélioré. On peut ainsi prendre en compte les barrages ou l'irrigation, affiner davantage le domaine souterrain, recourir à d'autres sources de validation comme la télédétection.



Actuellement, le modèle est utilisé pour fournir une première évaluation de l'impact du changement climatique sur les ressources en eau du bassin du Rhône. A un horizon plus lointain, on attend avec intérêt le couplage réel de ce modèle avec un modèle atmosphérique régional.

VERS UNE MODÉLISATION PLUS PRÉCISE

Dans une grande partie du bassin versant de la Saône, les écoulements souterrains jouent un rôle primordial pour le soutien des étiages pendant les mois d'été. Au cours de cette période, en effet, les précipitations ne produisent généralement que peu d'écoulements durables. L'évaporation et la transpiration par la végétation sont alors à leur maximum, et les sols sont secs et avides d'eau. Hormis les orages isolés, la plus grande partie des précipitations est donc consommée directement par la végétation, ou stockée dans le sol et consommée dans les jours ou les semaines qui suivent. A cette époque où les cours d'eau sont à leur minimum, les écoulements proviennent pour l'essentiel du drainage des nappes souterraines alimentées par les précipitations de l'hiver et du printemps précédents. Par ailleurs, ces nappes ont en période de crues un effet contraire quoique limité : les pointes de débits sont en effet amorties par la percolation d'une partie du débit vers les nappes à travers le lit du cours d'eau.

L'effet des nappes se fait particulièrement sentir dans le bassin versant de la Saône (30 000 km² de superficie), dont certains affluents, le Doubs ou la Loue notamment, sont en relation avec des nappes étendues. Dans le cadre du projet Gewex, une modélisation fine de ce bassin versant avec la prise en compte détaillée des relations nappe-rivière est en cours de réalisation à l'aide du logiciel Marthe. Les données de plus de 6 000 forages ont été rassemblées. Elles ont permis, grâce à l'analyse des terrains, de déterminer les aquifères rencontrés et définir leurs extensions latérales et leurs épaisseurs. A partir de ces informations, un modèle couplé d'écoulements en rivière et d'écoulements en nappe permettra ensuite de déterminer, jour par jour, les échanges entre les nappes et les cours d'eau, en fonction de la géométrie du lit (largeur, longueur) et de la position respective de la surface libre de la nappe et de celle de la rivière. Un tel modèle couplé, prenant en compte finement l'influence des nappes souterraines, est plus robuste qu'un simple

modèle d'écoulement dans les cours d'eau. Sa capacité de prévision en est donc accrue d'autant.

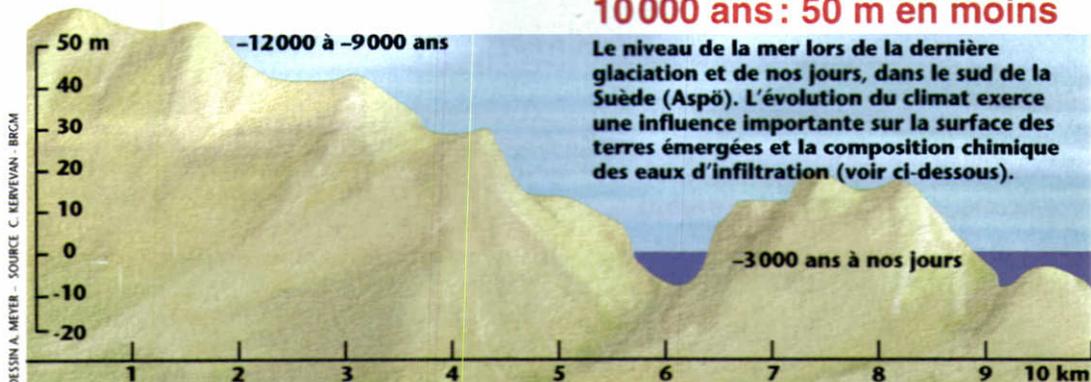
PRÉVOIR LES VARIATIONS DE COMPOSITION CHIMIQUE

Parfois, un modèle numérique est développé pour tenter de reconstituer l'évolution des écoulements des eaux à des échelles de temps de plusieurs milliers d'années. L'exemple présenté ici est celui du site d'Aspö, dans le sud de la Suède. Un modèle a été mis au point, destiné à calculer non seulement la circulation des eaux, mais aussi la composition chimique des fluides et de la roche depuis la dernière glaciation, il y a 12 000 ans, jusqu'à nos jours. Le choix de cette zone s'explique par les nombreuses données dont on dispose sur elle. Elles permettent d'établir la géométrie tridimensionnelle et les propriétés hydrodynamiques et géochimiques du bloc de roche fracturée de plusieurs kilomètres cubes, qui représente le volume modélisé (jusqu'à 1 700 mètres de profondeur). Dans cette première étape, les simulations donnent accès au rôle des variations climatiques sur l'évolution des caractéristiques hydrogéochimiques du site. Les résultats du modèle indiquent comment se modifient naturellement les propriétés chimiques des fluides qui se déplacent lentement dans ce volume de roche. Ultérieurement, le modèle sera en mesure d'intégrer des scénarios d'évolution du climat, se traduisant par exemple par des variations importantes du niveau et de la salinité de la mer Baltique. L'exemple présenté



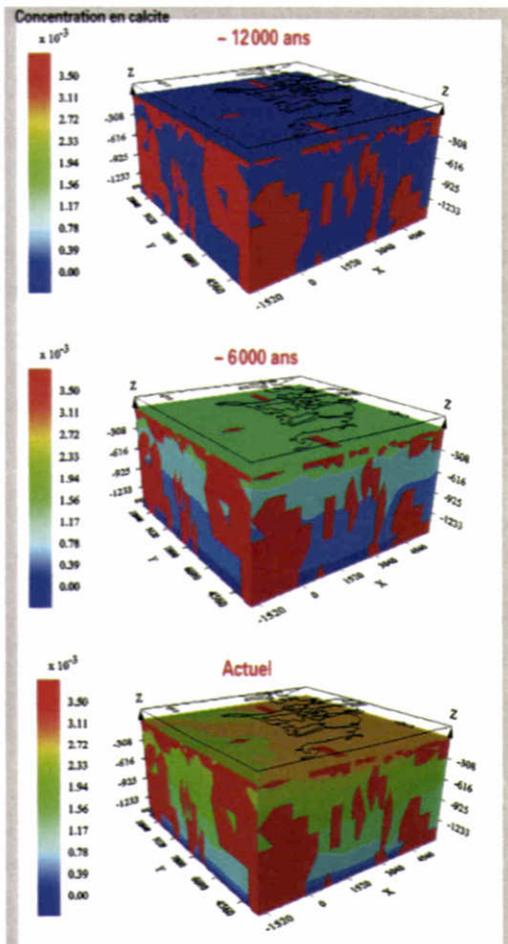
Une partie des pluies

Pour construire une représentation juste du cycle de l'eau à l'échelle d'un bassin, on tient compte de phénomènes aussi compliqués que l'interception des pluies par la végétation.



ici a été conçu pour illustrer la capacité des simulateurs couplés transport-chimie, et en particulier du logiciel Marthe-SCS (Simulateur chimique spécifique) (2). Ce type de simulations apporte des éléments de réflexion importants pour évaluer le comportement à long terme du stockage des déchets chimiques ou radioactifs.

Pour l'aspect hydrodynamique, le modèle mathématique a été conçu de manière tout à fait classique. La zone d'étude a été divisée en milliers de blocs élémentaires (mailles) et chacun s'est vu attribuer ses propriétés (perméabilité, porosité, composition de la roche). Pour débiter les simulations, des valeurs approximatives des paramètres variables du modèle ont été utilisées à partir de l'état supposé des pressions et de la composition chimique des eaux souterraines, il y a 12000 ans. L'évolution du climat dans le passé (voir ci-dessus) a eu des effets importants sur le niveau de la mer, donc sur la surface des terres émergées sujettes à l'infiltration des eaux douces. La salinité de l'eau de mer a aussi été influencée par la fonte des glaciers. Ces variations très complexes des circulations d'eau provoquent des mélanges permanents entre eaux douces et marines, à la fois en surface et en profondeur, de telle sorte que la qualité des eaux souterraines dépend directement de la composition de l'eau de mer. Le long de son parcours souterrain, l'eau rencontre des roches de nature différente (granite, minéraux carbonatés...) avec lesquelles elle interagit, dissolvant ou précipitant des minéraux en fonction de son état de saturation (la figure ci-contre). La composition naturelle de l'eau et des roches se modifie donc au cours du temps. Ce modèle, développé pour calculer l'évolution hydrodynamique et chimique d'un tel volume de terrain, est un outil de travail extrêmement complexe. En effet, outre la prise en



Interférences...

Les circulations d'eau provoquent des mélanges permanents entre eaux douces – résultant des précipitations et de la fonte des glaciers – et marines. En s'infiltrant dans le sol, l'eau interagit avec les roches, modifiant leur composition. Ainsi, la calcite tapissant initialement les fractures (en orange) se dépose progressivement dans toute la zone étudiée.

2 - Le projet de recherche Pagepa a été cofinancé sur fonds européens. le coordonnateur est l'université d'Édimbourg (Royaume-Uni) et les partenaires sont le BGR (Allemagne), le CTH (Suède) et le BRGM.

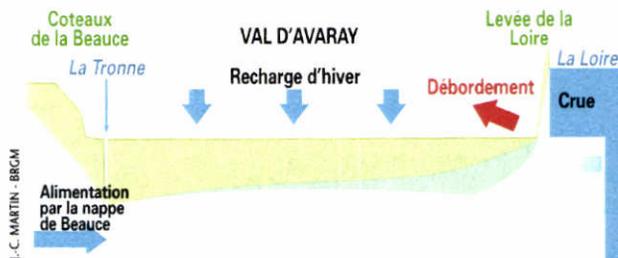
compte d'écoulements à densité variable en milieu fracturé, il couple, dans notre cas, plus de vingt réactions chimiques pour décrire de façon satisfaisante le comportement global du système.

ETUDIER L'IMPACT DES CRUES

Les écoulements de surface dans les cours d'eau sont étroitement liés aux écoulements souterrains. La plupart du temps, les eaux souterraines sont en équilibre avec les cours d'eau. Elles les alimentent ou les drainent selon la période de l'année et les prélèvements réalisés pour l'activité humaine. A ce jour, peu de modèles traitent les relations entre les variations de la hauteur du niveau des cours d'eau, et celles des nappes. Même au cours d'événements climatiques extrêmes, les crues sont la plupart du temps supposées résulter des écoulements superficiels de ruissellement. On n'imagine pas que les nappes d'eau souterraines, dont l'inertie est grande, puissent être concernées par des phénomènes si rapides.

Dans le val d'Avaray, à l'ouest d'Orléans, le long de la Loire, la géométrie des alluvions est bien connue grâce à de nombreux forages et études de prospection géophysique. Ce site a été sélectionné pour étudier par modélisation, avec une version adaptée du logiciel Marthe, l'influence de crues exceptionnelles, centennales et cinq centennales par exemple, sur le niveau des nappes souterraines (3). L'objectif est de maîtriser ce phénomène qui pourrait être la cause d'un danger supplémentaire pour les populations. Il s'agit en particulier de déterminer si la remontée de nappe derrière les levées peut vraiment produire des inondations graves lorsque la crue de la Loire dure quelques jours, et s'il est possible de prévoir les endroits concernés avec des moyens relativement simples. Tout au long de l'année, la nappe alluviale est alimentée par l'écoulement souterrain qui provient de la Beauce et par les pluies. Lors d'une forte crue, la Loire cherche à déborder dans son val et s'élève contre les levées. Ne pouvant déborder, l'eau du fleuve se propage lentement dans la levée et sous terre en créant un front qui progresse en direction du val. Lorsque la configuration du modèle est modifiée, il devient possible de déterminer les scénarios les plus propices au phénomène de débordement au pied des levées, dû à la remontée du niveau de la nappe d'eau souterraine (voir la figure ci-dessus). Les simulations réalisées pour ce site orientent les gestionnaires

3 - Le projet a été réalisé par le BRGM pour le Plan Loire grandeur nature sur cofinancement de l'Etat, de l'Epala et de l'Agence de l'eau Loire-Bretagne.



Un val sous surveillance

Suite à une forte crue, l'eau de la Loire pénètre dans la levée et sous terre. Le niveau de la nappe peut ainsi remonter et provoquer des inondations. Un phénomène que la modélisation permet d'évaluer.

sur les principaux paramètres qui influencent ces débits de débordement. Dans le cas présent, ces paramètres peuvent être topographiques : niveau de l'eau dans le canal de la Tronne, affluent de la Loire, ou altitude du sol au pied des levées. Ils peuvent aussi dépendre de caractéristiques intrinsèques des terrains – perméabilité et coefficient d'emmagasinement – ou encore de l'état initial de la nappe et des précipitations. La modélisation a également des effets indirects sur la connaissance du milieu naturel. Ses résultats peuvent, en effet, servir à définir les programmes de mesure à mettre en place pour appréhender dans le futur des mécanismes similaires mais dans des environnements naturels différents.

En résumé, l'augmentation rapide de la puissance des ordinateurs permet d'envisager la modélisation de plus en plus complexe des phénomènes naturels, soit au niveau du nombre de processus qui sont considérés numériquement, soit au niveau de l'extension spatiale des modèles ou de la durée des périodes simulées. Les outils présentés ici répondent à des besoins bien précis en relation avec la gestion quantitative des masses d'eau. D'autres modèles existent pour décrire les réactions thermiques, biologiques... qui sont partie intégrante du cycle de l'eau.

Actuellement, la tendance est à combiner ces modèles dits mécanistiques dans des systèmes qui prennent en compte également les contraintes socio-économiques, afin de mieux répondre aux besoins des utilisateurs des ressources en eau. □

POUR EN SAVOIR PLUS :

- G. Marsily, *L'eau*. Collection Dominos, Flammarion, 1995.
- J. Margat, *Les ressources en eau*. Editions BRGM, Orléans et Editions FAO, Rome, 1996.
- D. Thiéry, « Modélisation des aquifères complexes - Prise en compte de la zone non saturée et de la salinité. Calcul des intervalles de confiance. » *Revue Hydrogéologie*, 1993, n° 4, pp. 325-336.

Qu'est-ce qu'une nappe aquifère ?



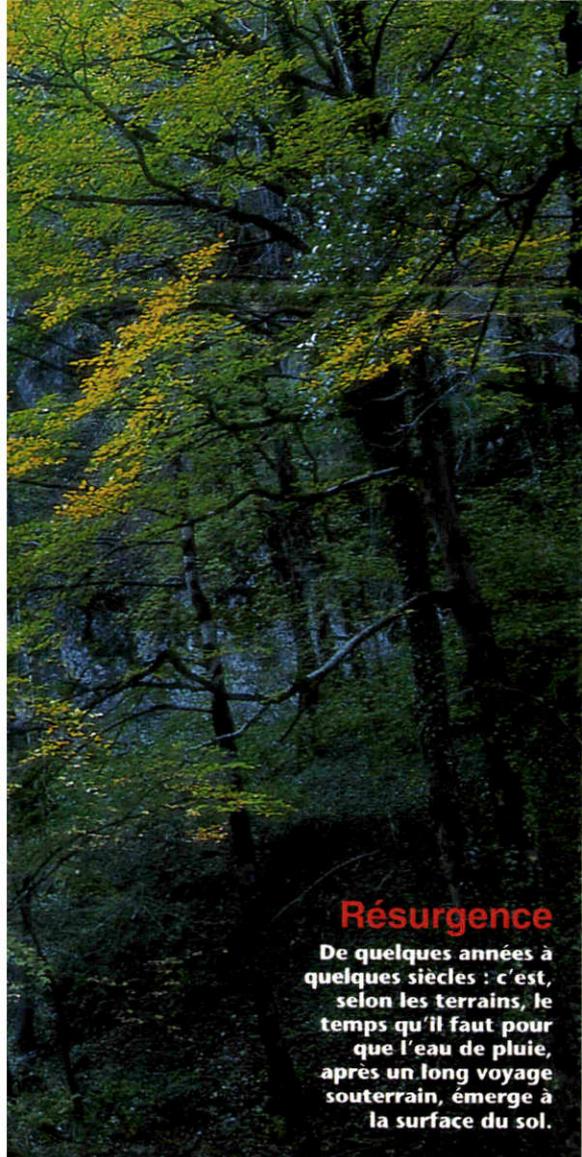
Au plan morphologique, les nappes sont des roches gorgées d'eau. Il en est de différentes sortes. Mais ce sont aussi et surtout des systèmes dynamiques, dans lesquels l'eau circule et réagit chimiquement avec le milieu.

PAR THIERRY POINTET

Selon la définition admise par l'ensemble des services géologiques européens, une nappe est la forme que prend l'eau dans les sols et les formations géologiques lorsqu'elle occupe la totalité des vides qui lui sont accessibles. L'eau y circule, presque toujours très lentement, et on peut l'y collecter grâce à des puits, des forages ou

des galeries drainantes. Le plus souvent, elle tire son origine des eaux de pluie. Une fois infiltrées dans le sol et le sous-sol, ces dernières se rassemblent dans les niveaux géologiques perméables ou, au contraire, sont retenues par les niveaux imperméables.

Pour voir tout cela de plus près, commençons



Résurgence

De quelques années à quelques siècles : c'est, selon les terrains, le temps qu'il faut pour que l'eau de pluie, après un long voyage souterrain, émerge à la surface du sol.

D. BRINGARD - BIOS

par nous placer à l'échelle d'un petit volume d'une roche poreuse : sable ou grès par exemple. Imaginons-le imbibé d'eau jusqu'à saturation des espaces intergranulaires : nous voici face à un volume élémentaire de nappe. Une nappe n'existe en effet que par défaut : c'est parce que la plupart des roches, granites compris, présentent des vides que l'eau peut s'y accumuler. A l'échelle d'une formation géologique, les quantités en deviennent vite considérables. En outre, le plus fréquemment, ces vides communiquent entre eux, ce qui permet à l'eau de se déplacer.

La circulation de l'eau dans des roches s'apprécie à partir de deux grandeurs physiques : la porosité et la perméabilité. La porosité est une notion simplement géométrique : elle exprime le pourcentage de vides présents dans la roche. La perméabilité, elle, est une notion dynamique.

C'est l'aptitude de ces vides à laisser circuler l'eau. Elle dépend de leur forme et dimension, mais l'eau, par sa viscosité et sa température, y intervient aussi un peu. Un sable est à la fois poreux et perméable. Il contient environ 20 % de vides et l'eau y circule aisément. Il est dit aquifère. Tout aussi poreuse, car elle contient autant de vides que le sable, une argile est, elle, pratiquement imperméable. Ses vides sont en effet de dimensions si petites que l'eau, en raison de sa viscosité et de ses propriétés électriques à toute petite échelle, a les plus grandes difficultés à se déplacer.

Sont identifiées comme aquifères la majorité des roches sédimentaires et un grand nombre de roches métamorphiques et cristallines. Les premières le sont à cause de leur structure propre ; les autres, par suite des cassures ou failles qu'elles ont subies dans leur histoire. Enfin, le plus souvent, les niveaux altérés qui, sous la surface du sol, couvrent ces roches, sont aussi aquifères.

A proximité de la surface, l'apparition d'une nappe est soumise à deux conditions : d'une part, un apport d'eau (en général de la pluie) ; d'autre part, l'action de la gravité terrestre qui fait que cette eau s'enfonce dans le sol. Elle commence son parcours suivant la verticale en n'occupant qu'une partie des vides disponibles. Dans ces vides partiellement imbibés, les trois phases en présence – une matrice minérale, de l'eau et de l'air – forment une zone non saturée. En migrant dans le sol, cette eau va ensuite rencontrer des niveaux de perméabilité différents. Certains, résistant à son écoulement, l'obligent à s'accumuler et à occuper tout le volume disponible. En saturant les vides, l'eau va ainsi former une nappe et rendre aquifère le niveau géologique concerné.

La transition entre milieux non saturé et saturé s'appelle la surface libre de la nappe. C'est une surface au sens géométrique du terme. Sa forme, sa pente sont étroitement liées aux directions et au sens d'écoulement de l'eau dans la nappe. L'écoulement en nappe est généralement à dominante horizontale. La profondeur et la nature des terrains qui surmontent la nappe sont déterminantes dans la vulnérabilité de l'eau à la pollution, mais aussi – pour les pays chauds et secs – à l'évaporation.

Un cas particulier de propagation des eaux dans le sous-sol doit être mentionné. Il s'agit des terrains calcaires dont la matrice rocheuse est particulièrement soluble dans l'eau, notamment les eaux de pluie déjà acides. La dissolution, en agissant surtout le long des fractures, génère des vides importants, caverneux, noyés ou non par l'eau.

Cette morphologie souterraine est baptisée karst, du nom d'une province de l'ex-Yougoslavie. L'écoulement des eaux y est concentré dans les conduits, qualifiés à tort de rivières souterraines. Ces dernières coexistent d'ailleurs avec des circulations plus lentes et moins spectaculaires dans la matrice poreuse de la roche et dans des conduits de bien plus petites dimensions. L'ensemble, dans la partie saturée, constitue la nappe.

Selon que, entre autres facteurs, elles sont libres ou captives, les nappes ne sont pas à la même profondeur. Les premières communiquent avec la surface du sol et en reçoivent directement leur alimentation ou recharge. Elles se situent à quelques mètres sous le sol dans les régions tempérées, à fleur de sol en régions équatoriales, et parfois très en profondeur dans les régions arides. La première nappe des Yucca Mountains, dans le désert de l'Arizona, est ainsi enfouie à près de 600 mètres.

Les secondes sont des structures aquifères, saturées d'eau sur toute leur épaisseur, et disposées en sandwich entre deux niveaux imperméables. Pour ces nappes captives, aucun record de profondeur n'a été établi. Dans le bassin de Paris, certaines se trouvent à plusieurs milliers de mètres. En revanche, dans les terrains de socle comme des granites où l'eau occupe des fissures et des zones faillées, on ne trouve plus de nappe significative passé quelques dizaines de mètres de profondeur. La qualification de phréatique, rappelons-le au passage, est réservée à la première nappe que l'on rencontre depuis la surface du sol : étymologiquement celle traditionnellement exploitée par les puits.

A la profondeur est attachée une autre notion : la pression lithostatique. A mesure que l'on descend, le poids cumulé des roches exerce en effet une pression croissante sur les vides. Résultat : les passages pour l'eau tendent à se fermer ; le substratum devient de plus en plus étanche. De fait, au-delà d'une certaine profondeur, les soubassements ne contiennent plus suffisamment d'eau pour que l'on puisse parler de nappe. Cependant, dans les grands bassins sédimentaires – et la France en comporte quatre – les roches poreuses et perméables encore présentes à plusieurs milliers de mètres de profondeur abritent des nappes. Les grès du Trias affleurent sur le versant ouest des Vosges. En Lorraine, les mêmes grès, enfouis à une profondeur de 800 mètres par le jeu du pendage des terrains, contiennent une nappe exploitée, qui est d'ailleurs chaude en raison du gradient géothermique. Enfin, le même niveau s'approfon-

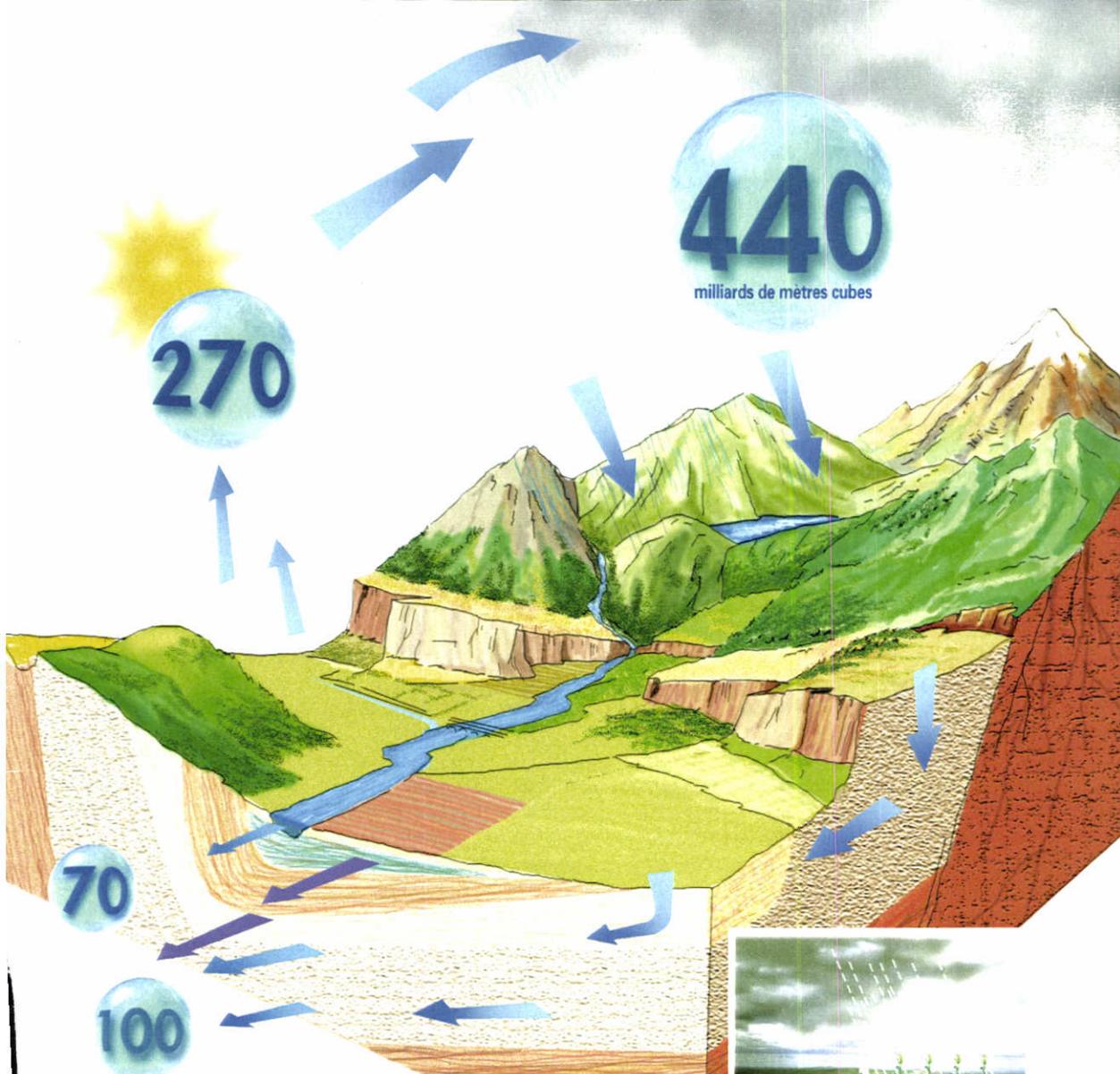
dit encore graduellement vers le centre du Bassin parisien où il abrite une eau salée cette fois. A l'aplomb de Paris on compte sept groupes de niveaux aquifères superposés, de la surface du sol jusqu'aux grès du Trias, qui se trouvent à une profondeur de 2000 mètres. Ces différents niveaux offrent des eaux de qualités diverses.

LA QUALITÉ CHIMIQUE DE L'EAU DES NAPPES

Cette qualité dépend bien sûr de la nature des roches traversées. Par hydrolyse, l'eau de pluie, au pH légèrement acide, est la première à dissoudre des substances que la nappe entrainera dans son écoulement. Lors du parcours sous terre (et d'ailleurs assez tôt), l'eau acquiert une composition chimique caractéristique de l'endroit où elle se trouve. C'est le fond géochimique naturel des eaux. Ces éléments chimiques circulants peuvent être « comptabilisés » : ce flux de sels minéraux correspond en effet à une « usure » de l'écorce terrestre (quelques millimètres par siècle) sous l'action chimique de l'eau.

Le fond géochimique est aussi réglé par des équilibres chimiques. Sous de telles conditions de température et de pH – et après un temps suffisant pour que les réactions chimiques soient achevées – l'eau accepte en effet une charge chimique de tant de milligrammes par litre de tel élément : pas plus. Quand on perturbe sa composition, l'eau tend à revenir à cette concentration d'équilibre. C'est une donnée dont il faut impérativement tenir compte lorsqu'on cherche à débarrasser la nappe d'un élément chimique donné : il y a un seuil en dessous duquel la déminéralisation n'a pas de sens. Enfin, la dépendance vis-à-vis de la nature des terrains présente un autre avantage pour les hydrogéologues. Ils peuvent en effet prédire le faciès chimique d'une eau qui n'a pas encore été analysée, en croisant la lecture de la géologie des terrains traversés avec quelques notions simples de chimie.

L'eau peut contenir une immense variété de substances, chacune en quantité très faible ou à l'état de traces. Dans un niveau aquifère calcaire, la nappe est légèrement basique (pH supérieur à 7) : elle est fortement minéralisée en calcium et bicarbonates. A l'inverse, acide et peu minéralisée, une eau issue d'un granite pourra contenir en faibles teneurs un assez grand nombre d'éléments métalliques. Le faciès chimique d'une eau exprime aussi la signature des roches traversées. L'analyse méticuleuse de cette dernière est à l'origine de renseignements très utiles : parcours et temps

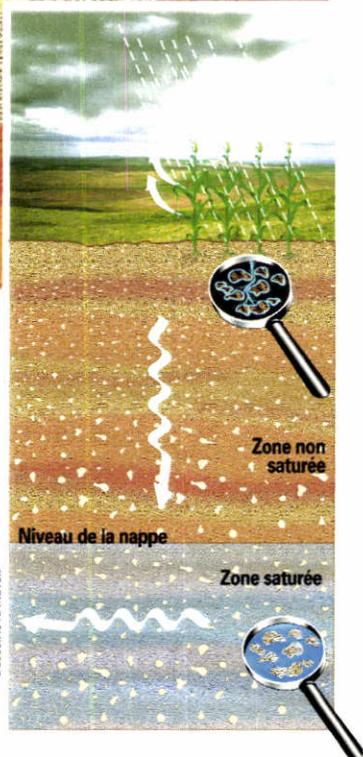


Un flux continu

Composantes essentielles du cycle de l'eau, les nappes se renouvellent partiellement, par infiltration. L'eau de pluie pénètre dans le sol et occupe une partie des vides disponibles. Elle chemine ainsi à la verticale jusqu'à rencontrer une couche moins perméable. Elle sature alors les vides et la nappe ainsi formée circule horizontalement. En France, sur les 2000 milliards de mètres cubes d'eau souterraine, 100 milliards ressortent chaque année pour alimenter les sources et les rivières.

de résidence dans le sol d'une eau de source, lieux de recharge de la nappe. Ces aires d'infiltration étant connues, il devient possible de les protéger. De telles mesures ont d'ailleurs déjà été adoptées pour des nappes stratégiques, notamment pour certaines eaux destinées à la mise en bouteille.

Si, s'agissant de leur apparence, il est évident de distinguer entre nappes et cours d'eau, s'agissant de leurs eaux, cette distinction semble très arbitraire : entre ces deux structures, les échanges sont



constants. Dans la plupart des cas, c'est en effet dans les zones basses de la topographie – les fonds de vallées et le littoral – que les nappes trouvent leur exutoire. En l'absence de pluies, ce processus naturel de vidange est d'ailleurs seul à assurer les débits d'étiage des cours d'eau. Parfois, l'agencement des niveaux géologiques et des reliefs qui les recourent amène une nappe à déborder au flanc d'une vallée et à donner naissance à des sources.

De leurs zones de recharge à leur exutoire, les nappes sont une composante majeure du cycle de l'eau. On compte environ 6500 aquifères distincts en France, dont 200 d'importance régionale, 175 à nappe libre et 25 profonds enfermant une nappe captive. La ressource en eau⁽¹⁾, contenue à tout instant dans le sous-sol, est estimée à environ 2000 milliards de mètres cubes. Le débit d'écoulement annuel des nappes, c'est-à-dire le renouvellement partiel de la masse d'eau, est estimé à 100 milliards de mètres cubes. Même si nappes et cours d'eau ne peuvent être comptés séparément – le drainage des unes contribue, nous venons de le voir, à l'alimentation des autres –, ces 100 milliards de mètres cubes sont à comparer aux 170 milliards qui représentent l'écoulement annuel total de l'eau en France.

Le temps de résidence des eaux dans le sol est en moyenne de 20 ans, mais il est extrêmement modulé : de quelques jours à quelques mois, dans les nappes alluviales liées à un cours d'eau ou dans les nappes d'aquifères calcaires à plusieurs siècles dans les grandes nappes des bassins sédimentaires. Les nappes superficielles sont en constante relation avec les cours d'eau. La très grande part des échanges se fait de la nappe vers le cours d'eau, des versants et des interfluves vers les fonds de vallée et non l'inverse. Toutefois, localement et sous certaines conditions – crue d'un cours d'eau en période d'étiage de nappe – l'inverse peut se produire et un cours d'eau peut recharger temporairement une nappe alluviale.

De leur percolation à travers un milieu poreux, les nappes tirent certaines caractéristiques dont la première est leur inertie. Les variations du niveau – à la hausse ou à la baisse – y sont toujours très lentes. Cette propriété conduit à une première conséquence : pour comprendre le comportement de certaines grandes nappes, et pouvoir les protéger, il faut raisonner sur des cycles annuels ou plu-

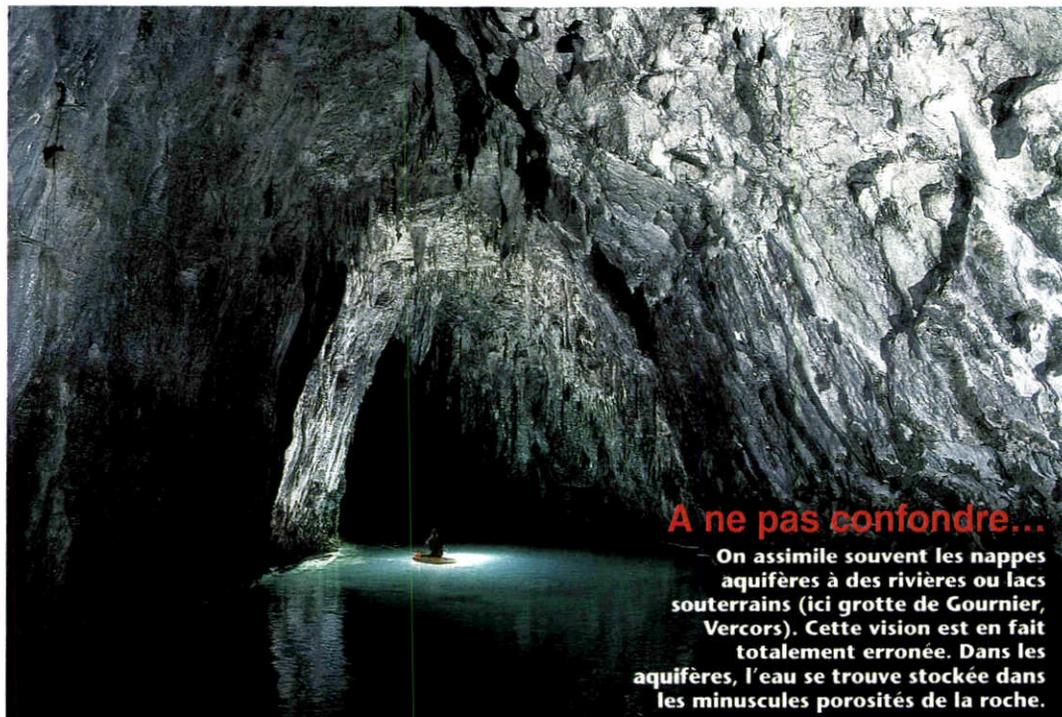
riannuels. Deuxième conséquence : en cas de perturbations (d'origine le plus souvent démographique et économique), il est vain d'espérer des corrections immédiates. Enfin, l'inertie a des effets sur la qualité de l'eau. Notons d'abord que les nappes, par leur écoulement filtrant, disposent d'une capacité d'auto-épuration : alors que certaines substances sont physiquement retenues par le milieu poreux, d'autres peuvent l'être chimiquement. Mais là encore l'inertie est à double sens. La régénération d'une nappe dégradée par une pollution est en effet beaucoup plus longue que celle d'un cours d'eau, et ce même si on la favorise par une action appropriée. Un facteur supplémentaire – la capacité de stockage du sol lui-même – vient d'ailleurs compliquer la situation. Ainsi une charge polluante introduite dans le sol à un instant donné peut n'en avoir pas bougé, puis, par suite d'un changement de pH ou de toute autre raison, être entraînée par l'eau et commencer à migrer. Une concentration anormale de polluant dans la nappe ne tarde alors pas à apparaître. Or ce processus, la transformation d'un stock en flux, va durer jusqu'à la disparition du stock. On comprend donc comment une pollution instantanée du sol peut générer une pollution durable de l'eau qui le traverse. Parfois, le phénomène est encore plus pernicieux : si la variation de pH – ou de tout autre facteur – survient longtemps après l'introduction du polluant dans le sol, suffisamment longtemps pour que l'on ait perdu la mémoire de l'événement, il apparaît alors une pollution de l'eau, voire des gaz du sol, qui ajoute l'effet de surprise à la dégradation du milieu.

L'EAU RESSOURCE

Pollution, dégradation, réhabilitation indiquent que l'eau souterraine est une ressource. Elle a une valeur économique et il s'y attache toutes les actions nécessaires à sa gestion : connaissance, suivi des évolutions, protection, conservation pour les générations futures et bien entendu exploitation, qui est en fin de compte le moteur de toutes les autres mesures.

On exploite annuellement en France 7 milliards de mètres cubes issus des nappes. 60 % des besoins en eau potable sont couverts par les eaux souterraines. Bien évidemment, ces prélèvements sont inégalement répartis. Le climat tempéré de la France garantit certes une ressource largement plus importante que la demande, mais on assiste localement à des situations de crise : surexploitation anormale et pollutions non résorbées et croissantes qui font craindre une disponibilité insuffi-

1 – Il s'agit du volume d'eau maximum théoriquement mobilisable, par dénoyage de tous les aquifères libres et décompression des aquifères captifs. Pour ces derniers, il resterait encore un stock considérable mais pratiquement inaccessible.



A ne pas confondre...

On assimile souvent les nappes aquifères à des rivières ou lacs souterrains (ici grotte de Gournier, Vercors). Cette vision est en fait totalement erronée. Dans les aquifères, l'eau se trouve stockée dans les minuscules porosités de la roche.

PH. BAYLE - BIOS

sante pour les années à venir. Pour ce genre de raisons, la Commission européenne va publier prochainement une Directive cadre sur l'eau. Elle concernera largement les eaux souterraines. En France, à l'initiative de la Direction de l'eau du ministère de l'Aménagement du territoire et de l'environnement, et par l'action conjointe de tous les partenaires concernés, notamment le Bureau de recherches géologiques et minières, une banque nationale des données sur l'état et la qualité de l'eau des nappes se met en place. Elle permettra de remplacer une connaissance fragmentaire de la ressource des nappes par un suivi d'ensemble.

Les pratiques évoluent. En matière de gestion, l'avenir est à faire cohabiter les différents usages de l'eau, y compris les rejets qui en découlent, dans des espaces restreints. La mise en œuvre passe par des actions de recherche technologique et de développement concernant le prétraitement des effluents et la stimulation des fonctions épuratrices des sols, afin qu'à moyenne distance des points de rejets le risque soit nul pour la nappe.

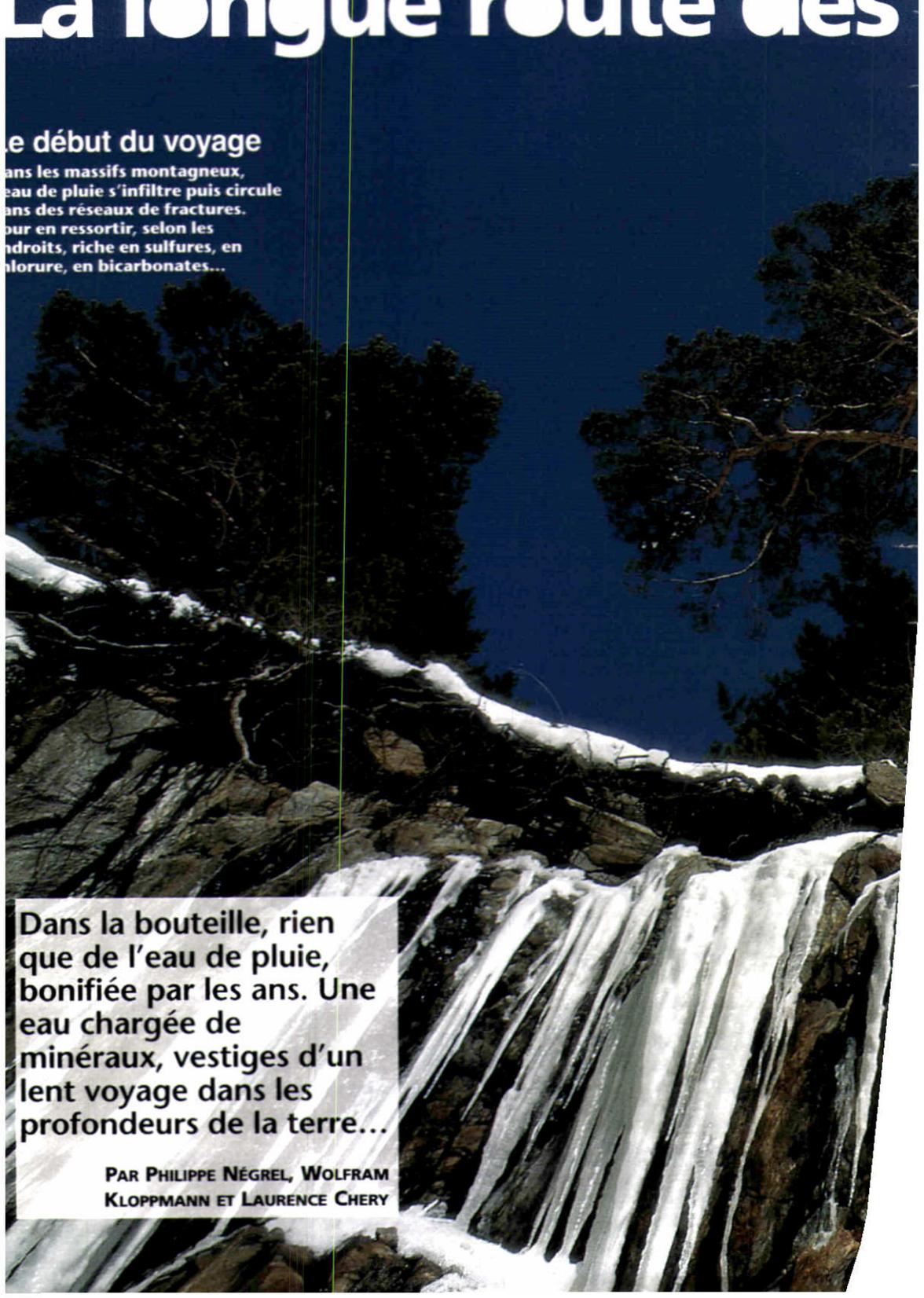
On admet que des actions doivent désormais être entreprises dont le but n'est pas la production immédiate mais la préservation. Une charte de bonne conduite à l'attention des professionnels des nappes a été établie en 1997. Elle indique les bonnes et mauvaises pratiques en matière de forages d'eau et souligne la nécessité de mettre en sécurité les puits et forages inexploités, en raison du risque d'introduction de substances polluantes.

La valeur patrimoniale de l'eau a été clairement mentionnée par la loi sur l'eau de 1992. La diffusion des connaissances relatives aux nappes s'élargit, certes, mais lentement. L'optimum actuel, atteint par certains Etats membres européens à l'est et au nord de la France, revient à diffuser les données et les informations sur les nappes jusqu'au domaine public. Par une action didactique, chacun est concerné par leur préservation. En France, le Réseau national des données sur l'eau est interservices de l'Etat et interorganismes. Il s'applique à définir des standards destinés à faciliter l'échange des données entre organismes et services concernés, pas important vers le rapprochement des très nombreux services missionnés pour travailler sur les ressources en eau. Il met au point les types d'informations pertinentes sur l'évolution des nappes à l'attention des gestionnaires. Un bulletin de situation hydrologique est publié cinq fois l'an. Il contient, entre autres, un descriptif de l'évolution des nappes en France. Des actions par bassins à l'initiative des Agences de l'eau présentent les résultats de suivis effectués sur les nappes du bassin. Ils sont consultables sur Internet. Le BRGM a, pour sa part, mis à disposition un site Internet baptisé Infoterre, qui délivre des données et informations réunies sur plus de 300 000 ouvrages souterrains. Les collectivités directement concernées par la fourniture d'une eau de qualité s'intéressent de plus en plus à la connaissance amont, c'est-à-dire à la ressource dans son milieu naturel. □

La longue route des

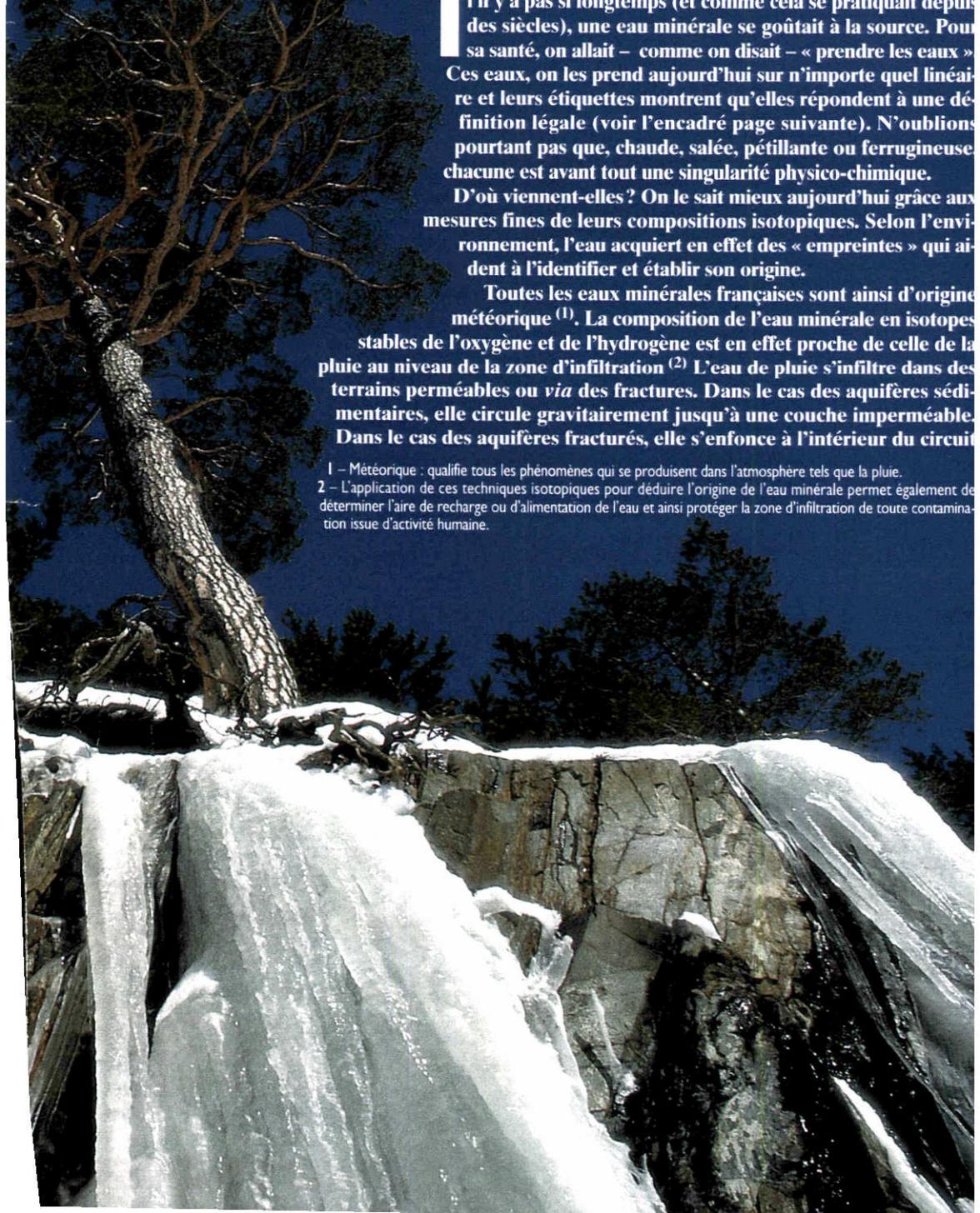
le début du voyage

ans les massifs montagneux,
eau de pluie s'infiltré puis circule
ans des réseaux de fractures.
our en ressortir, selon les
ndroits, riche en sulfures, en
lorure, en bicarbonates...



Dans la bouteille, rien
que de l'eau de pluie,
bonifiée par les ans. Une
eau chargée de
minéraux, vestiges d'un
lent voyage dans les
profondeurs de la terre...

PAR PHILIPPE NÉGREL, WOLFRAM
KLOPPMANN ET LAURENCE CHERY



Il n'y a pas si longtemps (et comme cela se pratiquait depuis des siècles), une eau minérale se goûtait à la source. Pour sa santé, on allait – comme on disait – « prendre les eaux ». Ces eaux, on les prend aujourd'hui sur n'importe quel linéaire et leurs étiquettes montrent qu'elles répondent à une définition légale (voir l'encadré page suivante). N'oublions pourtant pas que, chaude, salée, pétillante ou ferrugineuse, chacune est avant tout une singularité physico-chimique.

D'où viennent-elles? On le sait mieux aujourd'hui grâce aux mesures fines de leurs compositions isotopiques. Selon l'environnement, l'eau acquiert en effet des « empreintes » qui aident à l'identifier et établir son origine.

Toutes les eaux minérales françaises sont ainsi d'origine météorique⁽¹⁾. La composition de l'eau minérale en isotopes stables de l'oxygène et de l'hydrogène est en effet proche de celle de la pluie au niveau de la zone d'infiltration⁽²⁾. L'eau de pluie s'infiltré dans des terrains perméables ou *via* des fractures. Dans le cas des aquifères sédimentaires, elle circule gravitairement jusqu'à une couche imperméable. Dans le cas des aquifères fracturés, elle s'enfonce à l'intérieur du circuit

1 – Météorique : qualifie tous les phénomènes qui se produisent dans l'atmosphère tels que la pluie.

2 – L'application de ces techniques isotopiques pour déduire l'origine de l'eau minérale permet également de déterminer l'aire de recharge ou d'alimentation de l'eau et ainsi protéger la zone d'infiltration de toute contamination issue d'activité humaine.

hydraulique descendant. Les grands réseaux de fractures ont des directions liées aux phases structurantes majeures, par exemple les orogènes pyrénéenne et alpine⁽³⁾. Ces événements ont morcelé les massifs cristallins et favorisé les circulations d'eau minérale.

L'émergence en surface d'eaux qui, d'après leurs températures, ont parfois dû s'enfoncer jusqu'à des profondeurs de plusieurs kilomètres,

L'EAU MINÉRALE SELON LA LOI

Selon l'article 2 du Décret n° 89-369 du 6 juin 1989 : « Une eau minérale naturelle est une eau possédant un ensemble de caractéristiques qui sont de nature à lui apporter des propriétés favorables à la santé. Elle se distingue nettement des autres eaux destinées à la consommation humaine par sa nature, caractérisée par sa teneur en minéraux, oligo-éléments ou autres constituants et par certains effets et par sa pureté originelle, l'une et l'autre caractéristiques ayant été conservées intactes en raison de l'origine souterraine de cette eau qui a été tenue à l'abri de tout risque de pollution. Elle témoigne, dans le cadre des fluctuations naturelles connues, d'une stabilité de ses caractéristiques essentielles, notamment de composition et de température à l'émergence, qui n'est pas affectée par le débit de l'eau prélevée.

Les dénominations eaux minérales, eau minérale naturelle ou toute autre contenant ces mots, sont réservées aux eaux douées de propriétés thérapeutiques, provenant d'une source dont l'exploitation a été autorisée, par décision ministérielle, dans les conditions prévues par les lois et règlements en vigueur. » L'appellation d'eau minérale ainsi que l'autorisation d'exploitation ne sont donc données que sur l'agrément du ministère de la Santé. Une eau minérale peut être froide ou chaude. Dans ce dernier cas, elle répond au terme d'eau thermale et correspond, d'après la définition donnée par Castany & Margat (1977), à une « eau d'origine souterraine naturellement chaude à son émergence. Sa température est supérieure à un seuil (par exemple la valeur moyenne des nappes de la région) ce qui la rend utilisable à diverses fins, notamment sanitaire ou thérapeutique ». Dans le langage courant, on appelle « eau thermale » toute eau minérale dotée de propriétés thérapeutiques et utilisée dans un établissement thermal. Les eaux chaudes ont été recherchées par l'homme pour se soigner dès le tout premier âge de l'humanité. Les premiers témoignages de l'utilisation des eaux chaudes à usage médical, ont été datés entre 5 000 et 3 000 ans avant J.-C. (Géochronique, 1999).

semble plus surprenante. Deux phénomènes peuvent en être à l'origine. Dans le plus simple, l'artésianisme⁽⁴⁾, l'eau remonte sous l'effet de la pression qui s'exerce sur elle. Dans le second, le phénomène de thermosiphon, l'eau en profondeur est soumise à de fortes températures. Ainsi chauffée et donc plus légère, elle s'élève en repoussant des masses d'eau froide. Dans certaines régions, ce phénomène s'accompagne de dégagements gazeux provenant de zones profondes : la remontée s'en trouve facilitée d'autant.

Ces émanations gazeuses, fréquemment observées là où émergent les eaux minérales, sont souvent constituées par du gaz carbonique (CO₂) associé à d'autres gaz en quantités moindres : azote (N₂), hélium (He), argon (Ar), ou radon (Rn)... Tous se forment très en profondeur. Pour le CO₂, l'hélium et l'azote, les déterminations isotopiques montrent une origine mantellique⁽⁵⁾. Les valeurs mesurées sont en effet les mêmes que celles qu'on trouve dans les gaz provenant des zones volcaniques en activité. Ces dégagements de CO₂ jalonnent les zones faillées depuis l'avant-pays alpin jusqu'aux Pyrénées en passant par le Massif central (Limagne, Forez...). Tous ces reliefs ont été générés lors des phases de tectonique cassante qui sont intervenues au tertiaire et au quaternaire et ont favorisé le dégazage des couches profondes de la Terre.

Lors de la remontée des eaux minérales, la pression diminuant, l'échappement du CO₂ provoque une précipitation de carbonate de calcium (CaCO₃). C'est ce processus qui est à l'origine des fontaines pétrifiantes (Gimeaux dans le Massif central) et aussi des travertins⁽⁶⁾ qui, par endroits, jalonnent les lignes d'émergence des eaux minérales.

DES TEMPÉRATURES PARFOIS TRÈS ÉLEVÉES

L'eau a une forte propension à dissoudre les minéraux des roches au travers desquelles elle percole et circule. On comprend donc que la composition chimique des eaux minérales dépende fortement de la nature de la roche encaissante. Mais pas seulement : interviennent également les températures auxquelles s'effectuent les échanges eau/roche et la durée de contact, c'est-à-dire du temps de cheminement souterrain de l'eau.

Bien évidemment, selon les régions, les proportions dans lesquelles l'eau souterraine va se charger en sels minéraux ne seront pas les mêmes. Certaines eaux traversant des zones calcaires seront très riches en calcium ; d'autres traversant des

Une eau pétillante

De nombreuses eaux du Massif central, région marquée par un volcanisme récent, remontent chargées de gaz carbonique. (Source du Dôme, Vichy.)



BRGM

zones granitiques le seront moins; d'autres encore pourront être très riches en fer. En fonction de leur composition, les eaux minérales peuvent être distribuées en différentes classes hydrogéochimiques. Quatre classes ont été établies en partant des ions dominants (anions Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- et cations Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , K^+): eau sulfatée-calcique, eau bicarbonatée-calcique, eau chlorurée-sodique et eau bicarbonatée-sodique. S'y ajoutent les eaux riches en sulfures comme celles que l'on trouve dans la chaîne des Pyrénées. Les interactions fines entre les eaux et les roches encaissantes ainsi que la nature de ces dernières sont aujourd'hui étudiées par des traçages isotopiques.

L'étude des températures constitue un autre point important dans la compréhension des échanges entre eaux minérales circulantes et roches. Les eaux minérales peuvent en effet émerger à la surface de la terre à une gamme de températures variables, parfois très élevées : plus de 80°C à Chaudes-Aigues dans le sud du Massif central, plus de 70°C à Ax-les-Thermes dans les Pyrénées et à Pechelbronn en Alsace. Les températures d'émergence des eaux minérales ne reflètent cependant pas fidèlement celles qu'elles atteignent en profondeur. Pour évaluer ces dernières, on s'appuie sur la présence de combinaisons chimiques dont on sait qu'elles résultent de réactions sensibles à la chaleur. Ces indicateurs géochimiques des températures portent le nom de géothermomètre. L'un de ces géothermomètres

est Na-Ca-K dont l'origine se situe dans les relations entre l'eau et des minéraux silicatés de la roche (plagioclases, feldspaths potassiques). L'application, avec certaines précautions, des géothermomètres sur de nombreuses eaux minérales et thermales fait apparaître des gammes de températures dans les réservoirs profonds s'échelonnant de moins de 100°C à plus de 200°C .

Dans leur ouvrage paru en 1992, C. Pomerol et J. Ricour ⁽⁷⁾ illustrent bien les liens entre la nature des eaux minérales et la géologie. Dans la zone axiale des Pyrénées, par exemple, l'eau de pluie s'infiltré dans les massifs granitiques au travers des fractures apparues lors de l'orogénèse de cette chaîne. Là, elle descend jusqu'à une profondeur de 5 à 7 km, où elle atteint une température de l'ordre de 130°C . Pour remonter, elle emprunte de vastes zones de fractures ouvertes d'où elle émerge à des températures de l'ordre de 40° à 80°C avec un faciès hydrogéochimique sulfuré-sodique (Luchon, Ax-les-Thermes, Amélie-les-Bains, Barèges, Cauterets...).

Dans la zone nord-pyrénéenne, les eaux de pluie s'infiltrent et circulent dans les calcaires à

3 - Orognèse : processus conduisant à la formation de relief.

4 - Artésianisme : conditions hydrodynamiques et topographiques favorisant le jaillissement spontané de l'eau souterraine.

5 - Mantellique : qui se rapporte au manteau, enveloppe de la Terre située sous la croûte continentale ou océanique.

6 - Travertin : roche sédimentaire continentale se déposant aux émergences de certains cours d'eau et sources.

7 - C. Pomerol & J. Ricour. *Terroirs et Thermalisme, les eaux minérales françaises*. 1992. Ed. BRGM, 288 p.

des profondeurs de quelques centaines de mètres. Leur remontée s'effectue rapidement le long des failles et donne des émergences d'eau minérale à des températures de 20° à 50°C. Là, les faciès hydrogéochimiques sont sulfaté-calcique, chloruré-sodique et bicarbonaté-calcique (Bagnères de Bigorre, Ussat, Capvern...).

Fortement influencé par l'orogénèse alpine et le volcanisme récent, le Massif central est une des régions les plus riches en eaux minérales. Cette eau circule par les grandes failles actives des grabens, et remonte en surface chargée de gaz carbonique d'origine mantellique avec un faciès hydrogéochimique bicarbonaté-sodique (Vichy, Châtel-Guyon, St Nectaire, Chaudes-Aigues...). En certains endroits, le CO₂ est remplacé par de l'azote et l'eau présente un faciès chloruré-sodique (Evau, Nérès).

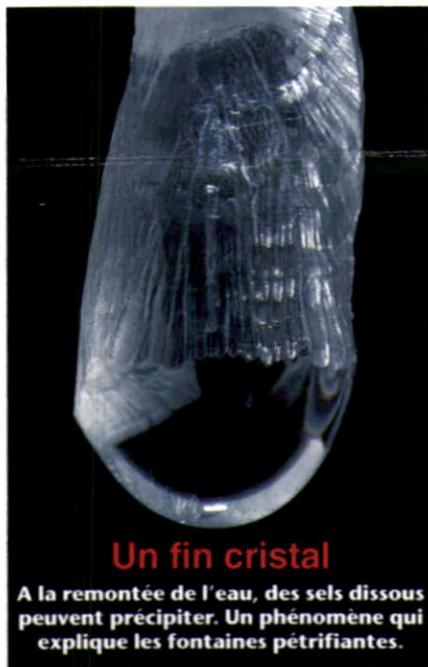
Dans les Alpes et l'avant-pays (Jura, Provence), de nombreuses sources d'eau minérale sont issues des terrains sédimentaires. La grande différence d'altitude entre les zones d'alimentation sur les hauts reliefs et les zones d'émergence dans les vallées engendre des circulations à grande profondeur (jusqu'à 5 km) amenant les eaux à des températures proches de 150°C dans le réservoir profond. Nombre de venues profondes d'eau minérale sont reprises dans des circuits plus superficiels avec, pour conséquence, des mélanges d'eau et des faciès hydrogéochimiques différents (Aix les Bains, Propiac, Arcens...).

LA COURSE DU TEMPS

On peut appeler « âge » d'une eau minérale, le temps de son voyage sous terre : de son infiltration à son émergence. Pour le déterminer, la géochimie vient encore une fois à la rescousse, avec pour horloge des radioisotopes comme le tritium et le radiocarbone⁽⁸⁾.

Parmi les eaux minérales courantes, certaines sont toutes jeunes : pas nées de la dernière pluie

⁸ - La datation des eaux au moyen du carbone reste délicate du fait des sources de carbone dans une eau qui est en contact avec l'atmosphère, des roches calcaires, de la matière organique et des gaz d'origine profonde.



Un fin cristal

A la remontée de l'eau, des sels dissous peuvent précipiter. Un phénomène qui explique les fontaines pétifiantes.

PH. BAYLE - BIOS

mais presque, en fait d'une pluie qui remonte à quelques années. Dans la région d'Evian, l'eau ne met ainsi que 14 ans pour accomplir son voyage souterrain. Elle contient du tritium qui est un indicateur d'eaux récentes. L'eau est un peu plus « vieille », dans la région de Contrexeville : son séjour dans le sous-sol a été de l'ordre de 50 ans. Rien cependant comparé aux eaux qui dépassent l'échelle historique : dans les Pyrénées, les eaux de certaines sources minérales, datées au radiocarbone, ont passé près de 20 000 ans dans les fractures profondes des massifs granitiques avant de réémerger

dans les sources de Luchon et de Cauterets ou encore d'Amélie-les-Bains.

D'autres indicateurs géochimiques tels que les isotopes stables de l'eau (oxygène 18, deutérium) peuvent confirmer des âges aussi anciens. Ils nous indiquent aussi les températures qui régnaient au temps où les eaux de pluie se sont infiltrées dans le sol. Certaines eaux témoignent ainsi du rigoureux climat qui, il y a 18 000 ans, était à son apogée : celui de la dernière glaciation.

Il peut donc nous arriver de nous désaltérer avec de l'eau issue de pluies tombées à l'époque où les artistes préhistoriques peignaient sur les parois des grottes de Lascaux ou de Cosquer. Ces eaux anciennes sont une ressource précieuse, leur voyage dans les profondeurs de la terre leur a laissé le temps de dissoudre, pendant des dizaines de milliers d'années, les minéraux des roches à l'abri de tout danger de pollution par l'homme. □

POUR EN SAVOIR PLUS :

- J.M. Caron, A. Gauthier, A. Schaaf, J. Ulysse & J. Wozniak. 1989. *Comprendre et enseigner la planète Terre* Editions Ophrys, 271 p.
- G. Castany & J. Margat. *Dictionnaire français d'hydrogéologie*. 1977. Ed. BRGM, 249 p.
- *Géochronique*. « Les eaux minérales ». 1999. Ed. Société Géologique de France/BRGM, n°72, 47p.
- G. Michard. *Équilibres chimiques dans les eaux naturelles*, 1989. Collection Sciences et Techniques ». Ed. Publisud, 347 p.
- C. Pomerol & J. Ricour. *Terraires et Thermalisme, les eaux minérales françaises*. 1992. Ed. BRGM, 288 p.
- *Réalités Industrielles. Les eaux minérales naturelles; l'inventaire complet des sources en France*, 1998. Série Annales des Mines, 124p.



page 32

◀ **Fleuves**
et rivières
l'état des
Pollués, où et
quel point



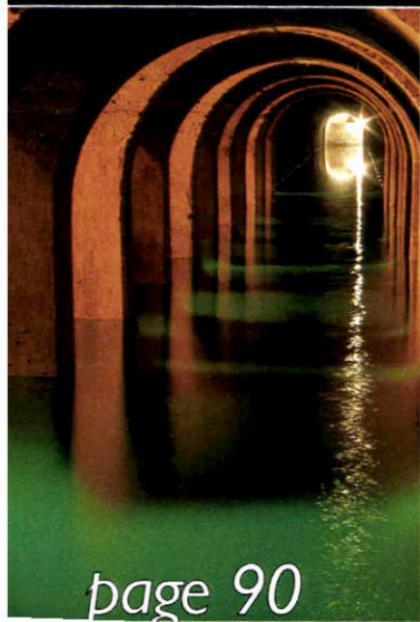
M. BARRET - RAPHO

page

◀ **Sous**
Paris,
un vaste
réseau

*Tout sur l'eau
des Parisiens*

▶
Entre s
et **rob**
Des normes d
boire sans



page 90

E. GAFFARD

▶ **Epurer,**
décanter,
assécher
Assainissement :
des boues
à usages multiples



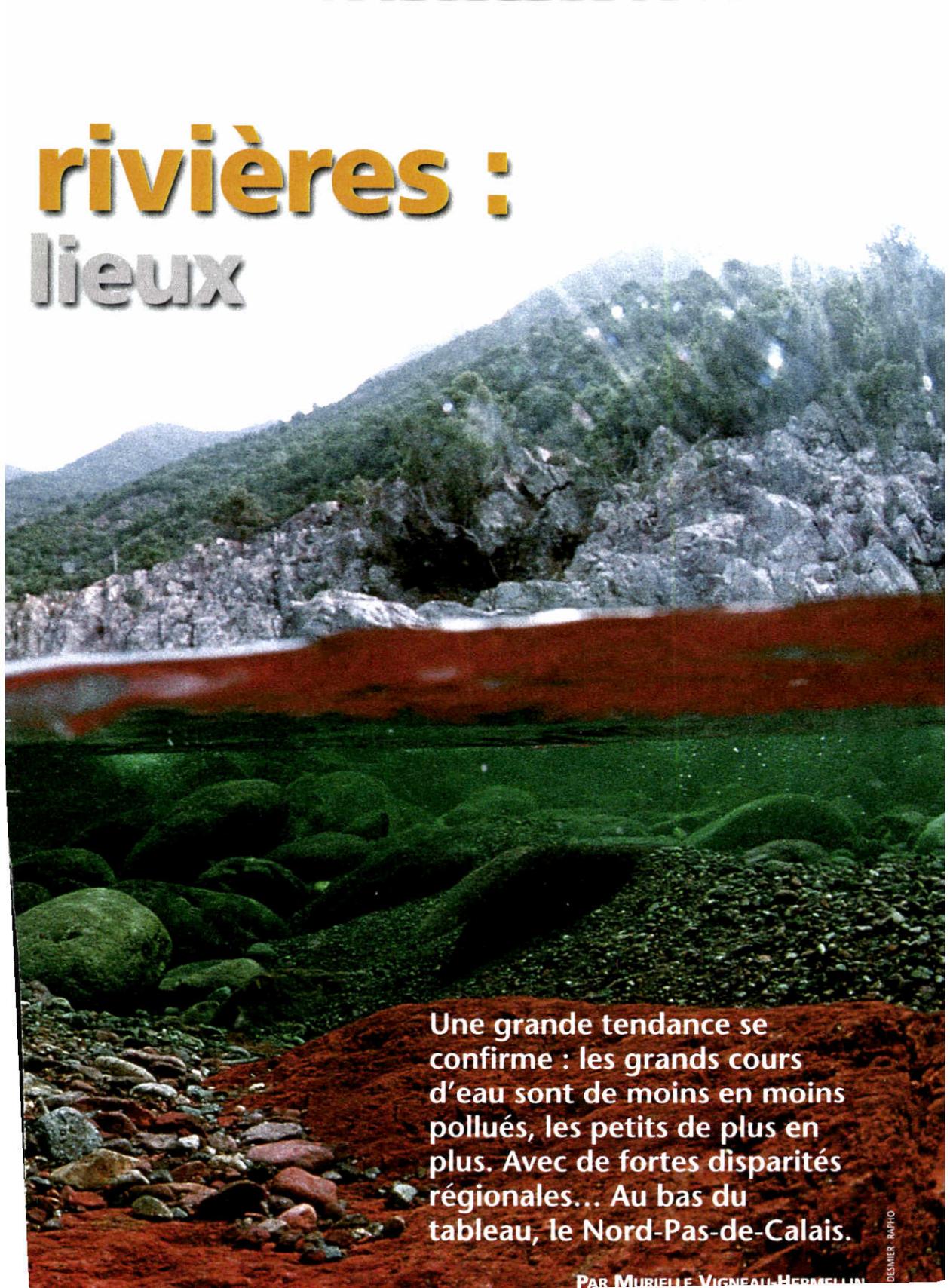
page

Fleuves et l'état de

certains
rellement

mesures
lières de la
ité de l'eau

rivières : lieux



Une grande tendance se confirme : les grands cours d'eau sont de moins en moins pollués, les petits de plus en plus. Avec de fortes disparités régionales... Au bas du tableau, le Nord-Pas-de-Calais.

« Depuis 20 ans, la qualité des eaux s'est globalement améliorée sur la moitié des bassins français, alors qu'elle s'est dégradée sur un peu plus du tiers », estime Elisabeth Louvet, responsable du bureau des données sur l'eau au ministère de l'Environnement. Les grands fleuves sont moins pollués qu'avant, même si la Loire, la Seine, et une partie du Rhône (en particulier entre Lyon et Montélimar) restent très dégradées. Mais pour les petits cours d'eau, la situation empire. A cela deux raisons principales : le manque d'efficacité de l'assainissement en milieu rural, et les pollutions diffuses, d'origine agricole en particulier. La loi sur l'eau de 1992 a permis de fixer un certain nombre d'objectifs à atteindre, via les schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux (S.D.A.G.E.), mais « un écart non négligeable subsiste entre la qualité actuelle et ces objectifs », souligne Elisabeth Louvet. Seuls 40 % des points de mesure montrent des valeurs conformes. Le nombre de zones très polluées diminue, mais dans le même temps, les eaux les plus « pures » tendent à disparaître.

Peut mieux faire

Si leur état de santé s'améliore, les grands fleuves ne sont pas pour autant sortis d'affaire. La Loire (ci-dessous) reste en première ligne pour la pollution par les matières organiques et l'ammonium.

C'est en 1971 qu'a débuté le suivi systématique de la qualité des cours d'eau. On dispose aujourd'hui de 1 500 sites de mesure, répartis sur tout le territoire, et mis en œuvre par le ministère et les 6 Agences de l'eau (Adour-Garonne, Artois-Picardie, Loire-Bretagne, Rhin-Meuse, Rhône-Méditerranée-Corse, Seine-Normandie). Tous font l'objet d'un même protocole de mesure. Chaque année, divers paramètres sont testés en des points choisis. Leur nombre varie avec l'importance du cours d'eau et la nature des pollutions. Si elles ne décèlent pas les pollutions accidentelles, ces campagnes permettent de suivre les évolutions saisonnières et annuelles. Tous les 3-4 ans, le Réseau national des données sur l'eau (RNDE) dresse ainsi des cartes de la qualité des eaux de surface. Celles disponibles à ce jour datent de 1996, les prochaines devraient être éditées fin 2000 ou début 2001.

Quels paramètres physico-chimiques choisit-on pour évaluer la qualité d'une eau ? D'abord, les matières organiques et l'ammonium. En eux-mêmes, ces éléments ne sont pas toxiques. Mais leur excès perturbe l'équilibre biologique, en diminuant le taux d'oxygène dissous dans l'eau. On dose aussi les nitrates et les phosphates, qui compromettent la fabrication d'eau potable et provoquent la prolifération d'algues nuisibles. On relève enfin la température, l'acidité, les sels et l'oxygène dissous. Au besoin, on complète par des



1. Les secteurs dégradés

 Secteur dégradé
 Secteur très dégradé



Cette carte met en évidence les zones où l'eau des rivières est la plus dégradée. Elle s'appuie sur la classification nationale de la qualité des eaux en 4 catégories :

Classe 1 = eau de qualité très bonne (1A) ou bonne (1B). Elle permet une vie normale des poissons et la production d'eau potable par des traitements simples.

Classe 2 = eau de qualité passable. La reproduction de certains poissons peut être compromise. La fabrication d'eau potable est difficile.

Classe 3 = eau de mauvaise qualité, polluée. La survie des poissons peut être compromise.

Classe 4 = eau de très mauvaise qualité.

Depuis la fin des années 1970, on assigne aux cours d'eau des objectifs de qualité, rendus officiels par arrêté préfectoral. La loi sur l'eau de 1992 a précisé ces objectifs en instituant les « schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux », ou SDAGE. Dans chacune des 6 circonscriptions de bassin (Adour-Garonne, Artois-Picardie, Loire-Bretagne, Rhin-Meuse, Rhône-Méditerranée-Corse, Seine-Normandie), les mesures permettent de dresser l'état de l'eau des rivières, et de le comparer à l'objectif. Dans les zones oranges, la qualité de l'eau est mauvaise (classe 3), ou s'écarte d'au moins une classe de l'objectif. Dans les zones rouges, la

2. Pollution par les matières organiques et l'ammonium

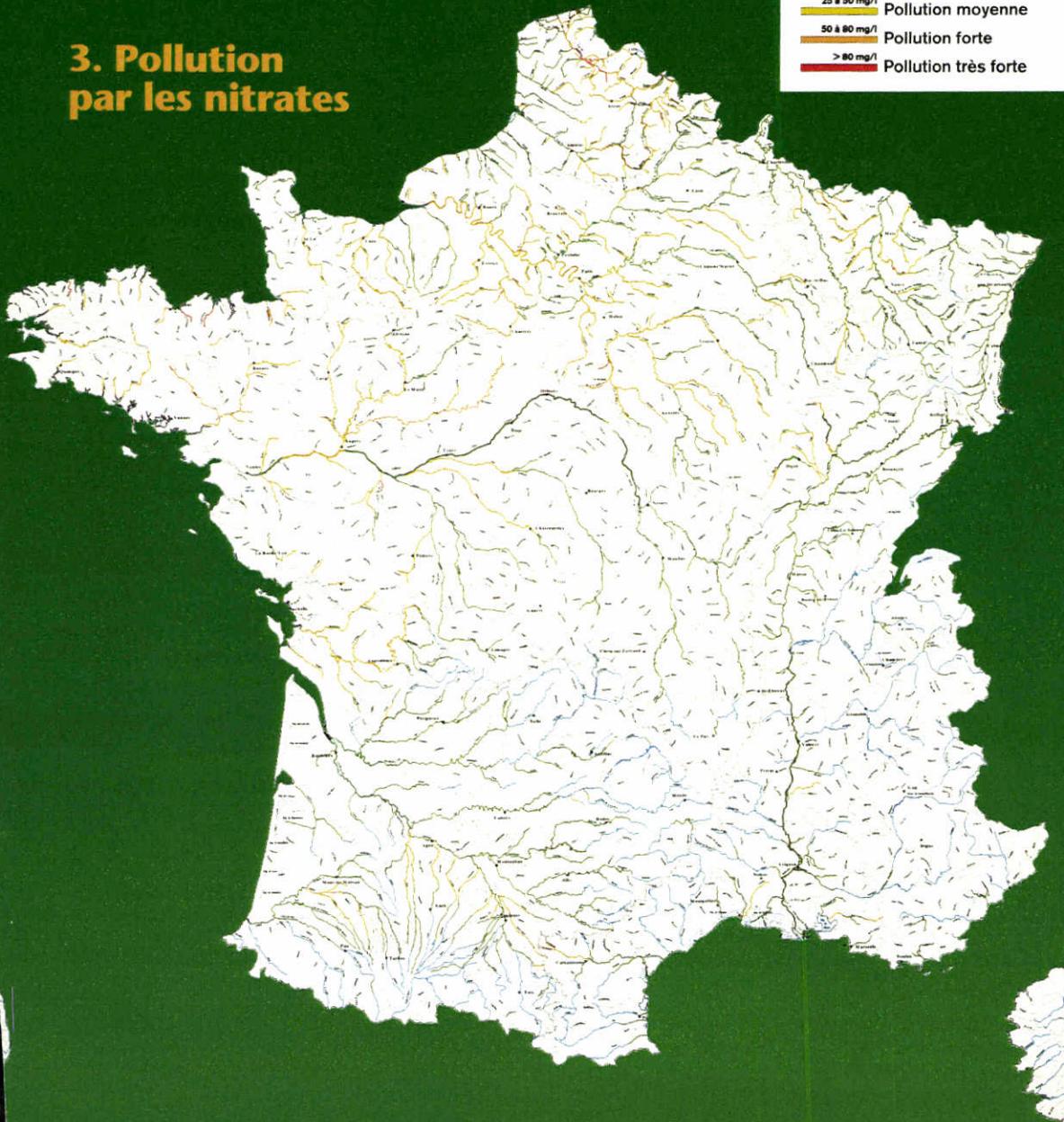


Apportés naturellement par la décomposition des matières vivantes dans les rivières, les matières organiques et l'ammonium sont nécessaires à la vie. Cependant, les rejets des centres urbains, ajoutés aux engrais, au lisier ou au purin, augmentent considérablement leur concentration dans l'eau. En temps normal, les matières organiques sont dégradées par des micro-

c'est ce qu'on appelle auto-épuration. Mais face à un excès, la machine s'emballe : les micro-organismes consomment beaucoup d'oxygène et perturbent l'équilibre biologique par désoxygénation. Les poissons meurent alors par asphyxie. Quant à l'ammonium, apporté entre autres par les engrais, sa dissociation dans l'eau entraîne la formation

- Eau non ou peu polluée
- Pollution faible
- Pollution moyenne
- Pollution forte

3. Pollution par les nitrates



Les nitrates sont naturellement présents dans l'eau des rivières, à raison de quelques milligrammes par litre. Apportés par la pluie et le lessivage des sols, ils ne sont pas nuisibles par eux-mêmes. Leur toxicité vient de leur transformation en nitrites par les bactéries de l'estomac et l'intestin. Très dangereux pour la santé, en particulier celle des nourrissons, les nitrites oxydent l'hémoglobine des globules rouges du sang. Ils sont aussi impliqués dans l'apparition

de cancers de l'œsophage et de l'estomac. Si la pollution par les nitrates a des causes multiples, on estime que plus des deux tiers sont d'origine agricole, le reste provenant de rejets domestiques et industriels. Dans de nombreuses régions agricoles, les communes reçoivent d'ores et déjà une eau dont la teneur en nitrates dépasse la norme de potabilité, établie par l'OMS à cinquante milligrammes par litre. C'est le cas de 12 % des forages du bassin Artois-Picardie.

4. Pollution par les phosphates et eutrophisation

PROLIFÉRATION VÉGÉTALE

| | |
|-----------------------------|----------------------------|
| < 10 mg/m ³ | Absence de prolifération |
| 10 à 60 mg/m ³ | Proliférations faibles |
| 60 à 120 mg/m ³ | Proliférations moyennes |
| 120 à 300 mg/m ³ | Proliférations fortes |
| > 300 mg/m ³ | Proliférations très fortes |

PHOSPHATES

| |
|----------------|
| < 0,2 mg/l |
| 0,2 à 0,5 mg/l |
| 0,5 à 1 mg/l |
| 1 à 2 mg/l |
| > 2 mg/l |

A des doses de quelques centièmes de milligrammes par litre, les phosphates sont indispensables à la vie animale et végétale. Mais en excès, ils provoquent la prolifération de certaines algues et l'enrichissement excessif en matières organiques des eaux des lacs et des rivières. Ce phénomène, qui porte le nom d'eutrophisation, s'accompagne d'une série de nuisances : désagrément esthétique d'une eau verte ou brune, odeurs, colmatage des filtres au cours de la fabrication d'eau potable, perturbation de la vie aquatique. Autrefois limitée aux lacs et aux eaux stagnantes, l'eutrophisation

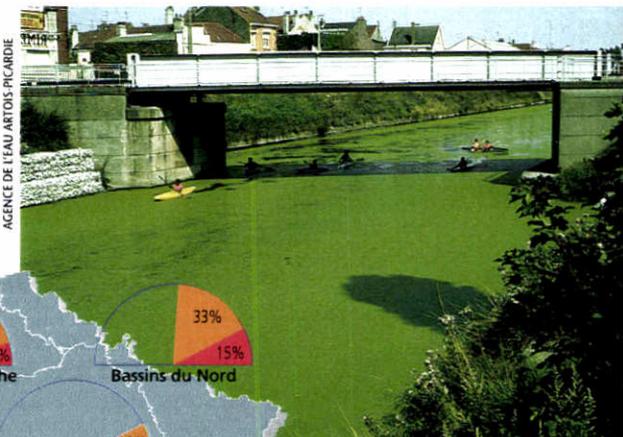
s'observe de nos jours même dans les grands fleuves. Elle est particulièrement perceptible en aval des agglomérations et dans les estuaires. L'excès de phosphates provient des rejets domestiques (lessives phosphatées par exemple), mais aussi des rejets industriels, de l'élevage, et des eaux et boues résiduaire des stations d'épuration. Pour lutter contre ces proliférations, des détergents sans phosphates ont été introduits sur le marché; ils contiennent, par exemple, des silicates ou des carbonates. Mais ces derniers ont le défaut d'augmenter l'alcalinité de l'eau.

analyses plus élaborées : métaux lourds (chrome, cadmium, arsenic) et micro-polluants organiques.

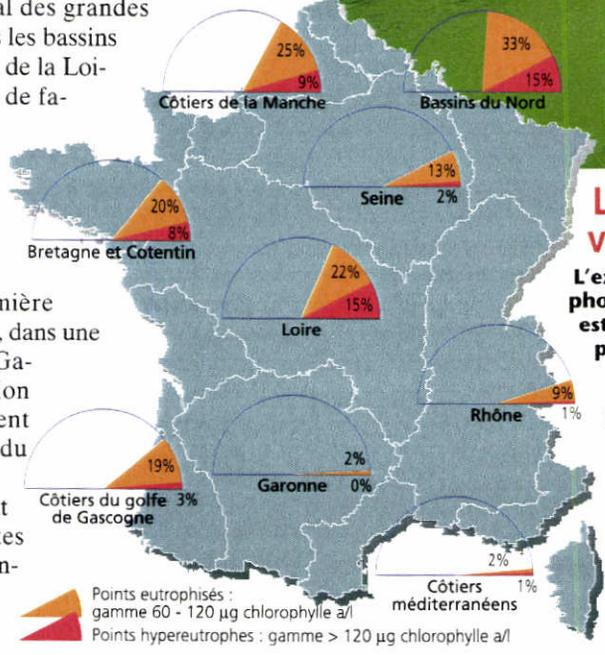
BONNES ET MAUVAISES NOUVELLES

Qu'en ressort-il ? La **pollution par les matières organiques**, issue des déchets humains et industriels, connaît une baisse relative. Elle reste toutefois importante dans certaines zones, en particulier en aval des grandes agglomérations, dans les bassins du Nord, de la Seine, de la Loire. Elle touche aussi de façon plus localisée le Rhône, entre Lyon et Valence. La **pollution par l'ammonium**, elle, s'étend sur les grands fleuves. La Seine est en première ligne, avec la Loire et, dans une moindre mesure, la Garonne. Cette pollution touche aussi fortement les petites rivières du Nord.

Mais ce sont surtout les taux de phosphates et de nitrates qui inquiètent les autorités publiques. Cause majeure de la mauvaise qualité des cours d'eau, la **pollution par les phosphates** se développe surtout dans les zones à forte activité urbaine ou industrielle. On la trouve dans les bassins très pollués du nord de la Seine, ainsi qu'en aval des grandes agglomérations : Strasbourg, Nantes, Dijon, Toulouse, Marseille, Annecy... Ce qui confirme le rôle des apports domestiques dans cette forme de pollution. La tendance générale est à une légère diminution des teneurs en phosphates. Elle est probablement liée au moindre emploi des pyrophosphates dans les détergents ménagers, à la réduction des usages industriels, et à une meilleure déphosphatation des rejets dans les usines d'épuration. Mais ces progrès ne suffisent pas encore à empêcher la prolifération des algues. Quant à la **pollution par les nitrates**, elle est en hausse constante sur les deux tiers du territoire. Elle domine dans l'Ouest et le Nord-Ouest de l'Hexagone, où se combinent agriculture intensive



AGENCE DE L'EAU ARTOIS-PICARDIE



La montée verte

L'excès de nitrates et de phosphates dans les rivières est responsable de la prolifération d'algues. Celles-ci ne font pas qu'altérer la couleur de l'eau : elles contribuent, en pompant l'oxygène, à l'asphyxie des autres formes de vie aquatique. Ce phénomène, appelé eutrophication, touche un nombre croissant de cours d'eau. (Ci-dessus, le canal de Bergues.)

GRAPHIES METLAN. SOURCE : IFEN D'APRÈS BRDE

et forte densité de population. La teneur en nitrates des eaux de surface varie beaucoup avec les saisons : maximale en février et minimale en août, en liaison avec l'épandage des engrais.

Conséquence de ces excès de nitrates et de phosphates, la « pollution verte » progresse de façon massive. Son nom vient de la prolifération d'algues, qui donnent à l'eau une couleur verte ou brun et asphyxient les autres formes de vie aquatique. Le phénomène est aussi appelé eutrophication. On l'observe « de plus en plus fréquemment, sur une période plus longue, et sur un nombre croissant de cours d'eau », constate Elisabeth Louvet. *Tous les départements sont touchés*. Selon l'Institut français de l'environnement (IFEN), 29 % des ressources en eaux superficielles sont eutrophisées, en premier lieu les fleuves (1). Environ la moitié des petits cours d'eau restent épargnés. Avec, quand même, des disparités régionales. Plus de 60 % des ressources en eaux sont eutrophisées dans les bassins du Nord et de l'Est, plus de 45 % dans le bassin de la Loire, entre 30 et

1 - Note publiée en 1999 dans *Les données de l'environnement eau*, N° 48, Octobre 1999.

45 % pour la Bretagne, le Rhône et le pourtour méditerranéen. Dans les bassins côtiers du golfe de Gascogne et de la Garonne, les atteintes sont plus localisées. Une évaluation, commencée en 1971, montre que les bassins versants qui subissent des pressions de type agricole sont atteints depuis au moins 20 ans. Ce sont eux qui présentent le niveau d'eutrophisation le plus élevé. Pour faire face au problème, des programmes d'équipement avancés ont été mis en place, notamment en Loire-Bretagne, où de nombreuses collectivités ont investi pour que leurs stations d'épuration éliminent les phosphates.

AUTRES INDÉSIRABLES

Outre ces trois pollutions principales, d'autres, dues cette fois à des produits non biodégradables, préoccupent aussi le ministère de l'Environnement. La **pollution par les métaux lourds** résulte soit des rejets agricoles (insecticides, fongicides), soit de l'industrie (électronique, électricité, automobile...). On la trouve surtout dans le nord et l'est de la France, dans le bassin de la Seine, et en région Rhône-Alpes. A l'état de traces, certains métaux comme le fer, le chrome ou le cobalt sont essentiels à la vie des organismes, mais ils deviennent toxiques en grande quantité. Deux métaux ont des effets particulièrement désastreux : le mercure, qui bloque le site actif de la vitamine B12, et le plomb, responsable du saturnisme.

La **contamination par les pesticides** (provenant des usages agricoles et urbains, du traitement des voiries, etc.) est assez généralisée sur l'ensemble

du territoire, y compris en aval des grands fleuves, où ces produits subissent pourtant une forte dilution. Les plus fréquents dans les rivières sont l'atrazine et la simazine, deux herbicides utilisés sur les cultures de maïs et les vignes, ainsi que le lindane, insecticide dont l'usage agricole est interdit depuis deux ans. Encore une fois, la pollution est saisonnière : c'est généralement au printemps, période de traitement des cultures, que le niveau de contamination des milieux aquatiques par les pesticides est le plus élevé.

Au vu de ces données, la région Nord (Nord-Pas-de-Calais) semble particulièrement défavorisée. Pourquoi ce mauvais état de santé ? L'Agence de l'eau Artois-Picardie incrimine plusieurs facteurs. Dans la région, la densité de la population est 3 fois plus élevée que la moyenne nationale. Or, les cours d'eau du Nord ont un débit trop faible pour drainer toute la pollution produite. A titre de comparaison, le bassin du Rhône a un débit de 55 milliards de m³/an, contre seulement 4 milliards de m³/an pour le bassin Artois-Picardie ! Qui plus est, les pressions industrielles sont très fortes. Des industries polluantes comme celle de l'amidon, le peignage de laine ou la transformation de la pomme de terre sont implantées respectivement à 90 %, 90 % et 70 % en Artois-Picardie. Et à cette pollution s'ajoute celle, plus ancienne, des nombreuses friches industrielles. Dans le seul département du Pas-de-Calais, plus d'un millier de sites recèlent dans leurs sol et sous-sol des substances nuisibles pour les eaux superficielles et souterraines, témoins d'activités minières, chimiques ou métallurgiques aujourd'hui disparues. C'est encore en Artois-Picardie que le réseau des canaux est le plus important. Or, la canalisation des cours d'eau a réduit les méandres des rivières qui permettaient, en allongeant le parcours de l'eau, une meilleure auto-épuration.

Si la qualité des eaux françaises est en moyenne assez médiocre, il existe malgré tout de très grandes fluctuations d'une année sur l'autre, en fonction des variations de débit dues au régime des pluies. Il faut aussi garder à l'esprit que l'amélioration et la multiplication des systèmes de mesure dévoilent des problèmes jusqu'alors méconnus ou inconnus, ce qui a pour conséquence d'accroître les exigences de qualité. Aujourd'hui, on dispose d'outils plus performants et plus divers pour lutter contre les multiples polluants. Il n'en reste pas moins que l'emploi de ces outils se répercute forcément en termes de coûts, et en particulier sur le prix de l'eau potable payé par le consommateur. □



R. MICHEL - RAPHO

Les lignes de vie

En allongeant le cheminement de l'eau, les méandres facilitent son auto-épuration. Ce parcours de santé est abrégé par les canalisations. (Ici, confluence de la Durance et du Verdon.)

LE POISSON, UN GAGE DE QUALITÉ

■ Si la truite ou le brochet peuplent une rivière, c'est bon signe. D'autres espèces, en revanche, annoncent la pollution.

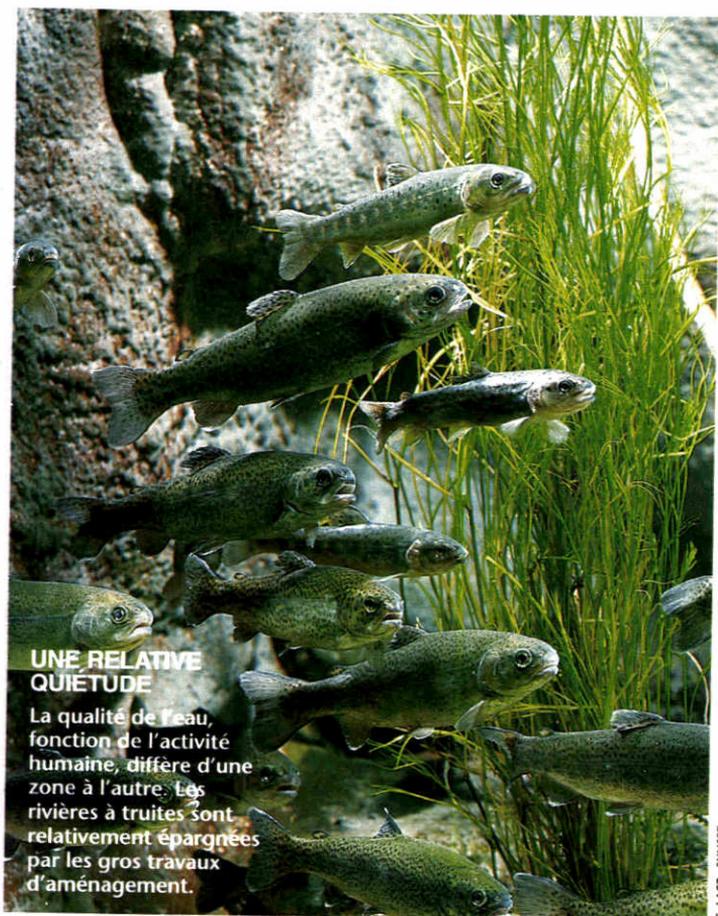
PAR MURIELLE VIGNEAU-HERMELLIN

Aujourd'hui, l'examen de la faune et de la flore est essentiel pour mesurer la qualité des eaux. Lui seul permet d'intégrer les variations sur le long terme et de suivre l'état général de l'écosystème.

L'examen des animaux vivant sur le fond, mollusques, crustacés, larves d'insectes, vers, etc., se limite aux petits cours d'eau. Il permet d'attribuer une note IBGN (Indice biologique global normalisé), qui traduit l'influence de la qualité de l'eau vis-à-vis de ces populations.

Le gros de l'analyse porte sur les poissons. Ce sont de bons révélateurs de la qualité des milieux, car ils possèdent une position élevée dans l'édifice biologique. Qui plus est, la plupart des espèces ont une durée de vie longue, souvent supérieure à dix ans. La faune piscicole française d'eau douce et d'eau saumâtre regroupe près de 80 espèces; 25 sont considérées comme menacées et 24 ont été introduites à partir de l'Amérique du Nord, de l'Europe centrale ou de l'Asie.

Chaque année, des opérations de pêche à l'électricité permettent de recueillir des informations en 600 points de l'Hexagone : les stations du réseau hydrobiologique et piscicole (RHP), mis en place depuis 1992 et géré par le Conseil supé-



UNE RELATIVE QUIETUDE

La qualité de l'eau, fonction de l'activité humaine, diffère d'une zone à l'autre. Les rivières à truites sont relativement épargnées par les gros travaux d'aménagement.

rieur de la pêche. On suit ainsi d'une part, l'impact des grands événements naturels, sécheresse ou crues, sur les peuplements, et d'autre part, leur évolution face aux pressions des activités humaines. C'est aussi l'occasion de voir le fruit des efforts de lutte contre les pollutions et de réhabilitation de la qualité des milieux naturels.

Réglementairement, on distingue, pour la pêche, deux types de cours d'eau :

– Les cours d'eau de première catégorie sont ceux où les salmonidés dominent. On y trouve donc des truites, mêlées, dans la partie amont des rivières, à des

espèces de petite taille comme le chabot, le varion, la loche. En aval, les truites cohabitent avec des espèces plus grandes, telles que l'ombre et les cyprinidés d'eaux vives.

– Dans les cours d'eau de deuxième catégorie, les cyprinidés dominent : gardon, rotengle, carpe, ablette... On y trouve aussi d'autres espèces à large répartition et notamment des carnassiers comme le brochet, le sandre, la perche ou le silure.

Dans les deux cas, d'amont en aval, plusieurs types de peuplement se succèdent, caractérisés chacun par la présence d'espèces repères. Dans les eaux

LE SAUMON EN PREMIÈRE LIGNE



L. CAMPBELL - FOTOGRAF-STONE IMAGES

Espèce emblématique de toute la façade atlantique, le saumon est menacé. Son aire de répartition a beaucoup régressé, si on la compare à ce qu'elle était au milieu du XVIII^e siècle. Il a totalement disparu de nombreux bassins : Rhin, Moselle, Meuse, Somme, Seine, Rance, affluents de la Loire moyenne, Haute-Loire, affluents de la Garonne et de la Dordogne...

De fait, son cycle biologique complexe le rend sensible à toutes les dégradations. Le saumon est un poisson migrateur. Né en amont des cours d'eau, il va grossir en mer avant de revenir, 1 à 3 ans plus tard, se reproduire dans son cours d'eau natal. Après 3 mois d'incubation, les œufs donnent de jeunes saumons ou tacons, qui restent encore plusieurs mois en rivière avant de subir une métamorphose physiologique (smoltification). Ils peuvent alors gagner la mer et rejoindre leur zone d'engraissement, au large du Groenland et des îles Féroé. Les pièges sont nombreux au long du parcours vers la mer : filets, hameçons des pêcheurs, mais aussi barrages... Une fois qu'il les a déjoués, le saumon doit encore survivre à la pollution et retrouver ses zones de frayères... quand elles n'ont pas été détruites!

En France, 80 % des captures à la ligne se font en Bretagne et en Basse-Normandie. Depuis quelques années, l'Etat, la région Bretagne, les conseils généraux, le Conseil supérieur de la pêche et les fédérations de pêche bretonnes se sont associés pour développer le contrat « Retour aux sources ». En 6 ans, 32 millions de francs ont été investis pour rétablir les axes de migration (aménagement de passes à poissons), soutenir les stocks, assurer le suivi des populations. Les périodes de pêche et les prélèvements autorisés sont fixés par les Comités de gestion des poissons migrateurs (C.O.G.P.O.M). Des actions de grande envergure se développent aussi sur la Loire, la Dordogne, la Garonne, l'Adour. Quelques barrages-obstacles ont aussi été placés, solution radicale, mais sans doute la plus efficace pour rétablir les axes de migration.

fraîches et vives des ruisseaux, les espèces de poissons sont naturellement peu nombreuses, mais très exigeantes en oxygène dissous. Dans les rivières, la pente et la vitesse du courant dimi-

nuent. Et à mesure que le cours d'eau s'élargit, la végétation aquatique se développe. Les fleuves, enfin, se caractérisent par une pente faible, un courant lent, des profondeurs impor-

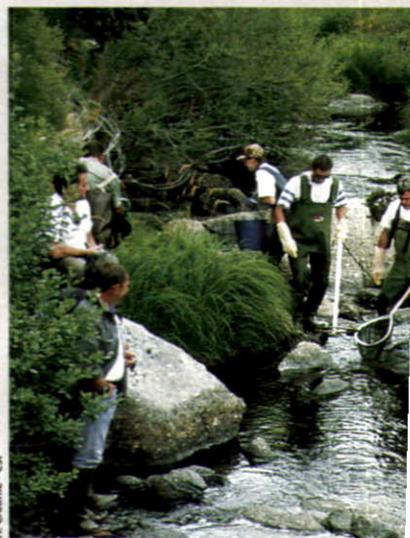
tantes. Quand elle n'est pas perturbée, la dynamique fluviale garantit la création de bras morts, qui favorisent la croissance des alevins. Les poissons d'eaux vives s'effacent au profit d'espèces d'eaux calmes plus nombreuses, aux modes d'alimentation et de reproduction très variés. En l'absence de perturbation, c'est ainsi à l'aval des cours d'eau que la richesse des peuplements est la plus grande.

Quel est, aujourd'hui, l'état des lieux ? Sur l'ensemble de l'Hexagone, l'état de santé des peuplements en poissons apparaît perturbé. En beaucoup d'endroits, certaines espèces caractéristiques manquent à l'appel, d'autres prolifèrent (comme les poissons de deuxième catégorie dans les rivières de première catégorie). Parfois, le peuplement observé n'a plus rien à voir avec celui attendu.

Les différences de qualité, d'une zone à l'autre, s'expliquent par la nature et l'intensi-

PRENDRE LE POULS

Des opérations de pêche à l'électricité sont pratiquées annuellement dans les quatre coins de France. Elles visent à suivre de près la santé des milieux aquatiques.



H. CARBIE - C.F.P.

té des activités humaines. Les zones à truites bénéficient souvent d'une bonne qualité de l'eau et sont relativement épargnées par les travaux hydrauliques durs. Ce n'est pas le cas des cours d'eau de deuxième catégorie. Ils sont en effet les premières cibles des travaux d'aménagement visant soit à limiter l'intensité des crues, soit à assurer l'évacuation rapide des eaux drainées par les exploitations agricoles. Rectifications, reprofilage, recalibrage, curage : ces lourds travaux affectent les lits des rivières, réduisant le nombre et la diversité des abris pour poissons. Qui plus est, les canalisations destinées à la navigation s'accompagnent de l'édification de berges enrochées, inhospitalières pour la faune piscicole. Enfin, la modification des pratiques agricoles a entraîné l'isolement et la destruction des annexes au lit principal (noues, bras morts, fossés...). Ce qui affecte la reproduction de certaines espèces, comme le brochet. Le bassin du Rhin symbolise parfaitement cette situation : dans cette zone, 66 % des zones à cyprinidés ont un peuplement médiocre. □

POUR UNE POLITIQUE D'AMÉNAGEMENT PLUS RESPECTUEUSE

■ « Arrêter la prolifération des plans d'eau. » Telle est, selon Gilbert Marsollier, secrétaire général de l'Union nationale de la pêche, l'une des priorités pour lutter contre la dégradation des milieux aquatiques.

PROPOS RECUEILLIS PAR MURIELLE VIGNEAU-HERMELIN

SVHS : Que pensez-vous de l'état général des eaux de surface en France ?

Gilbert Marsollier : On assiste depuis une quarantaine d'années à une dégradation des milieux aquatiques. Après-Guerre, l'urbanisation de la population a, entre autres, posé un problème d'épuration des eaux usées. Elle s'est accompagnée du développement de nouvelles industries, chimie par exemple puis agroalimentaire, à une époque où on se préoccupait assez peu d'environnement, ainsi que d'une mutation profonde de l'agriculture. C'était l'époque des « 30 glorieuses », pendant laquelle on sacrifiait au « dieu productivisme ».

Avant même l'existence des mouvements écologistes, avant même que le mot écologie n'entre dans le vocabulaire courant, les pêcheurs ont été les premiers à donner l'alerte. Leur réseau de 4 200 associations a permis de dénoncer les catastrophes en cours et de commencer à agir, y compris devant les tribunaux.



Gilbert Marsollier

PÊCHEUR DE FRANCE

SVHS : Aujourd'hui, les pollutions n'ont plus les mêmes causes ?

Gilbert Marsollier : Les grandes pollutions dues aux rejets urbains et industriels, spectaculaires avec leurs milliers de poissons morts, sont en cours de résorption. Mais s'y sont ajoutées d'autres agressions du milieu aquatique : des pollutions accidentelles, spectaculaires mais ponctuelles (panne d'une station d'épuration, mauvaise manœuvre dans une usine, accident d'un camion citerne...); des pollutions chroniques, pernicieuses, aux effets moins visibles, mais qui perturbent profondément le milieu sur le long terme.

Parmi les sources de dégradation, on peut citer les travaux hydrauliques lourds qui, à coups de pelleuses, recalibrent et reprofilent les moindres ruisseaux, pour les transformer en simples exutoires des eaux, sans tenir compte du fait qu'ils étaient des milieux de vie; l'emploi intensif d'engrais chimiques et de pesticides; la modification des paysages ruraux et périurbains;





HÉCATOMBE D'ÉTÉ

Les grandes pollutions accidentelles frappent à juste titre les esprits (ici, la Seine un jour de canicule, en 1992). Mais il en est d'autres, moins visibles et plus pernicieuses: celles qui, par suite d'une modification forcée des paysages, dégradent le milieu sur le long terme.

été entrepris dans beaucoup de domaines, mais les résultats ne peuvent être immédiats. Il faudra, par exemple, sans doute plus de 10 ans pour faire baisser le taux de nitrates dans l'eau.

SVHS : Quelles mesures proposez-vous?

Gilbert Marsollier : Les pollutions urbaines ou industrielles sont maintenant assez bien localisées, ce qui ne veut pas dire qu'elles soient toutes résolues. On a construit de nombreuses stations d'épuration – qui laissent malgré tout passer un flux polluant, l'épuration à 100 % n'existe pas. Mais les pollutions d'origine agricole, diffuses, sont plus difficiles à cerner.

Soulignons que la pollution d'origine agricole est née d'une agriculture intensive, qui s'est imposée ou que l'on a imposée aux agriculteurs. Ce ne sont pas eux qui ont inventé les techniques (hors-sol, maïsiculture, irrigation...) ou les produits utilisés (engrais minéraux, pesticides...).

Les solutions résident dans une nouvelle politique agricole, plus respectueuse de l'environnement, et ne pénalisant pas les revenus des agriculteurs. Le cas le plus évident est celui des primes. Si dans les vallées, par exemple, on encourage les prairies permanentes davantage que le maïs irrigué, on aura fait un grand pas. Mais cette politique agricole se décide pour l'essentiel au niveau de l'Europe.

D'autres progrès se font jour, en concertation avec la profession agricole. Ainsi, dans certains départements, des arrêtés préfectoraux diminuent les doses autorisées d'atrazine. Enfin, il est absolument nécessaire d'arrêter la prolifération des plans d'eau, comme ont été pratiquement stoppés les travaux hydrauliques lourds. □

l'élevage intensif, souvent en hors-sols...

D'autres sources de dégradations, moins évidentes, n'en sont pas moins réelles. La plus importante est la prolifération des plans d'eau, qui entraînent évaporation, augmentation de la température, abaissement du taux d'oxygène, eutrophisation,

introduction d'espèces indésirables, etc.

Le grand public a ainsi dû se familiariser avec les mots nitrates, phosphates, métaux lourds, pesticides, eutrophisation, étiage... qui mettent en péril l'alimentation humaine en eau potable à partir des eaux superficielles. De gros efforts ont

Usine "Seine Centre" Colombes

Performances techniques,
discrétion absolue,
efficacité décuplée : jamais
eau n'a été si bien traitée.



Une usine intégrée à son environnement

La conception exceptionnelle de l'usine a permis l'intégration souterraine des bassins habituellement en plein air, évitant ainsi tout risque de nuisance olfactive. Les fumées émises lors du traitement des boues sont lavées et filtrées pour préserver la qualité de l'air.

Des pollutions de plus en plus maîtrisées

L'usine est l'aboutissement des progrès techniques en matière de lutte contre la pollution : élimination des matières en suspension, de la pollution carbonée et d'une grande partie des pollutions azotées et phosphorées. La qualité reste l'objectif principal de "Seine centre", pour toujours mieux protéger le fleuve.

LA SEINE, VOUS L'AIMEZ



NOUS LA PROTÉGEONS

L'eau des nappes : il faut changer de conduite

Les eaux dans le sous-sol se comportent à grande échelle de façon très différente selon le milieu dans lequel elles circulent : milieu sédimentaire – on parle alors d'aquifère sédimentaire ; milieu de socle ou de roches métamorphiques – on parle là d'aquifère de socle.

Le Bassin parisien, le Bassin aquitain ou la plaine d'Alsace constituent des exemples de grands bassins sédimentaires. Dans ces structures généralement immenses, les niveaux aquifères sont multiples et superposés. L'eau des niveaux profonds est en pression et les échanges qui se produisent entre niveaux sont très lents. En termes de ressources, les volumes d'eau sont considérables. On estime par exemple à quelque 400 milliards de mètres cubes⁽¹⁾ celui de l'aquifère de l'Albien du bassin de Paris. Cette nappe, qui s'étend sur 75 000 km² – d'Arras à la Sologne et de l'embouchure de la Sei-

ne à Troyes – est constituée de sables et d'argiles intercalés.

Par comparaison, les aquifères de socle présentent de toutes autres caractéristiques. Ils sont d'abord superficiels, ne s'étendant guère en dessous de 120 m. Résultat :

cette faible profondeur fait que l'eau qu'ils offrent, moins minéralisée, est plus vulnérable à la pollution. Les interactions avec la surface sont de fait quasi constantes. Enfin, la présence et la capacité de ces aquifères dépendent moins du type de roches qui les forme que de la façon dont ces roches ont été fracturées et altérées. La découverte des meilleurs de ces sites implique

donc une prospection appropriée et très technique.

A ces deux catégories, il faut en ajouter une troisième : les nappes alluviales, présentes dans la

Ne plus forer à l'aveuglette...

L'exploitation des eaux souterraines a longtemps été pratiquée sans aucune connaissance de l'état des nappes et de leur comportement. La donne devrait changer avec les nouvelles techniques de modélisation.

L'eau souterraine, par définition, ne se voit pas. Et tout se passe, dans les esprits, comme si on ne risquait rien à la dégrader et ne gagnait rien non plus à l'améliorer. Le temps est certainement venu de raisonner autrement si l'on veut éviter des préjudices durables.

PAR THIERRY POINTET

1 – Attention, ce chiffre est plus une curiosité qu'une ressource : à 800 mètres de profondeur, il serait inconcevable de dénoyer l'aquifère, tout au plus pourrait-on compter sur le volume que peut libérer l'eau en se décompressant (mode de production des nappes captives, ce qui place la ressource proprement dite à un ordre de grandeur 100 à 1 000 fois plus faible que ce chiffre).



plupart des vallées. Parfois très importantes en capacité, elles constituent des ressources d'autant plus cruciales à protéger qu'elles coïncident avec la présence de zones habitées. Elles ont les mêmes caractéristiques que les nappes sédimentaires, mais étant peu profondes, sont très vulnérables. Outre qu'elles peuvent échanger de l'eau avec les cours d'eau, elles se rechargent par la surface du sol et communiquent aussi avec des nappes sous-jacentes.

Ces quelques définitions nous font comprendre qu'il existe une géographie des systèmes aquifères (voir la carte en page de droite). Le fait que cette dernière soit calée sur la géologie du proche sous-sol donne à l'hydrogéologie la caractéristique d'une science de la surface de l'écorce terrestre.

Prévisibles ou non

Contrairement à ce qu'on croit, toutes les crues ne résultent pas de ruissellements, comme celle qui s'est brutalement produite à Vaison-la-Romaine, en 1992 (ci-dessous). La plupart des crues d'hiver, comme celle de la Marne, sont prévisibles et font intervenir les nappes.

OBSERVER, COMPRENDRE, PRÉVOIR

Observer, suivre et prévoir, en quantité comme en qualité, les états et fluctuations de la ressource en eau profonde, tels sont les objectifs de l'hydrogéologie. Ils impliquent d'identifier les différentes structures, d'étudier l'écoulement des nappes, les échanges aux limites, les causes des changements d'état et notamment des dégradations. Par suite de l'inertie des nappes, un facteur est essentiel pour comprendre leur fonctionnement : le temps, qu'il s'agisse de l'âge de l'eau ou de son temps de transit. Pour le mesurer, on dispose d'une horloge géologique naturelle : les isotopes de l'eau et ceux de certains éléments contenus dans les sels minéraux dissous. Une fois toutes les données acquises, et après plusieurs étapes de traitement, on vérifie leur cohérence en simulant l'écoulement et la chimie de la nappe à l'aide de modèles. On accède ainsi aux paramètres déterminants dans son fonctionnement.

L'ensemble de cette procédure connaît toutefois une limite. Les ouvrages qu'elle implique – en général des forages – reviennent très cher. Toutes dépenses confondues, obtenir une donnée



Une répartition inégale

La productivité des nappes tient au niveau de perméabilité des roches du sous-sol. Aux premiers rangs, les bassins sédimentaires et les plaines alluviales.

Productivité

-  > 100 m³/h
-  10 à 100 m³/h
-  1 à 10 m³/h
-  < 1 m³/h

Zones d'accès difficile

-  Aquifères calcaires karstiques
-  Aquifères de socle
-  Régions montagneuses non classées

S. FLORAND SOURCE BRGM

chiffrée sur les eaux souterraines est toujours plus coûteux que sur les eaux de surface. Conséquence : la connaissance des aquifères profonds a plutôt suivi que précédé l'installation des premiers équipements de production, raison pour laquelle toute anticipation est le plus souvent restée impossible.

Cette situation a changé depuis peu grâce à l'établissement, en 1996, d'un bilan de la situation générale en France et à la promotion par la Direction de l'eau du ministère de l'Aménage-

ment du territoire et de l'Environnement, des recommandations établies par une commission d'experts, présidée par Yves Martin. Ces recommandations ont permis de préciser les enjeux d'une gestion à long terme et un réseau pour le suivi des grandes unités aquifères du pays est en cours de constitution. Ce réseau, même si là n'est pas son but premier, permettra de suivre des tendances et donc d'aider à l'exploitation : connaître pour mieux exploiter, pour préserver les ressources du futur donc gérer, mais aussi connaître

pour faire coexister des usages très différents de l'eau dans une aire géographique donnée.

LES MARGES DE PROGRÈS

La gestion des nappes, de façon générale, se heurte pour l'heure à quatre catégories de problèmes : les exploitations qui dépassent le régime de renouvellement naturel de la ressource, les pollutions diffuses ou ponctuelles souvent durables, les mécanismes de propagation des pollutions diffuses, les situations de pénuries saisonnières. Ajoutons-y, fait moins connu, la participation des nappes elles-mêmes dans les situations de crise. Des traçages isotopiques nous ont ainsi montré comment leurs eaux pouvaient entrer dans les crues d'automne ou d'hiver, jusque-là toujours attribuées au ruissellement.

Dans de nombreux cas, pourtant, on met en évidence une pratique passée dans les mœurs et qui est particulièrement préjudiciable : l'exploitation extensive des nappes. Elle consiste à aller chercher toujours plus loin ou plus en profondeur une eau de qualité tout en abandonnant en l'état les ressources déjà sollicitées et dégradées. Cette façon de procéder revient en fait à accélérer le rythme de la dégradation. Une alternative consis-

terait à faire cohabiter les utilisations de l'eau, exploitations et rejets, dans des aires géographiques ou des volumes géologiques limités, au prix des traitements et du suivi nécessaires. Cette dernière voie s'apparente à une gestion volontaire du milieu, de la ressource et des éventuels effluents pour le bien des générations futures. Elle repose sur un constat de bon sens : chaque catégorie d'usage n'implique pas la même qualité d'eau. Qu'est-ce qui en effet justifie qu'on utilise une eau de qualité potable dans des process industriels ?

Il semble évident que les progrès futurs viendront pour l'essentiel d'une meilleure connaissance des eaux souterraines. Notons cependant que le fait que ces eaux restent à l'abri des regards – on ne les voit ni se dégrader ni s'améliorer – n'est pas pour encourager les efforts financiers qu'il faudrait consacrer à leur étude et à leur protection. Et ce, malgré les milliards de mètres cubes qu'elles représentent.

GÉRER LA RESSOURCE SOUTERRAINE

Deuxième facteur de progrès, la gestion active, c'est-à-dire une meilleure intervention sur les phénomènes naturels. Nous savons déjà recharger artificiellement des nappes déprimées, multiplier et entrouvrir les fractures du socle pour mieux collecter une eau rare. Ultérieurement, nous pouvons peut-être espérer agir sur le milieu intermédiaire pour éviter que les pollutions diffuses n'atteignent les nappes. C'est une voie de recherche actuelle.

En attendant, c'est peut-être sur la conduite des actions destinées à mieux gérer la ressource souterraine que doit porter la priorité. De l'échelon local à l'échelon national, les acteurs sont encore trop nombreux, ce qui tend à diluer des moyens toujours trop limités. Plusieurs actions remarquables ont pourtant vu le jour ces dernières années. Des réseaux de bassin, en Rhône-Méditerranée-Corse, en Loire-Bretagne, en Alsace amènent tous les services qui ont compétence sur l'eau à mettre en commun leurs moyens et leurs données pour établir des bilans et des bulletins de suivi. Le RNDE, les Agences de l'eau et le BRGM mettent à disposition de l'ensemble des acteurs des méthodes de traitement de l'information, ainsi que des jeux de données, notamment celles de la Banque du sous-sol, pour aider les gestionnaires. Ce point est d'importance : il y a en effet beaucoup trop de négligence par rapport à tout ce qui est répandu sur le sol, et qui s'infiltré ensuite dans les nappes. □

LES CHIFFRES DE L'EAU SOUTERRAINE EN FRANCE

La réserve en eau souterraine de la France est estimée à 2 000 milliards de mètres cubes⁽¹⁾, la ressource exploitable (facilement accessible) à 20 milliards de mètres cubes. Un récent travail du RNDE⁽²⁾ fait ressortir pour 1997 que 8,2 milliards de mètres cubes ont été exploités à partir des nappes. Cela représente 25 % de l'exploitation totale des eaux (32,5 milliards de mètres cubes). 43 % ont été destinés à la fourniture d'eau potable, 20 % d'eaux industrielles et 11 % pour l'irrigation des cultures en supplé-

ment à l'infiltration naturelle des pluies.

Si l'on entre dans le détail bassin par bassin, les chiffres globaux varient peu depuis 15 ans. La composante qui a certainement le plus varié est la part destinée à l'irrigation qui est aussi la moins bien mesurée.

1 - Ce chiffre correspond à la somme de ce que les nappes libres pourraient fournir par dénoyage et les nappes captives par décompression.

2 - Le Réseau national des données sur l'Eau regroupe les principaux acteurs du secteur public pour l'eau : les services centraux et décentralisés des ministères, les Agences de l'eau, des organismes publics de recherche comme l'Ifremer, Météo France, le BRGM.

L'EAU SOUS LA BEAUCE : ON COMMENCE À COMPRENDRE



J. ANDANSON - SYGMA

Comme sa révision complète, entreprise en 1997, a permis de l'établir, le système hydrogéologique du plateau beauceron est plus compliqué qu'on le croyait, et son état n'est pas bon. Observées depuis maintenant vingt ans, les dégradations qui l'affectent se sont considérablement accélérées ces dix dernières années. Cela tient d'abord à une succession d'années moins pluvieuses que la moyenne qui, de 1985 à 1997, a naturellement entraîné une baisse des niveaux sur ce système multi-aquifère immense et doté d'une très forte inertie. Mais cette baisse s'est aggravée par l'effet d'une situation facile à comprendre. Quand, pour éviter les surproductions, la politique agricole a imposé de limiter les superficies cultivées, les exploitants ont prévenu la baisse prévisible de leurs revenus en accroissant les rendements à l'hectare par l'irrigation et la fertilisation. Un choix que des mesures compensatoires, comme des primes à l'achat de dispositifs d'irrigation, ont

Des pompages inconsidérés au cours de dix années où il a moins plu que d'habitude ont mis à mal le système hydrogéologique du plateau beauceron. En comprenant mieux son fonctionnement – ce qui est en cours – on va pouvoir fixer de nouvelles règles.

PAR THIERRY POINTET

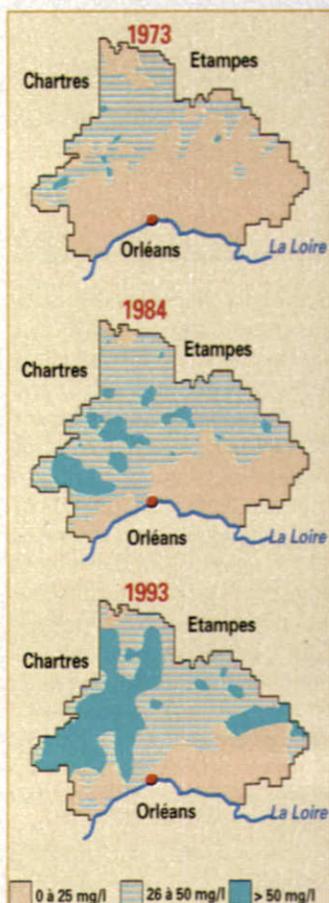
d'ailleurs implicitement validé ! Les résultats ne se sont pas fait attendre. Pour commencer, les productions n'ont pas vraiment baissé. Ensuite, la Beauce (au moins centrale) n'ayant presque aucun cours d'eau, l'irrigation par pompage a entraîné des baisses artificielles du niveau de la nappe qui se sont ajoutées à la baisse naturelle. Par ailleurs, sur cette eau raménée au jour, une partie s'est évaporée, mais une autre s'est recy-

clée d'elle-même en s'ajoutant aux pluies et en se réinfiltrant vers la nappe. Ce faisant, elle a, hélas, entraîné avec elle les excès d'engrais et de pesticides, dont les taux en nappe ont rapidement augmenté (voir la figure page 52). Enfin, accessoirement, quelques forages ont traversé de part en part le premier niveau aquifère et en ont rencontré un second sous couverture d'argile. Résultat : les eaux nitrées du premier aquifère ont pu gagner directement le deuxième qui en était bien évidemment vierge ; le tout, dans des proportions certes mineures, mais le fait est là.

La Beauce est un plateau. Son altitude relative par rapport aux affluents de la Seine, au Nord et à l'Est, et de la Loire, au Sud et à l'Ouest, conduit l'eau à s'écouler de son centre vers ces exutoires naturels de la nappe. En bordure du plateau, la nappe alimente par un effet de surverse des petits cours d'eau, de directions centrifuges également, et qui affluent vers les précédents. Les nitrates qu'elle conte-

naît se sont donc retrouvés dans ces petits cours d'eau, y provoquant une eutrophisation croissante à mesure que la baisse du débit suivait celle du niveau de la nappe. Ces petites rivières se sont alors transformées en flaques vertes puis ont connu l'été des assèchements de plus en plus longs.

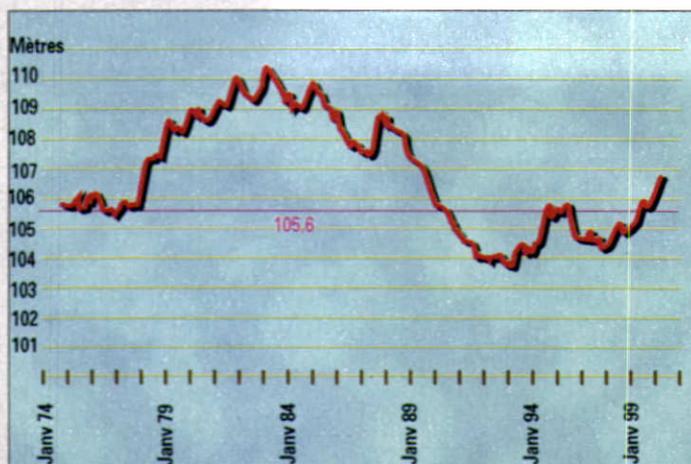
La situation étant pour le moment irréversible s'agissant des



Polluée, mais pas partout

Malgré l'augmentation des teneurs en nitrates, une zone de la Beauce, à l'est d'Orléans, reste épargnée. Elle correspond à celle où la nappe, s'écoulant du nord au sud, s'insinue sous les roches du Miocène.

SOURCE : DONNÉES BRGM



DESSIN A. MEYER D'APRES DIBEN CENTRE

Une timide remontée

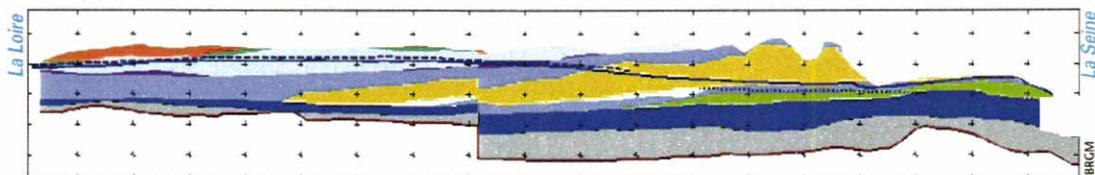
Trois ans après une période de basses eaux - 1985/1997 - la nappe de la Beauce, en dépit de pluviométries redevenues normales, n'a toujours pas retrouvé son niveau moyen. (Courbe obtenue à partir de relevés pratiqués sur neuf forages.)

investissements des agriculteurs, la seule solution se trouve dans un dosage des engrais et des pesticides à la valeur strictement nécessaire aux besoins des plantes. Les récoltes faites, la teneur dans le sol tendrait alors vers zéro ou du moins, pour rester réaliste, vers un minimum. Quant aux prélèvements d'eaux ils seraient également limités au strict besoin des plantes. Dans un deuxième temps, il faudrait pouvoir ajuster ces chiffres en fonction des aléas du climat et de la recharge annuelle de la nappe.

Dans le cadre de la révision complète du schéma hydrogéologique (voir ci-contre, p. 53), les données stratigraphiques et celles qui portent sur la perméabilité des niveaux ont toutes été vérifiées, comparées entre elles et assemblées. Au total, plus de 8000 points de repère ont ainsi été ordonnés. Il en a résulté la construction d'un schéma cohérent, mais aussi de réelles découvertes sur des horizons jusqu'alors ignorés ou confondus.

Dans le détail, la révision a

porté sur les zones d'échanges. Il s'agit des lacunes (naturelles) dans les niveaux imperméables, qui font communiquer deux aquifères entre eux. Elle a aussi porté sur la structure des niveaux aquifères à la périphérie du plateau et sur le mode d'alimentation des petits cours d'eau périphérique. La nappe est en fait quadruple. Quatre niveaux stratigraphiques sont fortement aquifères, les Calcaires de Pithiviers, les Calcaires d'Etampes, les Sables de Fontainebleau et les Calcaires dits de Brie (voir la figure p. 53). Ayant chacun son inertie particulière, ces éléments de nappe se comportent différemment. Le niveau supérieur réagit deux à trois mois après l'infiltration des pluies, principalement les pluies d'hiver. Son inertie en grand est telle que trois ans après la séquence de basses eaux de 1985-1997, la nappe, en dépit de pluviométries redevenues normales, n'a toujours pas retrouvé son niveau moyen. Le second niveau, en pression, réagit avec retard sur le premier. Il est partielle-



Une nappe à quatre niveaux

Le plateau de la Beauce est constitué de treize couches géologiques dont quatre sont aquifères (en bleu, les calcaires, en jaune, les sables). Une importante faille, au centre, décale verticalement les deux demi-bassins de 25 mètres.

ment alimenté par la lente percolation de l'eau à travers l'horizon semi-perméable qui les sépare mais surtout à la faveur des « trous » dans ce niveau intermédiaire.

Le système hydrogéologique du plateau beauceron est d'une complexité telle que si l'on comprend assez bien son état statique, son fonctionnement en dynamique impose de recourir à un modèle qui permettra de vérifier la cohérence d'ensemble des données en prenant pour référence des situations observées de la nappe tour à tour en hautes et basses eaux. Grâce à ce modèle, on pourra étudier des scénarios alternatifs et ajuster objectivement les quotas exploitables pour l'irrigation. Suivra alors

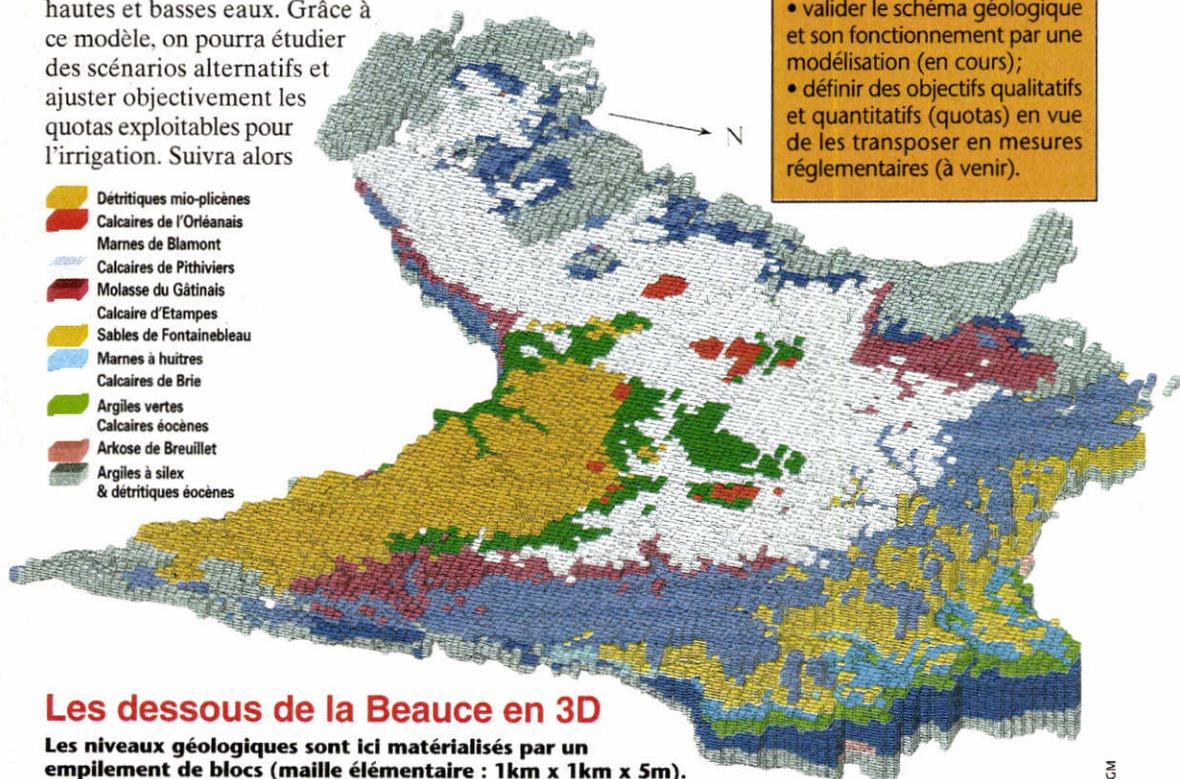
la démarche réglementaire de mise en application.

Cette étude, qui a débuté en 1997, est l'initiative de deux collectivités, le Conseil régional Centre, le Conseil régional d'Ile-de-France, et deux Agences de l'eau, l'Agence de l'eau Loire-Bretagne et l'Agence de l'eau Seine-Normandie. L'opérateur de la révision géologique et hydrogéologique est le BRGM. Un comité de pilotage impliquant d'autres services de l'Etat (Diren en particulier) et des collectivités locales a suivi et contrôlé les travaux. □

LES OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

Cette étude de l'hydrogéologie du plateau beauceron a consisté à :

- réunir et relier les données, sporadiques, accumulées petit à petit au fil des années;
- comparer entre elles ces données, les valider, éliminer les données erronées ou douteuses;
- reconstruire le schéma géologique dans son ensemble en le précisant;
- reprendre le schéma hydrogéologique à la lumière de la géologie, préciser les caractéristiques hydrodynamiques des niveaux aquifères, préciser les conditions d'échange des nappes à leur périphérie et les limites des nappes entre elles;
- valider le schéma géologique et son fonctionnement par une modélisation (en cours);
- définir des objectifs qualitatifs et quantitatifs (quotas) en vue de les transposer en mesures réglementaires (à venir).



Les dessous de la Beauce en 3D

Les niveaux géologiques sont ici matérialisés par un empilement de blocs (maille élémentaire : 1km x 1km x 5m). Une fois parés des données hydrodynamiques, ce modèle permettra de tester plusieurs scénarios d'irrigation.

BORDEAUX : DES PROBLÈMES BIEN ANTICIPÉS

Dans le sous-sol de l'agglomération bordelaise, la surexploitation d'un des niveaux de la nappe a fait naître un risque sur l'alimentation en eau potable, associé à moyenne échéance à la possibilité d'infiltrations d'eau de mer. L'étude fine du système aquifère va permettre d'écarter ces deux risques.

PAR THIERRY POINTET

En Aquitaine, le suivi à l'année des aquifères superposés situés sous la ville de Bordeaux et ses environs relève désormais de la routine.

A l'origine de cette initiative mise en œuvre par le BRGM, se trouvent plusieurs collectivités et services de l'Etat en région⁽¹⁾. Après une révision géologique complète (analogue au cas de la Beauce, voir plus haut) avec caractérisation de tous les aquifères (7 en tout), des forages ont été sélectionnés pour servir au suivi des nappes.

C'est la baisse progressive du niveau dans un des aquifères, les sables, grès et calcaires de l'Éocène, qui avait donné l'alerte. Cette baisse, de plus de 10 mètres, faisait suite à l'exploitation de plus en plus intense de cet aquifère pour satisfaire les besoins en eau potable de l'agglomération bordelaise. En



CNES - DIST SPOT IMAGE - EXPLORER

Déprime souterraine

Durant de nombreuses années le pompage de la nappe, pour approvisionner en eau potable l'agglomération bordelaise, a excédé ses capacités de recharge par la pluie.

1995, elle était telle que le niveau de la nappe se trouvait en dessous du zéro de la mer. On pouvait donc redouter, à moyenne échéance, une intrusion d'eau de mer dans l'aquifère sous la Gironde.

L'interdépendance des niveaux a conduit à en étudier un, puis un second, puis tous ensemble à les suivre et simuler leurs réactions. De cette analyse, il ressort que 66 millions de mètres cubes étaient exploités en 1997 dans la nappe de l'Éocène, dont 80 % destinés à la fourniture d'eau potable. Ce rythme qui excédait la recharge

naturelle par la pluie a été atteint graduellement sur 40 ans, allant jusqu'à provoquer des baisses de niveaux semi-durables d'un mètre par an. Bien évidemment, un certain nombre de forages ne sont plus en pression.

La recharge des nappes se fait à la fois par infiltration, au droit des affleurements de chaque niveau, et par des échanges inter-niveaux. L'objectif de l'étude était de tester par simulation un éventail de solutions alternatives. Le modèle qui a été créé reprend les sept niveaux aquifères superposés allant du Juras-



Le « mille-feuilles » bordelais

Cette coupe de l'aquifère en Adour-Garonne montre l'agencement complexe des couches de terrains, y compris au sein d'une même formation géologique. Comprendre les écoulements dans ces systèmes complexes nécessite de les modéliser.

sique au Miocène ainsi que les inter-niveaux semi-perméables ou imperméables (voir ci-dessus). L'unité de modélisation est la maille de 5 km x 5 km pour chacun d'eux. En extension, le modèle couvre une grande partie de l'Aquitaine.

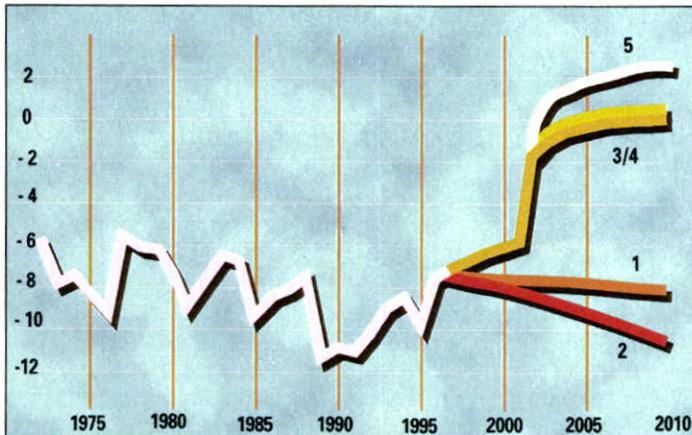
A la lecture des bilans d'eau issus du modèle, l'aquifère oligocène est globalement à l'équilibre : ce qui rentre est égal à ce qui sort. Deux niveaux sont cependant en déficit : l'Eocène, à raison de 30 000 m³/jour et le Campanien pour 3 000 m³/jour.

De quelles solutions dispose-t-on ? La première, et la plus évidente, consiste à réduire les prélèvements dans l'Eocène. Là se tient d'ailleurs l'une des grandes forces du modèle : on génère des scénarios d'exploitation dans lesquels on diminue plus ou moins les prélèvements en nappe pour prédire les conséquences à long terme sur le niveau d'eau. L'objectif recherché est évidemment la stabilisation.

La deuxième solution consiste à répartir les prélèvements sur plusieurs niveaux. On décharge

alors partiellement la nappe la plus sollicitée et on recherche des ressources de substitution, par exemple dans l'Oligocène. Ce faisant, on étudie les modifications induites sur le bilan d'eau de chaque niveau, sur les échanges – lents – de l'un vers l'autre, et sur le comportement aux limites. Le point particulier lié au risque d'intrusion d'eau salée est du même coup contrôlé : il suffit de maintenir dans la nappe, entre la zone des captages intenses et la Gironde, une ligne de points plus hauts que le niveau de la mer, de sorte qu'à partir d'eux les écoulements centrifuges repoussent l'eau salée.

Une fois encore, il faut compter avec l'inertie de ces très grands systèmes. L'amélioration de la situation ne peut survenir très vite. Les simulations ont été conduites jusqu'à 2010, une échéance à laquelle on aura à peine atteint un état stabilisé. Chaque scénario a fait l'objet d'une simulation 1999-2010 et les courbes d'évolution du niveau sur un point de repère particulier, que l'on a choisi à hauteur de Bassens sont représentées de façon comparative dans le graphique de la figure ci-contre. □



DESSIN A. MEYER SOURCE BRGM

Scénarios pour une nappe

En simulant différents régimes de prélèvement, à partir de 1996, on peut prédire les réactions de la nappe. 1 : prélèvements constants entre 1996 et 2010 ; 2 : augmentation de 11% ; 3 et 4 : réduction graduelle des prélèvements jusqu'en 2002, avec mise en place de solutions alternatives, dont le captage dans d'autres nappes. Réductions effectives à partir de 2002. 5 : réduction maximale des prélèvements.

4 – Région Aquitaine, Conseil général de Gironde, Agence de l'eau Adour-Garonne, DIRE Aquitaine, DIREN Aquitaine.

Une gestion très privée

En France, la pratique relève de la tradition : nombre de communes délèguent à des opérateurs privés la gestion de l'eau et les investissements dans les réseaux. Les avantages et les inconvénients

PAR YVES LEERS



Parce que, par nature, l'eau appartient à tous, sa gestion implique le respect de l'intérêt général. Ce principe, les anciens Romains l'avaient déjà officialisé en créant une fonction de « préfet des eaux ». La nécessaire régulation publique n'empêche cependant pas la participation d'autres acteurs que l'Etat. Publics ou privés, la seule règle est qu'ils œuvrent en commun.

En France, le système juridique qui encadre le secteur de l'eau date de la loi de 1964. Cette loi a été revue en 1992, et une nouvelle version est en préparation chez Dominique Voynet, l'actuelle ministre de l'Environnement, à qui revient la tutelle de cette ressource.

La gestion de l'eau est devenue une préoccupation sérieuse depuis le milieu du XIX^e siècle, en Grande-Bretagne, aux Etats-Unis et en France. Une « Ecole française de l'eau » s'est peu à peu constituée, imposant une politique globale de l'eau, puis la gestion par les Agences de bassin, et enfin des mécanismes de délégation de services à des opérateurs publics ou privés. Cette expérience française a incontestablement eu un côté exemplaire. Elle a permis de transposer le système

d'agences de bassin, le plus rationnel, dans des pays économiquement et politiquement très différents. C'est encore en se fondant sur cette organisation originale que les industriels du secteur de l'eau, forts d'une longue expérience et trop à l'étroit dans l'Hexagone, se sont lancés à la conquête de marchés à l'étranger (voir l'article p. 104).

LE MARCHÉ DE L'EAU

Le secteur privé – Suez-Lyonnaise des eaux, Générale des eaux (aujourd'hui Vivendi Water) et Saur (Bouygues) – dessert 77 % de la population. Premier distributeur en France, la Générale affiche le chiffre de 25 millions d'usagers, alors que sa rivale, la Lyonnaise, n'en dénombre « que » 15 millions. Tous métiers confondus, les industriels et entrepreneurs du cycle de l'eau représentent plus de 50 000 emplois et 45 milliards de chiffre d'affaires annuel, hors exportations. Les factures d'eau pèsent lourd dans le budget des Français : 75 milliards de francs par an, taxes et redevances comprises (lesquelles peuvent représenter jusqu'à 50 % du prix de l'eau; on estime à 23 milliards de francs par an le retour vers les distributeurs pri-

vés). Quant au service public, il ne représente plus que 23 % des usagers. On notera qu'entre les grandes compagnies et certaines villes, le lien est parfois très ancien, ce qui donne d'autant plus de relief à la toute récente affaire de Grenoble. Le 20 mars 2000, cette municipalité a en effet mis fin au contrat d'affermage du service des eaux et à un scandale politico-financier qui a duré onze ans et conduit en prison l'ex maire-ministre Jean Carignon. Cette rupture, entérinée par le Conseil d'Etat, compte tenu des conditions de signature du contrat initial, va s'accompagner du versement de 86 millions de francs à la Lyonnaise des eaux. Mais c'est la première fois qu'une ville reprend le contrôle de son service des eaux et ouvre la voie

manente original : « Dès qu'un investisseur propose un plus faible prix (sur 20 ans), il se substitue immédiatement au propriétaire de l'entreprise, qu'il indemnise à hauteur du capital investi », explique-t-il. Un tel mode de gestion est d'ailleurs transposable à l'électricité ou aux autoroutes.

Le projet de loi, qui sera discuté fin 2000 ou plus vraisemblablement en 2001, a deux objectifs, selon Dominique Voynet :

1/accroître la transparence dans le secteur de l'eau et de l'assainissement ;

2/mieux appliquer le principe pollueur/payeur.

Une profonde réforme du système des Agences de l'eau était initialement prévue. Ces agences auxquelles le reproche est souvent fait de n'être

I



a des renégociations plus favorables aux intérêts de la collectivité.

Reste que dans l'absolu, le choix entre système privé et système public n'a rien d'évident. Plusieurs études ont montré que le premier était souvent plus cher que le second. A quoi les industriels répondent qu'ils ont répercuté le coût d'une partie des investissements que le public tarde à réaliser. Ce qui est globalement exact, à ceci près que, dans certains cas, ils ont profité des contrats à très longue durée pour pratiquer des augmentations qui n'étaient pas justifiées. Selon l'économiste Jean Gatty (1), aucun des deux systèmes actuels, gestion directe ou gestion déléguée, ne garantit les meilleurs prix. Cet auteur note que, même avec la loi Sapin, qui limite à vingt ans les contrats de gestion déléguée, la comparaison des prix n'intervient jamais que cinq fois par siècle. Comme il est évidemment absurde d'imaginer qu'il y ait plusieurs producteurs, plusieurs tuyaux sous le même trottoir, le monopole est de fait. Pour éviter les rentes de situation illustrées par de nombreux exemples ces dernières années, Jean Gatty suggère d'expérimenter un système de concurrence per-

L. GAFFARD

que des « banques de l'eau » auraient du participer au financement de la lutte contre les inondations.

Au bout du compte, la réforme va se limiter à un avis du Parlement et à un fonds doté de 500 millions de francs par an. Le Haut Conseil de l'eau et de l'assainissement n'aura qu'un rôle consultatif et donc éloigné de celui de l'OFWAT (Office of Water Services) britannique.

Ce dernier dispose en effet d'un réel pouvoir de régulation des services de l'eau. L'OFWAT est en mesure d'imposer une baisse des tarifs et d'obliger à des investissements là où il le juge nécessaire. Le Haut Conseil français sera une instance de recours et de réflexion. Son rôle consistera davantage à pointer les problèmes qu'à les régler. La vision française ne peut, il est vrai, qu'être différente de la britannique. Ici, en effet, la responsabilité première de la gestion de l'eau incombe aux communes, qui fixent elles-mêmes les prix.

Quant à la plus grande transparence, certaines dispositions vont déjà dans ce sens. Depuis 1995, les maires doivent ainsi publier tous les ans un rapport sur le prix, la qualité des services, les tra-

vaux engagés, et les endettements correspondants. Des « commissions locales de service public » ont aussi commencé à se mettre en place.

Un principe s'est dégagé du Forum mondial de l'eau, qui s'est tenu en mars 2000 à La Haye : partout où l'eau a un prix, la régulation et le contrôle sont essentiels. Sur ce point tout le monde est d'accord, y compris les plus chauds partisans de l'intervention du privé. Les compagnies d'eau sont d'ailleurs les premières à réclamer des régulateurs, « à condition qu'ils soient compétents et ne constituent pas un frein aux investissements ». Il y a aujourd'hui un consensus pour un équilibre entre des entreprises qui veulent gagner de l'argent pour les services qu'elles rendent et des consommateurs qui ne veulent pas (ou plus) être lésés.

Fin 1999, le Haut Conseil du secteur public a jugé, dans son rapport annuel, qu'il y avait « nécessité de réguler le secteur de l'eau, en France mais aussi en Europe ». En s'appuyant sur les statistiques de l'Insee, il a noté que le prix de l'eau en France, était passé d'une base 100 en 1990 à 164,5 en 1997 (en francs courants TTC), contre 106,9 pour l'électricité, 119,0 pour l'essence, voire 94,4 pour les télécommunications. « En économie, un monopole est un monopole, quel que soit le statut juridique de l'entreprise, et une rente reste une rente. Or en France, la structure du secteur de l'eau ne manque pas de faire penser à l'un et à l'autre », avait commenté le président de ce Haut Conseil, le député socialiste Dominique Baert. Selon lui, « une clarification des droits d'accès aux réseaux, des prix plafonds, des contrôles de sujétion de service public, en un mot une régulation véritable, garantie d'une concurrence réelle, paraissent prioritaires, et de surcroît économiquement logiques comme socialement justes ».

A ces critiques, gestionnaires publics et privés répondent qu'ils doivent faire face à des investissements très lourds. Ils concernent tout particulièrement l'assainissement, suite à la directive européenne de 1991. C'est même la seule application de cette directive qui explique la hausse rapide du prix de l'eau entre 1990 et 1997. Or, le coefficient d'épuration des eaux françaises est encore très insuffisant : officiellement 55 %. Un chiffre qui s'explique par le fait que la France a privilégié les travaux sur l'eau potable outre que les investissements ont été maintenus dans des limites supportables et donc étalés dans le temps. Un problème sérieux va également se poser pour l'application d'une autre directive portant sur le remplacement des canalisations en plomb. D'abord



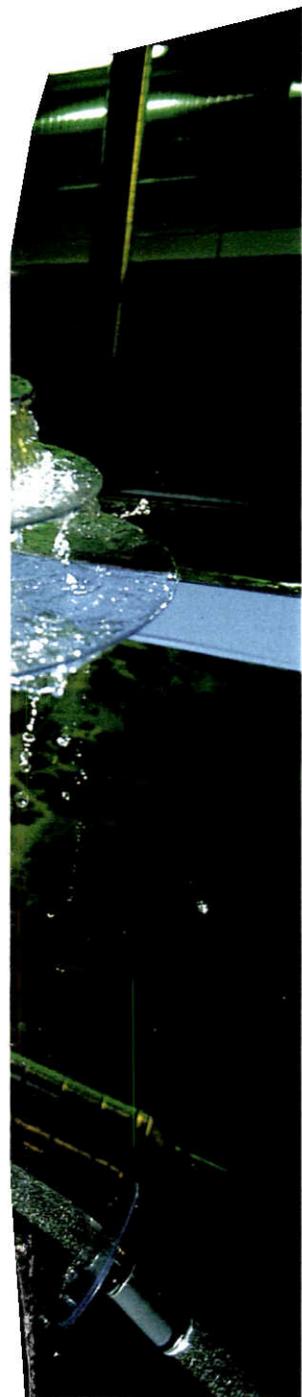
Une activité débordante

Fort d'une longue expérience, le secteur privé détient plus de 75 % du marché français de la distribution d'eau potable et la moitié du marché de l'assainissement. (Traitement des eaux OTV, Vivendi Water.)

M. BAERT - RAPHO - CIE GENERALE DES EAUX

chiffré à 130 milliards de francs, il ne coûterait finalement, d'après le ministère de l'Environnement et suite à des études plus fines, « que » 60/70 milliards, étalés sur plus de dix ans.

La réforme de Dominique Voynet prévoit aussi une loi quinquennale de programmation sur l'eau, dont l'une des fonctions serait l'approbation des programmes d'intervention des Agences de l'eau. Enfin, le principe pollueur-payeur sera plus strictement appliqué, de sorte que chaque classe



de redevances sur pollution (les redevances sur la pollution domestique forment 80 % des redevances actuelles) soit directement assise sur les pollutions émises. L'application du principe pollueur-payeur sera également complétée par une taxation environnementale « eau », portant sur différents types de polluants et inscrite dans le dispositif de la TGAP (Taxe générale sur les activités polluantes).

La France a été parmi les premiers pays à adopter le principe de la gestion de l'eau par bassins hydrographiques. Ce principe, aujourd'hui repris par la directive-cadre européenne attendue avant la fin de l'année 2000, remonte au début des années soixante. Avec le décollage économique, le Commissariat au Plan avait à l'époque constaté que la pollution des rivières et des fleuves s'aggravait. Devant cette situation, il a proposé un projet de loi qui a débouché en 1964 sur la création des Agences de bassin. Le rôle de ces dernières était d'abord financier : percevant une redevance, elles en redistribuaient le produit pour encourager des projets de dépollution. Après 35 ans de fonctionnement, le bilan des

Agences de bassin apparaît contrasté. On leur reproche souvent de ne pas être assez efficaces malgré leur dotation. Dans de nombreux cas, l'argent versé par les plus gros pollueurs ne fait que leur revenir grâce aux aides à la dépollution. Or comme le note l'économiste Jean Gatty (déjà cité) : *« Il peut être moins cher pour un pollueur des rejeter ses effluents, de payer la redevance, puis de recevoir l'aide pour investir dans la dépollution plutôt que de faire seul l'effort de ne pas polluer ».*

Un raisonnement qui est sans doute recevable tant que la police de l'eau manque, comme aujourd'hui, des moyens suffisants pour être tout à fait efficace. Enfin, s'y ajoute le problème de l'agriculture, qui prélève beaucoup d'eau, la paye rarement ou très bon marché et ne participe qu'à quelques « pour cent » au système des Agences de l'eau, alors même que ces dernières financent une partie de la politique de dépollution agricole et spécialement la protection des captages.

Les agences ne sont toutefois pas seules en cause. D'une part, les communes ont tardé à se regrouper en maîtres d'ouvrage. D'autre part, les effectifs de la police de l'eau sont restés par trop insuffisants. Aux yeux d'Ivan Chéret, un des pères de l'idée de la gestion par bassin, l'évolution des agences devra tenir compte de trois facteurs essentiels : l'unité géographique du bassin, le rôle de conscience de l'eau et de forum et enfin l'argent, *« car il n'est pas très efficace d'avoir une conscience sans argent ».*

Au bilan, cette combinaison de formes de gestion à plusieurs niveaux a-t-elle permis d'obtenir une eau de la meilleure qualité possible ? La réponse est plutôt négative et ce pour plusieurs raisons :

- la faiblesse de la police de l'eau, qui aboutit à ce que la plupart des pollueurs soient assurés de l'impunité ;

- le remplacement du principe pollueur-payeur par le principe pollueur-sociétaire, dans les Agences de l'eau, qui se transforment alors en sortes de mutuelles ;

- la redevance des agences, qui agit en aval de la pollution au lieu de prévenir en amont ;

- le manque de périmètre de protection autour des captages : sur les 40 000 captages d'eau potable en France, moins de 20 % en disposent. Or la première cause de pollution est d'ordre microbiologique, en général liée à l'absence de protection des captages ;

- enfin, la gestion de l'eau et de l'assainissement est souvent conçue à trop petite échelle. L'intercommunalité permettrait d'atteindre la taille critique pour assurer un meilleur contrôle de la qualité de l'eau. A peu de choses près, le même constat doit être fait pour l'assainissement.

Un résultat qui, rapporté aux 80 milliards de francs que représente le 7^e programme des Agences de l'eau (1997/2001), est somme toute décourageant. ▣

1 – Jean Gatty, *Quelle concurrence entre les services publics d'eau et d'assainissement ?* Edition Agence de l'eau Seine-Normandie.

Pollution agricole :

Une gestion

La majorité de la pollution azotée de l'eau provient de l'agriculture. Et rien ne semble pouvoir la maîtriser. Or, les solutions existent. Elles passent par une modification rigoureuse des pratiques.

PAR ANNE DEBROISE

Depuis le milieu du siècle, l'utilisation des engrais et des pesticides s'est généralisée. Avec la mécanisation et le choix de variétés végétales plus performantes, ils ont conduit à l'explosion des rendements. Ainsi, depuis le début des années 80, le rendement moyen du blé tendre a augmenté de 57 %. Et si l'on estime qu'un agriculteur français nourrissait 7 personnes en 1960 et 44 en 1985, il en nourrit 90 aujourd'hui.

L'azote contenu dans les engrais est un composé *a priori* banal. Sous forme de gaz diazote, il constitue 80 % de l'air que nous respirons, et la molécule d'azote entre dans la structure des protéines de notre corps à hauteur de 16 %. Dans le



impossible?

Pollueurs en puissance

L'élevage, par les lisiers qu'il génère, constitue une source importante de pollution. Particulièrement concernée, la Bretagne, qui rassemble à elle seule 56 % du cheptel porcin français.

Y. ARTHUR-BERTRAND - ALTITUDE

sol, c'est sous la forme d'ions nitrates (NO_3^-) qu'il sert de nourriture aux plantes. Au même titre que l'eau, il est indispensable à leur croissance. Dans un terrain en friche ou en forêt, la décomposition des végétaux alimente continuellement le sol en nitrates. Privé de cet apport naturel, un sol cultivé doit être enrichi, soit par des fertilisants de synthèse contenant des ions nitrates, soit par des fertilisants organiques (fumier, lisier ou boues d'épuration) riches en matière azotée, rapidement convertie en nitrates par la flore microbienne du sol. Cette flore compose en fait un vaste match de ping-pong avec les nitrates. Certaines bactéries les assimilent pour fabriquer leur propre ma-

tière organique, d'autres les produisent en dégradant de la matière organique. Mais ce cycle engendre des fuites, d'autant plus importantes que le sol est fertilisé. Quand ils ne sont pas assimilés par les plantes, les nitrates, très solubles dans l'eau, sont entraînés par la pluie. Ils se retrouvent alors dans une rivière ou une nappe d'eau souterraine. Le sol, incapable de constituer des réserves, doit être de nouveau fertilisé.

L'agriculture serait ainsi responsable des deux tiers de la pollution azotée de l'eau. Une pollution inquiétante : on estime que dans les Côtes d'Armor, le département le plus touché en France, plus de 60 % des ressources en eau présentent une te-

neur en nitrates supérieure à la norme européenne de 50 mg/l. Or les nitrates sont soupçonnés de provoquer des cancers ainsi que d'autres affections (et par ailleurs coûteuses) ne doivent pas occulter la nécessité de réduire la pollution à sa source.

UN CODE DE BONNE CONDUITE

Il n'est pas question aujourd'hui de stopper la fertilisation. La chute des rendements risquerait de faire passer la production en dessous des besoins alimentaires. Mais les agronomes partisans de l'agriculture raisonnée assurent qu'il est possible de réduire les apports azotés d'environ 30 %. Leurs études ont conduit à un ensemble de recommandations connues sous le nom de « bonnes pratiques agricoles ». « L'idée générale consiste à coller le plus possible aux besoins des plantes, explique Philippe Debaeke, chargé de recherche dans le département Agronomie et Environnement à l'Inra. Pour connaître ces besoins, l'Inra et l'ITCF⁽¹⁾ ont développé un test simple : on écrase des bas de tiges prélevées sur la culture de façon à recueillir un jus. Puis on applique à ce jus un test colorimétrique sous forme de bandelettes, qui évalue sa teneur en nitrates ». En connaissant mieux les besoins de ses cultures, l'agriculteur ne fertilise plus que lorsqu'elles en ont besoin. Et diminue fortement les risques de lessivage des nitrates par l'eau de pluie. Pour peaufiner le travail, il faut aussi vider le sol des excès d'azote encore présents après la récolte. Car un sol nu, en automne et en hiver, n'a plus aucun moyen de retenir les résidus azotés. « On utilise des cultures pièges, continue Philippe Debaeke. Il s'agit de semer, juste après la récolte ou même parfois avant, du seigle, du blé ou du colza, qui assimilera les nitrates pendant l'automne et l'hiver. Bien sûr, tout ce travail est fait à perte pour l'agriculteur... ». Alors, la pollution par les nitrates connaîtrait-elle ses dernières heures ? « A l'heure actuelle, il y a moins de re-

1 - Institut technique des céréales et des fourrages.

cherche sur la fuite des nitrates vers les eaux. Il s'agit plutôt de mettre en application les résultats de ces bonnes pratiques agricoles dans les faits. Elle contraint les agriculteurs des zones dites vulnérables à maîtriser leurs apports en azote et réglemente les périodes et les conditions d'épandage. Une pratique par exemple interdite sur un sol gelé, ou en forte pente. Neuf ans plus tard, l'application de la directive fait toujours l'objet de débats dans certains départements. Sur le terrain, la contestation va bon train. Selon Martine Gaeckler, chef du service agricole à

l'Agence de l'eau Adour-Garonne, « il est difficile de tirer un bilan de la directive nitrates. Au mieux, les chambres d'agriculture ont engagé une bonne sensibilisation des agriculteurs ».

Il y a tout juste un an, le ministère de l'Agriculture et de la Pêche publiait un rapport accablant : malgré les efforts consacrés à la sensibilisation du monde agricole, les excédents d'azote d'origine agricole (apports d'azote synthétique et organique comparés à la consommation théorique des plantes) ont encore augmenté : estimés à 320 000 tonnes en 1995, ils atteignaient plus de 400 000 tonnes en 1997.

Quels que soient les progrès réalisés dans la maîtrise des apports azotés, il faudra de toute façon attendre les résultats avec patience. Car suivant la nature des sols, les nitrates parcourent de 1 à 2 mètres par an. Des chercheurs de l'Inra de Châlons-en-Champagne ont ainsi fertilisé une parcelle hors-sol de 2 mètres de profondeur il y a presque 20 ans. Chaque année, ils en récupèrent environ 1 à 1,5 %. Un rythme qui, compte tenu des années de fertilisation à outrance stockées dans les sols, nous promet encore plusieurs décennies de lutte contre la pollution.

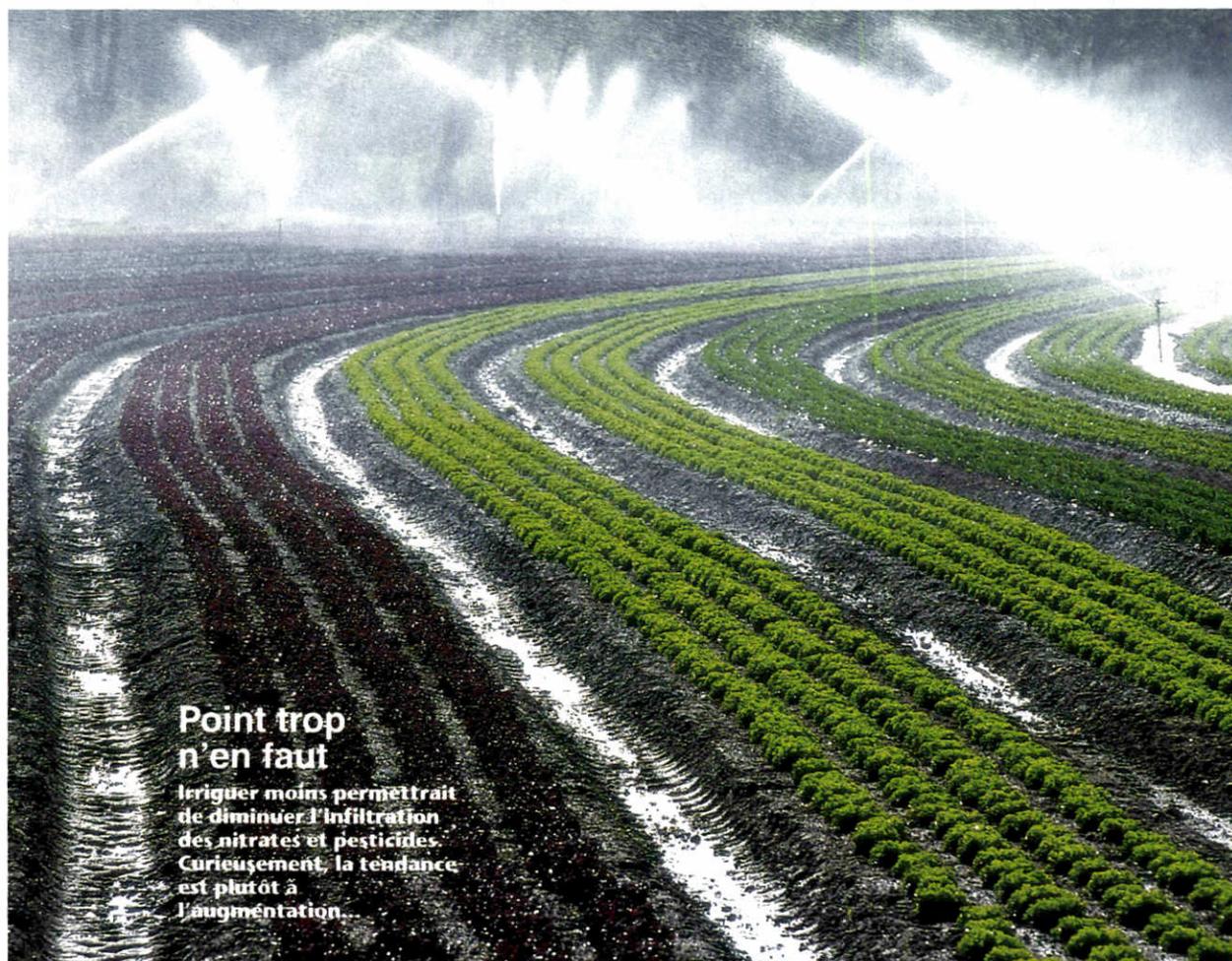
Cette lutte passe également par la réduction de la pollution engendrée par les élevages. Les déjections des bovins, des volailles et des porcs représentent une source importante de pollution. Cette pollution peut s'exprimer en équivalent-habitant, une unité qui correspond à la pollution



MOSCHETTI - REA

Nettoyage bio

Asséché, stocké, épandu au bon moment, le purin pourrait constituer un bon fertilisant. Les solutions ne manquent pas. (Traitement biologique du lisier à Caulnes.)



Point trop n'en faut

Irriguer moins permettrait de diminuer l'infiltration des nitrates et pesticides. Curieusement, la tendance est plutôt à l'augmentation...

LE PROBLÈME DE L'IRRIGATION

Des études menées en 1998 par l'Agence de l'eau Seine-Normandie montrent que les apports d'eau sur les cultures de betteraves et de céréales pourraient être diminués de 25 à 50 % par rapport aux quantités estimées nécessaires. Ces économies d'eau permettraient de préserver la ressource, et de diminuer l'infiltration des nitrates et autres pesticides. Par ailleurs, elles engendrent des microclimats plus secs, hostiles au développement des maladies. Mais la tendance est plutôt à l'augmentation de l'irrigation. « Aujourd'hui, en Picardie, on arrose les cultures de pommes de terre, ce qui ne se fai-

sait pas avant », constate Philippe Debaeke, chargé de recherche à l'Inra. L'agriculteur qui veut réduire ses apports se heurte à un véritable casse-tête chinois. Prenons un exemple : sachant qu'il ne dispose que d'un seul équipement d'irrigation, et que, compte tenu du débit de sa ressource en eau, il met une dizaine de jours pour effectuer son « tour d'eau » (c'est-à-dire l'arrosage de toutes ses parcelles), que la météo prévoit du soleil, mais n'exclut pas la pluie dans dix jours, et que ses cultures ont besoin d'un arrosage tous les 15 jours, à quelle date doit-il commencer son arrosage? « Pour aider l'agricul-

teur à gérer ces contraintes tout en collant au mieux aux besoins de ses cultures, l'Inra élabore des logiciels informatiques, explique Philippe Debaeke. On y entre les contraintes de l'agriculteur et il en sort des paramètres tels que le rendement de la parcelle, la quantité d'azote perdue ou les besoins en eau de la plante. » L'outil informatique étant très peu utilisé par les agriculteurs jusqu'ici, ces logiciels ont fait un flop. « Mais avec la pénétration de l'Internet, on espère qu'il y aura une explosion », ajoute Philippe Debaeke. De quoi convaincre les agriculteurs qu'un peu de restriction ne ferait pas de mal à leurs cultures.

organique engendrée par un homme en une journée. Une vache laitière produit par exemple 10 équivalent-habitant par jour, un porc 3 eqh. Les lisiers animaux en excès contaminent le milieu naturel par leur richesse en matières organiques, en azote, en phosphore, ou en microbes pathogènes. Ils constituent également de formidables fertilisants, traditionnellement épandus sur les champs à la place des engrais minéraux. Une solution acceptable à condition d'épandre au moment opportun. Or les lisiers, volumineux, liquides et puants, s'avèrent difficiles à stocker, coûteux à transporter. D'autant plus que leurs lieux de production se concentrent dans quelques régions historiquement vouées à l'élevage. Ces conditions condamnent l'utilisation raisonnée des lisiers comme engrais. Ainsi, en Bretagne, qui rassemble 56 % du cheptel porcin français, 280 kg d'azote sont potentiellement épandus par hectare chaque année. De l'azote qui, transformé en nitrate, pollue massivement les cours d'eau, les bords de mer et les rivières.

UN PROGRAMME DE LONGUE HALEINE

La solution ? Récupérer les lisiers, les assécher pour réduire leur volume et leur odeur, et permettre le stockage. Voilà l'objectif, à long terme, du programme de maîtrise des pollutions agricoles (PMPOA), lancé le 1^{er} janvier 1994. Il contraint les établissements de plus de 70 « unités de gros bétail » (UGB) à réaliser des travaux de mise aux normes de leurs bâtiments. Les sols doivent être imperméabilisés, et tous les effluents liquides récupérés dans des fosses étanches. Des travaux financés en partie par l'Agence de l'eau, censée percevoir des éleveurs une taxe calculée selon le mode « pollueur-payeur » : la redevance est proportionnelle à la pollution générée par l'exploitation. Mais le principe a provoqué chez les éleveurs une véritable levée de boucliers. La profession a réussi à négocier un report de la redevance, le temps de se mettre aux normes. Les Agences de l'eau continuent malgré tout de financer les projets. Annoncé pour un coût de 7,3 milliards de francs, le programme risque d'atteindre au total les 15 milliards de francs. Une somme énorme au regard de l'efficacité du programme : ainsi, en 6 ans, seules 300 exploitations se sont mises aux normes sur les 6700 concernées sur le bassin Adour-Garonne. 1500 autres sont actuellement en travaux. Il faut dire que l'instruction d'un dossier prend en moyenne... une quarantaine de mois ! Pendant ce temps, les situations d'infraction se généralisent et les contrôles admi-

nistratifs, politiquement délicats dans un milieu fragilisé par la crise, restent rares.

Bon an, mal an, ce programme accouche difficilement de son lot d'établissements « propres ». Les méthodes qu'ils utilisent pour traiter le lisier sont nombreuses. Parmi celles-ci, les solutions biologiques pourraient bien prendre le pas sur les traitements physico-chimiques, relativement coûteux, mis en œuvre classiquement dans les usines d'épuration. Le lagunage par exemple consiste à faire séjourner le lisier dans plusieurs bassins consécutifs. Dans le premier, des micro-algues se chargent de dégrader les nitrates et la matière organique pour se développer. Dans le second, ces micro-algues sont digérées par des petits animaux, les daphnies. Ces dernières constituent ensuite le repas de poissons herbivores. Au final, les nitrates (NO_3^-) se sont décomposés pour donner des atomes d'azote (N) qui ont intégré les protéines des poissons et des atomes d'oxygène (O) rejetés dans l'atmosphère. Cette solution ne fait que reprendre une technique très ancienne puisqu'en Asie, l'utilisation des eaux usées pour enrichir les étangs producteurs de poissons est connue depuis des siècles. La technique s'avère particulièrement rentable lorsque l'éleveur dispose de place. Dans le cas contraire, il lui faut envisager de mettre en place des bioréacteurs : des réacteurs fermés dans lesquels sont cultivées des bactéries. Dans une première étape, certaines espèces de bactéries, utilisent l'oxygène de l'air pour transformer l'azote présent sous forme ammoniacale (NH_3) en nitrates (NO_3^-). Puis, en l'absence d'oxygène cette fois, d'autres micro-organismes se chargent de transformer ces nitrates pour former du diazote (N_2), inoffensif et du dioxygène (O_2). Il s'agit, en fait, au cours de ces procédés biologiques, d'intensifier les processus d'épuration naturelle des sols, largement dépassés aujourd'hui par la surabondance d'azote. Ces méthodes ne constituent pas toutefois la panacée, dans la mesure où elles peuvent dégager des gaz indésirables, comme l'ammoniac, et ne traitent pas les métaux contenus dans le lisier.

Parallèlement à ces solutions, les agronomes cherchent donc à diminuer la quantité de lisier produite. Des études menées par l'Inra montrent que l'on peut diminuer de 10 à 25 % les rejets azotés des animaux en adaptant leur alimentation. En effet, l'azote qu'ils ingèrent se trouve sous la forme de protéines. Or, si une alimentation riche en protéines est indispensable en période de croissance et au moment de la lactation chez les femelles, ce n'est plus le cas en période d'engrais-



GLEIZE - REA

Personne n'est à l'abri

L'emploi raisonné des pesticides, dont la toxicité ne se limite pas aux seules espèces visées, n'est pas encore entré dans les mœurs. Leurs ventes ont augmenté de 17% depuis 1993.

ment. Une alimentation différente suivant le stade de développement de l'animal permettrait donc de diminuer la pollution.

La pollution azotée n'est pas une fatalité. Il s'agit surtout aujourd'hui de vaincre l'inertie des mauvaises habitudes, et de convaincre une population économiquement fragilisée de l'importance de ces changements.

Mais l'agriculture contribue à une pollution plus pernicieuse : la pollution par les pesticides. Le terme de pesticides désigne tous les composés chimiques qui, par leur toxicité permettent de maîtriser le développement d'animaux, de plantes ou de champignons considérés comme nuisibles. Suivant leur cible, on parle d'insecticides, d'herbicides, de fongicides, etc. Toute leur efficacité tient dans leur toxicité, qui ne se limite malheureusement pas aux seules espèces visées. Les pesticides se stockent dans les tissus graisseux des espèces qui les ingèrent. Au fur et à mesure de leur progression dans la chaîne alimentaire, ils s'accumulent et se concentrent. L'homme, placé au bout de la chaîne, y est donc particulièrement sensible. 90 000 tonnes de matière active (molécules chimiques à la base des pesticides) sont vendues chaque année en France. Les produits phytosani-

LES AGRICULTEURS SE MOBILISENT PETIT À PETIT

Mâîtriser la pollution agricole exige un engagement massif des agriculteurs. Et si parfois, la profession semble freiner des quatre fers, on peut constater une certaine évolution. Selon Martine Gaeckler, chef du service agricole à l'agence de l'eau Adour-Garonne, « depuis le début des années 90, les agriculteurs ont été sensibilisés aux problèmes environnementaux. Des actions basées sur le volontariat se sont mises en place. » Ces actions s'appellent ferti-mieux, phyto-mieux,

ou irri-mieux. Elles prônent une meilleure utilisation des fertilisants, des produits phytosanitaires et de l'irrigation. Ferti-mieux, l'opération la plus ancienne, repose sur un cahier des charges précis de maîtrise de la fertilisation azotée. Aujourd'hui, ces opérations concernent 1,9 million d'hectares, soit moins de 6 % de la surface agricole utilisée. Si leur impact sur l'environnement ne peut être mesuré, elles témoignent cependant du changement progressif des mentalités.

taires y sont présents dans 47 % des points d'eau, dans 50 % des eaux côtières, dans 20 % environ des eaux souterraines. Ils sont la cause d'un quart des eaux impropres à la consommation humaine.

« On estime que l'eau d'infiltration véhicule moins de 0,1 % de la quantité de pesticides appliquée, précise Christophe Mouvet, au service « eau » du BRGM. Mais lors d'un orage, sur un sol peu perméable, de 1 à 5 % peuvent ruisseler et se retrouver dans les eaux de surface, ou s'infiltrer plus loin. » Dès que les pesticides arrivent sur le sol, ils subissent des transformations : ils peuvent réagir chimiquement avec les molécules du sol, plus ou moins acide, être digérés par les micro-organismes qui y ont élu domicile ou bien encore se dégrader sous l'effet de la température. « En un an, la majorité des pesticides ont disparu dans leur forme initiale », ajoute Marc Voltz, directeur de recherche à l'Inra. Oui, mais voilà : il arrive que les résultats de ces dégradations, les métabolites, soient plus toxiques encore que leur précurseur. Des métabolites qui, avec les restes de pesticides, sont ensuite entraînés par ruissellement vers les rivières ou par infiltration vers les nappes. Leur progression dépend alors de facteurs multiples : de la météo (une averse accélérera le phénomène), de la composition du sol (un sable caillouteux laissera beaucoup mieux passer les molécules qu'une argile relativement imperméable), de la structure de ce sol (est-il homogène ou fissuré ?), du type de culture (une culture avide d'eau avec un enracinement profond captera mieux les pesticides), de la pratique de l'agriculteur (s'il a retourné son sol profondément, l'infiltration sera facilitée). Autant de facteurs que les chercheurs du BRGM (entre autres) tentent de rassembler dans l'espoir de bâtir un modèle capable de prévoir, dans les cas les plus simples, la vitesse d'infiltration des pesticides.

Restera alors à faire le tri entre les pesticides suivant leur toxicité et celle de leurs métabolites. La multiplicité des pesticides, compliquée par la multitude de leurs métabolites, rend la tâche particulièrement ardue. Plusieurs laboratoires de l'Inra s'y sont attelés. Leurs travaux peuvent conduire au retrait de l'homologation d'un pesticide particulièrement toxique et persistant, comme ce fut le cas pour le DDT (dichlorodiphényltrichloroéthane). Les fabricants de produits phytosanitaires s'orientent ainsi de plus en plus vers des produits qui seront plus rapidement dégradés dans le sol. « Mais n'espérez pas que l'on produise un jour des produits phytosanitaires inoffensifs pour l'environnement, précise Jean-Pierre Guillou, directeur général de l'Union des in-

dustries de la protection des plantes (UIPP). *Un produit non toxique, ou qui disparaîtrait dès son application, n'aurait aucun effet et serait par conséquent totalement inutile.* »

Là encore, des pratiques agricoles adaptées peuvent permettre de limiter les dégâts. Il est recommandé de ne pas traiter les cultures avant une averse et de récupérer les pesticides en excès dans le sol grâce à des bandes enherbées qui les fixeront et limiteront le ruissellement. Cependant, si l'on en croit le marché des pesticides, les pratiques agricoles n'évoluent guère. En 1998, la quantité de produits phytosanitaires achetés par les agriculteurs a connu une hausse de 7 %, portant à 17 % l'augmentation depuis 1993.

UN PETIT COUP DE POUCE

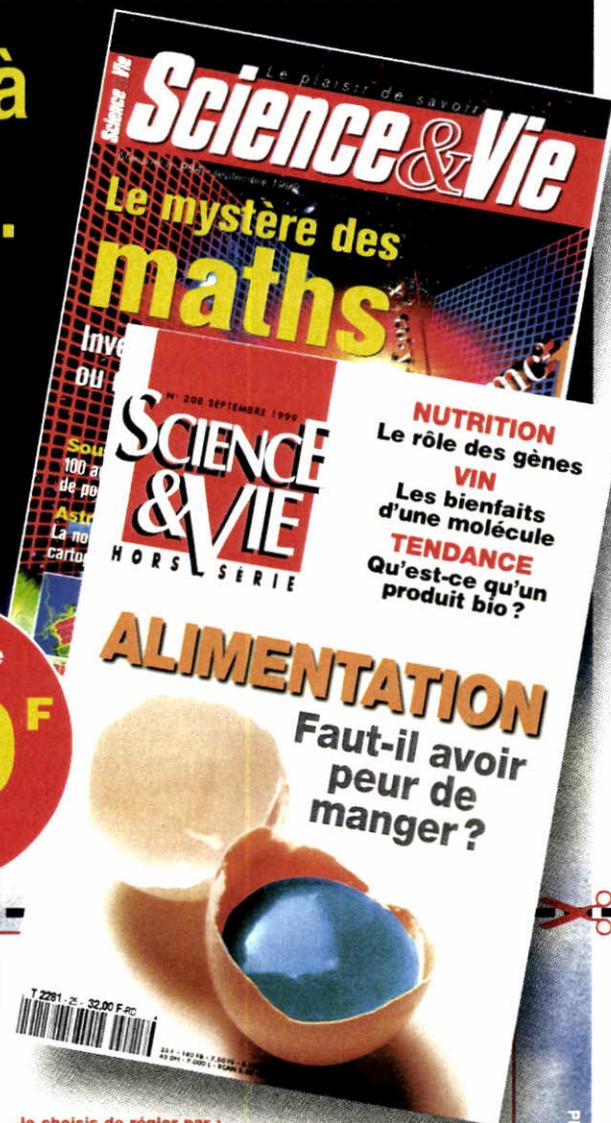
Si la révolution des pratiques tarde, les partisans de l'agriculture de précision ont juré de l'accélérer. Leur arme ? L'informatique. Voilà plusieurs années que fleurissent dans les laboratoires de recherche des logiciels informatiques destinés à aider les agriculteurs à traiter ou à irriguer au bon moment, à les conseiller sur le produit à épandre suivant l'état de la culture. Et si en France ces logiciels ne se vendent pas encore, les fabricants de matériels agricoles encouragent la mutation vers une agriculture assistée par ordinateur. Leur matériel, déjà utilisé aux Etats-Unis, est actuellement testé en France. Ainsi, les moissonneuses-batteuses du fabricant Case enregistrent, lors de la moisson, le rendement des parcelles. Un rendement qui peut varier d'un mètre à l'autre suivant la qualité du sol, son inclinaison, son exposition, etc. L'agriculteur obtient ainsi une carte de rendement de ses parcelles. Compilées avec d'autres données, comme les images satellites des cultures (d'ores et déjà disponibles à la vente), ou la nature du sol, et les prévisions météo, un système informatique devrait, dans l'avenir, être capable de déterminer la variété de graines à semer, les quantités exactes d'engrais ou de pesticides à épandre suivant l'endroit de la parcelle considéré. Pour couronner le tout, les fabricants imaginent déjà que des machines pilotées par ordinateurs et localisées par un système GPS iront semer et épandre les quantités préconisées. Si l'efficacité de ces procédés au regard de la pollution est encore à prouver, ils présentent une certaine similitude avec les démarches qualité qui se sont développées, avec succès, dans l'industrie. D'aucuns regretteront que l'agriculture s'éloigne de plus en plus de son état de nature. Mais cela peut l'amener, paradoxalement, à retrouver une certaine virginité. ▣

Pour comprendre aujourd'hui et mieux maîtriser demain...

Abonnez-vous à SCIENCE & VIE.



A partir de
229^F
seulement



Bulletin d'abonnement à SCIENCE & VIE

à retourner sous pli affranchi avec votre règlement à SCIENCE & VIE - Service Abonnements
1, rue du Colonel Pierre Avia 75503 Paris Cedex 15

Oui Je m'abonne pendant **1 an** :

- SCIENCE & VIE - 12 n^{os} pour 229 francs
C43 01 au lieu de 276 francs*
- SCIENCE & VIE + ses hors série
C43 03 16 n^{os} pour 299 francs au lieu de 376 francs*
+ en cadeau le N°1 de LA SCIENCE ET LA VIE** (80)

Nom _____
Prénom _____
Adresse _____

Code postal _____
Ville _____
Téléphone _____
e-mail _____



Je choisis de régler par :

chèque bancaire ou postal à l'ordre de SCIENCE & VIE

carte bancaire

N° _____

expire à fin _____ mois _____ année

Date et signature obligatoires



*Prix de vente en kiosque **Dans la limite des stocks disponibles.
Délai de réception de 3 à 4 semaines, à partir du règlement de votre abonnement.

OFFRE VALABLE JUSQU'À FIN MARS 2001 ET RÉSERVÉE À LA FRANCE MÉTROPOLITAINE
Vous pouvez aussi vous abonner par téléphone
au 01 46 43 47 17 ou Minitel : tapes 26 15 ABON,
par internet : <http://www.abonmag.com>

Conformément à la loi Informatique et Libertés du 06/01/1978, vous disposez d'un droit d'accès aux données personnelles vous concernant. Par notre intermédiaire, vous pouvez être amené à recevoir des propositions et autres sociétés ou associations. Si vous ne le souhaitez pas, il vous suffit de nous écrire en nous indiquant vos nom, prénom, adresse et si possible, votre référence client.

SV HS 211

Les moteurs des progrès en matière de pollution industrielle, ce sont la législation et les pressions économiques. En France, l'arrêté du 2 février 1998 contraint les industriels à déclarer auprès des préfetures les activités polluantes et les activités à risque. Les plus importantes sont soumises à autorisation. Cet arrêté fixe les normes de rejet, ou les reprend quand elles existaient déjà, pour les principales installations classées (abattoirs, traitements de surface, usines de pâte à papier, etc). Son application est contrôlée par des fonctionnaires assermentés, les « inspecteurs des installations classées », dotés d'armes bien réelles, pouvant aller de la sanction pénale à la suspension d'activité. En 1997, en Midi-Pyrénées, 100 entreprises ont été mises en demeure de respecter les règles, 4 ont vu leur activité suspendue, 5 se sont vu retirer leur autorisation.

Mais c'est sûrement le volet économique de la législation qui fait le plus réfléchir les industriels. « La pollution a nettement régressé depuis 1992, date à laquelle les redevances à la pollution ont été multipliées par deux, constate Guillaume Faurès. La loi sur l'eau de 1964, complétée et renforcée par celle de 1992, crée les Agences de l'eau et fixe les redevances payées par les industries polluantes. Ces redevances obéissent au principe « pollueur-payeur » : elles sont proportionnelles à la pollution produite et à la quantité d'eau prélevée. « Ces taxes peuvent représenter 0,5 % à 5 % du chiffre d'affaires de l'entreprise, précise Guillaume Faurès. De 10000 F au minimum, elles peuvent atteindre une dizaine de millions de francs

pour les gros pollueurs. » De plus, les taux de redevance ont subi dernièrement de fortes hausses. Ainsi, pour les matières inhibitrices (MI, voir l'encadré), le taux est passé de 4,537 F par équitox⁽¹⁾ produit en 1993 à 9,804 F en 1998. De quoi en convaincre plus d'un de l'utilité de la dépollution.

L'investissement des industriels se mesure par la part importante de pollution qu'ils traitent eux-mêmes : en 1996, sur le bassin Seine-Normandie, les industriels traitaient 66 % de la pollution organique qu'ils engendraient, le reste étant pour moitié rejeté dans le réseau d'assainissement urbain après prétraitement, et pour moitié traité en centre spécialisé. Aussi se chargent-ils eux-mêmes de 96 % des MES et 50 % des MI.

UNE TECHNIQUE D'AVENIR

Qu'ils transitent par une usine d'épuration privée ou publique, les effluents industriels subissent plusieurs types de traitement en filade. « La première chose à faire quand on veut traiter un effluent, c'est de le caractériser, explique Michel Roustan, directeur du Laboratoire d'ingénierie des procédés de l'environnement (Lipe) à Toulouse. En fonction de ses caractéristiques physico-chimiques et biologiques, on monte une combinaison de plusieurs procédés de dépollution pour arriver à l'objectif final : un niveau de rejet compatible avec l'utilisation que l'on veut faire de l'eau à la sortie ». A côté des procédés classiques de décantation, floculation et autres coagulations utilisés pour la dépollution des eaux urbaines, l'industrie se tourne de plus en plus vers les procédés de séparation membranaire. Une technologie qui se démocratise.

Il s'agit de membranes poreuses, qui opèrent à la manière d'un tamis aux pores microscopiques. La taille des pores dépend de la composition de la membrane, et des conditions de sa fabrication : en ajustant la température et la quantité de solvant ajoutée lors de la réaction chimique de formation de la membrane, le fabricant obtient des pores de taille extrêmement précise : entre 10 et 0,1 µm on parle de microfiltration, entre 0,1 et 0,01 µm d'ultrafiltration, entre 0,01 et 0,001 de nanofiltration. Pour filtrer des molécules de plus petite taille encore, comme les sels dissous, les industriels utilisent des membranes non poreuses, dans lesquelles les molécules pénètrent, puis migrent pour atteindre l'autre côté de la surface membranaire. Il s'agit alors d'osmose inverse. Dans tous les cas, il est nécessaire d'appliquer d'un côté de la membrane une pression suffisante

1 - Unité de mesure de la toxicité.



ALLARD - REA

Laver plus propre

Comment polluer moins tout en économisant l'eau ? En utilisant, par exemple, la centrifugation pour laver la caséine. L'effluent ainsi obtenu est plus concentré et moins volumineux.

DIFFÉRENTES CLASSES DE POLLUANTS



Parmi les polluants des eaux de rivière : les déchets carbonés provenant des industries agroalimentaires, ou de papeteries. (Usine de Saillat-sur-Vienne, avec ses installations d'épuration de l'eau.)

DAMORET - REA

Les professionnels du traitement, ainsi que la législation, distinguent plusieurs catégories de polluants. La première, ce sont les matières en suspension, notées MES. Une dénomination qui désigne toutes les matières minérales ou organiques qui ne se solubilisent pas dans l'eau et la troublent. Les MES diminuent la luminosité dans l'eau, donc freinent la photosynthèse. Les espèces végétales se développent plus difficilement, l'oxygène qu'elles produisent diminue dans le milieu, et les espèces animales en souffrent. Les matières organiques (MO) constituent la deuxième catégorie. Ce sont tous les déchets carbonés tels que la cellulose produite par les papeteries, le sucre ou le lactosérum des industries agroalimentaires. A l'inverse des MES, ces matières constituent une nourriture de choix pour tous les micro-organismes de l'eau et provoquent leur prolifération. Les micro-organismes se mettent alors à vider le milieu de son oxygène, ce qui s'avère fatal pour la vie aquatique. Lorsque le milieu se retrouve totalement vidé de son oxygène, les micro-organismes vont le chercher dans les sulfates dissous (SO_4^{2-}), qu'elles réduisent en sulfure (S^0), qui se dégage sous forme de sulfure d'hydrogène en engendrant une odeur d'œufs pourris. La troisième catégorie regroupe les matières qui s'avèrent toxiques pour les daphnies (du zooplancton). On les appelle les matières inhibitrices (MI). On y trouve des métaux ou

métalloïdes (mercure, plomb), des pesticides, notamment les organochlorés (lindane, DDT), certaines huiles minérales et certains hydrocarbures. Les MI présentent des risques d'effets toxiques immédiats ou différés par accumulation dans les chaînes alimentaires et des risques d'effets cancérogènes. Les textes législatifs distinguent ensuite la pollution par l'azote réduit (azote organique et ammoniacal), par le phosphore, par les composés organo-halogénés (AOX) et par les métaux toxiques (METOX). Cette dernière catégorie regroupe sept métaux et un métalloïde (chrome, zinc, cuivre, nickel, plomb, arsenic, cadmium et mercure). La pollution thermique concerne toutes les industries utilisant des circuits de refroidissement. Des circuits qui déversent leurs effluents, chimiquement propres, dans les rivières, et entraînent une augmentation de température pouvant atteindre une dizaine de degrés. Cette chaleur provoque l'échappement de l'oxygène dissous dans l'eau et perturbe fortement l'écosystème, entraînant la mort de certains poissons ou l'éclosion prématurée de leurs œufs. Quant à la pollution radioactive, elle est rare. L'eau utilisée dans les centrales nucléaires n'entre théoriquement jamais en contact avec la matière radioactive. Mais il peut arriver que des hôpitaux, des centres de recherche ou des usines de traitement de déchets soient à l'origine d'une contamination radioactive.



Barrière sélective

Dans la dépollution des eaux, la technologie membranaire fait une percée remarquable.

Munies de pores microscopiques (ils vont jusqu'à 0,01 µm), les membranes permettent de filtrer bactéries et virus. Et ce, sans l'ajout de composés chimiques. (Procédé d'ultrafiltration Carbosep.)

pour faire passer l'eau au travers. « Je crois à l'avenir des technologies membranaires, assure Guillaume Faurès. Aujourd'hui, elles représentent à peine 5 % des installations, car l'investissement est encore important. Mais ces technologies deviennent de moins en moins chères. Et leur résultat est bien meilleur : elles prennent peu de place, elles supportent des variations de charge importantes, et surtout elles constituent une barrière physique infranchissable avant le rejet dans le milieu naturel. La sécurité de la dépollution est augmentée. » Sans compter que, contrairement à la majorité des techniques de traitement physico-chimiques, elles ne nécessitent pas l'ajout de composés chimiques tels le chlore ou les sulfates ferreux. Le concept fait des émules. La société Rhodia Orelis, qui conçoit et commercialise des techniques de filtration par membrane à destination des industriels, voit son chiffre d'affaires en traitement d'effluents doubler chaque année depuis 3 ans. Les effets d'échelles aidant, ces techniques seront bientôt financièrement compétitives.

DES AVANT-GARDISTES

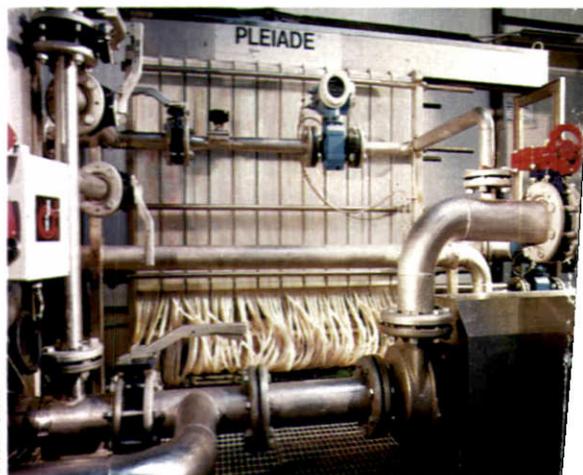
Pour dépolluer les effluents industriels, les technologies membranaires se marient particulièrement bien avec les traitements biologiques. On parle alors de bioréacteurs à membranes. « Il s'agit de faire passer l'effluent chargé en matière organique dans un bioréacteur contenant des bactéries qui vont la digérer, précise Roger Ben Aïm, chercheur au Lipe. L'eau ainsi traitée est ensuite affinée en passant dans une membrane qui assure sa désinfection en retenant les microbes ». Voilà déjà une vingtaine d'années que cette association est

utilisée dans les gratte-ciel japonais : les eaux usées sont ainsi récupérées puis réinjectées dans le circuit des toilettes. Au Japon encore, mais aussi aux Etats-Unis, les huiles de coupe usées des usines de mécanique sont souvent traitées par ce procédé. La technique devrait s'affiner encore dans l'avenir grâce à l'utilisation de bactéries génétiquement modifiées, dans lesquelles on introduirait des gènes adaptés à une dégradation spécifique, telle celle des hydrocarbures.

Autre mariage réussi, celui de l'ultrafiltration et de la complexation. Elle permet le traitement

Deux armes en une

La lutte contre les effluents peut associer ultrafiltration et traitement biologique. Ce bioréacteur à membranes permet ainsi de débarrasser l'eau de ses matières organiques.



INTRA - AZARD - RHODIA ORELIS

RHODIA ORELIS

Circuits nippons

Le système fonctionne depuis 20 ans dans le gratte-ciel japonais : les bioréacteurs à membranes permettent l'épuration des eaux sanitaires et leur réutilisation.

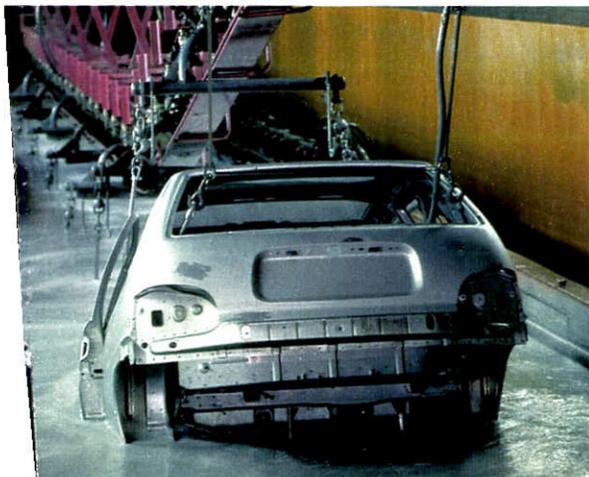


STOCK IMAGE

d'effluents contenant des cations métalliques (cuivre, fer, zinc, plomb, cadmium...). Les membranes d'ultrafiltration ne les arrêtent pas. Mais elles arrêteront des macromolécules composées d'un complexant (grosse molécule ayant une affinité particulière pour les cations métalliques) et d'un cation. Le procédé d'épuration consiste donc à complexifier les cations, puis à les filtrer sur membrane. Ensuite, il suffit d'acidifier la solution pour casser l'association complexant-cation et de repasser le tout par une seconde membrane pour obtenir, d'un côté, les métaux lourds concentrés,

Des bains moins chers

Les membranes permettent de recycler à la fois l'eau et les résidus de peinture lors du traitement anti-corrosion des carrosseries automobiles.



MAILLAC - REA

et de l'autre, la molécule complexante que l'on peut réutiliser dans le procédé.

Les techniques membranaires sont particulièrement efficaces dans le cadre du recyclage des contaminants. Car aujourd'hui, la dépollution des effluents *at the end of the pipe*, c'est-à-dire en sortie d'usine, n'est plus de mise. « Depuis environ 10 ans, le changement est significatif, poursuit Roger Ben Aim. L'eau devient plus chère, les industriels ont de plus en plus intérêt à l'économiser en optimisant les processus et en la recyclant à la sortie de chaque unité de travail ». Le recyclage s'inscrit dans une démarche environnementale qui inclut l'ensemble du processus industriel. « On traite l'eau étape par étape en cherchant chaque fois à la réutiliser », poursuit Roger Ben Aim. Ce système offre des conditions d'épuration idéales, puisque l'on connaît exactement les contaminants produits par l'unité industrielle, et que ceux-ci sont peu nombreux. Et s'il n'en est encore qu'à ses débuts, le recyclage devrait exploser, car il ouvre la voie à l'industrie du futur. Une industrie idéale qui, du point de vue de l'eau, fonctionnerait en circuit fermé. Ce rêve commence à prendre corps. Un exemple : les carrosseries automobiles sont traitées contre la corrosion par immersion dans un bain de peinture dans lequel circule un courant électrique responsable du dépôt de la peinture. Mais le trempage provoque des irrégularités. Il est donc nécessaire de finir par un rinçage à l'eau, ce qui produit un effluent riche en résidus de peinture toxiques. « Aujourd'hui, les technologies membranaires permettent de fonctionner en circuit totalement fermé, assure Ludovic Huitorel,

responsable du marché environnement chez Rhodia Orelis. Une petite fraction de l'eau du bain passe à travers une membrane d'ultrafiltration. Cette eau est alors utilisée pour le rinçage, puis revient par gravité dans le bain en y ramenant le surplus de peinture éliminé par le rinçage. Finalement, les industriels qui avaient envisagé le recyclage d'un point de vue environnemental, l'adoptent pour les économies qu'il génère ». Tout à la fois des économies d'eau, de peinture et de redevance à la pollution. Le recyclage s'avère très rentable dès lors que la molécule à récupérer est chère. C'est le cas pour les solvants en chimie, les teintures dans le textile, les métaux lourds de l'industrie électrique ou encore le lactosérum produit dans l'industrie laitière. « Chez Rhodia Orelis, d'autres techniques de recyclage sont d'ores et déjà au point, poursuit Ludovic Huitorel. Pour l'instant, elles ne sont rentables qu'en Allemagne, où l'eau est relativement chère. L'augmentation du prix de l'eau devrait les rendre rapidement intéressantes en France. »

Le recyclage de l'eau est à la base de ce que l'on appelle les technologies propres. Ce terme désigne l'ensemble des techniques permettant de produire mieux tout en polluant moins. Il s'agit par exemple de modifier, dans l'industrie laitière, le mode lavage de la caséine. Traditionnellement, la caséine est obtenue par précipitation du lait par l'acide chlorhydrique. Le solide précipité est ensuite rincé dans plusieurs bains d'eau. Mais on peut aussi effectuer ce lavage par centrifugation, ce qui permet l'économie d'une grande quantité d'eau, et l'obtention d'un effluent plus concentré, donc moins volumineux. Autre exemple de technologie propre : le recyclage des teintures dans l'industrie textile grâce aux techniques membranaires. La mise en place de ces dernières nécessite souvent de modifier une partie, ou parfois même l'ensemble du procédé industriel. L'investissement est important, mais il permet de réduire notablement la pollution. Alors que les technologies propres ne représentent que 11 % des investissements des établissements du bassin Adour-Garonne en matière de dépollution sur les années 1994-1998, elles sont responsables de l'élimination de 22 % de la matière organique, soit 18,8 t/j. « Aujourd'hui, 40 % des investissements des agences de l'eau concernent des mises en place de technologies propres et 60 % de la dépollution, précise Guillaume Faurès. L'engagement des industriels vers le rejet minimal (à défaut du rejet zéro) est donc massif. L'ennui, c'est que, pour une industrie donnée, la technologie propre n'existe pas toujours. Il faut alors l'inventer. Et cela prendra encore du temps. »



FRICHES: DES SOLUTIONS

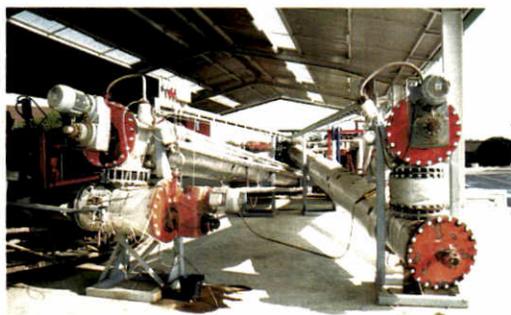
Une teinturerie qui périclète, une station-service à l'abandon, une usine à gaz désaffectée : autant de scénarios qui génèrent des friches industrielles. Des friches où l'on découvre, un jour ou l'autre, des bidons toxiques rouillés qui laissent échapper leur contenu et polluent massivement les sols, puis les nappes ou les rivières de la région. Ainsi, les eaux du Lot trahissent une forte pollution au cadmium et au zinc, issue du lessivage, pendant presque un siècle, des anciens crassiers de l'Union minière de Viviez. Un métal toxique que l'on retrouve jusque dans l'estuaire de la Gironde!

Pour parer à ce danger, le ministère de l'Environnement a engagé un plan de bataille. Il s'agit de recenser toutes les activités industrielles présentes et passées ayant pu occasionner une pollution. Un travail énorme et coûteux (environ 1 million de francs par département), et qui avance à pas de fourmi. « Depuis 1994, 14 départements ont été bouclés », précise Dominique Darmendrail, du BRGM. Il n'en reste donc pas moins de 82... « Tous les sites recensés sont catalogués sur Internet ⁽¹⁾, avec leur degré de pollution éventuelle, et le nom du responsable du terrain. » Lorsque le site est effectivement contami-

1 - basias. brgm. fr.



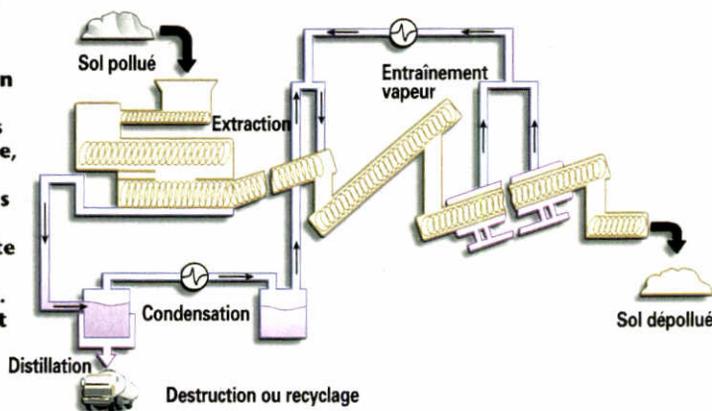
C. THIRIET - ALTITUDE



GEOCLEAN

Comment nettoyer un sol

La société Géoclean a déposé un brevet pour son procédé de dépollution des sols, Solvis. Les terres, une fois extraites du site, circulent en continu à l'intérieur de tubes munis de vis sans fin. Un solvant, circulant en sens inverse, dissout et emporte les polluants (hydrocarbures, huiles, goudrons, pesticides...). Puis, les résidus de solvant sont éliminés du sol par entraînement à la vapeur d'eau.



né et qu'il nécessite une réhabilitation, on est en présence d'une friche industrielle. Alors, en attendant de trouver un responsable, l'Etat enregistre, au mieux surveille, mais traite rarement.

Pourtant, des sociétés spécialisées dans la dépollution des sites proposent des solutions. Le *venting* consiste par exemple à enfoncer des puits d'extraction dans le sol, chargés d'aspirer les gaz qui s'y trouvent. Les molécules polluantes, volatilisées par la dépression, sont entraînées dans le puits. Les vapeurs sont alors traitées, soit par absorption sur charbon actif, un matériau capable de retenir de nombreux composés dans ses pores, soit par incinération. Cette sorte d'extraction sous-vide s'avère particulièrement efficace pour récupérer des composés volatils comme l'essence ou les solvants de l'industrie chimique. Pour des composés organiques moins volatils, la société Géoclean a déposé un brevet pour son procédé « Solvis » : les sols extraits du site sont entraînés dans une vis sans fin. Un solvant, le dichlorométhane, qui circule à contre-courant de la vis, dissout et emporte les polluants. Les traces résiduelles de solvants sont ensuite entraînées à la vapeur d'eau, le solvant régénéré par distillation, et les polluants éliminés dans un centre spécialisé.

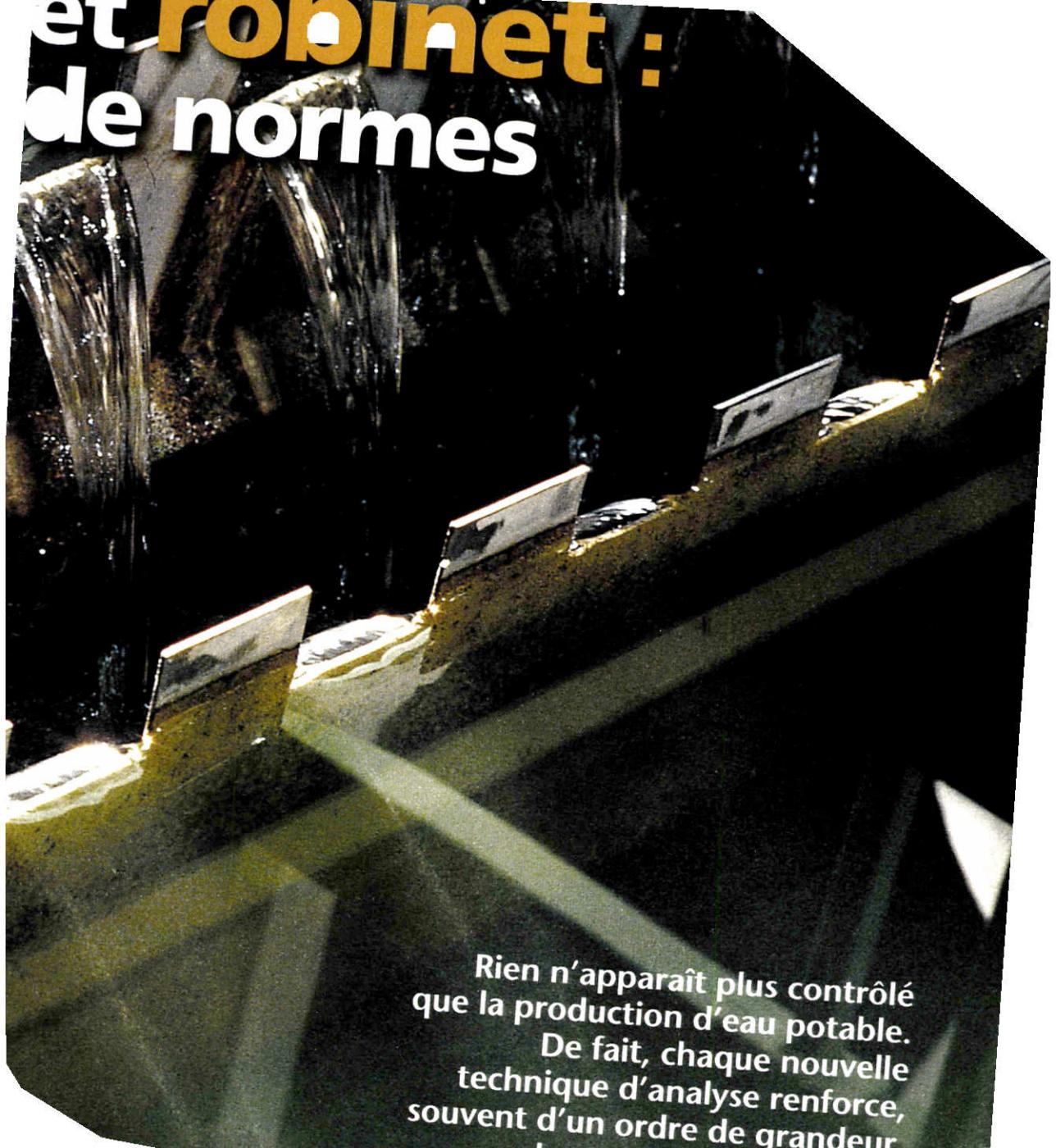
Parallèlement aux procédés physico-chimiques, les procédés biologiques se développent. Il s'agit d'aider un peu les bactéries du sol à dégrader les résidus organiques. Pour la stimulation, on insuffle de l'oxygène dans le sol, que l'on peut enrichir en nutriments. On ajoute éventuellement des bactéries plus efficaces puis on installe un circuit de récupération des produits de dégradation, les lixivats. Une dépollution économique : à 100 à 500 F la tonne de sol traitée, contre 2000 à 7000 F pour les techniques physico-chimiques, la biodégradation a la cote auprès des industriels. Car ces procédés sont majoritairement utilisés par des entreprises qui réhabilitent, volontairement ou sous la contrainte, leurs propres terrains. Ils profitent rarement aux friches industrielles, toujours en attente d'un responsable qui veuille bien engager les travaux.

Entre source un tamis serré

Cascade purifiante

Une fois captée, l'eau brute nécessite toute une série de traitements pour être rendue potable. Coagulation, décantation et filtration en sont les principaux maillons (ici, procédé Actiflo TV, regroupant ces 3 étapes).

MICHEL BARRÉ - JPM/NO



et **robinet** :
de normes

Rien n'apparaît plus contrôlé
que la production d'eau potable.
De fait, chaque nouvelle
technique d'analyse renforce,
souvent d'un ordre de grandeur

Disposer 24 heures sur 24 d'eau potable, à domicile. Un confort dont bénéficie la plus grande majorité des Français, à raison de 150 à 200 l/jour pour chacun d'eux, ou, sur l'année, de 103 m³. Ce qui représente près d'un quart des consommations nettes totales d'eau⁽¹⁾ de l'Hexagone, tandis que 68 % sont le fait de l'agriculture, 5 % de l'industrie et 3 % de l'énergie. Consommateurs somme toute raisonnables, comparés aux Canadiens (304 m³/habitant/an) ou aux Américains (244 m³/habitant/an), nous nous situons dans la moyenne européenne, aux côtés du Royaume-Uni, de l'Espagne et de la Suède.

Si la question de la disponibilité ne se pose pas, reste celle de la qualité, tant sanitaire que gustative. Soumise à des contrôles rigoureux et constants, sous l'égide des exploitants d'abord, puis des organismes publics, cette qualité est au cœur de la loi sur l'eau de 1964, complétée par la loi du 3 janvier 1992, actuellement en vigueur. Considérant l'eau comme « patrimoine commun de la nation », ces textes ont notamment renforcé le rôle des collectivités en matière de distribution et d'assainissement. Libres à elles, par ailleurs, de déléguer la gestion du service de l'eau à une société privée.

D'après le baromètre Sofres/Centre d'Information de l'Eau de 1999, 70 % des Français sont satisfaits de l'eau « du robinet ». Deux tiers d'entre eux estiment qu'elle leur offre toutes les garanties requises. On note une sensibilité accrue à la qualité de cette eau, ainsi qu'une volonté d'information quant à sa composition et à sa provenance. Est-elle, par exemple, souterraine ou superficielle ? L'Ain, l'Eure, la Marne, l'Oise et huit autres départements ne s'abreuvent que d'eau issue de nappe aquifère. Tandis que le Grand Ouest, le Limousin, ou encore plusieurs zones très urbanisées comme l'Ile-de-France puisent surtout leur eau dans les rivières, lacs et fleuves. Globalement, en France, on consomme davantage d'eau souterraine (60 % des besoins) que d'eau de surface.

C'est ici, à partir de la source choisie, que commence le long processus de production et de distribution. Il s'agit du simple pompage des eaux superficielles, ou, pour les eaux souterraines, de leur captage, souvent effectué par un forage pouvant dépasser 1 500 mètres de profondeur. Toutes ces eaux ainsi prélevées vont alimenter quelque 29 000 unités de distribution (UDI), réparties aux quatre coins du territoire. Chacune comprend le réseau physique de distribution, le réservoir, les

tion. En moyenne, une unité dessert 2 005 habitants ; en pratique, certaines d'entre elles dépassent largement ce chiffre. Ainsi, en région Ile-de-France, les réseaux peuvent alimenter plus de 500 000 personnes.

A L'AUNE DE 63 PARAMÈTRES

Puisée à l'état naturel, l'eau nécessite, presque partout en France, un traitement pour être rendue propre à la consommation humaine. Le choix de l'eau brute est donc une étape essentielle : elle doit satisfaire à un certain nombre d'exigences, sachant que sa qualité dépend à la fois du contexte géographique, hydrographique, agricole, urbain et industriel... Avec, en conséquence, des régions plus privilégiées que d'autres (voir l'article de Anne Debroise, p. 68). Pour juger de sa qualité initiale, on tient compte de ses caractéristiques physico-chimiques, de sa qualité microbiologique, de sa couleur, de la présence de substances « indésirables » – particules d'argile en suspension, bactéries, matières organiques – ou toxiques, de nitrates et de pesticides. Ces dernières substances sont issues de pollutions chroniques ou accidentelles, en général liées aux pratiques agricoles. Pour en limiter la teneur dans les eaux brutes, la loi a établi des périmètres de protection autour des points de prélèvement.

« Quiconque offre au public de l'eau en vue de l'alimentation humaine, à titre onéreux ou gratuit, est tenu de s'assurer que cette eau est propre à la

EMMANUEL GAFFARD

Pour abreuver Paris

Pompant l'eau de la Marne, l'usine de Joinville-le-Pont produit plus de 100 000 m³ d'eau potable par jour. Avec les usines d'Orly et d'Ivry-sur-Seine, elle alimente près de la moitié des Parisiens.



LES CRITÈRES DE QUALITÉ

consommation. » (Article 19 du Code de la santé publique). Dans les faits, il s'agit de la rendre conforme aux normes rassemblées dans le décret du 3 janvier 1989, en application de la directive européenne du 15 juillet 1980. Leur ensemble garantit une eau « potable ». En France, on a établi ces normes à l'aune de 63 paramètres, classés en six catégories (voir l'encadré ci-contre) : il s'agit d'éléments dont on va rechercher la présence et la quantité. Aussi, la norme fixe un maximum à ne pas dépasser. Qu'il s'agisse des 50mg/l de nitrates ou des 50µg/l de cyanure.

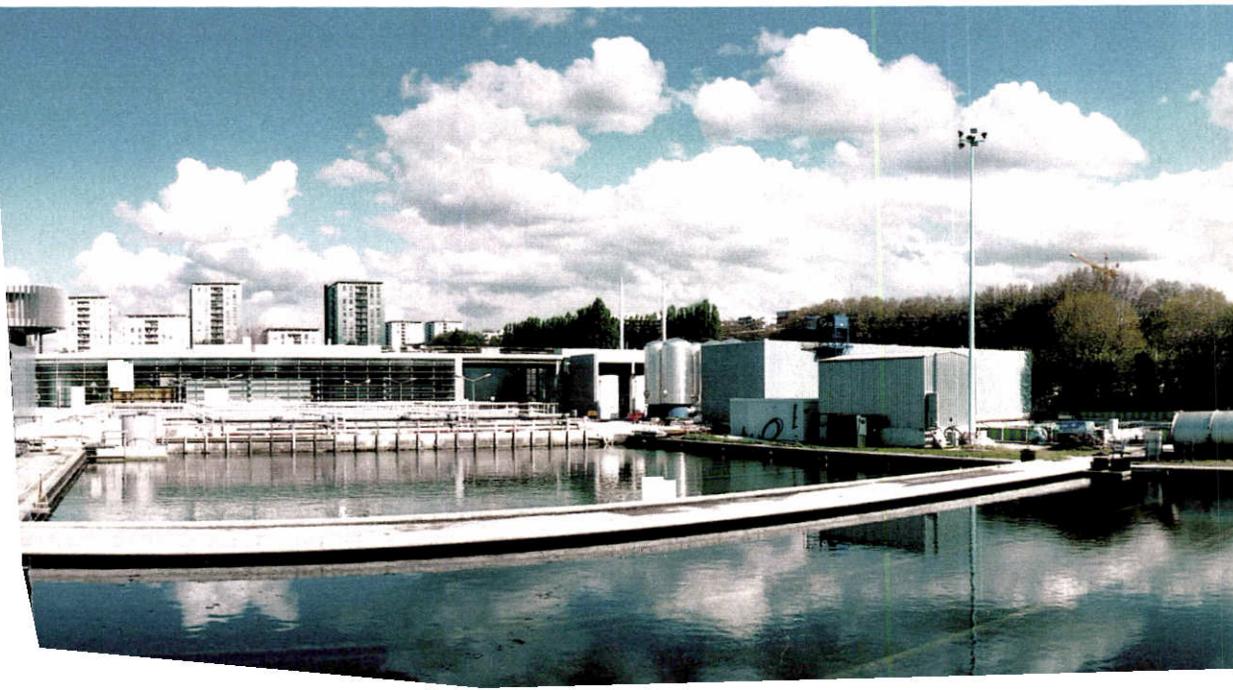
Pour les définir, « il y a d'abord eu une série de tests qui permet de reconnaître un produit toxique, précise Jean-Luc Trancart, directeur de la clientèle à la Lyonnaise des eaux. Puis on fixe la dose admissible en se basant sur le métabolisme du jeune enfant. » Elle inclut une forte marge de sécurité, en général de l'ordre de 10^{-5} à partir de la dose jugée toxique. Les normes en vigueur sont donc très strictes, et notamment en matière de pesticides : beaucoup plus basses que les recommandations de l'Organisation mondiale de la santé (OMS). Adoptées par l'Union européenne et la France, celles-ci ont en réalité deux objectifs : protéger l'individu, certes, mais aussi l'environnement et les ressources en eau. Ce qui explique ce 0,1 microgramme de pesticides par litre d'eau, voire 0,03 µg/l pour certains d'entre eux.

Qu'en sera-t-il dans la toute prochaine réglementation sur l'eau ? Pour les pesticides, pas de

La liste des paramètres pour l'eau potable a fluctué au cours du temps. Pour preuve, elle est passée de 6 paramètres en 1885 à 63 en 1980. On les a classés en 6 groupes : organoleptiques (couleur, odeur, saveur), physico-chimiques en relation avec la structure naturelle des eaux (éléments minéraux comme les chlorures ou les sulfates, la température, le pH), substances « indésirables » (fluor, nitrates... tolérées jusqu'à un certain seuil), toxiques, (arsenic, mercure, plomb, nickel,...), microbiologiques (virus et bactéries pathogènes, surtout salmonelles et staphylocoques), pesticides (herbicides, insecticides, acaricides, fongicides), et ceux concernant les eaux adoucies. S'y ajoutent des critères secondaires, portant surtout sur le confort de l'utilisateur. Ainsi, la quantité de chlore utilisée pour désinfecter n'est limitée à aucune norme, bien qu'il existe une valeur indicative (0,1mg/l).

De nouvelles normes devraient entrer en vigueur à partir du 25 décembre 2000 : les paramètres de qualité seront classés en 3 groupes : microbiologiques, chimiques et indicateurs du bon fonctionnement des installations de traitement.

changement. Cette nouvelle directive européenne « relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine » devrait être transcrite en droit français d'ici à la fin de l'année, et appliquée à partir du 25 décembre 2003. En ligne de mire, on trouve certaines substances comme l'arsenic – potentiellement cancérigène pour l'homme – et le plomb, responsable du saturnisme



(voir l'encadré ci-dessous). Leurs normes se verront réduites d'un facteur 5 (de 50 µg/l à 10 µg/l), avec, pour le plomb, une étape transitoire à 25 µg/l, et ce jusqu'en 2013... Un délai raisonnable quand on sait l'envergure des travaux à réaliser : remplacement de 40 % des branchements raccordant les habitations aux réseaux de distribution d'eau, ainsi que celui des conduites intérieures de 10 millions de logements.

Aujourd'hui, on estime l'ensemble des coûts aux alentours de 75 milliards de francs... dont une part prise en charge par l'usager. A quelle hauteur ? Pour l'instant, les Agences de l'eau planchent sur le chiffre et les modalités de subventions. Par exemple, dans le Rhône, on évalue la partie publique entre 5 à 7 milliards de francs, la partie privée entre 8 et 10 milliards de francs, à répartir sur 13 millions d'habitants. « *Disons que l'utilisateur devrait voir sa facture d'eau augmenter de quelques dizaines de centimes par mètre cube* », précise William Bouffard, de l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse.

Au prix du plomb devrait s'ajouter, dans certaines unités de distribution, celui de l'arsenic... par exemple, là où – comme dans le Puy-de-Dôme – les nappes en sont naturellement riches. « *Cela va obliger certaines petites communes à investir* ».

ENCORE MOINS DE PLOMB

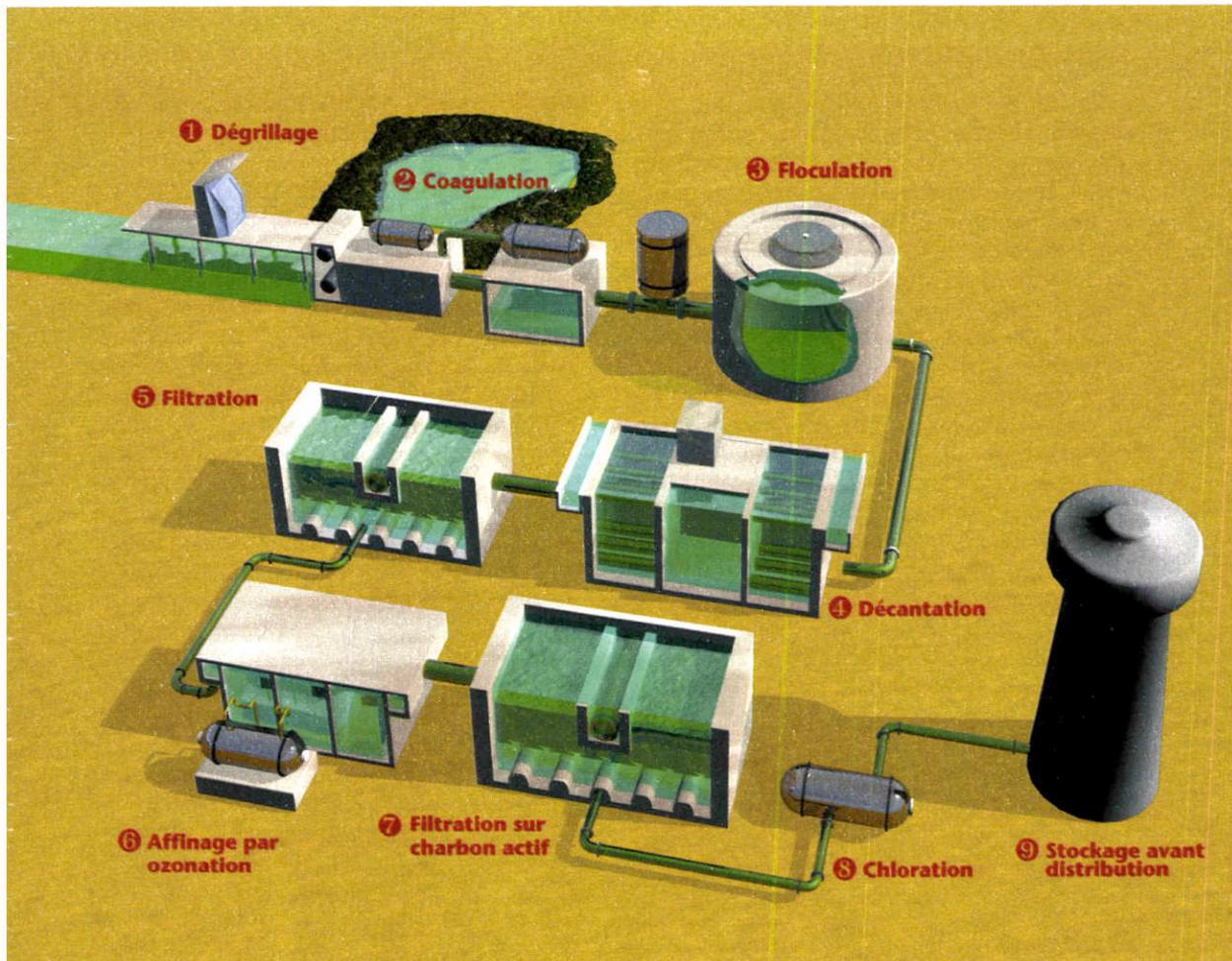
L'abaissement du taux de plomb dans l'eau du robinet, d'après la nouvelle norme européenne, s'inscrit dans une logique de réduction générale de l'exposition de l'homme au plomb. Mais l'eau est loin d'être seule en cause ; il faut compter avec l'air – surtout dans les grandes villes – le tabac, ou encore certains aliments comme le vin et les jus de fruits... Alors, pourquoi diviser par cinq, en 15 ans, la concentration maximale admissible de plomb dans l'eau du robinet ? D'une part, pour participer à la diminution des apports potentiels ; d'autre part, pour contribuer à protéger les populations les plus vulnérables (jeunes enfants et femmes enceintes). C'est là une nouvelle application du « principe de précaution ». Mais qu'en est-il des cas de saturnisme d'origine hydrique ? En France, on n'en compte quasiment aucun au cours des dernières décennies. Cette maladie provient essentiellement de l'ingestion massive de plomb, soit à la suite d'une exposition professionnelle, soit, surtout pour les enfants en bas âge, de l'ingestion d'écailles de vieilles peintures au plomb dans les immeubles vétustes et insalubres.

souligne-t-on à l'Agence de l'eau Loire-Bretagne. Car la solution passe par un traitement supplémentaire, à l'instar de Baudricourt (Vosges) où l'eau provient d'une nappe de grès, à 456 m de profondeur : l'arsenic contenu dans ce minerai se dissout progressivement dans l'eau. Aussi, à l'entrée de l'usine, celle-ci contient entre 40 et 70 µg/l d'arsenic, voire 100 µg/l. Il a donc fallu ajouter une étape de coagulation-floculation (formation de grumeaux) avec du chlorure ferrique qui piège l'arsenic, suivie d'une décantation et d'une filtration sur sable. En termes de coût pour l'usager, on devrait approcher 2 francs supplémentaires par mètre cube, du moins dans quelques zones du territoire. Ainsi la facture d'eau varie-t-elle (voir l'encadré p. 83), mais en partie seulement, selon le traitement de potabilisation mis en œuvre et, de fait, selon la qualité de l'eau brute.

UNE EAU PLUS CLAIRE

« *L'idéal, pour un distributeur ou un maire, c'est une nappe d'eau profonde. Elle est en effet relativement bien protégée, notamment des contaminations bactériennes* », souligne Jean-Luc Trancart. En revanche, les ressources en eau superficielle sont plus vulnérables aux pollutions et susceptibles de contenir, en quantités non négligeables, des matières organiques, des pesticides, du manganèse, du fer, des métaux lourds, des algues et de la turbidité. Avec, en conséquence, une filière de traitement particulièrement complexe.

Première étape : débarrasser l'eau des substances solides, à la fois responsables de sa couleur et de sa turbidité (sédiments secs en suspension). « *On dispose pour cela d'un procédé commun avec des techniques différentes, précise Abdelkader Gaïd, expert à la direction technique d'OTV (société de Vivendi Water). Il consiste en trois opérations successives : la floculation, la décantation et la filtration.* » Après avoir retiré les plus gros éléments par dégrillage et tamisage, on agrège les microparticules à l'aide d'un coagulant. En brassant l'eau, les flocons s'agglomèrent. Entraînés par leur poids, ils se déposent dans les décanteurs, grands couloirs que l'eau parcourt lentement. Au terme de ce trajet, l'eau est déjà plus claire. Enfin, une filtration au travers d'une épaisse couche de sable la nettoie des dernières particules. Dans la pratique, les exploitants ont parfois mis au point divers procédés pour rassembler toutes ces opérations en une seule enceinte. Un atout de « taille » pour les petites et moyennes unités de distribution d'eau de surface, traitant entre 15000 et 25000 m³/jour.



Seconde étape : neutraliser les nitrates et les pesticides. Cette opération est relativement bien maîtrisée grâce à l'utilisation de charbon actif (il les fixe à sa surface poreuse *via* des forces électrostatiques). Face à une pollution ponctuelle – par exemple en période d'épandage associée à de fortes pluies – on l'injecte sous forme de poudre en suspension, avant la décantation ou la filtration. Un procédé efficace, mais coûteux. Face à une pollution chronique, comme dans les zones de cultures intensives, on lui préfère le charbon actif en grains (1 à 1,5 mm de diamètre).

Troisième étape : éliminer les germes pathogènes qui représentent un risque à court terme. Deux procédés classiques – la chloration et les rayonnements ultraviolets – détruisent la quasi-totalité des bactéries. « *L'utilisation des UV a l'avantage d'éviter, théoriquement, celle des réactifs comme le chlore, précise Abdelkhaider Gaïd. Mais en contrepartie, l'eau circulant dans le réseau ne contiendra pas de désinfectant. Difficile, en fait, de se passer totalement de chlore.* » Au grand dam de certains usagers qui se plaignent de son goût pro-

Parcours « high-tech »

Dans sa forme traditionnelle, le traitement complet de l'eau brute suit 5 étapes : un prétraitement (1) pour retirer les grosses particules ; une clarification (2 à 4) pour agréger puis séparer les microparticules ; une filtration (5) ; un affinage (6 et 7) pour éliminer germes pathogènes et pesticides ; enfin, une désinfection par le chlore (8) avant le stockage (9).

noncé : or, celui-ci provient souvent de la combinaison du chlore avec des matières organiques, sans relation directe avec sa concentration initiale. Les virus, quant à eux, sont éliminés ou inactivés par une ozonation – l'ozone disposant d'un fort pouvoir oxydant.

Voici pour les traitements actuels. Mais demain, ils devraient céder leur place à une technique en plein développement : la filtration membranaire. Répondre à la sévérité accrue des directives internationales, préserver l'environnement... Autant de facteurs qui font de cette innovation l'un des fers de lance de l'industrie de l'eau.

En quoi consiste le procédé membranaire ? Il

repose sur une mince pellicule dont la surface est garnie de pores microscopiques – des millions par centimètre carré. On choisit la taille de ces pores en fonction des substances à éliminer. Ainsi, la microfiltration (diamètre des pores entre 10 et 0,1 microns) retient les particules colloïdales et les micro-organismes comme les protozoaires et les bactéries; quant à l'ultrafiltration (entre 0,1 et 0,01 micron), elle arrête les macromolécules, les bactéries et les virus.

En fonction de la qualité de l'eau, l'une ou l'autre peut se substituer efficacement à l'étape complète floculation/décantation/filtration. Elles intéressent d'autant plus les constructeurs d'usines de traitement que l'« on utilise aujourd'hui des polymères fluorés, qui présentent l'avantage de montrer une résistance chimique supérieure aux anciens polymères utilisés, et une durée de vie plus longue » précise Hervé Buisson, du département eau potable et procédé de séparation à Anjou Recherche (Générale des eaux).

De fait, les techniques de filtration membranaire multiplient les avantages : plus compactes, moins d'ajouts de produits chimiques, moins de boues formées, et une barrière microbienne efficace. Sans compter qu'elles peuvent aussi traiter des eaux présentant un « profil de pollution » connu et stable dans le temps. Dans ce cas, alors, on fera appel à la nanofiltration – filtrant les molécules d'un diamètre compris entre 0,01 et 0,001 micron – pour retenir les pollutions dissoutes comme les pesticides ou les nitrates. « Si elle permet un principe de précaution maximale, précise Hervé Buisson, la nanofiltration a un coût encore fort élevé. Elle reste le haut de gamme, inaccessible aux petites communes. » Notamment à cause du remplacement fréquent des membranes (tous les 5 ans en moyenne, contre 20 ans pour les procédés classiques) et de leur coût énergétique – dû aux pressions relativement importantes qu'il faut appliquer. Fleuron en la matière : l'usine d'eau de Méry-sur-Oise (Ile-de-France), qui intègre un procédé de nanofiltration depuis septembre 1999. Trois raisons ont motivé ce choix : réduire une pollution chronique en pesticides; limiter les

ajouts de chlore, élevés à cause de la longueur du réseau de distribution; adoucir l'eau.

QUI CONTRÔLE QUOI ?

Une étude du ministère de la Santé signale 187 accidents de pollution de l'eau sur une période allant de 1991 à 1994 : huit cas ont donné lieu à des effets de santé déclarés et analysés (gastro-entérites principalement).

À l'échelon national, les impacts sont donc limités. Une grande vigilance s'impose pourtant, afin que les valeurs limites ne soient pas dépassées dans les eaux distribuées.

Or, à mesure que les systèmes d'analyse s'affinent, ces normes, on l'a vu, perdent périodiquement et inéluctablement un ordre de grandeur. Conséquence : on recherche aujourd'hui des produits à l'état de traces. Les pesticides, par exemple : leur norme actuelle, très restrictive, a induit la mise sur le marché de produits plus actifs à des doses moindres, et

donc de plus en plus difficiles à mettre en évidence par les laboratoires. Or, le coût d'analyse de ces paramètres est exorbitant : la recherche d'une série de pesticides revient en effet à

plusieurs milliers de francs. Dans ces conditions, elle est doublement ciblée : on ne recherche que les molécules utilisées dans l'environnement de la ressource, et pendant les périodes suivant l'épandage.

Une grande évolution technologique concerne l'analyse bactériologique; celle-ci est basée sur la recherche de germes témoins d'une pollution fécale (coliformes fécaux) d'origine humaine ou animale. Quand on en détecte, on peut craindre la présence d'autres germes susceptibles de provoquer une maladie.

En général, le contrôle bactérien se fait par culture sur gélose, ou, par exemple pour *Crypto-*



Puce d'avenir
Des milliers de sondes moléculaires greffées sur un support de 1 cm² : cette puce à ADN peut reconnaître les empreintes génétiques d'une vingtaine de bactéries, dans un échantillon d'eau. Et ce, en moins de 4 heures.

sporidium, par une méthode de détection basée sur l'immunofluorescence. Or celle-ci n'est pas spécifique du genre *Cryptosporidium parvum*, seul responsable des infections; de plus, elle nécessite des délais de plusieurs jours. Autant d'écueils que devrait contourner un nouvel outil de pointe : une « puce à ADN », fruit d'un partenariat industriel entre la Lyonnaise des eaux et BioMérieux. « Il s'agit d'utiliser les ADN et ARN spécifiques des germes pathogènes que l'on recherche dans l'eau », explique Patricia Renaud, directrice du CIRSEE (Centre international de recherche sur l'eau et l'environnement). En moins de quatre heures, on obtient des résultats d'analyse sûrs et précis. »

La puce à ADN est un support miniaturisé (1 cm²) sur lequel on a greffé plusieurs milliers de sondes moléculaires. Chacune d'elle peut reconnaître les brins d'ADN qui lui sont complémentaires, présents dans l'échantillon d'eau analysé, et se fixer à eux par hybridation. On les repère ensuite grâce à des marqueurs fluorescents. Puis l'empreinte d'hybridation ainsi obtenue est soumise à un traitement informatique : celui-ci détermine la présence et l'identité des micro-organismes recherchés dans l'échantillon. En une

seule analyse, on peut identifier 20 à 30 espèces.

Mais qui effectue ce type de contrôle ? D'abord les autorités sanitaires, les Directions départementales des affaires sanitaires et sociales (DDASS), sous l'égide des préfets. Elles viennent renforcer et contrôler l'autosurveillance de l'exploitant, indispensable pour prévenir, au quotidien, toute anomalie dans la qualité de l'eau distribuée. Chaque année, les DDASS réalisent près de 300 000 prélèvements d'échantillons d'eau dans des lieux définis par elles. Puis ces échantillons sont analysés dans des laboratoires agréés par le ministère de la Santé. Toute anomalie, tout dépassement d'une valeur réglementaire, toute dégradation anormale de la qualité de l'eau entraîne l'intervention de la DDASS auprès de l'exploitant de l'installation. « En fonction du paramètre en cause et de l'importance du dépassement, les autorités sanitaires décident de plusieurs mesures, souligne Charles Saout, chef de bureau de l'eau, à la Direction générale de la santé. Celles-ci vont de la simple analyse de confirmation à la mise en place de méthodes correctives comme le rinçage des canalisations ou la désinfection de celles-ci, voire à l'interdiction de consommation. Dans tous les cas, ces informations de gestion sont disponibles auprès des responsables de la distribution des eaux ou de la DDASS, ou portées à la connaissance des consommateurs. »

Quant à la fréquence des contrôles, elle dépend à la fois du débit journalier de l'eau, de la population desservie et de l'existence, ou non, d'un processus de désinfection. On arrive ainsi à des écarts considérables : 2 à 4 contrôles annuels pour des unités de distribution desservant moins de 500 utilisateurs, un contrôle biquotidien pour celles qui alimentent plus de 300 000 habitants.

Dans les faits, c'est surtout au niveau des 27 000 petites unités de distribution – caractéristiques du milieu rural – que les résultats d'analyse sont les moins satisfaisants. Ainsi, William Bouffard note que « dans le bassin Rhône-Méditerranée-Corse, près de 6 % de la population ne dispose pas d'eau régulièrement aux normes bactériologiques ». En cause : pollutions de la ressource, défaillance du traitement de désinfection, ou encore mauvais entretien du réseau de distribution et des réservoirs... La solution ? Elle passe par une meilleure protection des périmètres de captage, un renforcement du traitement de l'eau, et, de surcroît, par la mise en œuvre de journées d'information destinées aux maires. Reste que la qualité de l'eau, en France, continue globalement de s'améliorer au fil des années. ▽

L'EAU, À QUEL PRIX ?

La moyenne nationale du prix de l'eau, en 1999, avoisinait les 20 francs TTC/m³. Celui-ci a connu une augmentation d'environ 60 % depuis 1992, surtout liée à l'application de la Directive européenne de 1991 sur le traitement des eaux résiduaires urbaines. Un domaine où la France avait pris quelque retard. Prenons l'exemple du bassin Artois-Picardie : l'évolution du prix a été forte entre 1994 et 1996 (+ 8 %), puis s'est sensiblement modérée les deux années suivantes (respectivement +3 % et +2 %). Mais cette stabilisation, globalement observée au niveau des six bassins, devrait laisser place à une nouvelle augmentation, toutefois moins forte que précédemment. Il s'agira de couvrir à la fois les nouveaux investissements en matière d'assainissement, et les installations nécessaires pour répondre aux nouvelles normes (principalement plomb et arsenic).

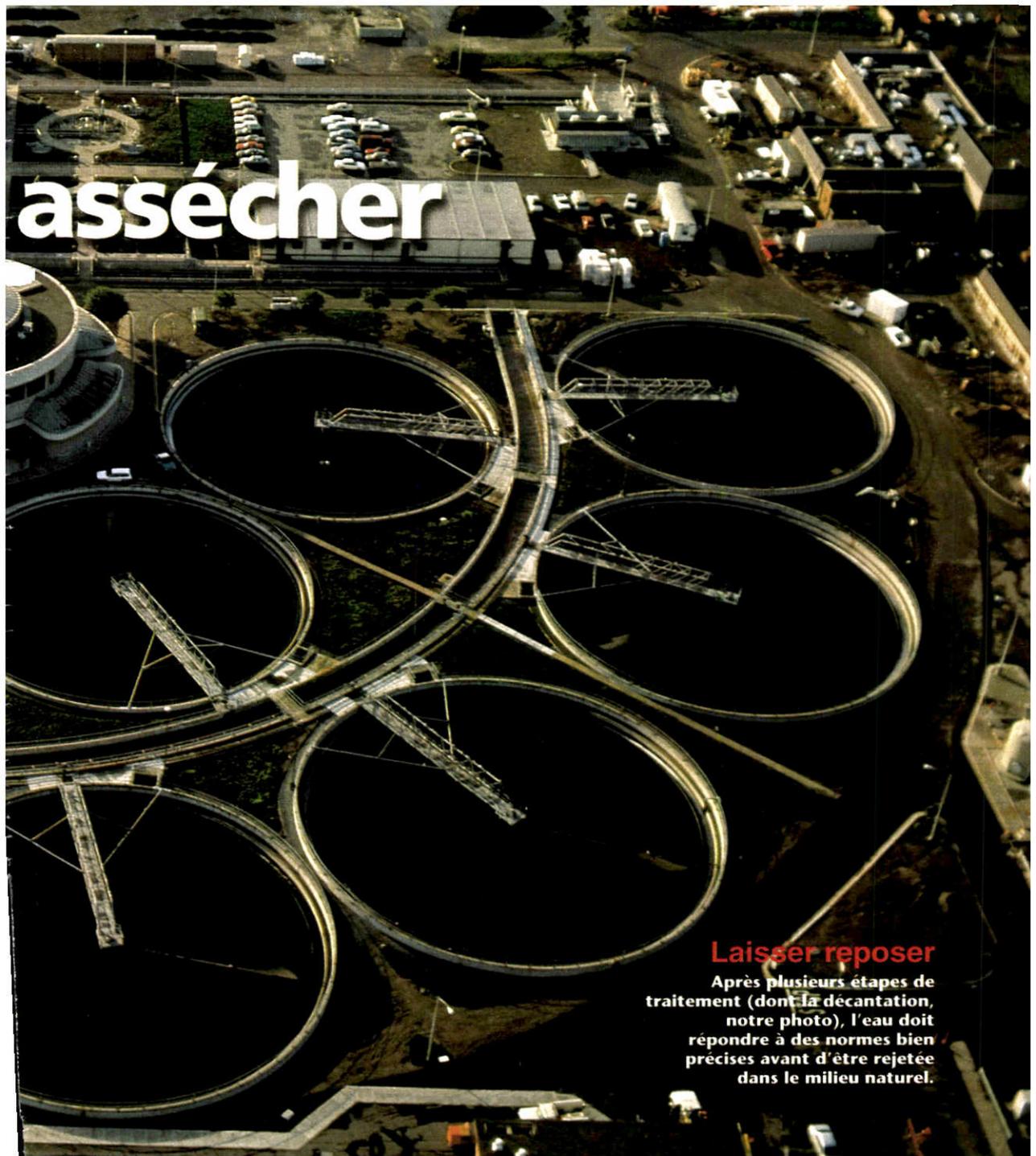
Sur la facture d'eau, la répartition des coûts se fait selon cinq « postes » (chiffres du bassin Artois-Picardie) : la redevance FNDAE (Fond national de développement des adductions d'eau) et la taxe des Voies navigables de France (au total, 1 %); la TVA (5 %); la redevance de l'Agence de l'eau (17 %); la distribution d'eau potable (36 %); l'assainissement (41 %).

Epurer, décantant,



Issues du traitement des eaux usées domestiques, les boues résiduelles, aujourd'hui déshydratées et sous forme de granulés, sont des matières valorisables dans l'agriculture et la production d'énergie.

PAR HERVÉ LABAQUERRE



assécher

Laisser reposer
Après plusieurs étapes de traitement (dont la décantation, notre photo), l'eau doit répondre à des normes bien précises avant d'être rejetée dans le milieu naturel.

V100

L'eau courante dans la ville, c'est-à-dire la distribution de l'eau potable au robinet, a certes apporté du confort au citoyen, mais a surtout engendré de considérables progrès de la santé publique.

L'assainissement collectif dans les villes a en effet suivi naturellement car il est devenu indispensable d'éviter le croupissement des eaux usées

soillées après leur utilisation. On a donc cherché à les évacuer au plus vite du milieu urbain pour réduire les risques d'insalubrité.

Toutefois, déversées dans la rivière, en aval de la ville par le réseau d'assainissement, ces eaux usées ont entraîné une dégradation de sa qualité et un appauvrissement de sa faune et de sa flore.

Les stations d'épuration ont ainsi été cons-

truites au bord des rivières, le milieu récepteur, à l'extrémité du réseau d'assainissement.

Les eaux usées véhiculées par le réseau d'assainissement contiennent toutes sortes de résidus rejetés par les utilisateurs de l'eau courante, citadins, industriels, mais aussi de l'eau de pluie après ruissellement sur les chaussées, trottoir, et toitures de la ville.

On trouve dans ces eaux usées des flottants, des matières en suspension et des matières dissoutes. Ces résidus sont essentiellement constitués de matières organiques (environ 75 %).

La masse totale de matières rejetées dans le réseau d'assainissement est de l'ordre de 20 kg par an et par habitant pour une consommation moyenne annuelle d'eau potable de 45 m³.

COMMENT FONCTIONNE UNE STATION D'ÉPURATION

L'objectif d'une station d'épuration est de concentrer la pollution contenue dans les eaux usées sous la forme d'un petit volume de résidus, les boues, et de rejeter une eau épurée répondant en France à des normes bien précises.

Dans la station, le processus d'épuration comporte d'abord une étape de prétraitement qui consiste à éliminer, par dégrillage, les encombrants et les déchets grossiers, puis les sables et les graisses. Cette première étape de traitement ne permet d'éliminer que 10 à 15 % de la pollution initiale des eaux usées.

Les eaux prétraitées subissent ensuite, selon la taille de la station, une phase de décantation statique, qui va éliminer la pollution particulière minérale et organique, soit environ 30 à 40 % de la pollution initiale.

Ces résidus sont alors concentrés sous forme de boues primaires, particulièrement fermentescibles et générant donc rapidement des odeurs désagréables.

Enfin les eaux usées vont subir une épuration biologique. Celle-ci consiste à développer une culture bactérienne spécifique qui, pour croître, va assimiler la pollution soluble et de ce fait la transformer en suspension.

Ce développement s'effectue dans des bassins parfaitement mélangés et oxygénés dans lesquels les eaux usées peuvent séjourner de 4 à 24 heures.

Dans un deuxième temps, les cultures bactériennes parfaitement structurées et isolées dans les suspensions qu'elles génèrent, seront séparées de l'eau épurée par décantation. Elles forment, dans le fond des bassins, des boues biologiques.

Cette phase de traitement biologique permet

non seulement l'élimination de la matière organique dissoute (rendement de 85 à 95 %), des composés azotés et phosphorés par synthèse biologique mais également par adsorption l'élimination de polluants organiques et minéraux solubles et présents à l'état de traces dans les eaux usées.

LES BOUES, LEUR COMPOSITION, LEURS USAGES

Les boues produites sur l'ensemble des ouvrages de traitement sont liquides et même franchement diluées. Leur teneur en matière sèche est de l'ordre de 20 à 50 grammes par litre.

La quantité de boues produites sur la station d'épuration est d'environ 20 kg de matière sèche par habitant raccordé sur la station et par an, soit un volume de 1 m³.

Ces boues, et la matière sèche qu'elles renferment, peuvent être considérées comme un fertilisant pour l'agriculture. En effet, elles contiennent environ 75 % de matière organique, 5 % d'azote, 2 % de phosphates.

Mais elles ont aussi leur face cachée : elles concentrent des micropolluants minéraux (métaux lourds, plomb, mercure, cadmium, zinc...), organiques (pesticides, résidus de combustion d'hydrocarbures...) et des micro-organismes pathogènes (bactéries, virus, parasites).

Riches en matières organiques, elles sont fermentescibles et peuvent donc dégager des odeurs nauséabondes caractéristiques des composés soufrés si on les laisse stagner sans oxygénation. Déshydratées et partiellement séchées, elles représentent une source d'énergie renouvelable comparable à un charbon de médiocre qualité, le lignite.

Du fait de leurs caractéristiques, plusieurs voies d'élimination ou de valorisation de ces boues sont possibles selon que l'on souhaite mettre en valeur leur caractère fertilisant ou énergétique, et que l'on considère les aspects sanitaires ou micropolluants.

Le devenir des boues dépend, dans un cadre réglementaire précis, essentiellement de trois contraintes : locales, économiques et en particulier sociologiques.

Trois voies d'élimination sont classiques : la valorisation agricole directe ou épandage, la mise en décharge et l'incinération.

L'épandage en agriculture est la voie la plus pratiquée en France et même en Europe. Les boues sont épandues dans les champs, directement sous forme liquide ou pâteuse (après déshydratation), puis enfouies.



ROSENFELD IMAGES LTD - SPL - COSMOS

Un séjour mouvementé

Dans ces bassins soumis à une forte insufflation d'oxygène, les bactéries aérobies se développent et métabolisent les matières organiques dissoutes. Elles seront ensuite séparées de l'eau épurée.

Cette pratique est la plus commune et doit être sauvegardée surtout pour les toutes petites collectivités locales.

En France, 60 % des boues produites sont valorisées en agriculture. Cette pratique, quand elle est bien maîtrisée, ne présente aucun risque sanitaire ou environnemental, mais nécessite une application rigoureuse selon des procédures de qualité mises en place par la réglementation.

L'incinération, après déshydratation, est également une pratique commune dans les collectivités de grande taille, 100 000 habitants et plus. Effectuée dans un four adapté, elle nécessite le plus

souvent un apport d'énergie complémentaire. C'est pour cette raison qu'elle est réalisée de plus en plus en co-incinération avec les ordures ménagères qui dégagent de l'énergie pendant leur combustion. La communauté urbaine de Bordeaux a équipé ses incinérateurs de Canon d'un tel système de combustion combinée.

La mise en décharge des boues avec les déchets ménagers est également une pratique courante et sans risque pour l'environnement. Dans les centres d'enfouissement techniques modernes, les déchets sont confinés dans des alvéoles étanches et recouverts de terre végétale. La fermentation qui se déclenche dans ces alvéoles, produit au bout de quelques mois, et pendant une dizaine d'années, un gaz riche en méthane. Celui-ci est aujourd'hui capté par des réseaux de canalisation et peut être utilisé comme combustible sur des moteurs thermiques.

Ce système, mis en place sur le centre d'enfouissement technique de la Satrod à Roche la Meulière, près de Saint-Etienne, produit 7 mégawatts/heure d'électricité.

QUELQUES SOLUTIONS ORIGINALES DE VALORISATION

La ville de Milwaukee, au bord du lac Michigan, aux Etats-Unis, est sans doute plus connue pour la fabrication des Harley Davidson que pour sa station d'épuration. Et pourtant ! Cette dernière, qui date de... 1926, reste à ce point exemplaire que des responsables viennent encore du monde entier pour la visiter et s'en inspirer.

Son système de traitement de boues est en effet aussi sophistiqué qu'original. Les boues produites sur cette installation, sont déshydratées sur des filtres à bandes, puis séchées dans des fours rotatifs balayés par un gaz chaud, en fait un gaz d'échappement d'une turbine de production d'électricité. Les boues séchées sont recyclées plusieurs fois dans le système pour finalement former des granulés de 2 à 6 millimètres de diamètre.



LE BRUN LIGHT MOTIV

Rien ne se perd...

Recueillies au fond des bassins de décantation, les boues d'épuration entament des carrières variées. Une fois déshydratées, elles peuvent être épandues dans les champs agricoles ou bien affectées à la production d'énergie.

Ceux-ci contiennent 6 % d'azote et 6 % de phosphate et du fer et seulement 5 à 8 % d'eau.

80000 tonnes de granulés sont ainsi produites chaque année et stockées en silos pendant la période hivernale. Ensachés, ils sont ensuite vendus dans tous les Etats-Unis, au Canada et même en Europe, comme fertilisant sur les terrains de golf ; les granulés les plus fins, 2 à 3 mm sont utilisés sur les « greens », les plus grossiers sur les parcours de liaison.

Depuis sa création, cette installation a bien sûr été rénovée. Mais le même principe de production conjointe d'électricité et de fertilisants ainsi que les sècheurs rotatifs ont été conservés.

En Allemagne, dans le complexe carbochimique de Schartzpump, les boues de stations d'épuration préalablement déshydratées et séchées sont mélangées avec des bois usagés, riches en micropolluants organiques, bois de démolition de charpente ou vieilles traverses de chemin de fer.

Ce combustible alimentaire d'énormes réacteurs sous pression, les gazéificateurs. Dans ces réacteurs sous pression et à forte température va se

produire une première réaction de pyrolyse qui est une transformation du carbone organique en carbone minéral. Puis une réaction de gazéification du carbone minéral en un mélange de gaz, méthane, monoxyde de carbone, hydrogène essentiellement.

Les gaz produits sont ensuite séparés. Le monoxyde de carbone alimente la chaudière d'une centrale d'électricité. Le méthane, préalablement purifié, alimente quant à lui une unité de synthèse de méthanol.

Ce produit de base de la chimie fine est utilisé dans l'industrie agroalimentaire et également comme combustible pour certains moteurs de voitures spécialement développés.

En volume, cette installation traite annuellement 400 000 tonnes de déchets et produit 140 000 tonnes de méthanol.

Ce dernier exemple montre comment, partant d'un déchet, on peut obtenir une énergie noble et stockable.

Demain, les boues de stations d'épuration et le bois constitueront certainement une source d'énergie renouvelable. Enfin, parce qu'elles peuvent aussi fournir des phosphates, les boues d'épuration sont une ressource qu'il faut continuer à valoriser sans crainte. □

L'Histoire des sciences

comme on ne vous l'avait jamais racontée.

Abonnez-vous
aux CAHIERS DE SCIENCE & VIE.

149^F
seulement



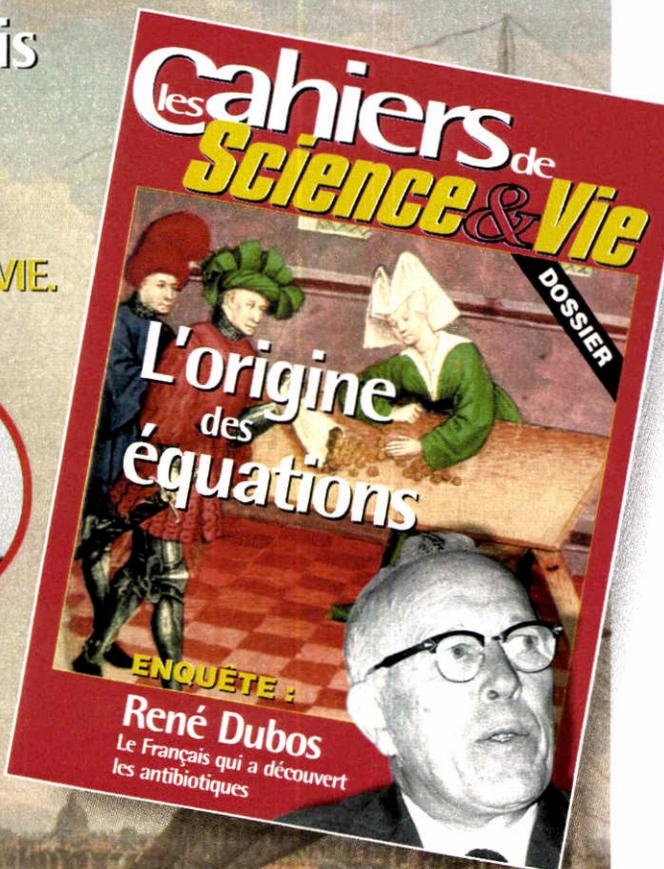
Vinci



Einstein



Pasteur



Bulletin d'Abonnement

à compléter et à retourner avec votre règlement
21 copies des CAHIERS DE SCIENCE & VIE sans enveloppe affranchie à
Service Abonnements - 1, rue du Colonel Perrin, Av. 75019 Paris cedex 19

OUI je profite de votre offre exceptionnelle et je m'abonne
un an aux Cahiers de Science & Vie (soit 6 numéros)
pour **149 francs seulement** au lieu de 192 francs*.

Nom _____

Prénom _____

Adresse _____

Code postal _____ Ville _____

Je choisis de régler par :

chèque bancaire ou postal à l'ordre des CAHIERS DE SCIENCE & VIE

carte bancaire

N° _____

expire à fin _____ mois _____ année

Date et signature obligatoires

Je recevrai en cadeau la lampe-coffret**



Lampe en aluminium
avec sangle d'attache,
dans un coffret de
protection noir livrée
avec deux piles
(diam. 13 cm de longueur)

Offre valable jusqu'à fin 2000 pour un premier abonnement livré en France métropolitaine.
Vous pouvez aussi vous abonner par téléphone au 01 46 48 47 17.
par Internet : <http://www.abomag.com>

[*] Prix de vente normal chez votre marchand de journaux.

**Prévoir un délai de réception de 4 à 6 semaines et dans la limite des stocks disponibles.

En application de l'article L. 27 de la loi du 6-01-1978, les informations ci-dessus sont indispensables au traitement de votre commande et sont exclusivement communiquées au destinataire la traitant. Elles peuvent donner lieu à l'exercice de droits d'accès et de rectification auprès d'Excelsior. Vous pouvez vous opposer à ce que vos nom et adresse soient communiqués ultérieurement.

SV HS 211

Sous Paris, un vaste réseau

Il y a cent cinquante ans, le baron Haussmann et son ingénieur Belgrand dessinaient le premier réseau d'eau à grande échelle de Paris. Aujourd'hui, bien que modernisé en de nombreuses portions, ce réseau fait l'objet d'un contrôle minutieux, afin de parer à toute fuite et à tout colmatage. Etant donné le renchérissement qui frappe le prix de l'eau depuis une dizaine d'années ⁽¹⁾, il serait fâcheux d'envoyer les 300 millions de tonnes d'eau potable que la Sagep distribue chaque année aux Parisiens dans un réseau bouché ou percé de toute part. Ce réseau affiche aujourd'hui un rendement de 90,6 %, contre 80,4 % en 1987 et 60 % en 1960. C'est-à-dire que sur 100 litres injectés dans le réseau, moins de 10 sont perdus avant d'arriver au robinet des Parisiens. Par comparaison, les 600 000 km de canalisations d'eau potable françaises, posées pour la plupart après 1945, perdent en moyenne un milliard de mètres cubes sur les cinq qui y sont effectivement injectés, avec un rendement moyen de 70 à 75 % en milieu rural et de 80 à 85 % en ville.

Traquer les fuites, maintenir le réseau, tout cela demande une organisation et une technique extrêmement rodées. A la Sagep, tout se passe sous gestion technique centralisée (GTC). Depuis trois ans, 24 heures sur 24, un centre de contrôle et de commande, dont l'emplacement est gardé secret, gère quelque 12 000 informations par seconde portant sur les mesures, les contrôles et les défauts repérés dans le réseau d'adduction mais aussi dans les usines de potabilisation et de relevage. C'est là qu'aboutissent, par exemple, les résultats des mesures effectuées en continu par les analyseurs de chlore (ChloroScan) répartis dans tout

1800 km de conduites où circulent chaque année 300 millions de tonnes d'eau potable : ces grandeurs suffisent à saisir les capacités du réseau parisien. Et aussi la difficulté qu'il y a à le maintenir étanche.

PAR JÉRÔME LABEYRE

le réseau. A échelle régionale, le Syndicat des eaux d'Ile-de-France (Sedif) dispose lui aussi d'un poste de commande centralisé (baptisé Centre de mouvement des eaux), basé à La Défense. Il y dirige des automates *in situ* reliés à un calculateur programmé pour réguler au mieux les transferts d'eau entre portions du réseau sur tout son maillage (8630 km), au besoin en télécommandant les vannes principales. En aval, la plombémie des eaux est particulièrement surveillée, *a fortiori* dans les sections les plus anciennes constituées de conduits en plomb, car ce métal toxique est susceptible de migrer dans l'eau qui y circule. La directive européenne du 3 novembre 1998 a d'ailleurs abaissé les teneurs maximales en plomb dans l'eau potable : 25 µg/l en 2003 puis 10 µg/l en 2013, contre 50 µg/l aujourd'hui. Une sévèrisation lourde de conséquences financières, puisque le ministère de l'Environnement estime à 40 milliards de francs le montant des travaux à engager sur quinze ans dans les réseaux de canalisations françaises pour remplacer les tuyaux en plomb.

TÉLÉSURVEILLANCE DES FLUX

Outre les mesures de qualité, le centre de contrôle et de commande est aussi une chambre de télésurveillance des flux, car il est indispensable de savoir quel volume d'eau s'écoule à quel endroit et à quelle vitesse. C'est là qu'intervient la débitmétrie. Connectés au centre, les débitmètres permettent de connaître à la fois « l'état du

1 - 14,913 francs TTC/m³ à Paris au 1er janvier 2000, dont 5,113 F pour le poste production & distribution, 4,931 F pour le poste collecte & épuration, et 4,869 F de taxes & redevances (source Sagep).



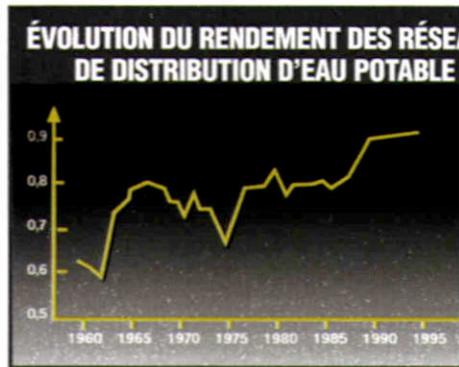
Sous les voûtes de Montsouris

1,2 million de
mètres cubes
distribués en cinq
réservoirs (ici celui
de Montsouris) : tel
est le stock d'eau
potable disponible
à tout moment
pour les Parisiens.

trafic », mais aussi les éventuels « accidents de parcours ». En effet, la différence de flux entre une coupe X et une coupe Y d'une conduite de diamètre donné renseigne sur l'état de cette conduite et indique une présence éventuelle de fuites. « *Ce qui nous alerte avant tout, c'est une chute de pression. Mais quand le problème est trop localisé pour avoir de tels effets, nous nous en remettons aux débitmètres postés dans les sous-réseaux et comparons leurs relevés avec les appareils du quartier voisin pour voir si la variation se répercute plus loin* », explique Bruno Nguyen, ingénieur d'exploitation à la Sagep. Ce système présente une exception : la nuit, lorsque la consommation est faible, le centre se contente de comparer les volumes distribués avec une moyenne statistique.

La débitmétrie d'aujourd'hui s'affranchit du contact avec l'ouvrage et d'un sectionnement toujours délicat à effectuer. Les gros diamètres du réseau amont privilégient les débitmètres à ultrasons. Leur fonctionnement est basé sur l'effet Doppler ou sur la mesure du temps de transit : le temps que met une onde ultrasonore à effectuer

un aller-et-retour en deux points diamétralement opposés sur une coupe de la canalisation est proportionnel à la vitesse d'écoulement du fluide. L'indice est obtenu en rapportant cette vitesse à la vitesse de l'onde dans le milieu. La mesure Doppler, elle, consiste à mesurer la fréquence de l'onde à l'émission et celle de l'onde réfléchi après rencontre des particules présentes dans l'eau. L'autre famille de débitmètres est celle des appareils électromagnétiques. Ils mesurent le champ magnétique créé autour de l'écoulement qui induit une force électromotrice



proportionnelle à la vitesse de l'écoulement. Reste une troisième gamme de diamètres : la mesure par ultrasons. Mis en œuvre sur le réseau amont, constitué de gros diamètres, consiste à intercaler un élément dit « déprimogène » (ventouse) ou « phragme » sur le trajet de l'eau, ce qui perturbe la géométrie du canal, donc modifie le niveau et, lorsqu'il se resserre le tuyau, l'aide d'un diaphragme, crée une perturbation différentielle de pression de part et d'autre de cet élément.

J.P. DUPLAN - LIGHT MOTIV

20 % de gains en 25 ans

(dans un rapport égal au carré de la vitesse)



E. CAFFARD

Sous la rue de l'Université

Sous Paris, 2 300 km d'égouts viennent diriger les eaux usées de la capitale vers des grands émissaires au bout desquels se trouvent quatre grandes stations d'épuration. Construit sous le Second Empire, le réseau intra-muros est inspecté deux fois par an.

sans passer par une mesure sur le fluide, la Sagep dispose du système MAC (Mécanique d'auscultation des conduits). « Il s'agit d'envoyer dans les ouvrages de section comprise entre 800 et 3 500 mm de gros vérins qui appliquent des forces pouvant atteindre 20 tonnes sur les parois des conduits, en les ovalisant. Des capteurs de déplacement, appelés ovamodulomètres, mesurent ensuite les déformations induites, du millimètre au micron, et la réaction du sol (fonction du taux de compactage, la force appliquée lors de l'opération de remblaiement de la conduite dans le sol). Cela permet de localiser les points faibles », décrit Bruno Nguyen. Lorsque l'une ou l'autre de ces techniques mettent en évidence une cassure, il faut programmer une intervention. Le centre de GTC télécommande alors les vannes papillons de la section concernée afin de réguler flux et pression, d'éviter l'engorgement, et de libérer la conduite défectueuse pour permettre aux fontainiers, aidés de micro-tunneliers pilotés par ordinateur, de travailler. Au total, la Sagep affirme investir 300 millions de

francs par an pour moderniser le dispositif d'approvisionnement de Paris en eau potable.

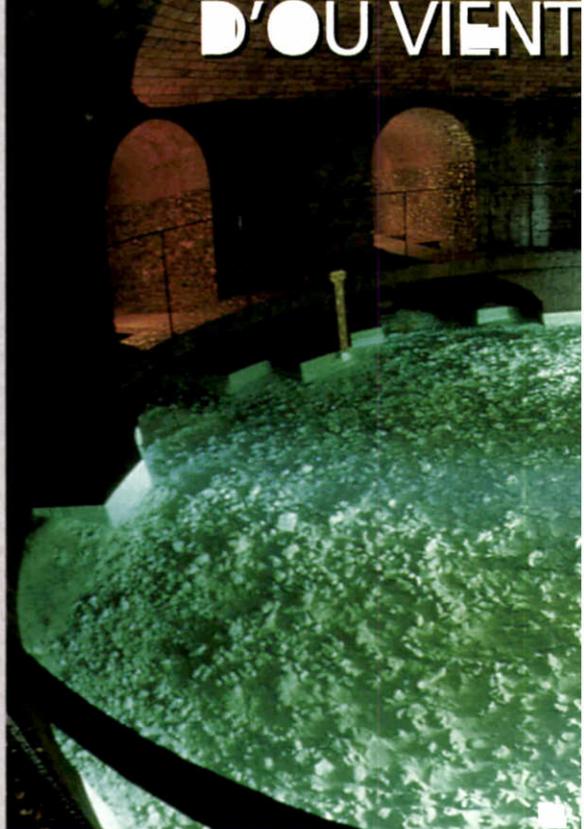
SCORE AUX COMMANDES

Cette structure en « poste d'aiguillage » est identique pour les réseaux d'assainissement. Afin de veiller à la bonne répartition des eaux usées entre les émissaires dès leur sortie de Paris, le Siaap exploite depuis 1978 un système de télégestion centralisée baptisé Score (Système de contrôle, d'organisation et de régulation pour l'exploitation des émissaires), basé à Clichy. Il offre une véritable vue d'ensemble sur 73 km de conduites de 2,5 à 4 m de diamètre enfouies de 10 à 100 m sous terre. Il permet de réguler l'arrivée des effluents par télécommande des vannes, et d'écarter les débits de pointe afin d'éviter de surcharger un émissaire puis une station. Score dispose d'informations pluviométriques en temps réel, afin de parer à toute arrivée massive d'eaux pluviales dans le réseau. Car par temps de pluie, le réseau peut saturer. « En assainissement, les effluents sont difficiles à réguler car les flux varient énormément selon qu'il pleut ou non. Face à cet aléa, notre système de supervision est bâti autour du souci d'éviter la saturation, et intègre en cela des commandes de déversement direct en Seine », confirme Olivier Jacque, chef de la section d'assainissement de Paris. Qui plus est, les effluents collectés par temps

pluvieux sont très pollués car, avant de prendre le chemin des égouts, l'eau de pluie ruisselle sur le bitume, emportant avec elle dépôts d'hydrocarbures, matières organiques et déchets en tout genre. C'est ainsi qu'on retrouve parfois la Seine couverte de poissons le ventre en l'air, l'eau en excès empruntant un *by-pass* sans être traitée. Mais, à l'avenir, ces rejets bruts se produiront de moins en moins. Dans la toute nouvelle station d'épuration de Colombes, les ouvrages sont dimensionnés pour pouvoir réceptionner 2,8 m³/s par temps sec mais aussi 8,5 m³/s par temps de pluie et 12 m³/s en cas d'orage. Celle d'Achères accueillera bientôt un bassin de stockage supplémentaire de 1,6 million de mètres cubes dédié aux eaux pluviales.

500 TONNES DE DÉCHETS PAR AN

Un réseau d'assainissement qui ne fuit ni ne se bouche est rare, tant les eaux usées qui y circulent recèlent de pollutions diverses. En 1997, par exemple, le curage des grands émissaires du Siaap a permis de retirer 8000 mètres cubes de sables. Ce curage se fait principalement au moyen d'une grosse boule de bois de 1 à 3,60 m de diamètre, qui progresse dans la conduite à la manière d'un chasse-neige. Chaque année, 500 tonnes de déchets, soit 600 m³, sont ainsi extraites. En outre, afin de limiter les problèmes en aval, le Siaap a recours à des ouvrages de prétraitement (dégrilleurs, desableurs) installés en tête des grands émissaires. L'inspection de l'état des maçonneries et du niveau d'ensablement s'effectue par bateau télécommandé équipé d'une caméra vidéo lorsque les conduits sont en service ou que leur diamètre ne laisse pas passer un homme, ou lors d'une visite à l'occasion de la mise en chômage d'une section. A Paris, quelque 2300 km d'égouts sont ainsi visités deux fois par an. « Comme les volumes arrivant dans le réseau varient d'une heure à l'autre, on ne dispose pas de données précises et régulières qui puissent laisser l'instrumentation diagnostiquer les conduits à la place de l'homme. D'autant qu'à l'exception de 60 km de canalisations fermées, l'écoulement se fait dans des galeries et non des tuyaux pleins, ce qui exclut tout recours à un débitmètre », explique Olivier Jacque. « En assainissement, je doute que deux appareils placés l'un derrière l'autre puissent offrir un diagnostic fiable, car d'une part nous ne sommes pas sous pression, et d'autre part, les fuites s'effectuent le plus souvent de l'extérieur vers l'intérieur, par arrivée d'eaux dites parasites », renchérit Michel Gousailles, directeur R & D au Siaap. ➔



■ De l'adduction à l'évacuation, la description qualitative et quantitative des réseaux parisiens

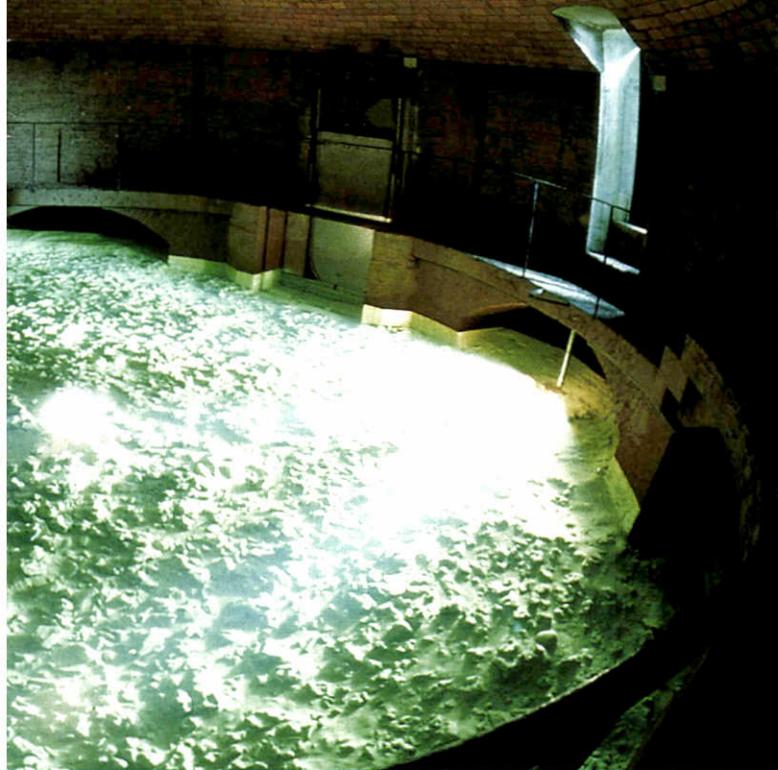
PAR JÉRÔME LABEYRE



JUSQU'AUX CONFINS DE L'ILE-DE-FRANCE

Situées dans un rayon de 80 à 150 km, 48 sources (photo du haut : source de la Vanne dans l'Aube) alimentent le réseau parisien. S'y ajoutent les eaux produites par les usines d'Orly, Ivry et Joinville, après pompage dans la Seine et la Marne.

L'EAU DES PARISIENS ?



E. GAFFARD

Au commencement il y a la Seine. Mais pas seulement. En effet, si une partie de l'eau des Parisiens vient du fleuve qui traverse la capitale, il faut aussi compter avec la Marne, son affluent. L'eau prélevée dans les deux cours d'eau est acheminée vers les usines de potabilisation d'Ivry-sur-Seine, Orly et Joinville. Chacune d'elles traite en moyenne 100 000 mètres cubes par jour, une capacité extensible à 300 000 m³/j. Ces stations sont toutes reliées entre elles pour sécuriser l'approvisionnement, au cas où une pollution accidentelle sur l'une des rivières viendrait paralyser momentanément une usine. A elles deux, la Seine et la Marne couvrent la moitié des besoins quotidiens des Parisiens en eau. L'autre moitié des volumes provient de nappes souterraines, captées en

63 endroits dans un rayon de 80 à 150 km autour de la capitale, au sud-est vers Provins, Sens et Fontainebleau, et à l'ouest, vers Dreux. L'eau est acheminée gravitairement vers Paris *via* 600 km d'aqueducs. Eau de nappe et eau de rivière sont ensuite chlorées et stockées aux portes de la capitale, dans cinq réservoirs d'une capacité cumulée de 1,2 million de mètres cubes (Ménilmontant, Montsouris, Saint-Cloud, etc). Le tout sous l'égide de la Sagep, une société d'économie mixte détenue à 70 % par la Ville de Paris. Sachant que la consommation journalière d'eau potable des 4 millions de Parisiens (résidant ou travaillant dans Paris) est d'environ 750 000 mètres cubes, il y a largement de quoi satisfaire les besoins.

L'eau emprunte ensuite quelque 1 800 km de conduites

avant d'arriver au robinet des logements parisiens. Suivant les quartiers, ce réseau est géré tantôt par Générale des eaux (pour la rive droite), tantôt par Suez-Lyonnaise des eaux (pour la rive gauche). Ces deux sociétés, *via* leur filiale respective Compagnie des Eaux de Paris et Eau-Force Parisienne des eaux, y assurent le transport, la mise sous pression et le contrôle de qualité, rachetant l'eau à la Sagep qui la facture au volume, suivant ce qu'enregistrent quelque 36 débitmètres postés aux portes de Paris. La capitale dispose également d'un réseau d'eau non potable séparé, réservé à des usages municipaux comme la propreté des rues, l'arrosage des jardins publics (400 000 m³/j).

Une fois utilisée, l'eau emprunte un second circuit, celui des égouts, long de 2 300 km sous Paris, qu'elle partage avec les eaux de pluie. Mais pas question de laisser ces égouts se déverser directement dans le milieu naturel. Les réglementations européenne (1991) et nationale (1992) l'obligent, les effluents urbains doivent être épurés. Et pour gérer cette opération complexe et coûteuse, c'est le Siaap qui prend le relais de la Sagep et des distributeurs privés. Ainsi, de collecteur en émissaire en passant par les postes de relevage, les eaux usées de Paris se mêlent à celles des communes voisines et prennent le chemin, long de 73 km, de quatre grandes stations d'épuration, principalement « Seine Aval » à Achères. Au total, ces usines traitent en moyenne 2,7 millions de mètres cubes d'eaux usées par jour (900 Mm³/an, soit 85 % du gisement), avant de les rejeter, presque propres, dans les cours d'eau dont elles portent le nom.

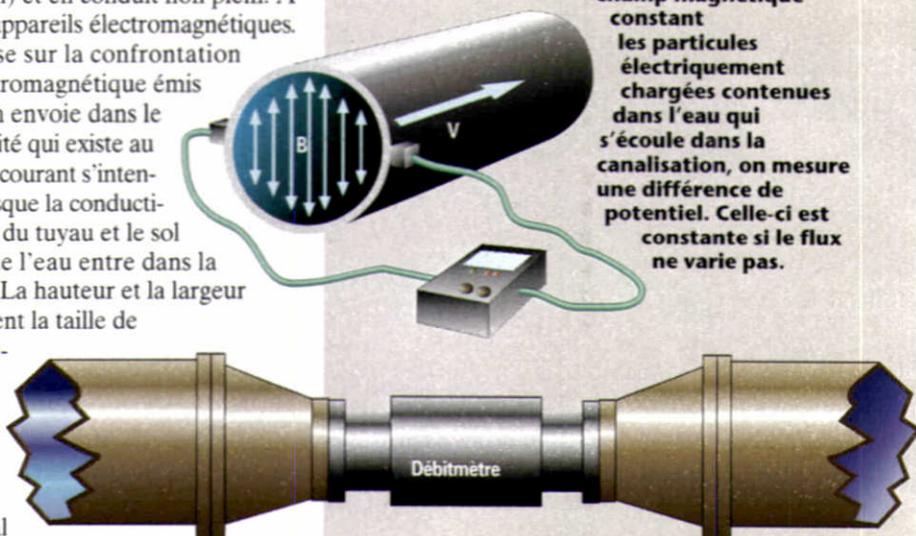
➔ Pourtant, des appareils de contrôle d'étanchéité et de fluidité ont été mis au point pour les réseaux d'eaux usées, y compris en gravitaire (sans pression) et en conduit non plein. A commencer par les appareils électromagnétiques. Leur principe repose sur la confrontation entre le champ électromagnétique émis par une sonde qu'on envoie dans le tuyau et la conductivité qui existe au niveau de la fuite : le courant s'intensifie à ce niveau, puisque la conductivité entre l'intérieur du tuyau et le sol augmente lorsque de l'eau entre dans la conduite ou en sort. La hauteur et la largeur de l'impulsion donnent la taille de la fuite. Sondes électro-acoustiques et corrélateurs existent aussi en assainissement. Les premières consistent à transformer en signal électrique les vibrations mécaniques induites par la fuite dans le sol au niveau d'une vanne. La corrélation acoustique, elle, consiste à installer deux capteurs de part et d'autre de la canalisation incriminée, sachant que la présence d'une cassure modifie le son du flux. Le bruit se propage dans la conduite, atteignant chaque capteur à des temps différents. Isolé des bruits de fond, il est alors transformé en signal électrique et retransmis par radio au central qui mesure la différence de temps de transit et calcule la distance entre la fuite et un point test.

Dans le réseau d'assainissement parisien, réguler les flux et contrôler les conduites est d'autant plus important que le Siaap s'est fixé un objectif « zéro rejet » d'eaux brutes. Dans le schéma directeur d'assainissement de l'agglomération parisienne adopté fin 1991, il est spécifié qu'à l'horizon 2015, les eaux usées réceptionnées par temps sec devront être épurées en totalité, que ce soit pour les pollutions phosphorées, carbonées ou azotées (2). Deux nouvelles stations d'épuration (Les Grésillons et La Morée) viendront épauler les unités actuelles, soulageant celle d'Achères de 300 000 m³/j. L'objectif est de limiter les rejets directs d'effluents non traités, voire non collectés, dans la Seine, et le recours à l'épandage, susceptible de contaminer les 1984 hectares de terrains réquisitionnés pour l'occasion. ➔

2 - En 1995, le taux moyen d'épuration des eaux usées des stations d'épuration françaises était de 72 % (source Ifen).

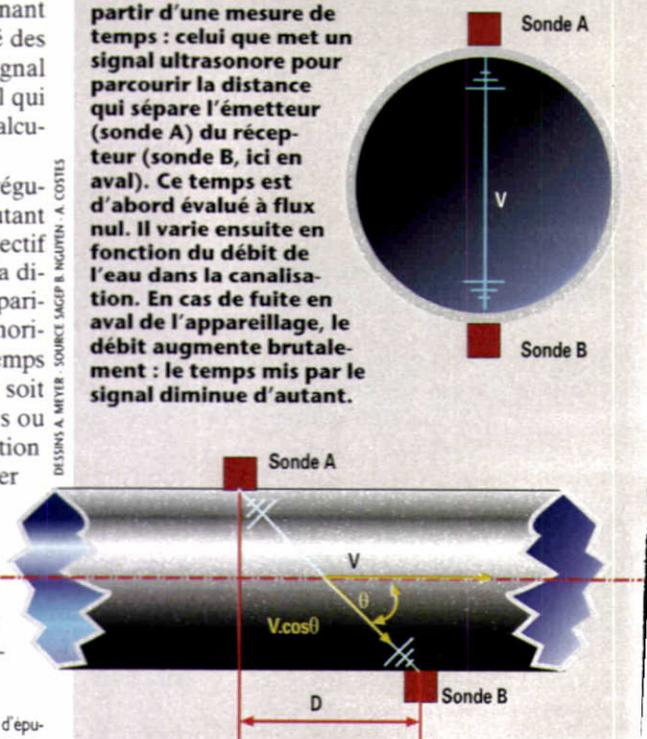
DÉBITMÈTRE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

En soumettant à un champ magnétique constant les particules électriquement chargées contenues dans l'eau qui s'écoule dans la canalisation, on mesure une différence de potentiel. Celle-ci est constante si le flux ne varie pas.



DÉBITMÈTRE À ULTRASONS

Ce type d'appareillage permet d'évaluer le débit dans une canalisation à partir d'une mesure de temps : celui que met un signal ultrasonore pour parcourir la distance qui sépare l'émetteur (sonde A) du récepteur (sonde B, ici en aval). Ce temps est d'abord évalué à flux nul. Il varie ensuite en fonction du débit de l'eau dans la canalisation. En cas de fuite en aval de l'appareillage, le débit augmente brutalement : le temps mis par le signal diminue d'autant.



NOUVELLE FORMULE

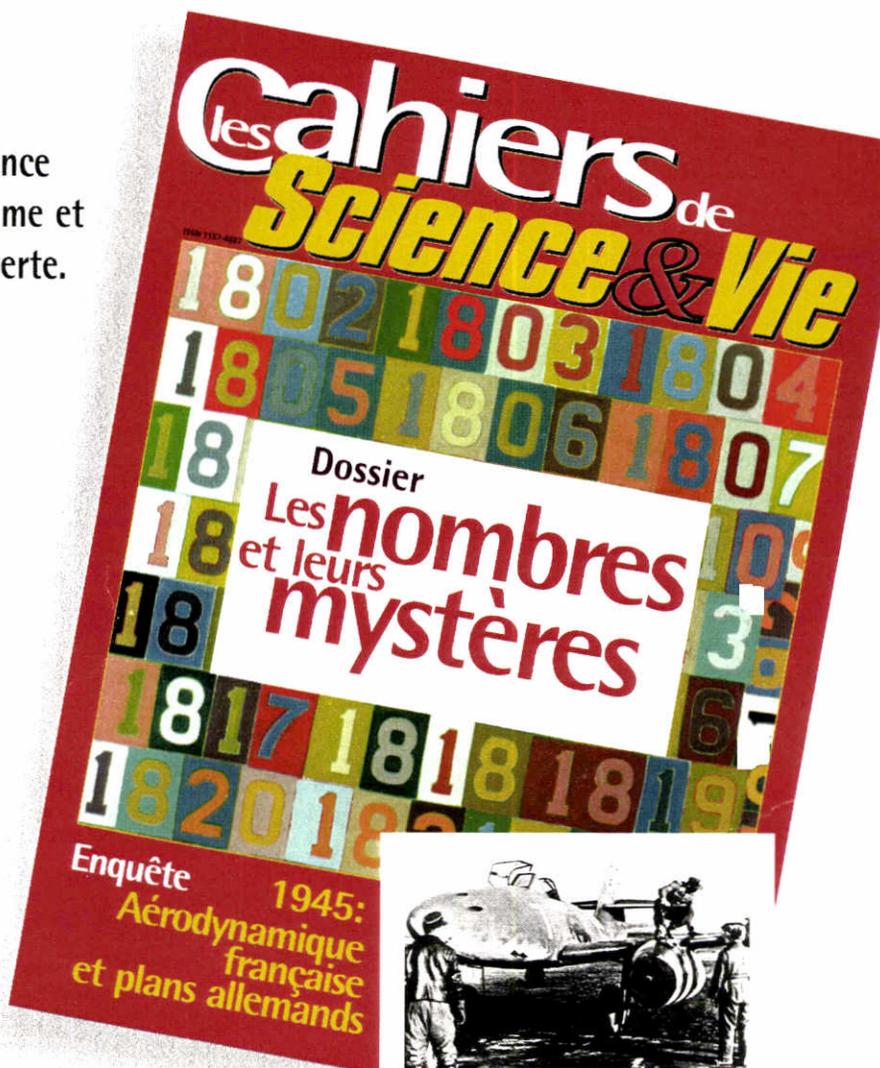
les Cahiers de *Science & Vie*

Pour comprendre
les sciences d'aujourd'hui : l'Histoire

La passion intense
des hommes, l'intelligence
des instruments, le drame et
la beauté de la découverte.

Sous l'actu, le passé.

Les Cahiers
de Science & Vie,
Le magazine de
l'Histoire des Sciences
et des Techniques.



EN VENTE DÈS LE 15 JUIN CHEZ TOUS LES MARCHANDS DE JOURNAUX

Les métiers de l'eau

Avec près de 100 000 emplois directs recensés en 1995, l'alimentation en eau potable et la gestion des eaux usées offrent un éventail de carrières des plus diversifiés.

Créneau le plus porteur : les eaux usées. Ce secteur, en raison du développement des stations d'épuration modernes, est à l'heure actuelle le plus dynamique. Et de toute évidence, il le restera. Car la directive communautaire sur les eaux urbaines résiduaires, qui va rendre obligatoire la collecte et le traitement des eaux usées domestiques sur l'ensemble du territoire d'ici à 2005, devrait entraîner de nouvelles embauches, pour des postes qui tendent à devenir de plus en plus techniques.

Le marché de la production et de la distribution d'eau n'est pas plus à plaindre : son chiffre d'affaires est passé de 17,5 milliards de francs en 1985 à 47,9 milliards en 1995. Dans le même temps, l'effectif total qu'il représente passait de 23 000 à 32 900 personnes. Et dans ce domaine, la France exporte aujourd'hui son savoir-faire, notamment dans les appareils de filtration.

Quels sont les métiers concernés par ces activités ? La liste des carrières possibles est longue. Surtout si on la prolonge, en amont, à l'eau qui nous tombe du ciel et dont les météorologues nous annoncent les précipitations. Ou plus en aval sur les côtes maritimes où, dans certains pays, les

« dessaleurs de mer » alimentent des populations en eau potable à partir d'eau de mer. De même, on pourrait citer les chercheurs chimistes et biologistes qui améliorent les procédés de traitement de l'eau ou des canalisations, l'informaticien qui optimise les systèmes d'automatisation, de télégestion ou de métrologie, ou le futur « aquaticien

» qui viendra dans nos maisons, à partir de 2003, mesurer la qualité de l'eau du robinet et vérifier les réseaux intérieurs pour détecter la présence de tuyaux en plomb.

A mesure que la réglementation (et donc la progression des dépenses relatives à l'eau) évolue, ces métiers de l'eau s'infiltreront dans tous les secteurs d'activité : informatique, génie électrique, chimie, pharmacie, mais aussi droit et économie. Ainsi, les embauches progressent depuis 1999 dans

les secteurs du matériel de précision et de l'industrie pharmaceutique, où même si leur nom n'apparaît pas explicitement, les professionnels de l'eau sont présents.

Les compétences requises par ces différents métiers sont en pleine évolution. La tendance est à la pluridisciplinarité, mais également à la baisse des qualifications. En effet, les offres d'emplois, qui concernaient au départ du personnel hautement qualifié (bac + 5 et plus), s'adressent plutôt, depuis quelques années, à des niveaux de qualification intermédiaires, qui vont du bac à bac + 4

Hydrobiologiste, gard-rivière « aquaticien »... Autant de carrières possibles dans un secteur en pleine effervescence. Des métiers de plus en plus techniques, associant des compétences multiples. Avec, pour les postes les plus élevés, une même exigence : accepter de travailler à l'étranger.

PAR MURIELLE VIGNEAU-HERMELLIN



Un avenir plus clair

Avec le développement des stations d'épuration modernes, le secteur des eaux usées ouvre un large éventail de métiers spécialisés. (Station d'épuration des eaux O.T.V. Système...)

(c'est-à-dire technicien et assistant ingénieur). En 1997, une étude de l'ANPE montrait que 60 % des offres d'emploi dans le domaine de l'environnement concernaient des « agents de traitements dépolluants », un niveau de qualification qui n'intéressait que 22 % des demandeurs d'emploi. Inversement, les profils de « cadres techniques », de qualification plus élevée, représentaient 34 % des demandes, mais seulement 12 % des emplois offerts.

« Les métiers de l'eau deviennent de plus en plus techniques et spécialisés, explique Jean-Luc Salle, directeur régional de la Générale des Eaux Loire-Poitou. D'une part parce que l'environnement se dégrade, et d'autre part, parce que la réglementation en matière de qualité de l'eau se durcit tant au niveau national qu'euro-péen. Pour s'adapter à ces exigences, on manque d'électromécaniciens, d'automaticiens et de télégestionnaires de niveau BTS, DUT, ou bac professionnel. »

Si les techniques utilisées pour traiter et assainir l'eau potable se complexifient, le problème majeur depuis quelques années reste le même : éliminer les sous-produits que rejettent les stations d'épuration, en particulier les boues. En effet, dès 2002, ces boues ne pourront plus être mises en décharge. Et les agriculteurs manifestent leur inquiétude vis-à-vis de la qualité des rejets que l'on épand sur leurs sols. Les nitrates et les phosphates contenus dans les boues fertilisent leurs champs, mais les métaux lourds sont indésirables. « Il faut donc intervenir le plus en amont possible, en contrôlant la qualité des eaux rejetées par les industriels », insiste Jean-Luc Salle, car il existe une forte interaction entre le contrôle de la collecte des eaux usées et la qualité de la boue récupérée. »

Ce contrôle (pH de l'eau, température, polluants, etc.), ce sont les ingénieurs des services techniques qui en définissent les modalités. Ils éta-

Aux commandes

Parmi les professionnels concernés par les métiers de l'eau, on trouve des informaticiens chargés, par exemple, d'optimiser les systèmes de télégestion. (Station d'épuration des eaux d'égouts. Salle de contrôle.)

blissent avec les industriels des conventions sur la qualité des eaux rejetées, les conseillent sur les techniques les mieux adaptées au traitement de leurs effluents et optimisent les installations.

Quant aux métiers destinés à assurer le suivi de cette qualité, ils n'existent pas encore. Mais ils devraient rapidement se développer. Les profils recherchés seront alors des techniciens de type BTS ou DUT.

Qui les embauchera ? Parmi les employeurs potentiels, on peut en distinguer quatre : l'Etat, les collectivités territoriales, les entreprises et les associations.

Les collectivités locales offrent environ la moitié des offres d'emploi proposées par le secteur public dans le domaine de l'eau, les plus gros demandeurs étant les communes et structures communales, qui ont une responsabilité directe très importante en matière de lutte contre la pollution, la distribution et l'assainissement de l'eau. Parmi les autres employeurs « publics », on peut citer le Conseil supérieur de la pêche, les Agences de l'eau et les comités de bassin, les différentes directions départementales et régionales com-

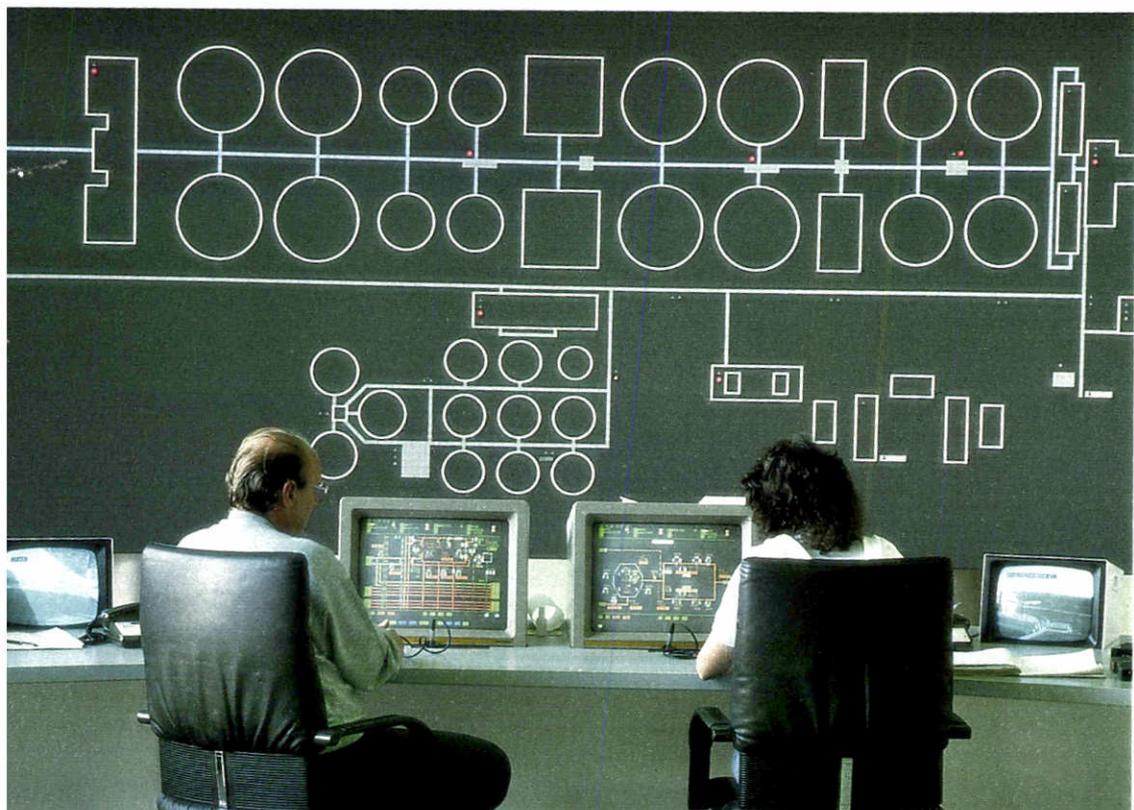
me celles des affaires sanitaires et sociales (DDASS), de l'équipement (DDE), de l'environnement (DIREN), de l'industrie et de l'environnement (DRIRE) ou de l'agriculture et des forêts (DAF). Dans le secteur privé, on retrouve les grands groupes tels que la Générale des Eaux (groupe Vivendi), La Lyonnaise des Eaux, la Saur et la CISE.

PROFESSION : GARDE-RIVIÈRE

Chargé d'appliquer, sur le terrain, les politiques de gestion des rivières, le garde-rivière joue un rôle important de prévention. Il surveille les cours d'eau, c'est-à-dire aussi bien la qualité de l'eau que l'état du lit et des berges. Il effectue des travaux d'entretien (débroussaillage, plantation d'arbres...) et d'aménagement. Il informe les riverains, le personnel communal, les élus, etc. Exigences : savoir nager (c'est impératif), connaître la flore qui pousse au bord des rivières ainsi que la législation sur l'eau et la pêche, et posséder des bases en hydrodynamique, hydrobiologie et chimie de l'eau.

Formation : CAPA et BEPA « aménagement et gestion de l'espace rural - spécialité rivières et milieux humides » ou bac technique sont les formations initiales les plus appréciées.

Renseignements : Maison nationale de l'eau et de la pêche.



M. STOCK - SPL - COSMOS

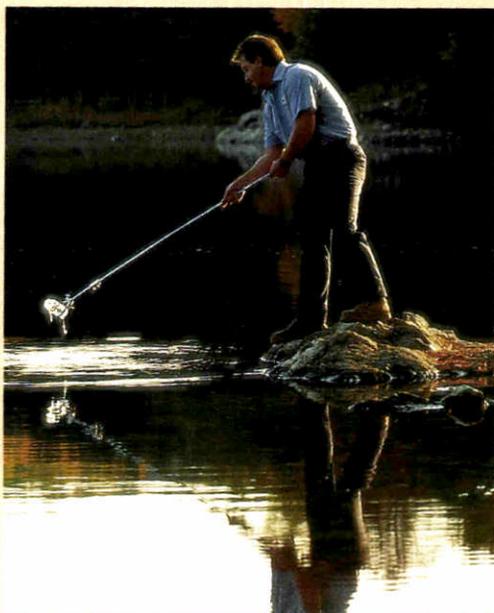
PROFESSION : HYDROBIOLOGISTE

L'hydrobiologiste analyse l'état biologique des milieux aquatiques. Il propose des objectifs pour améliorer cet état, ainsi que les mesures pour les atteindre. Ce métier peut s'exercer dans des organismes de recherche, des collectivités, des établissements publics, des bureaux d'études ou des structures associatives. Exigences : amené à défendre ses projets auprès des élus locaux, l'hydrobiologiste se déplace beaucoup et doit faire preuve d'une grande rigueur scientifique, ainsi que de fer-

meté et de diplomatie.

Formation : Ecole d'ingénieurs du type INA (Institut national agronomique), ENSA (Ecole nationale supérieure agronomique), ISIM (Institut des sciences pour l'ingénieur de Montpellier), ou diplômes universitaires tels que maîtrise (biologie des organismes et des populations), MST, DEA ou DESS.

Renseignements : Conseil supérieur de la pêche, Institut national de la recherche agronomique (Inra), Union des océanographes de France, CNRS...



R. DUCHAINE - THE STOCK MARKET

PROFESSION : CANALISATEUR

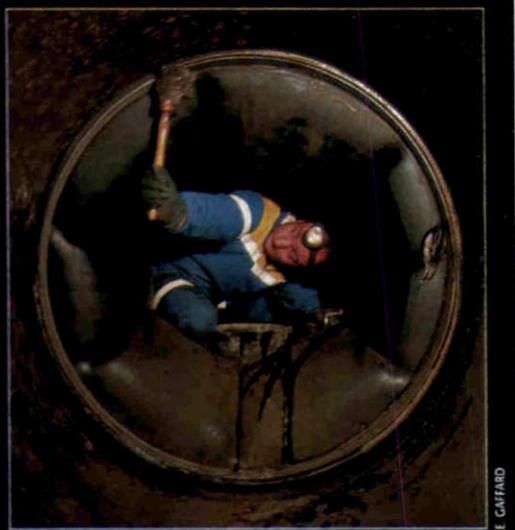
Il réalise les réseaux d'adduction d'eau potable, d'eaux usées domestiques et industrielles ainsi que d'eaux pluviales.

Exigences : amenés à se déplacer d'un site à l'autre les canaliseurs peuvent parfois avoir des activités nocturnes ou pendant les week-end.

Formation : ce métier est accessible après une première expé-

rience en travaux publics, mais un CAP « construction en canalisation » ou un BEP « travaux publics » facilite le recrutement. Un diplôme de niveau bac professionnel, BTS ou DUT, conduit rapidement aux fonctions de chef de chantier.

Renseignements : Canaliseurs de France, Fédérations régionales de travaux publics.



E. GAFFARD

PROFESSION : ANIMATEUR DE SAGE

La mise en place des SAGE (schémas d'aménagement et de gestion des eaux) étant encore à ses débuts, les animateurs de ces schémas d'aménagement devraient voir rapidement leur nombre se multiplier. Ils coordonnent les activités de la Commission locale de l'eau, chargée d'élaborer et de mettre en œuvre le SAGE d'une partie ou de la totalité d'un bassin hydrographique. Ils assurent l'appui administratif et technique des activités de la commission locale de l'eau, mettent en place des actions de communication, préparent et suivent les études. Exigences : la mobili-

té sur l'ensemble du bassin versant est nécessaire pour pouvoir rencontrer élus, représentants des administrations ou usagers.

Formation : ce métier nécessite généralement un diplôme de niveau bac + 4 ou bac + 5 (maîtrise, DESS, diplôme d'ingénieur,...) dans des domaines, comme la gestion de l'environnement, la gestion de l'eau, l'hydrogéologie, l'écologie des milieux aquatiques etc. La formation demandée lors du recrutement dépend du bassin hydrographique et des enjeux qui s'y rapportent (hydrogéologie, limnologie etc).

Renseignements : Agences de l'eau.

Les métiers proposés évoluent très vite. Et nécessitent par conséquent des efforts importants de formation initiale et continue. En France, de très nombreux lycées, écoles d'ingénieurs et universités préparent les étudiants aux différents métiers de l'eau. Et il existe au sein de la plupart des grands groupes de gestion et de distribution d'eau, des centres de formation interne pour les salariés. Des centres qui viennent compléter leur formation initiale.

« Si les techniciens recrutés présentent d'excellentes compétences techniques, constate Jean-Luc Salle, ils n'ont pas, pour la plupart de compétences de management. Or ils sont souvent amenés à diriger de petites équipes de 5 à 8 personnes. C'est justement au cours de formations internes que ce personnel apprend à manager ».

Des organismes assurent également en externe des formations continues, souvent en partenariat avec les différents groupes. C'est le cas, en particulier, du Conservatoire national des arts et métiers, où la chaire de chimie industrielle et génie des procédés propose, depuis cette année, des cours de gestion et d'exploitation de l'eau (production et distribution d'eau potable, collecte et traitement des eaux usées et, tout récemment, génie des procédés pour l'environnement). L'objectif ? Donner aux techniciens et ingénieurs les connaissances scientifiques et techniques nécessaires pour traiter les eaux de prélèvement, les eaux résiduaires et les boues. De même, la chaire Transport-Environnement propose une formation de techniciens niveau bac + 2 où sont traitées,

entre autres, les notions de périmètre de captage, d'assainissement et de tracé des réseaux.

Citons aussi le Centre national de formation aux métiers de l'eau (CNFME), premier organisme français de formation professionnelle dans le domaine de l'assainissement de l'eau. Géré par l'office international de l'eau (OIEau), le CNFME organise chaque année de nombreux stages qui couvrent l'ensemble des métiers de l'eau. « *La particularité du CNFME, note Jean-François Donzier, directeur de l'OIEau, est de disposer de plates-formes techniques, notamment sur le site de La Souterraine dans la Creuse, qui simule les installations en vraie grandeur. Nous présentons donc des formations en situation réelle de travail.* »

Toutes ces formations ont intégré une exigence devenue incontournable : l'international, très prisé par les recruteurs. Les jeunes diplômés de l'eau doivent s'y préparer, car tous les grands groupes se développent aujourd'hui hors des frontières. Jean-Luc Salle insiste : « *Si jusqu'à récemment, la mobilité s'appliquait surtout à la fonction d'encadrement, aujourd'hui, cette mobilité est aussi exigée de la part du personnel de maîtrise.* »

Une mobilité qui contribue à diffuser ce que Monique Chotard, qui dirige le Centre d'information sur l'eau, définit comme « *une véritable école de l'eau française, aussi bien pour la conception des usines, l'innovation technologique ou le traitement des eaux que dans la gestion de notre réseau hydrographique par bassin.* » □

Pour en savoir plus :

- Le guide de l'eau, 1999-2000, Editions Pierre Johanet et fils.
- Sur internet : www.onisep.fr, rubrique « Atlas des formations », éditée par L'Office national d'information sur les enseignements et les professions, www.eaufrance.tm.fr, site officiel de l'Agence de l'eau, www.cieau.com, site officiel du Centre d'informations sur l'eau.

PROFESSION : HYDROGÉOLOGUE

Spécialistes de la prospection, de l'évaluation des ressources, des projets d'exploitation et de la gestion des eaux souterraines, les hydrogéologues réalisent des études sur la gestion des ressources en eau, sur les risques de pollution et les techniques de dépollution. Ils jouent aussi un rôle de police des eaux, en vérifiant la qualité des forages. Exigences : comme l'hydrobiologiste, l'hydrogéologue doit faire preuve de rigueur scientifique et de fermeté pour faire accepter, par les collectivités locales, l'ouverture de sites d'enfouissement. Formation : ce métier nécessite un troisième cycle (DESS, DEA ou doctorat), après des études universitaires en sciences de la Terre,

ou après une formation d'hydrogéologue technicien. Certaines écoles d'ingénieurs (Ecole nationale supérieure de géologie appliquée et prospection minière à Nancy, Ecole nationale du génie de l'eau et de l'environnement de Strasbourg (EN-GEES), délivrent également des diplômes d'hydrogéologie. Des compétences en informatique et de bonnes bases en physique seront utiles.

Renseignements :

- **Association internationale des hydrogéologues,**
- **Union française des géologues,**
- **Bureau de recherches géologiques et minières.**
- **Association des hydrogéologues du service public.**

PROFESSION : TECHNICIEN DE LABORATOIRE D'ANALYSE

La directive communautaire de 1991 sur les eaux urbaines résiduaires, qui oblige les agglomérations à traiter leurs eaux usées selon un échéancier précis, rend le technicien de laboratoire d'analyse

de plus en plus indispensable. Outre l'analyse et le contrôle de la qualité physique, chimique et biologique de l'eau, ce technicien de laboratoire peut également acquérir la fonction de « goûteur d'eau ».

Exigences : il peut être amené à assurer des astreintes pour des analyses d'urgences, comme en cas de pollution accidentelle. Formations : les formations requises pour ce métier sont de type BTS ou DUT (chimie,

biologie, biochimie, mesures physiques ou métrologie, contrôle qualité).

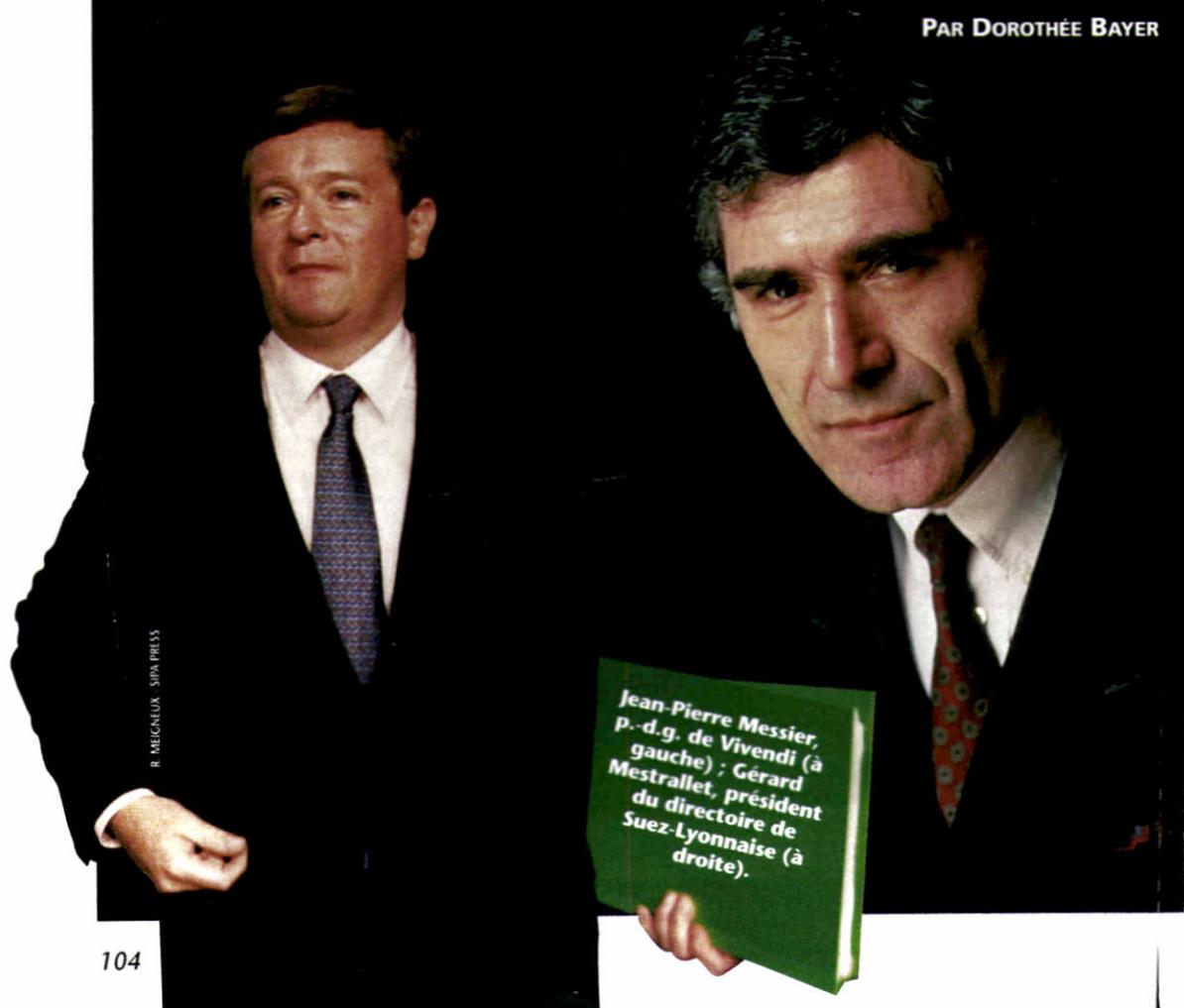
Renseignements :

- **Délégations régionales du centre national de la fonction publique.**

Deux Français captent l'eau du monde

Deux vénérables sociétés hexagonales, Suez-Lyonnaise des eaux et l'ex-Compagnie générale des eaux, aujourd'hui Vivendi, sont leaders sur le marché mondial de l'eau : le pourquoi de cette situation inhabituelle.

PAR DOROTHÉE BAYER



R. MEIGNEUX - SIPA PRESS

Leader mondial de l'eau, voilà un titre que deux sociétés françaises se disputent âprement : Vivendi (ex-Générale des eaux) d'un côté. Suez-Lyonnaise des eaux de l'autre. A l'aune du chiffre d'affaires, la première est pour l'heure gagnante : quelque 70 milliards de francs d'activité pour sa filiale eau, Vivendi Water, contre une quarantaine de milliards pour sa rivale. Cette dernière, toutefois, ne cesse de rappeler sa position dans trois métiers clés : la distribution d'eau des grandes métropoles, le traitement chimique de l'eau et l'ingénierie (construction de stations d'eau potable ou d'assainissement des eaux usées). Enfin la Lyonnaise, précisent ses dirigeants, a remporté 80 % des grands appels d'offres lancés dans le monde pour la distribution d'eau (Buenos Aires, Manille, Djakarta, Casablanca, Santiago du Chili, La Paz, Atlanta, Indianapolis,.) et déclare desservir une centaine de millions de personnes sur la planète. Vivendi revendique le même chiffre, ce que contestent les responsables de la Lyonnaise. Au reste, quoi qu'il en soit de cette querelle, le fait est là : à l'international, les deux groupes français ne sont plus le plus souvent en concurrence qu'entre eux : les autres, européens ou américains, sont loin derrière.

L'affrontement a été particulièrement vif l'an dernier. Pour renforcer leur développement dans leur métier de base, celui de l'eau, les deux groupes ont en effet investi près de 90 milliards de francs (une quarantaine de milliards pour Vivendi : une cinquantaine pour Suez-Lyonnaise) et ce, en pleine politique de diversification (dans la communication pour Vivendi ; dans l'énergie pour l'autre).

C'est Jean-Marie Messier, le président de Vivendi qui a lancé la course. En mars 1999, il informe du rachat pour 37 milliards de francs du numéro un américain de l'eau, US Filter (plus de 30 milliards de francs de chiffre d'affaires). Trois mois plus tard, Gérard Mestrallet, le patron de Suez-Lyonnaise, annonce coup sur coup l'acquisition, pour 28,45 milliards de francs, de Calgon et de Nalco. Ces deux sociétés américaines sont spécialisées dans le conditionnement de l'eau. Vient ensuite le lancement pour quelque 6 milliards de francs d'une offre d'achat sur la société de distribution d'eau, United Water Resources, également américaine. Entre-temps, Vivendi souffle à sa rivale la très convoitée privatisation des eaux de Berlin (3,5 millions d'habitants desservis en eau potable et en assainissement). A quoi Suez-Lyonnaise riposte en rachetant la majorité du capital de la société municipale d'eau de Santiago

du Chili (5 millions d'habitants). Et les choses n'en resteront pas là.

Cette spectaculaire croissance internationale s'appuie sur plus de cent ans d'histoire. La Compagnie générale des eaux (devenue Vivendi en 1998) fêtera bientôt ses 150 ans, tandis que la Lyonnaise a passé le cap des 120 ans.

LES PREMIÈRES CONCESSIONS

Alors que, sur la planète, l'eau est gérée à 95 % par le secteur public, les deux entreprises ont bénéficié de cette spécificité française née au XIX^e siècle avec la naissance des grands projets d'infrastructure : le régime de concession de services publics à un opérateur privé. « *C'est fondamentalement la notion de délégation de service public, de partenariat entre les collectivités publiques et les entreprises privées dans un schéma concessif négocié, qui explique l'origine et l'histoire du développement des deux conglomérats* », note Daniel Caille, président du syndicat des producteurs et distributeurs d'eau. Pour prendre l'exemple de la Compagnie générale des eaux, sa première concession, la distribution d'eau à Lyon, remonte au décret impérial du 14 décembre 1853. En 1860, la même mission échoit à la compagnie pour Paris, puis en 1869 pour la banlieue de la capitale. Trois territoires sur lesquels la Générale des eaux a aujourd'hui encore conservé cette maîtrise d'œuvre. Quant à la Lyonnaise, elle a été créée en 1880 par le Crédit lyonnais qui, attiré par le succès en bourse de la Générale, avait vu grand : 50 millions de francs de capital pour la nouvelle société dont 60% souscrits par la banque elle-même.

Jusqu'aux années 1940, les compagnies d'eau se développent doucement, mais sûrement. En bourse, on les considère comme des valeurs sûres. Après-guerre, elles évitent la nationalisation, grâce à leur sage neutralité pendant le conflit et même à la participation de quelques-uns de leurs dirigeants à la résistance. Après 1945, leur développement s'accélère, la diversification dans les secteurs de la propreté, de l'ingénierie, du transport, du chauffage urbain prend son essor. Un troisième acteur, la Saur (aujourd'hui filiale de Bouygues), entre dans la course pour s'occuper de la distribution d'eau dans les campagnes, secteur délaissé par les deux majors.

Vient 1981 et l'arrivée au pouvoir des socialistes : on reparle de leur nationalisation. Elle ne se fera pas. Quasiment partout en Europe, exception faite de la Grande-Bretagne, la gestion de l'eau relève du pouvoir communal et les socialistes hésitent à retirer du pouvoir aux élus. Le

ministre de l'Intérieur, Gaston Deferre, s'est prononcé contre la nationalisation et est écouté. Grâce à sa loi de décentralisation, les distributeurs d'eau vont même connaître une phase d'expansion sans précédent. Jusqu'en 1981, leur croissance était jugulée par la toute puissante Direction générale des collectivités locales. Outre qu'elle contrôlait tous les contrats, elle prônait plutôt l'affermage (schéma dans lequel la commune garde la maîtrise des investissements) que la concession (schéma dans lequel l'opérateur se charge du service complet, des investissements à la facture du client final). Après 1982, les maires s'affranchissent de cette tutelle et plébiscitent la délégation de services. « De 1982 à 1992, la Générale des eaux double de taille, gagnant autant de contrats qu'entre 1853 et 1982 », explique un ancien du groupe. Même constat à la Lyonnaise.

La décennie 1980 voit aussi se multiplier les « affaires ». Pour prendre pied dans les grandes villes françaises, les opérateurs privés sont prêts à payer des « droits d'entrée » de plus en plus importants aux collectivités locales. La pratique, légale, fausse toutes les règles d'une saine concurrence. Ses excès aboutissent au vote de la loi Sapin en janvier 1993. Cette dernière met un terme à ces surenchères, limite la durée des contrats et impose une plus grande transparence dans la procédure de dévolution.

Deux ans plus tard, toujours dans un climat « d'affaires », les lois Barnier et Mazeaud donnent aux collectivités locales davantage de pouvoir pour contrôler les délégataires privés. Les distributeurs privés parviennent néanmoins à prendre le contrôle de 75 % du marché français de la distribution d'eau potable (25 millions d'habitants desservis par la Générale des eaux, 14 millions par Suez Lyonnaise, 6 millions par Saur) et de la moitié du marché de l'assainissement.

En 1992, la nouvelle loi sur l'eau, qui fixe des objectifs de dépollution de l'eau ambitieux, leur donne un nouveau support de développement. Face aux énormes besoins d'investissements de dépollution, le prix de l'eau monte en flèche. Non

sans effet boomerang, puisqu'aujourd'hui encore, les polémiques sur le sujet restent vives. Si, comme le disent les dirigeants des compagnies privées, le prix de l'eau va au financement du service d'eau, comment ont-ils réussi à développer leurs entreprises (l'eau coûtant de plus en plus cher) dans la communication, la construction, l'immobilier, la gestion de déchets, l'énergie ? En 1983, la Compagnie générale des eaux participe à la création de Canal Plus, en 1987, elle crée SFR (téléphonie mobile), la Générale images et la Compagnie générale de santé et en 1988, elle prend le contrôle du major de la construction SGE. Un an plus tard, la Lyonnaise des eaux fusionne avec un autre major du BTP, Dumez.

À l'international, les débuts sont hésitants. Trop occupée en France, la Générale des eaux n'exploregère les marchés étrangers. C'est la Lyonnaise qui va débroussailler le chemin sous l'impulsion de son président, Jérôme Monod, actuellement président du conseil de surveillance du groupe. L'avenir de la compagnie, J. Monod en est convaincu, passe par l'exportation du modèle français de délégation de services publics dans d'autres pays industrialisés. Il envoie donc ses équipes aux quatre coins du monde pour vanter les mérites de l'« Ecole française de l'eau ».

Sans grand succès pour commencer. De 1980 à 1990, la Lyonnaise ne décroche qu'un seul contrat de distribution d'eau important à l'exportation, à Macao, où existait la seule société privée de distribution d'eau de tout l'Extrême-Orient. Impatient devant la lenteur de ce démarrage et envieux des succès des entreprises françaises de BTP à l'export, Jérôme Monod opte alors pour le mariage avec Dumez. L'alliance, décevante sur le plan financier en raison de la crise de la construction et de l'immobilier des années 1990, sera précieuse pour l'internationalisation du groupe : les hommes du BTP apportent leur expérience de grands chantiers internationaux à leurs confrères de l'eau, plus familiarisés avec les querelles de clocher du terroir.

Le vrai coup d'envoi de l'internationalisation date de 1989, lorsque la dame de fer, Margaret



Un bastion asiatique

Dès 1992, la Lyonnaise part à la conquête des villes étrangères. Elle compterait, à ce jour, 100 millions d'utilisateurs dans le monde. (Ici, Djakarta)

COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION DE

SCIENCE & VIE

HORS SÉRIE



Tous les trois mois, **LES HORS SÉRIE** de **SCIENCE & VIE** traitent de façon exhaustive un grand sujet de notre temps. Chaque **HORS SÉRIE** fait le tour complet d'une question d'actualité scientifique.

- N° 177 - Le cerveau et l'intelligence
- N° 178 - Néolithique
- N° 179 - Dossier SIDA
- N° 180 - Science à l'école
- N° 182 - Les aliments et la santé
- N° 183 - Aviation 93
- N° 184 - Les secrets du vivant
- N° 185 - Le sommeil
- N° 186 - La lumière
- N° 187 - Le corps humain
- N° 188 - L'adolescence
- N° 189 - Le big bang
- N° 190 - Les 9 premiers mois de la vie
- N° 191 - Aviation 95
- N° 192 - Pierre-Gilles de Gennes
- N° 193 - Attention Virus
- N° 194 - Où va la Défense Française
- N° 195 - A quoi sert le cerveau ?
- N° 196 - Les nouvelles planètes
- N° 197 - Pharaons
- N° 198 - Les grandes énigmes de la science
- N° 199 - Aviation 97

- N° 200 - L'homme
- N° 201 - Les chefs-d'œuvre du génie humain
- N° 202 - Les grandes expéditions scientifiques
- N° 203 - Dossier France
- N° 204 - Le cerveau et le mouvement
- N° 205 - L'univers de la gravitation
- N° 206 - Le dossier du dopage
- N° 207 - Aviation 99
- N° 208 - Alimentation
- N° 209 - La vie et le Sacré au temps des Pharaons
- N° 210 - La vie au tout début

Choisissez et commandez
vos numéros

BON DE COMMANDE

à retourner sous pli affranchi avec votre règlement à SCIENCE & VIE - Service VPC - 1, rue du Colonel Pierre Avia 75503 Paris Cedex 15

Oui je commande les numéros suivants de **SCIENCE & VIE HORS SÉRIE** :

N° _____
soit numéros à 33 francs franco l'un
(étranger : 40 francs)

OUI je commande reliures*
Science & Vie au prix de 95 francs (France)
110 francs pour l'étranger

Je joins mon règlement total de
 francs
à l'ordre de **SCIENCE & VIE** par chèque bancaire ou postal

⚡ Pour protéger et consulter facilement vos numéros, rangez-les dans de superbes reliures. De couleur bordeaux, marquée **SCIENCE & VIE**, chaque reliure permet de classer 12 mensuels.

Nom _____
Prénom _____
Adresse _____
_____ Code postal _____
Ville _____

Etes-vous déjà abonné (e) à SCIENCE & VIE :
Oui Non

Si oui, merci d'indiquer votre N° d'abonné _____

Etranger: mandat international ou chèque compensable à Paris
* Délai de livraison 4 à 6 semaines, et dans la limite des stocks disponibles.

Conformément à la loi Informatique et Libertés du 06/01/1978, vous disposez d'un droit d'accès aux données personnelles vous concernant. Par notre intermédiaire, vous pouvez être amené à recevoir des propositions d'autres sociétés ou associations. Si vous ne le souhaitez pas, il vous suffit de nous écrire en nous indiquant vos nom, prénom, adresse et, si possible, votre référence client.

OFFRES VALABLES JUSQU'À FIN 2000

SV HS 211

Thatcher, décide de réaliser la plus grande privatisation de services publics de l'histoire et d'introduire en bourse l'eau d'Angleterre. La Lyonnaise, la Générale et la Saur se précipitent outre-Manche et la presse populaire britannique crie à l'« invasion ». Après l'ouverture du marché anglais, les murs tombent à l'Est et permettent aux groupes français de décrocher des positions en ex-RDA, en Hongrie, en République Tchèque....

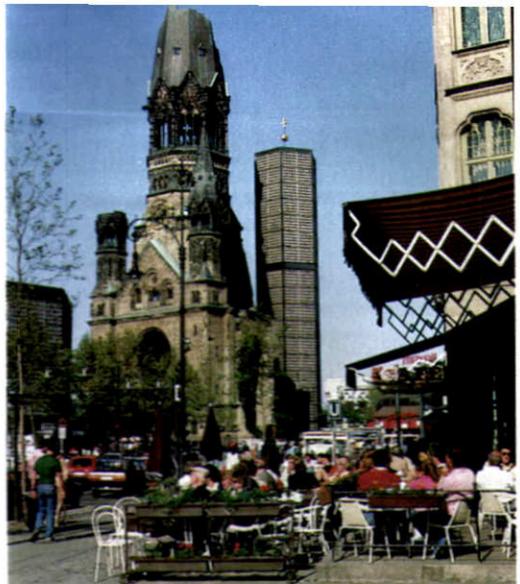
Ainsi lancé, le mouvement de privatisation s'accélère. Au Sommet de la Terre en 1992, l'ensemble de la communauté internationale tire la sonnette d'alarme sur les futures pénuries d'eau. La montée des préoccupations environnementales pousse les investissements à la hausse et convainc les autorités locales de faire appel aux spécialistes du privé. Las de financer à grands frais des équipements très vite inutilisés faute d'entretien suffisant, les bailleurs de fonds internationaux se convertissent au modèle français de la délégation de services publics.

En 1992, Jérôme Monod décroche enfin la timbale : la prise en charge de la gestion complète des services d'eau d'une grande capitale. Buenos Aires. De là, la Lyonnaise vole de succès en succès en Amérique latine, en Asie, en Europe de l'Est.... De 1992 à 1999, le chiffre d'affaires du groupe dans l'eau progresse en moyenne de 17 % chaque année. Pour financer cette marche en avant, le mariage en 1997 avec le holding financier Suez vient à point nommé.

UNE PARTIE TRÈS SERRÉE

Pendant ces années, la Générale des eaux, leader en France, prend du retard à l'international. Ce n'est réellement qu'en 1997, sous l'impulsion de Daniel Caille, qu'elle va gagner des terres lointaines. A Budapest, elle dame le pion à la Lyonnaise, gestionnaire du service d'eau potable de la capitale hongroise, en remportant la responsabilité de l'assainissement de la ville. Elle s'implante au Brésil, en Malaisie, à Porto Rico, en Chine et joue sa réputation de leader sur le contrat des eaux de Berlin, où elle remporte la manche.

Toutefois, si spectaculaires soient-ils, ces grands contrats restent des paris sur le long terme (vingt ou trente ans). Ils ne sont pas immédiatement rentables. A Buenos Aires, la filiale de la Lyonnaise a investi en cinq ans 1,3 milliard de dollars pour rénover le réseau et doit encore financer l'adduction d'eau pour quelque 4 millions d'habitants. « *Tout le pari est d'investir lourdement pendant les quinze premières années du contrat et nettement moins ensuite* », explique son directeur général.



WALDKIRCH - SCHÜSTER - EXPLORER

Un mur s'écroule

Après des débuts hésitants, Vivendi affirme sa position sur la scène internationale. Et souffle le marché de Berlin à sa rivale.

Par ailleurs, la rentabilité en France s'amenuise. Augmentation des prix oblige, les Français économisent de plus en plus l'eau, tandis que les maires surveillent à la loupe les dépenses des délégataires. Un grand nombre de contrats vont venir à échéance entre 2005 et 2010, et la loi Sapin impose désormais une réelle concurrence. De même, en Grande-Bretagne, l'autorité de régulation vient de réclamer une baisse conséquente des prix de l'eau, estimant qu'il était temps d'accorder les bénéfices de la privatisation aux consommateurs et pas seulement aux actionnaires.

C'est pourquoi les grands groupes français sont allés chercher l'an passé un nouvel eldorado aux Etats-Unis. Une terre quasiment vierge, puisque le marché municipal de l'eau ne s'ouvre au secteur privé que depuis trois ans (95 % de la distribution d'eau est encore publique). Mais une terre pleine de promesses, car les grands industriels américains ont de plus en plus tendance à « externaliser » la gestion de leurs besoins en eau. Or US Filter, qui produit des équipements comme des filtres, des membranes, des dégrilleurs, pour traiter l'eau, et Nalco, qui fournit les poudres chimiques destinés à purifier l'eau, sont en contacts étroits avec ces industriels, dont ils sont les fournisseurs. Gérer la distribution et le traitement de l'eau pour l'ensemble des unités de production de Coca-Cola dans le monde, ou de Intel, de General Motors..., telle est la nouvelle ambition de Suez-Lyonnaise et de Vivendi Water. Après les villes, leur nouveau terrain de conquête est donc clairement désigné : l'industrie. ▣



page 110

Les conséquences d'une **pénurie** annoncée

Il va falloir mieux répartir les usages.
Comment ?



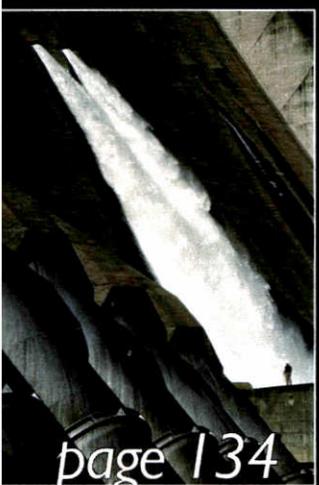
page 142

◀ Brèches dans les **barrages**

Les grands barrages hydroélectriques sont-ils révolus ?

De l'eau **pour tous**

De l'eau ni potable, ni propre : au moins 1,4 milliard de personnes dans le monde sont concernées



page 134



Texas : Produire plus avec moins d'eau

Economiser l'eau sans baisser le rendement : c'est possible

Et aussi :

Fleuves en sursis.
Page 117

Australie, un exemple à suivre ?
Page 122

Dessaler, recycler, déplacer.
Page 154



page 128

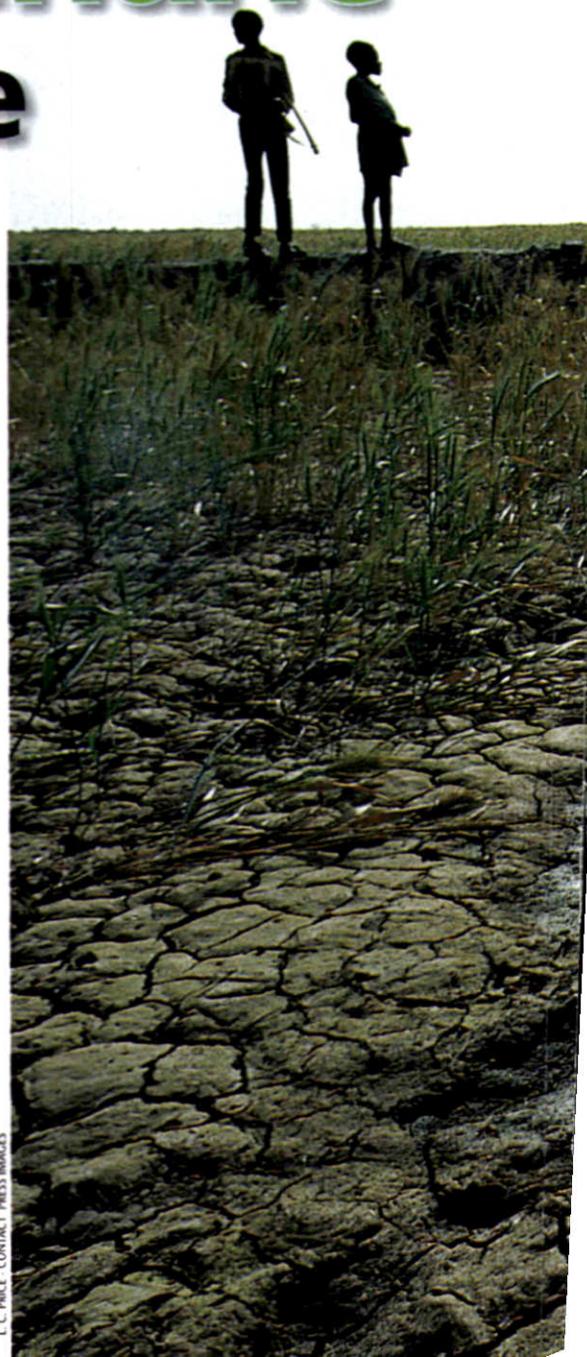
Les conséquences d'une pénurie annoncée

D'ici à 25 ans, la Terre comptera deux milliards d'habitants supplémentaires. Ce qui risque de provoquer une grave pénurie d'eau, à moins de réviser notre gestion de la ressource. Etat des lieux et solutions.

PAR SOPHIE COISNE

« **E**n 2025, la majorité de la population de la planète vivra dans des conditions d'approvisionnement en eau faibles ou catastrophiquement faibles », notait le directeur de l'Institut hydrologique de Saint-Petersbourg, Igor Shiklomanov, dans *Ressources mondiales en eau*. Les grands organismes internationaux se réunissent tous autour d'un même constat, en effet : les quantités d'eau douce ne cessent de diminuer. Ainsi, selon le Secrétariat international de l'eau, les réserves mondiales se montaient à 16 800 m³ par personne et par an en 1950. Aujourd'hui, elles atteignent 7 300 m³ et devraient tomber à 4 800 m³ dans 25 ans. En moyenne. Car trois milliards de personnes ne disposeront que de 1 700 m³ d'eau par an, « seuil d'alerte » pour l'ONU.

A croire que la Terre porte bien mal son surnom de planète bleue... En fait, la pénurie d'eau fait référence à l'eau douce gratuite et facile d'accès. L'eau sous toutes ses formes est abondante sur



Une richesse volatile

Les ressources en eau sont inégalement réparties dans le monde. Les pays les plus défavorisés se trouvent en Afrique, où le taux d'évaporation de l'eau est plus important que celui des précipitations. (Ici, le Mali.)



L'EAU PÉNURIE dans le monde

Terre en effet : elle représente 1 380 millions de kilomètres cubes. L'essentiel, toutefois, est constitué d'eau de mer (97,2 %) et de glace (2,15 %), inutilisables directement. L'eau douce facilement disponible – lacs, fleuves, certaines eaux souterraines – ne représente que 0,07 % de la ressource totale, soit un million de kilomètres cubes. « Si on ramenait la planète à la taille d'une orange, cette eau aurait la dimension d'une tête d'épingle », résume Lothaire Zilliox, directeur de recherche à l'Institut de mécanique des fluides de Strasbourg.

« Mais la question est de savoir si cette petite quantité est suffisante pour éteindre la soif de l'humanité », remarque Bernard Barraqué, chercheur au Laboratoire technique, territoire et société du CNRS. Ce serait le cas si tous les pays du globe disposaient d'autant de ressources les uns que les autres, ou de revenus suffisants pour se payer des réseaux d'adduction. Les inégalités, hélas, sont criantes. Dix pays se partagent 60 % des réserves d'eau douce, en tête desquels le Brésil, la Russie et la Chine. Vingt-neuf autres, localisés pour la plupart en Afrique du Nord, au Moyen-Orient et en Afrique subsaharienne, sont au contraire confrontés à une pénurie chronique d'eau. Cette répartition est essentiellement liée au climat.

Ramené à la superficie des terres émergées, le flux d'eau (précipitations moins évaporation) peut varier de un (Australie) à quinze (Amérique du Sud) en effet. L'Afrique reçoit 2,5 fois plus de précipitations que l'Europe mais dispose d'un écoulement... quasi équivalent. « Quand il tombe 1000 ml d'eau en Afrique, explique Lothaire Zilliox, il s'en évapore 1500 ml en effet. En France, pour 1000 ml de précipitations, il en retourne autant dans l'atmosphère. » Cette inégale répartition se traduit par d'énormes écarts des niveaux de consommation : un Américain utilise en moyenne cent fois plus d'eau qu'un Ougandais, un Français cinquante fois plus.

MOINS D'EAU, PLUS DE MONDE

450 millions de personnes, dans 29 pays, souffrent donc aujourd'hui d'un manque d'eau. Elles pourraient être 2,5 milliards en 2050. Pourquoi ? Parce que la pression démographique se fait de plus en plus forte, tout d'abord. La population mondiale, qui atteint aujourd'hui 6 milliards d'individus, a triplé en cent ans. Dans le même temps, les consommations d'eau ont été multipliées par six. Si la moitié de cette augmentation est à mettre



Un long fleuve tranquille

Une des causes de la rarefaction des réserves d'eau douce est la pollution des rivières. L'Amazonie est l'un des derniers fleuves au monde à rester indemne.

RODIER GALL

ment du bien-être social, au développement industriel et au développement agricole.

En effet, le passage d'une agriculture de subsistance à une agriculture de rente a considérablement augmenté les demandes en eau de ce secteur, de loin le plus gros consommateur des ressources mondiales. Deux tiers de l'eau douce prélevée dans le monde alimentent les cultures. Et cette augmentation ne va pas cesser. L'IWMI (International Water Management Institute) prévoit ainsi d'ici à 2025 une augmentation de 17 % de cette demande, puisqu'il s'agira de nourrir deux milliards d'habitants supplémentaires.

Or les pertes que génère l'agriculture sont



mentaires, qui laissent échapper une grande partie d'eau par évaporation. Malheureusement, les conséquences de ces pratiques sont dramatiques. Deux tiers des eaux du Nil sont détournées par l'activité humaine avant leur arrivée en Méditerranée. Les fleuves Amou-Daria et Syr-Daria alimentant la mer d'Aral ont vu leurs eaux détournées à 96 % pour l'irrigation du riz et du coton d'Asie centrale. Résultat : cet immense réservoir, autrefois quatrième lac du monde par sa superficie, est en voie d'assèchement. Au cours des vingt dernières années, ses rives ont reculé de 60 km et sa salinité a plus que doublé.

Les stocks d'eau douce faciles d'accès diminuent donc non seulement parce que le nombre de consommateurs – et leurs besoins – augmente mais aussi parce qu'une part grandissante de la

ressource est dégradée. Selon le Water World Vision, seuls le Congo et l'Amazone peuvent aujourd'hui être qualifiés de sains. Les rejets de pesticides et de fertilisants, les contaminations en métaux lourds (le cyanure du Danube, récemment) sont en outre accentués par la réduction du pouvoir tampon du milieu naturel. « *Les zones humides, comme les marécages, sont capables de filtrer 50 % des nitrates*, explique Gilles Billen, du Laboratoire de géologie appliquée de Paris VI. *Or le drainage agricole conduit à la disparition de ces filtres naturels.* » En Floride, les pratiques agricoles et l'urbanisation ont ainsi réduit de plus de moitié les Everglades. L'expansion des villes, enfin, entraîne une concentration spatiale des rejets domestiques et industriels. Sur les 33 mégapoles de plus de 8 millions d'habitants, 27 seront en 2015

situées dans des pays en développement. Ceux-là mêmes qui ont des difficultés à financer une politique d'assainissement.

GÉRER AU MIEUX LES USAGES

« Bien sûr, reprend Bernard Barraqué, on peut s'enfermer dans l'angoisse de la pénurie d'eau. Mais qui nous dit que l'on va continuer à gaspiller la ressource comme on le fait aujourd'hui? Rien n'est sûr. » Car une prise de conscience s'est fait jour : il est temps de revoir notre façon de gérer la ressource.

Longtemps les autorités ont répondu au manque d'eau par une augmentation de l'offre : construction de grands réseaux d'adduction, de gigantesques réservoirs, réalisation de forages profonds. L'idée a même germé de remorquer quelques icebergs... Puis les chercheurs ont réfléchi à la manière dont nos stocks pouvaient être étendus, grâce à l'exploitation des sources d'eau non conventionnelles : eau de mer, eaux saumâtres. Ainsi, aujourd'hui, « il est devenu techniquement possible de rendre potable n'importe quelle eau », affirme Louis Cot, directeur du Laboratoire des matériaux et procédés membranaires de Montpellier. Le recours aux technologies à membranes permet de retenir les bactéries, les plus petits virus et pour certaines, les ions, rendant réalisable le dessalement. L'eau de mer exploitable, 1350 millions de km³ de liquide gonflent soudain nos réserves... La technologie botte en touche? La pénurie d'eau annoncée est vaincue d'avance? Voire... Il est vrai que cette technique peut s'avérer salvatrice dans l'avenir. Mais à l'heure actuelle, il s'agit exclusivement d'une solution pour pays riches : elle porte à un dollar le prix du mètre cube d'eau. Seuls le Koweït et l'Arabie saoudite étanchent leur soif de cette manière.

En fait, force est de constater que la logique du « toujours plus de ressource » n'est plus durable au niveau mondial. « Ces politiques de grands travaux sont devenues extrêmement coûteuses et ont conduit à la surexploitation, constate l'économiste Patrick Point, du Groupe de recherche en analyse et politiques économiques du CNRS. On s'aperçoit aujourd'hui que la gestion des ressources en eau doit passer par une meilleure répartition des usages ».

Pour certains économistes, l'outil idéal de cette répartition, c'est l'eau « virtuelle ». Il s'agit de calculer la quantité d'eau nécessaire à la production d'une tonne de céréales, d'une tonne de viande, etc., et de définir sa politique agricole et commerciale de manière à consommer le moins d'eau

possible. La production d'une tonne de volailles, par exemple, nécessite 6 milliers de mètres cubes d'eau, une tonne de légumes... six fois moins. Un pays déficitaire en eau a donc tout intérêt à centrer sa production autour des légumes ou des céréales plutôt qu'autour de l'élevage. L'idéal étant d'importer le reste.

Ce mode de répartition peut également se faire

DES NAPPES SUREXPLOITÉES

« Compte épargne », c'est souvent le nom que les hydrogéologues donnent aux aquifères, ces immenses réservoirs d'eau souterraine qui représentent 97 % de l'eau douce continentale. Au fil du temps, ils ont en effet emmagasiné des millions de mètres cubes d'eau qui circulent lentement et mettent des siècles à être renouvelés (1 400 ans en moyenne). Mais cette eau souterraine, dont dépend 10 % de l'agriculture mondiale, est gravement menacée. D'une part, parce qu'elle est surexploitée. Au Yémen, en Chine, en Inde... Le niveau d'eau de ces réservoirs diminue actuellement d'un mètre par an. L'Arabie saoudite a augmenté l'exploitation de ses aquifères de 300 % en dix ans. Au

Mexique, enfin, la Banque mondiale considère 80 aquifères en situation de grand risque. Les contaminants qui y pénètrent y séjournent d'autre part pour longtemps. « Si les agriculteurs de la Beauce arrêtaient d'utiliser des nitrates, explique le géologue Gilles Billen, on ne verrait pas de diminution de leur taux dans la Seine avant une dizaine d'années. Car l'aquifère a subi 50 ans de contamination et continuera un moment à polluer le fleuve. » La Banque mondiale considère que seule la tarification des prélèvements dans les aquifères permettra de limiter leur exploitation. La tarification et la vérification des réseaux. Au Mexique, 50 fuites par nuit ont été repérées dans le réseau lié à l'aquifère d'Aguascalientes.



Le manque d'eau est un problème récurrent en Syrie. (Les bédouins creusent un puits dans le désert.)

Une activité dépendante

Mieux gérer les ressources en eau revient à les utiliser de manière plus rationnelle. Les pays arides ont ainsi tout intérêt à privilégier la culture de légumes ou de céréales, nettement moins gourmands en eau que l'élevage. (Éleveurs masais, Tanzanie.)



J.D. JOUBERT - HOAQUI

à l'échelle mondiale, à condition qu'une solidarité forte se mette en place. On peut imaginer que les pays riches en eau produisent les denrées les plus consommatrices. Au nord, les cheptels, au sud, les tubercules en quelque sorte. « Bien sûr, il serait socialement inacceptable de demander à un pays qui mène une politique d'autosubsistance de cesser d'irriguer, remarque Bernard Barraqué du Laboratoire technique, territoires et société. Cela permettrait en revanche d'éviter la grande irrigation destinée aux cultures d'exportation qui amélioreront le confort des pays riches. »

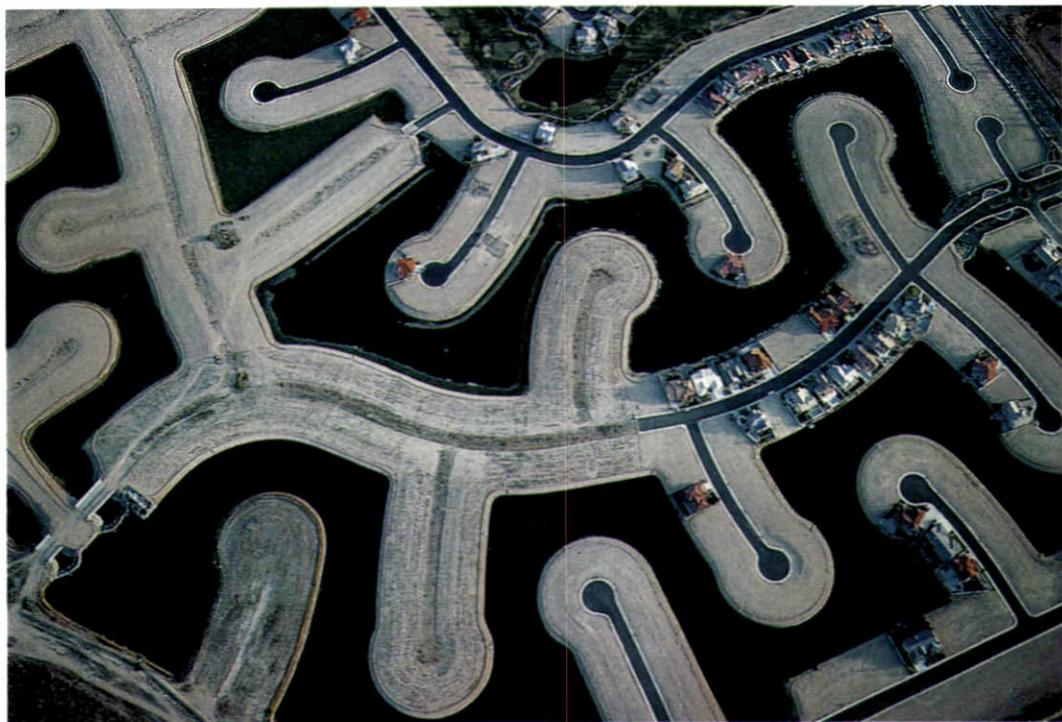
DONNER DU PRIX À L'EAU

La Banque mondiale et nombre d'économistes estiment que l'irrigation serait moins dispendieuse en eau si le prix de cette dernière était légèrement augmenté. Qu'il devrait intégrer le coût d'extraction, d'acheminement, et varier en fonction de la nature de l'utilisateur, afin de ne pas léser les petits consommateurs. Les autorités, toutefois, ont toujours rechigné à employer ce mode d'action (le spectre des manifestations agricoles plane), à l'exception d'Israël qui fixe le prix de l'eau d'irrigation à la moitié de son coût réel. Pourtant, « si la réalité des coûts de l'eau mobilisée (y compris les coûts environnementaux) n'est pas appliquée aux grands exploitants agricoles, notait en 1998 un rapport de la FAO sur le dévelop-

pement durable, ils n'ont aucune raison de changer leurs modes d'exploitation ».

Le prix est en effet « un indicateur de rareté, explique Patrick Point. Il permet aux utilisateurs d'adapter d'eux-mêmes leur comportement ». Exemple dans le sud de la France. « L'Astien, raconte l'économiste Jean-Michel Salles, une pointe d'accent montpelliérain dans la voix, est une nappe très menacée. Sa surexploitation peut conduire à une remontée de l'eau de mer par capillarité, auquel cas la qualité de l'eau se dégraderait à Agde et Béziers. La taxe de prélèvement dans ce réservoir a du coup été fixée à environ 3F le mètre cube. Eh bien là, on n'irrigue plus. Car dans la région, une culture irriguée nécessite 2000 à 5000 m³ d'eau par hectare... Ce qui reviendrait à 6000 à 15000 francs d'eau. Vous en connaissez des cultures qui permettent de rentabiliser cet investissement en dehors des coteaux Bordelais? » Le cas de l'Astien est extrême, bien sûr. Les économistes estiment qu'il suffirait d'augmenter le prix de l'eau de quelques dizaines de centimes pour que les agriculteurs utilisent plus parcimonieusement la ressource ou optent pour des formes culturelles moins gourmandes.

Autre moyen de donner de la valeur à l'eau sans jouer sur son prix : les quotas. Cette méthode est appliquée pour contrôler la consommation des industriels de Tianjin, en Chine. Si le relevé de leur



P. ESSICK - AURORA - COMPOS

consommation d'eau indique un dépassement du quota imposé, leur redevance augmente jusqu'à 50 % au-dessus du tarif normal.

RECYCLAGE ET ÉCONOMIE SOLIDAIRE

Le refroidissement des centrales, comme de nombreux procédés industriels, ne nécessite pas une eau douce de grande qualité organoleptique. Peu exploitée à l'heure actuelle, la réutilisation des eaux usées peut dans l'avenir constituer une source d'eau réservée à l'industrie, aux municipalités (irrigation des parcs, des golfs, nettoyage des voies publiques) et à certaines formes d'agriculture. En Israël, 70 % de l'eau rejetée par les communautés sert actuellement à l'irrigation. Au Japon, certains immeubles sont équipés de stations d'épuration miniatures qui traitent les eaux usées et en alimentent les chasses d'eau.

Selon la FAO, 10 à 20 % de l'eau utilisée pour l'arrosage des cultures pourrait ensuite être économisée grâce à de nouveaux procédés d'irrigation. En Amérique du Sud, des canaux souterrains réduisent les pertes par évaporation et infiltration en conduisant l'eau jusqu'à la parcelle. En Israël, en Jordanie, des tuyaux perforés courent sous la surface du sol et libèrent juste ce qu'il faut d'eau au niveau des racines des plantes. Malheureusement, le faible prix de l'eau ne favorise pas l'introduction du goutte-à-goutte, très coûteux.

Parcours économique

Encore peu répandue, la réutilisation – après traitement – des eaux usées peut constituer un apport non négligeable. (Eaux recyclées alimentant des lacs et des golfs en Arizona.)

Evidemment ces méthodes économiques et économes ne sont applicables que si l'on a soi-même accès à l'eau. Car on l'oublie souvent : en cette année 2000, un habitant sur cinq n'a toujours pas d'eau potable. Un sur deux n'est pas relié au tout-à-l'égout. Les eaux usées contaminent les puits, causant la mort de 2 millions de personnes selon l'OMS. Au total, les maladies liées à l'eau font chaque année six millions de morts. « *Il faut favoriser l'accès de tous à l'eau potable* ». Cette recommandation figure – qui s'en plaindrait ? – dans la déclaration d'intention de tous les colloques sur l'eau. Mais comment faire ? Sur le terrain, nombre d'organisations non gouvernementales impliquent les populations locales dans l'évaluation de leurs besoins, le montage du projet (adduction d'eau et assainissement) puis... son financement. Certes, en Afrique, 80 % des investissements sur des réseaux d'eau vient toujours des organismes internationaux et des ONG. Mais la part de PIB allouée à l'eau et à l'assainissement par les pays en développement augmente – elle est passée de 0,25 % à 0,4 % entre 1980 et 1990. Une croissance modeste, certes. Mais l'effort est là. □

Fleuves en sursis

Seuls le Congo et l'Amazone sont aujourd'hui qualifiés de sains. Les autres fleuves ? Exploités par l'homme jusqu'à la lie, certains ne voient plus la mer. D'autres sont entravés par de multiples barrages ou asphyxiés par les limons. Portrait des sept bassins les plus menacés ou les plus convoités.

Par Sophie Coisne



T. STODDART - KATZ PICTURES - COSMOS

ÉTERNELLE SOURCE DE CONFLIT

Le bassin du Gange est l'un des plus arrosés au monde. Le fleuve, toutefois, cesse de se jeter dans la baie du Bengale durant la saison sèche. Les détournements d'eau réalisés par l'Inde au profit de l'irrigation et de l'alimentation des villes laissent alors très peu d'eau pour le Bangladesh. Après de nombreux conflits, les deux pays ont accepté de partager équitablement les eaux du Gange retenues par le barrage de Farakka, situé à cheval sur leur frontière.



C. PILLITZ - NETWORK - RAPHO

DANGEREUX SÉDIMENTS

1,6 milliard de tonnes de sédiments sont charriés par le Fleuve Jaune chaque année. 200 millions se déposent au fond de son lit qui remonte de 10 cm par an, causant des inondations. Plusieurs barrages y ont toutefois été construits, aujourd'hui comblés de limons à 30 % voire 40 %. Selon les autorités chinoises, le prochain barrage de Xiaolangdi devra retenir assez d'eau et de sédiments pour résoudre les problèmes en aval. Des estimations fixent cependant l'ensablement complet du futur réservoir d'ici à 30 ans.



DE PLUS EN PLUS SALÉ...

A mesure que le Colorado approche de son delta, situé dans le golfe du Mexique, ses eaux sont de plus en plus salées. Il faut dire que l'eau issue du drainage agricole des Etats riverains est rejetée sans précaution dans le fleuve. En

1974, un programme de contrôle de la salinité a été institué. D'ici à 2015, 19 projets devraient permettre de supprimer annuellement 1,2 million de tonnes de sel des eaux de drainage.

UNE MER À SEC

Autrefois quatrième plus grand lac au monde, la mer d'Aral a perdu les deux tiers de son volume. En vingt ans, ses rives ont reculé de 60 km et sa salinité est passée de 10 % à 25 %. Les causes de cette catastrophe écologique? Le détournement des eaux de l'Amou-Daria et du Syr-Daria au profit de vastes cultures de coton (8 millions



SACRIFIÉ AUX CULTURES

A l'issue d'un parcours de 6 671 km, le Nil déversait autrefois dans la Méditerranée 38 % des eaux collectées par son bassin. Mais, en un siècle, la population égyptienne a été multipliée par 20, ce qui a contraint le pays à passer à une agriculture intensive. Le barrage d'Assouan a permis de créer une énorme réserve d'eau douce, le lac Nasser, de 500 km de long et 30 km de large. Depuis, le fleuve ne déverse plus que 2 % des eaux collectées dans la grande bleue.

Y. ARTHUS-BERTRAND - ALTIITUDE



CNES - DIST SPOT IMAGE - EXPLORER

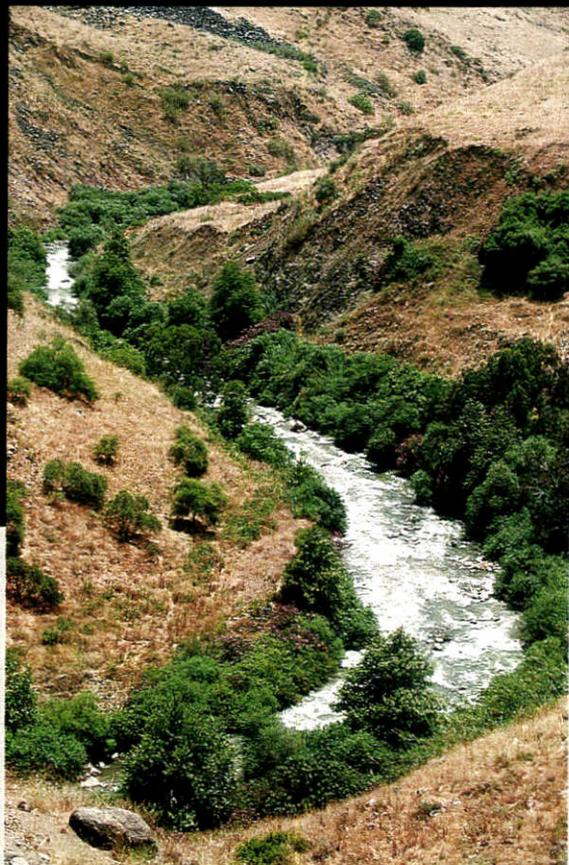
PRESSIONS À LA SOURCE

Le lac al-Hammar, à la confluence du Tigre et de l'Euphrate, a vu s'établir les premières cultures, il y a 10 000 ans. Les deux fleuves baignent la Syrie, l'Irak, et sont aujourd'hui devenus un formidable moyen de pression pour la Turquie, qui héberge leur source. Cette dernière bâtit actuellement un important projet, incluant la construction d'une vingtaine de barrages et l'irrigation de 1,7 million d'hectares de terre. Si ce programme est mené à son terme, le débit de l'Euphrate en Syrie risque de diminuer de 35 %



UNE RÉSERVE PRÉCAIRE

A lui seul, le Jourdain étanchera-t-il la soif des pays qu'il baigne ? Si les flux migratoires prévus se confirment, Israël, la Jordanie et la Palestine devraient manquer d'un à deux millions de mètres cubes d'eau d'ici à 2020.



A. AVAKAN - CONTACT PRESS IMAGES

Australie : un exemple à suivre?

La restauration du bassin Murray-Darling est souvent présentée, officiellement, comme une indéniable réussite. Le bilan paraît pour le moins mitigé, ce qui témoigne des difficultés propres à ce type d'entreprise. Or, l'Australie offre une situation des plus favorables : elle dispose en effet des moyens financiers requis.

PAR DANIEL CONNELL

Le désert, et des terres où rien ne pousse, ou presque. Telle est, à grands traits, l'une des deux images que la majorité des Européens a de l'Australie. L'autre étant celle d'un immense territoire de 7.7 millions de kilomètres carrés (15 fois la France), que se partagent 16.8 millions d'habitants – seulement – regroupés dans les 5 principales villes du pays – Sydney, Melbourne, Brisbane, Adélaïde et Perth.

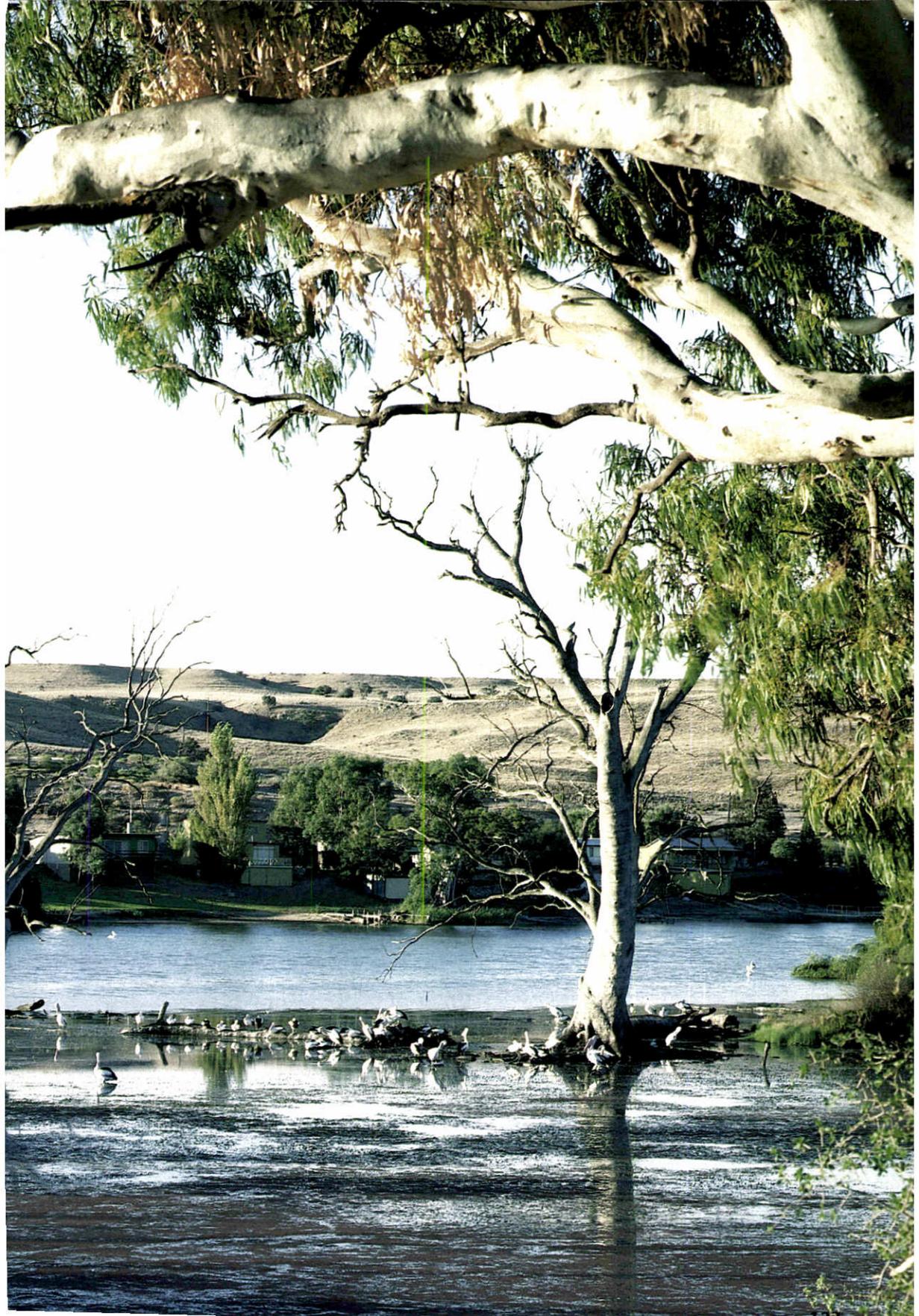
A y regarder de plus près, force est de constater que l'Australie ne se résume pas à ces deux clichés. Aux limites du désert, au sud-est et au sud-ouest du territoire, l'agriculture s'est taillée la part du lion. Parmi les régions les plus productives, le



2,6 fois la France

Principal fleuve d'Australie, le Murray s'étend sur 2.589 km. Avec son affluent, la rivière Darling, ils forment un bassin couvrant plus de 1,4 million de kilomètres carrés.

J. BURT - AUSTRAL



système fluvial Murray-Darling ⁽¹⁾, situé à l'intérieur de la Cordillère australienne.

Sur une superficie de 145 000 hectares, regroupant 20 rivières et de vastes systèmes de nappes aquifères, ce gigantesque bassin de retenue couvre environ 40 % des cultures et du pâturage australiens et une large part des besoins industriels et domestiques. Trois millions d'habitants – dont deux millions dans la région elle-même – dépendent directement de ses ressources. Le bassin alimente 1/4 du cheptel national des bovins, la moitié des troupeaux de moutons, les 3/4 des terres irriguées et la moitié des récoltes.

Au plan écologique, la valeur des ressources naturelles du bassin ne souffre aucun démenti. Ses vastes zones inondables ⁽²⁾ remplissent des fonctions hydrologiques, biologiques et chimiques fondamentales, qui garantissent la productivité et la santé des systèmes fluviaux de la région. L'irrigation à grande échelle, entamée il y a tout juste un siècle, génère aujourd'hui d'importantes richesses et des milliers d'emplois. En ce sens, c'est une réussite. Mais, l'histoire aurait été trop belle, cette productivité a un prix. Substantiel, au regard de l'environnement et des ressources naturelles sur lesquelles elle est basée.

En effet, le débit annuel moyen à l'embouchure du Murray ne représente aujourd'hui que 21 % du volume produit avant que les eaux ne soient détournées au profit de l'irrigation – cette dernière utilise plus de 95 % des eaux dérivées. La fréquence des périodes de sécheresse, causées par le faible débit, s'est, de ce fait, considérablement ac-

crue : d'une moyenne d'une fois tous les 20 ans, on est passé à 3 années sur 5. En conséquence, dans la partie sud du bassin, le long du Murray, le cycle d'alimentation en eau a été modifié : les crues printanières sont désormais retenues dans les réservoirs pour être déversées au plus haut de la saison d'irrigation, en automne. Et cela n'est pas sans conséquence sur l'environnement fluvial.

Par ailleurs, les principaux barrages du bassin stockent un volume d'eau nettement supérieur à celui que débitent leurs lacs de retenue. Certes, conserver l'eau dans ces barrages minimise les dégâts des crues sur les terres et accroît la masse d'eau réservée à l'agriculture et à la consommation industrielle et domestique. Mais parallèlement, le milieu aquatique s'en trouve considérablement affecté, la réduction de la biodiversité favorisant le développement d'animaux nuisibles, telles les carpes.

DE NOUVELLES APPROCHES

Depuis une dizaine d'années, gouvernements et communautés ⁽³⁾ ont donc décidé de prendre le problème à bras-le-corps. Dans le but avoué de protéger la biodiversité et l'environnement. Or, la tâche promet d'être longue et ardue. Les pratiques agricoles appliquées depuis 150 ans font aujourd'hui durement sentir leurs effets néfastes sur la qualité de l'eau et des retenues fluviales, ainsi que sur la productivité des terres du bassin. Le bilan, force est de l'admettre, n'est pas bon : déclin de la structure des sols, érosion par le vent et l'eau, retenues accidentelles d'eau, irrigation forcenée de terres arides ayant entraîné une salinisation, acidité des sols. L'ensemble résultant d'une gestion inappropriée des terres et de l'environnement : surpâturage de zones arides et semi-arides, culture de terres à faible rendement, surexploitation de champs de récoltes, pratiques d'irrigation inadaptées, gestion inadéquate des nuisibles, vaste défrichement de la végétation naturelle, en particulier sur les plateaux où se rechargent les aquifères souterrains.

Afin d'enrayer le processus, les autorités australiennes ont donc élaboré un programme de réformes majeures. Pour ces gestionnaires de l'eau, il ne suffit plus de se limiter à promouvoir la dis-

1 – Le Murray est le principal fleuve d'Australie, long de 2 589 km ; la rivière Darling, son affluent, s'étend sur 2 700 km.

2 – Dont certaines, comme Chowilla, les forêts de Barmah-Millewa, Gunbower, les lacs Hattah-Kulkyne, Albacutya et les Marais de Macquarie, sont reconnues par la Convention Ramsar sur les Zones Inondables.

3 – L'Australie est un État fédéral, composé de 6 États (Australie-Méridionale, Australie-Occidentale, Nouvelle-Galles du Sud, Queensland, Tasmanie et Victoria), ayant chacun un gouvernement et un Parlement, et de 2 Territoires (Territoire du Nord et Territoire de la capitale australienne).



MICHE PICTURES

Des moutons goulus

Supportant environ 40 % des cultures et du pâturage australiens, le bassin subvient aux besoins du quart du cheptel des bovins et de la moitié des troupeaux de moutons du pays.



MDBC PICTURES

tribution d'une ressource, jugée, jusqu'alors, propre et abondante. Aujourd'hui, la demande d'eau ayant supplanté l'offre, il leur faut hiérarchiser son utilisation, protéger ses bassins de retenue et déterminer la meilleure manière de recouvrer les sommes investies pour sa distribution – y compris celles engagées pour le remplacement de l'infrastructure de ses barrages et de ses systèmes de distribution, désormais obsolètes.

En 1995, le Conseil ministériel du bassin Murray-Darling, regroupant les 6 gouvernements impliqués dans la gestion du bassin, a commandé la réalisation d'un audit sur les ressources en eau de la région. Ses prévisions, relatives aux conséquences de la multiplication du détournement des eaux, sont sans appel : baisse sensible de la qualité et du volume d'eau distribuée aux usagers ; déclin de la biodiversité et dégradation de l'environnement fluvial du bassin, dus à une augmentation de la salinité et à un excès d'engrais. Au regard des conclusions de l'audit, le Conseil du

Richesses naturelles

Les vastes zones inondables qui jalonnent le bassin (ici, les marais de Macquarie) remplissent des fonctions hydrologiques, biologiques et chimiques essentielles à la santé et à la productivité de la région.

bassin a donc engagé une série de mesures. D'abord, limiter le volume des eaux détournées, quelles que soient les conditions climatiques, tout en respectant les besoins de la consommation ; ensuite, encourager le commerce de l'eau dans et entre les États, dans le cadre d'un ensemble de règles écologiques strictes destinées à développer des usages de l'eau à forte valeur économique et faible impact écologique ; enfin, grâce aux profits générés par ce marché de l'eau, provisionner le remplacement des anciennes infrastructures du bassin et s'assurer du respect des besoins de l'environnement.

L'année dernière, à la demande du Conseil, la Commission du bassin Murray-Darling a conduit

un nouvel audit, portant, cette fois-ci, sur la salinisation des eaux et des sous-sols du bassin. La majeure partie de la végétation naturelle qui recouvrait le bassin a en effet été défrichée au cours des 150 dernières années, afin de préparer la terre aux activités agricoles et pastorales qui dominent aujourd'hui le paysage. Or, ces nouvelles formes de végétation utilisent moins les eaux de pluie que la végétation traditionnelle. Il a donc fallu accroître considérablement leur irrigation, principale cause de salinité (voir l'encadré).

Sur ce point, et sans modification de la gestion actuelle des eaux et des sols, les prévisions de l'audit sont pour le moins pessimistes. La salinité du fleuve Murray augmentera d'approximativement 50 % dans les cinquante prochaines années; dans une moindre mesure, on notera des répercussions similaires pour les bassins des rivières Macquarie, Namoi, Lachlan, Condamine-Balonne, Loddon et Avoca, les zones inondables de Chowilla et d'Avoca, ainsi que les marais de Macquarie et

Productivité ou écologie ?

Si l'irrigation à grande échelle des pâturages, capitale pour l'industrie laitière australienne, génère aujourd'hui richesses et emplois, elle le fait souvent au détriment de l'environnement.

Cumbung; les mêmes causes produisant les mêmes effets, la productivité agricole de 3 à 5 millions d'hectares de terres sera affectée de manière significative; enfin, au cours du siècle à venir, le montant des dégâts occasionnés par le sel aux infrastructures devrait atteindre quelque 600 millions de dollars par an (260 millions de francs).

Selon les estimations de l'audit, c'est à la mise en valeur des terres arides et au développement des pâturages et non à l'irrigation naturelle des sols qu'incombera la responsabilité de la hausse de la salinité du bassin. Alors que les régions d'irrigation concentrent, en principe, les plus grands volumes de sels, leurs systèmes actuels de gestion sont en effet suffisamment efficaces pour maintenir la salinité à un niveau convenable. A condition, toutefois, que les investissements nécessaires à cette stabilité se maintiennent.

Les développements industriels et agricoles élaborés au cours du siècle passé ont ainsi profondément modifié le système fluvial du bassin Murray-Darling. Si l'Australie veut conserver les bénéfices économiques qu'elle a su en tirer, et protéger l'environnement fluvial de la région, il va lui falloir cibler soigneusement les ressources, déjà limitées, du bassin. Et ce, au double profit de la productivité et de l'environnement. □



UN PROBLÈME SOLUBLE

C'est l'irrigation qui est responsable de la salinisation, c'est-à-dire l'augmentation de la salinité des sols. On estime que sur 280 millions d'hectares de terre irriguée, 50 millions sont concernés par des problèmes de salinisation. Encore que ce chiffre est probablement sous-estimé. Voyons le processus qui conduit à ce phénomène. Avant qu'une terre ne soit irriguée, les nappes phréatiques sont principalement approvisionnées par l'eau de pluie. Une eau pure. Pour une précipitation de 100 mm/an, on attend une quantité de 1 000 m³/an/ha. L'irrigation, elle, apporte des volumes bien supérieurs. De 5 à 10 fois plus. En outre, l'eau d'irrigation provient de rivières ou de fleuves. Et sa concentration en ions est en moyenne de l'ordre de 1 à 2 g/l, parfois plus. Aussi la conclusion est-elle simple. L'irrigation des terres induit un gonflement de la nappe phréatique. Et à une augmentation de sa salinité. Cet effet est renforcé par une mauvaise distribution. Souvent, du fait de fuites, une partie de l'eau est perdue le long de son acheminement. Elle ne va donc pas aux cultures mais directement dans la nappe. Mais ce n'est là que le début du processus. Car tant que le niveau de la nappe phréatique reste éloigné de la surface du sol, il n'y a aucune incidence sur les cultures. Alors que l'irrigation était



MDIC PICTURES

Prévisions pessimistes

Selon un audit, la salinité du bassin australien devrait croître de 50 % d'ici à 2050. A moins de modifier l'actuelle gestion des eaux et des sols.

pratiquée intensivement autour du globe depuis des décennies, ce problème de salinité n'a émergé que dans les années 1960-1970. En effet, les problèmes de salinité n'interviennent que lorsque la nappe n'est qu'à quelques mètres des racines des plantes. Il y a alors deux phénomènes simultanés. D'une part, le flux d'eau descendant, qu'il implique l'irrigation, lessive les sols et entraîne les sels vers la nappe phréatique. D'autre part, l'eau de la nappe, proche de la surface du sol, remonte par capillarité et s'évapore dans l'atmosphère. Cette remontée n'est possible qu'à partir d'une valeur seuil, dépendant de la nature du sol, comprise entre 2 et 4 mètres environ. Si la nappe est plus éloignée de la surface, alors la structure poreuse de la terre interdit la remontée capillaire. Grossièrement, les pores

du sol sec, proches de la surface, sont trop grands. Mais si la valeur seuil est dépassée, un flux ascendant vient enrichir le sol en sels minéraux contenus dans la nappe phréatique. Et augmente la salinité du sol. Pour préciser quelques ordres de grandeurs, la tolérance saline d'une plante est de 2,5 g/l, concentration définie pour un sol saturé en eau. Pour des concentrations en sels supérieures, les plantes ne pourront plus absorber l'eau du sol car leur système d'absorption racinaire n'est pas adapté à de telles salinités. Et on arrive aux conséquences de la salinisation des sols. D'abord, les rendements agricoles diminuent, puis il devient impossible de cultiver. Dans les cas extrêmes, des cristaux de sels se forment à la surface du sol. Les sels rencontrés dans la nappe phréatique sont

identiques à ceux de nos eaux minérales préférées. Sont présents majoritairement les cations alcalins et alcalinoterreux : ions sodium (Na⁺) et potassium (K⁺), ions magnésium (Mg²⁺) et calcium (Ca²⁺) et les anions chlorure (Cl⁻), sulfate (SO₄²⁻), carbonate (CO₃²⁻), ainsi que d'autres ions suivant les spécificités régionales. Si ces espèces sont sous forme ionique dans l'eau, lorsque l'eau remonte par capillarité et s'évapore, leur concentration s'élève. Se produit alors une précipitation en sels dans l'ordre des solubilités croissantes des différents composés possibles. Parmi les solutions destinées à enrayer ce problème de la salinité des sols, des mesures préventives empêchant l'élévation du niveau de la nappe phréatique. Pour cela, on peut rationaliser l'irrigation en distribuant l'eau en fonction des besoins de chaque parcelle. Le drainage permet aussi d'évacuer l'eau superflue et d'éviter qu'elle n'approvisionne la nappe. Si la salinité a déjà fait son œuvre, rendant la terre inculte, il est encore possible d'intervenir. La réhabilitation se fait en plusieurs étapes : lessiver les sols pour redissoudre les sels et les entraîner en profondeur ; puis, implanter des cultures peu exigeantes sur les conditions de salinité ; enfin, passer à la culture voulue. L'ensemble de ce processus prend un peu plus de cinq ans.

Serge Dellerue

De l'eau pour tous

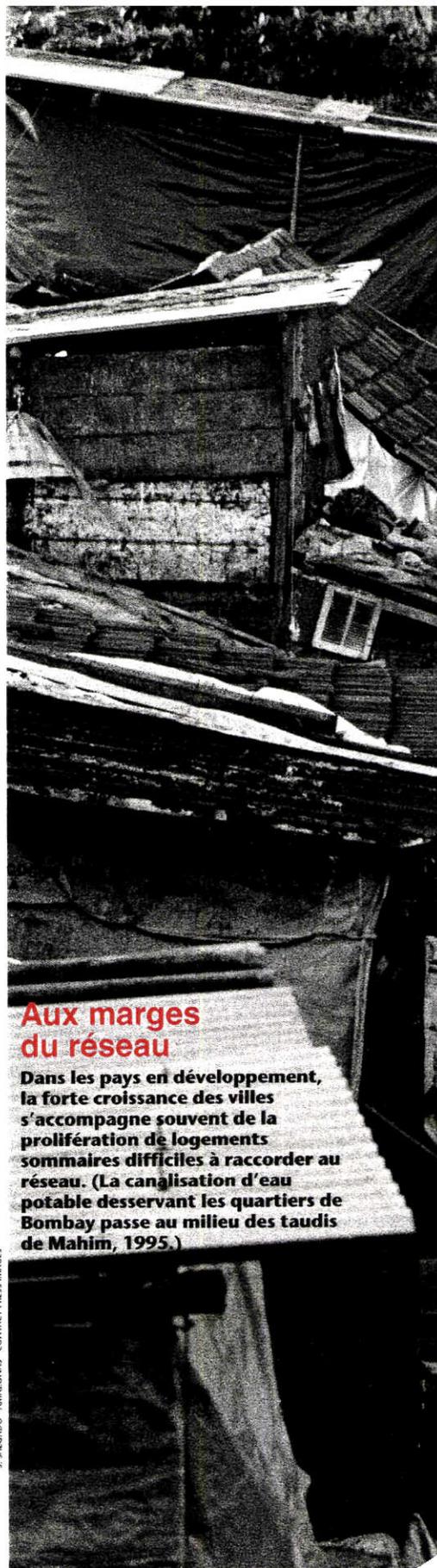
1,4 milliard de personnes, en majorité dans les pays en voie de développement, n'ont toujours pas accès à une eau saine. Comment apporter l'eau à des populations aux faibles revenus? Quelques réponses.

PAR SOPHIE COISNE

Ce devait être le siècle de l'abondance. Celui où, de Calcutta à Buenos Aires, l'eau potable coulerait dans chaque foyer. Mais les chiffres font mentir les rêves : l'an 2000 à peine franchi, 1,4 milliard de personnes n'ont toujours pas accès à l'eau potable. 2,3 milliards sont privés de système d'assainissement, selon la Commission mondiale sur l'eau pour le XXI^e siècle.

Beaucoup, pourtant, a été fait pour échapper à cette réalité. Durant les années 80 – la « Décennie de l'eau » – plus de 130 milliards de dollars ont ainsi été investis dans l'approvisionnement en eau et l'assainissement des pays en voie de développement, lesquels rassemblent la majorité des oubliés du réseau. Plus d'un milliard de personnes ont alors gagné l'accès à une eau saine, 750 millions à une collecte adéquate des eaux usées.

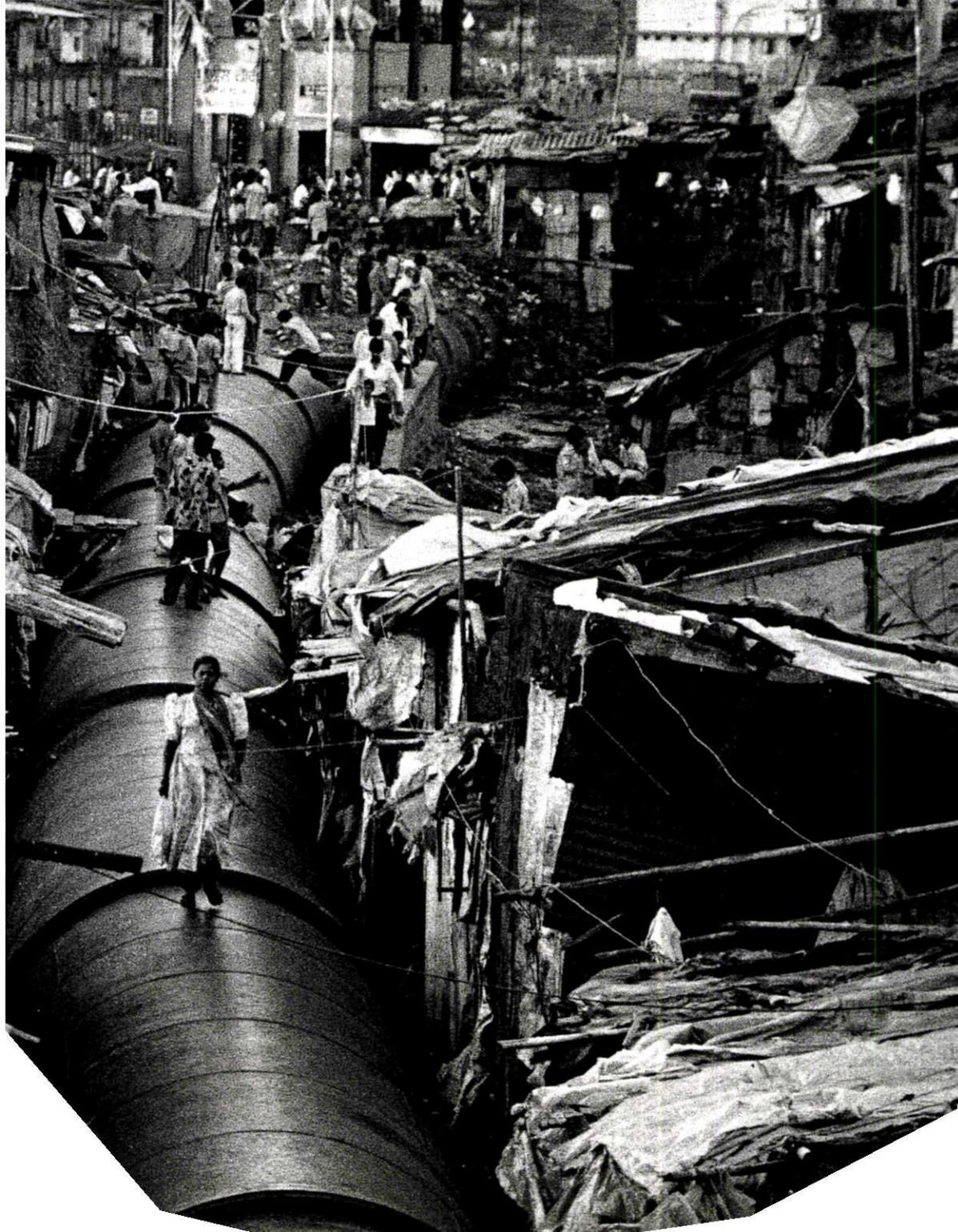
En fait, si les objectifs de l'eau pour tous n'ont pas été atteints, ce n'est pas tant faute de moyens que d'une stratégie adaptée au contexte très par-



Aux marges du réseau

Dans les pays en développement, la forte croissance des villes s'accompagne souvent de la prolifération de logements sommaires difficiles à raccorder au réseau. (La canalisation d'eau potable desservant les quartiers de Bombay passe au milieu des taudis de Mahim, 1995.)

S. SALGADO - AMAZONAS CONTACT PRESS IMAGES



ticulier des pays du Sud. « Dans la plupart des cas, remarque Alain Mathys, directeur de projet à la Lyonnaise des eaux, les services de l'eau se sont montrés incapables de satisfaire la rapide expansion des villes et des zones de faibles revenus ». Les taux d'urbanisation les plus importants s'observent dans les pays en développement, en effet. A leur tête : l'Afrique. Nairobi, Dar es-Salaam, Kinshasa... ont vu leur population multipliée par sept entre 1950 et 1980 et se sont développées deux fois plus vite que les villes sud-américaines comparables.

BIDONVILLES ET FAIBLES REVENUS

Or cette expansion urbaine se caractérise souvent par la construction, en banlieue, d'habitations sommaires. « Les quartiers péri-urbains défavorisés représentent, par exemple, les deux tiers de Durban, en Afrique du Sud », remarque Marie Margueritte Bourbigot, directrice du développement technique et de l'innovation de Vivendi Water. Des chemins de terre serpentent entre les nouveaux logements installés au petit bonheur la chance, et bien souvent sans autorisation municipale. Ce manque de structure entrave le raccordement des nouveaux quartiers au réseau d'eau potable et d'assainissement.

De fait, sans réseau routier digne de ce nom, il est difficile de poser des canalisations et d'étendre la collecte des eaux usées aux nouveaux habitants, qui se contentent généralement de creuser une fosse septique commune. Parfois, les municipalités classent tout bonnement ces quartiers en « zones non autorisées », les excluant ainsi de tout service public : eau, électricité, téléphone. Manière de ne pas affronter le problème ? « A Casablanca, à Buenos Aires, les gouvernements ne souhaitent pas que l'on intervienne dans les bidonvilles, jugés trop éphémères », explique Alain Mathys.

Ce vide de service laissé par les pouvoirs publics et les agences d'assainissement est en général comblé par une foule de fournisseurs indépendants qui revendent l'eau... à prix d'or. C'est le cas de Port-au-Prince, à Haïti, qui a connu un développement important du service privé de l'eau, suite aux difficultés de l'Etat à le garantir. Des forages, des citernes ont fleuri aux abords de la ville, tant et si bien que les réseaux de distribution al-

Service minimum

Durant les années 80, des milliards de dollars ont été investis dans l'approvisionnement en eau. On s'était pris à rêver qu'à l'aube de l'an 2000, l'eau potable coulerait dans chaque foyer.

favorisées parviennent tout de même à combler leurs (petits) besoins en eau. Car les fournisseurs privés savent adapter leur service au plus modeste des revenus. A Ouagadougou, par exemple, des porteurs d'eau revendent le liquide au litre, ce qui permet aux habitants les plus démunis – journaliers pour la plupart – d'acheter leur ration tous les matins. Car voilà bien la troisième raison pour laquelle l'accès à l'eau est difficile dans les villes en développement : les nouveaux citadins n'ont pas les moyens de payer les infrastructures nécessaires à leur raccordement au réseau. Ainsi, selon le Water and Sanitation Program de la Banque Mondiale, dans dix pays africains représentatifs, 80 % des habitants vivent avec moins d'un dollar par jour. La plupart ne peuvent consacrer que 5 à 20 \$ par an et par foyer pour l'eau et l'assainissement... contre 100 à 200 \$ dans les pays industrialisés.

GESTION PAR LA BASE

En 1992, les participants de la Conférence internationale sur l'eau et l'environnement de Dublin ont convenu d'une chose : l'accès à l'eau de tous ne peut être possible que si sa gestion est confiée aux utilisateurs. « Il est en effet indispensable d'intégrer les populations dans toutes les discussions », appuie Marie Margueritte Bourbigot, qu'il s'agisse du choix des technologies, du niveau de service ou des modes de paiement ».

La Tanzanie s'est ainsi dotée, en 1991, d'un Code national de l'eau reconnaissant la nécessité d'une gestion communautaire de la ressource. Dans la région de Dodoma, où femmes et enfants pouvaient parcourir 12 km en quête d'eau, chaque village a formé un « Comité de l'eau et de la santé ». Aidées par des animateurs gouvernementaux, les communautés ont élaboré un projet adapté à leurs besoins, puis signé un contrat avec le gouvernement : ce dernier s'engageait à verser une contribution financière annuelle et une organisation non gouvernementale, WaterAid, apportait les fonds nécessaires à l'achat d'une partie de l'équipement. En contrepartie, les villages met-



sation et une implication poussée des futurs utilisateurs.

« Seule la capacité à payer de la communauté permet de choisir le niveau de service adéquat », reprend Marie Marguerite Bourbigot. Il est en effet irréaliste, au nom de l'accès de tous à l'eau potable, de vouloir installer un robinet dans chaque foyer : cette exigence rendrait le projet coûteux donc irréalizable à grande échelle. A l'heure actuelle, les opérateurs privés proposent plutôt des services d'eau à la carte. « A Durban, continue la directrice de Vivendi Water, chacun peut puiser gratuitement 6 m³ d'eau potable par mois dans un réservoir situé à moins de 200 m de

LE DIFFICILE RECOUVREMENT DES FACTURES

Pas facile d'obliger les populations défavorisées à payer leur eau. Le faible recouvrement des factures a souvent poussé les compagnies de l'eau à cesser le service. A Yaoundé, par exemple, la distribution gratuite de l'eau a cessé en 1993 pour cause de non-solvabilité des communes envers la Société nationale des eaux du Cameroun. Pour éviter cette mesure extrême, la question du recouvrement des factures est parfois évoquée dès la mise en place du projet d'approvisionnement en eau.

« A El Alto, en Bolivie, explique Alain Mathys, directeur de projet à la Lyonnaise des eaux, il n'existait que deux bureaux de paiement des factures. Pour s'y rendre, il fallait dépenser un dollar, ce qui correspondait au taux moyen d'une facture d'eau ! Pour encourager les gens à payer leur facture, nous avons donc mis en place des bureaux mobiles qui

passent de quartier en quartier. »

Les mesures se font parfois plus radicales, comme à Port-au-Prince. Depuis 1994, un système de distribution d'eau par bornes fontaines payantes a été mis en place, grâce à un financement de l'Union européenne et de la Caisse française de développement. Un réseau principal, public, géré par la Camep, amène l'eau au compteur des 14 quartiers concernés. Chaque quartier récupère la quantité nécessaire à 24-48 heures de consommation, et la stocke dans un réseau particulier (1,5 km de canalisations en moyenne) dont la gestion est confiée à un comité de l'eau. Le liquide, au compteur, est facturé 2 F par mètre cube et revendu dans l'arrondissement au prix de 5F. Le comité récolte l'argent recueilli et paye les factures de la compagnie publique. Depuis, la Camep recouvre 100 % de ses factures.

son habitation. Ce service minimum a été exigé par la ville. Les quartiers disposant de davantage de moyens peuvent toutefois choisir d'installer des réservoirs sur le toit de chaque maison. Le mètre cube d'eau sous faible pression revient alors à 1,94 rand soit 1,9 F environ. Les quartiers plus aisés, enfin, peuvent demander l'installation du robinet pleine pression. L'eau coûte alors 2,89 rand le mètre cube jusqu'à 30 m³ et 5,57 rand/m³ au-delà. »

L'augmentation du prix du mètre cube en fonction du volume utilisé a deux buts : limiter la consommation d'eau dans un pays qui en manque, puis faire payer aux populations aisées une partie des infrastructures destinées aux quartiers pauvres. Le bénéfice réalisé de cette manière s'ajoute aux fonds mis en place par les communautés d'utilisateurs. « A Jakarta, les touristes participent aussi à l'extension des réseaux vers les banlieues défavorisées : les grands hôtels payent plus cher le mètre cube », explique Jean-Luc Trancart, directeur de la clientèle à la Lyonnaise des eaux.

On peut imaginer qu'à l'avenir cette pratique soit généralisée et que du plus riche au plus pauvre, chacun mette la main à la poche pour l'installation du réseau. Toutefois, la plus grosse partie des investissements proviendra toujours du secteur privé et associatif. Actuellement, 80 % des investissements dans les réseaux d'eau potable et d'assainissement réalisés en Afrique proviennent de fonds externes, 55 % à l'échelle mondiale. « L'essentiel des investissements doit en effet être réalisé en début de contrat, lorsqu'il s'agit de payer les équipements et leur installation », note Jean-Luc Trancart. Un effort que les communautés ne peuvent généralement pas faire. Par conséquent, la Banque mondiale, les Banques de développement, les ONG et les opérateurs privés financent les équipements, calculent un amortissement à long terme et se font rembourser petit à petit par les usagers et/ou les municipalités. 15 millions de francs ont ainsi été investis dans le projet de Durban par Vivendi Water, l'ONG sud-africaine Mvula Trust, la ville de Durban et Umgeni Water, un producteur public d'eau potable.

Mais on l'a vu, les quartiers où la connexion au réseau s'avère nécessaire sont aussi des quartiers temporaires. L'amortissement de leurs infrastructures doit donc être calculé sur dix ou vingt ans au lieu des cinquante habituels, ce qui augmente du même coup les mensualités... La solution ? « Mettre en place des structures plus souples et moins chères, remarque Alain Mathys. Cela n'a pas de sens de construire dans des bidonvilles des réseaux traditionnels qui ne peuvent être amortis



Les berges de la survie
 Souvent, lorsque l'eau existe, la question de l'assainissement se pose avec acuité. (Kuala Lumpur, Malaisie.)

D. NUNUK - SPL / COSMOS

qu'en un demi-siècle. » L'exemple nous vient du Brésil. Au lieu de passer sous les rues et d'en suivre le schéma d'implantation, les canalisations de Brasilia passent à travers les jardins et sont enterrées sous une faible profondeur. L'installation de ces systèmes condominaux – conçus par le Brésil, puis appliqués par la Lyonnaise des eaux à la Bolivie et quelques villes africaines – a permis de réduire les coûts de connexion aux réseaux d'eau potable et d'assainissement de 50 à 70 %. Donc de se satisfaire d'un amortissement de courte durée.

TECHNOLOGIE ADAPTÉE

Solutions moins coûteuses, plus vite amorties... Sous prétexte de fournir l'eau à tous, installerait-on dans les pays en développement des infrastructures au rabais ? Les opérateurs privés s'en défendent. « *Les infrastructures que nous développons pour les pays industrialisés sont conçues pour s'intégrer dans un réseau existant depuis 40 ans, explique Marie Margueritte Bourbigot. Il serait idiot de les transposer dans des pays où les réseaux sont plus récents voire inexistant. Pourquoi ne pas imaginer de nouvelles voies d'adduction et de collecte des eaux usées, histoire de ne pas reproduire nos vieilles erreurs ?* »

La question se pose particulièrement pour l'assainissement. Dans les villes françaises, les habitations sont le plus souvent raccordées à un système de collecte central. Les eaux usées sont transportées dans les canalisations à grand renfort

d'eau douce et produisent souvent du sulfure de dihydrogène (H_2S) qui corrode les tuyaux. « *Dans les pays en développement, remarque Marie Margueritte Bourbigot, on peut imaginer récupérer et traiter les eaux usées plus localement, ce qui permettrait de réduire la longueur des canalisations, les coûts de maintenance et de faire des économies d'eau douce. L'autre idée est de mettre au point des technologies de traitement robustes pouvant être facilement gérées par les populations du coin.* » L'entretien des équipements est en effet aussi important que leur financement. C'est pourquoi nombre d'ONG impliquent les utilisateurs dans cette dernière phase du projet, en leur offrant une formation puis un travail. A Buenos Aires, un troc de main-d'œuvre a même été mis en place, lorsque le nouvel opérateur, Aguas Argentinas, a décidé de faire payer les charges d'infrastructures – 500 à 1000 dollars – à ses clients. Les plus défavorisés ont obtenu un raccordement gratuit au réseau en échange de petits travaux d'entretien.

Si, donc, la Décennie de l'eau n'est pas parvenue à fournir l'eau potable à tous, elle aura au moins abouti à une quête intense de solutions, aussi bien techniques qu'économiques ou sociales. Elles sont aujourd'hui si nombreuses que la Banque mondiale, en partenariat avec les grands opérateurs de l'eau et quelques ONG, a lancé le Business Partners for Development. Un programme de trois ans destiné à les comparer et développer dans l'avenir les plus efficaces. Souhaitons que ce ne soit pas un coup d'épée dans l'eau. ▢

Brèches dans les barrages

Dans l'échelle de l'exécution écologiste, les barrages – au moins les grands – ont depuis peu pris place au côté des réacteurs nucléaires. Certes, admet-on, l'énergie qu'ils produisent est propre et renouvelable, mais à quel prix : déplacements forcés de population, dénaturation des paysages, fragilisation accélérée d'écosystèmes le plus souvent déjà fragiles, etc.

Voilà donc lancé un débat dont la journée internationale d'action contre les barrages, instaurée depuis trois ans tous les 14 mars par des militants anti-barrage, souligne (encore discrètement) le caractère transfrontière.

Avant d'exposer les termes de la controverse, un fait est à noter : l'ancienneté et l'ubiquité de la pratique qui consiste à barrer des cours d'eau. Exemples : un barrage d'endiguement remontant à quelque 5000 ans a été mis au jour en 1998, dans l'Etat du Gujarat, en Inde occidentale, et l'on s'attend à en découvrir de plus anciens encore dans l'aire des civilisations de la Vallée de l'Indus.

DÉJÀ DANS L'ANTIQUITÉ...

Plus près de nous, en Egypte – le pays le plus riche en vestiges de constructions hydrauliques –, un ouvrage, datant de 2800 avant notre ère, a été excavé, à Sadd el-Kafara, près du Caire. Avec 14 mètres de hauteur pour 113 mètres de longueur, ses dimensions, même si elles n'ont rien à voir avec celles des constructions actuelles, sont cependant impressionnantes. Cet ouvrage, dont les archéologues ont observé qu'il avait cédé à plusieurs reprises, était destiné à contenir dans un

Bien que l'énergie qu'ils produisent soit propre, les barrages mobilisent contre eux les défenseurs de l'environnement naturel. Leurs griefs sont nombreux. Et les coups – notamment les pressions financières – pleuvent.

PAR STÉPHANE FOUART

ment reste une pratique commune à la plupart des civilisations. Perses, Babyloniens et Assyriens en Mésopotamie, Nabatéens et Sabéens dans la péninsule Arabique, tous les peuples de la région érigent en effet, avant la domination romaine, ces édifices aux pentes molles qui retiennent dans les vallées, l'eau des crues hivernales. Ces barrages, à section pyramidale, dépassent rarement une quinzaine de mètres de hauteur et sont en général simplement constitués d'un amoncellement de pierres grossièrement cimentées. Toutefois, celui de Ma'rib (actuel Yémen), vestige du royaume de Saba (900-115 av. J.-C.), est déjà équipé de déversoirs, et peut donc faire face aux crues les plus importantes. Plus de mille ans durant, il permettra d'irriguer 1600 hectares, avant d'être détruit par un tremblement de terre vers le VI^e siècle.

Aujourd'hui encore, le manque de ressources hydriques reste un argument de poids en faveur de l'aménagement des cours d'eau. Prenons l'exemple de la Jordanie. Environ 80 % de l'eau qu'on y consomme vient de la pluie. Mais une immense partie de cette manne est « perdue par ruissellement » si rien ne vient endiguer les éphémères crues hivernales.

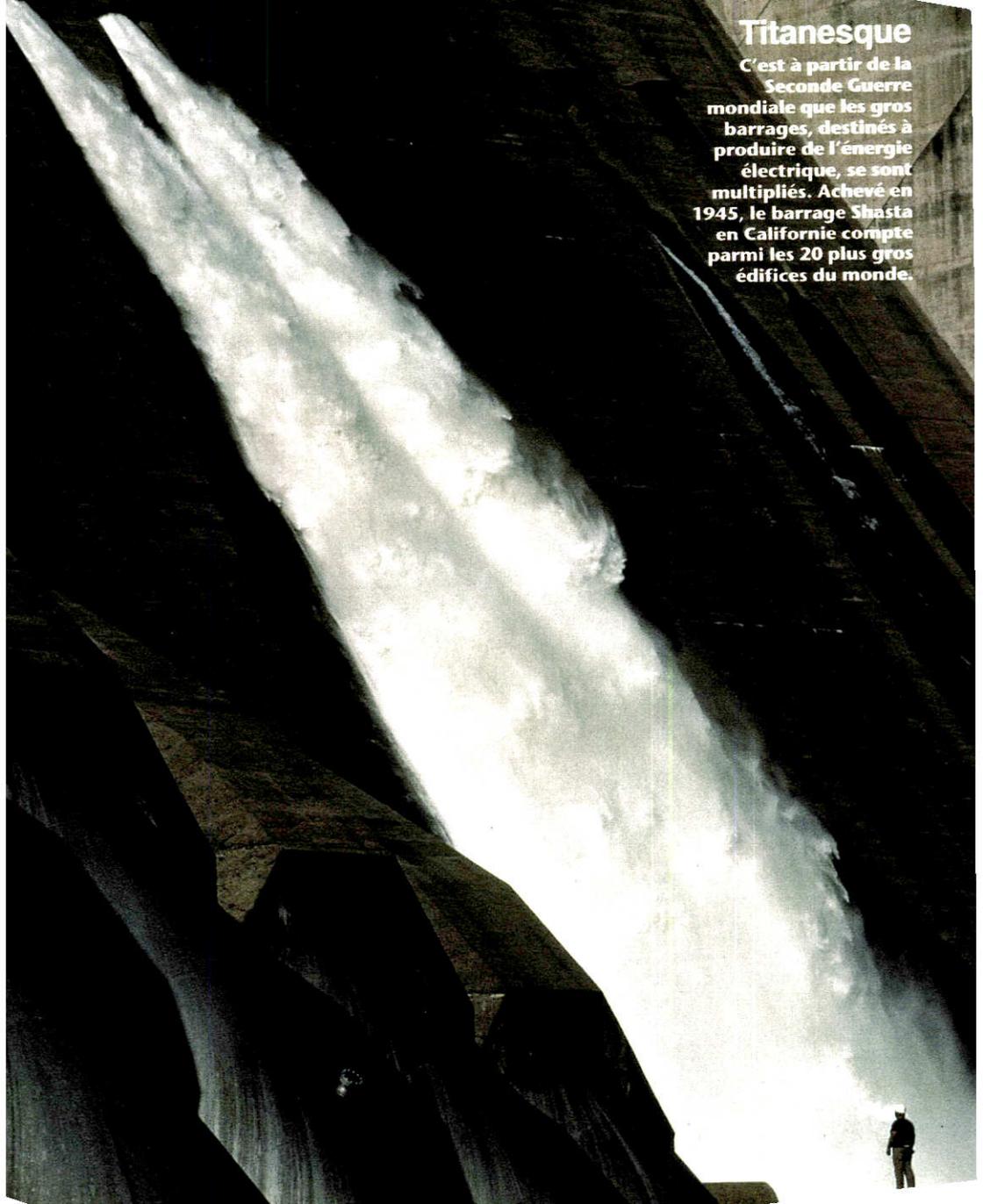
Depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale,

vaste bassin les crues rares – mais violentes – de l'un des bras du Nil. 1500 ans plus tard, les ingénieurs égyptiens construiront un autre édifice de cette taille mais cette fois sur l'Oronte – actuelle Syrie – aux crues moins impétueuses que celles du Nil.

Plus tard et dans le reste du Proche-Orient antique, la construction de barrages d'endiguement

Titanesque

C'est à partir de la Seconde Guerre mondiale que les gros barrages, destinés à produire de l'énergie électrique, se sont multipliés. Achevé en 1945, le barrage Shasta en Californie compte parmi les 20 plus gros édifices du monde.



l'enjeu principal des barrages s'est toutefois déplacé : il s'est recentré sur l'énergie. Actuellement, environ 18 % de la production mondiale d'électricité est d'origine hydraulique et les plus gros constructeurs de barrages sont les pays du tiers monde. Confrontées pour leur développement à la croissance très forte de leurs besoins en énergie – la Chine, pour ne citer qu'elle, a, entre 1996 et 2000, vu sa consommation électrique augmenter de 8 à 9 % par an – des nations comme l'Inde, la Chine ou la Turquie rivalisent dans la mesure de leurs projets.

Dans les pays industrialisés, la tendance est désormais inverse : on y construit de moins en moins de ces ouvrages. D'abord et surtout parce que, dans la plupart des cas – en France notamment – la quasi-totalité des sites favorables est déjà exploitée. Ensuite parce que ce type d'installation est de plus en plus souvent critiqué. Citons l'exemple des Etats-Unis où, sous la pression des lobbies écologistes, plus de 120 barrages ont été détruits au cours des vingt dernières années... (On notera, au passage, que cela n'empêche pas ce pays de rester le deuxième producteur mondial d'hydroélectricité – 260 milliards de kWh par an – derrière le Canada, dont la production annuelle – 315 milliards de kWh par an – équivaut à la moitié de toute la production asiatique).

Selon les estimations d'EDF, alors qu'en Europe le taux d'exploitation des sites potentiels est de 70 % (les 30 % restants se situent en Europe de l'Est), dans les pays en voie de développement, il ne dépasse pas 15 à 20 %. Cet écart constitue évidemment un très important marché potentiel pour les entreprises du génie civil et d'ingénierie électrique des pays industrialisés, susceptibles de concourir dans les appels d'offres lancés par les pays qui veulent s'équiper. EDF, pour sa part, s'y trouve d'ailleurs très impliquée.

LE DERNIER MASTODONTE

Dans les projets en cours, force est de constater que la règle est au gigantisme. Citons en exemple le barrage des Trois-Gorges, sur le Yang-Tsé, en Chine. Cet ouvrage, le plus grand jamais construit, est prévu pour fournir, dès 2011, une puissance de près de 18 000 mégawatts (MW) : l'équivalent de quelque 18 réacteurs nucléaires. Les 4 milliards de mètres cubes d'eau qu'il retien-

si vocation à contribuer de façon majeure à l'aménagement du territoire – plus de 600 kilomètres de voies navigables vont être créés – et à réguler le cours du fleuve en écrétant des crues parfois meurtrières.

Les détracteurs du projet le voient évidemment d'un œil très différent. Ils mettent en avant la disparition de sites archéologiques et la nécessité d'expropriations étendues : 4 500 villages, 19 districts et villes sous l'eau ; un à deux millions de paysans déplacés. Ils rappellent qu'en Inde, pas moins de 35 millions de personnes ont, en 50 ans, été déplacées par suite de l'application du principe : « *Un cours d'eau, un barrage* ».

Ce même principe, revu et corrigé par les écologistes, devient : « *Une rivière coupée est une rivière morte* ». Il est en effet indubitable que la construction d'un barrage ne laisse jamais intacts les écosystèmes existants. Certains poissons – bars rayés, esturgeons, saumons, etc. – ne peuvent plus se déplacer librement au long du fleuve ou effectuer les migrations qui leur sont vitales. En outre l'immersion des berges en amont de l'ouvrage détruit les espèces végétales et animales qui y vivent. De proche en proche, c'est l'équilibre entre le fleuve et ses rives qui se trouve ainsi transformé.

Dans les pays industrialisés, où l'on se penche désormais de près sur l'aménagement des installations existantes, la restauration de cet équilibre est d'ailleurs de plus en plus à l'ordre du jour. Selon Joseph Eon, délégué à l'environnement chez EDF, c'est même en France qu'on va le plus loin pour, dès la construction, limiter l'impact sur l'environnement. « *La loi sur la pêche en eau douce et les ressources piscicoles de 1984 prévoit de laisser un débit minimum dans la rivière, fixé à 10 % du débit moyen du cours d'eau [non aménagé] pour les ouvrages nouveaux et à 2,5 % du débit moyen pour les ouvrages renouvelés* ».

Un autre argument est couramment lancé à l'encontre des barrages : les eaux des lacs de retenue, destinées en principe à l'irrigation, sont en réalité infertiles, par suite de la sédimentation des limons et des alluvions en amont du barrage. L'exemple du barrage d'Assouan (achevé en 1965) est souvent cité à l'appui. On trouve en effet, souligne-t-on, une certaine ironie à voir près du tiers de l'électricité produite par ce gigan-



La muraille du Colorado

Aux Etats-Unis, un grand nombre de barrages ont été détruits sous la pression des écologistes. Malgré tout, l'oncle Sam reste le deuxième producteur mondial d'hydroélectricité. (Barrage Hoover, dans le Nevada.)

R. CAMERON - FOTOGRAF-STONE IMAGES PARIS

fondeurs des retenues, quand elle n'est pas trop riche en azote ammoniacal par l'effet du développement de certaines algues, est presque toujours très pauvre en oxygène.

Ces deux problèmes, aujourd'hui, ne sont pas sans solution. Concernant le premier, il existe en effet des systèmes de drainage qui permettent de réincorporer une partie des limons fertiles dans l'eau rejetée en aval du barrage. En outre, les installations les plus modernes autorisent un type de lâchers d'eau dans lesquels les matériaux d'ordinaire transportés par les rivières sont expulsés en aval. Quant au second problème, outre qu'il est possible de modifier les prises d'eau dans les retenues, on peut également réoxygéner l'eau en aval du barrage grâce à la mise en place de déversoirs pour aérer l'eau turbinée. EDF applique d'ailleurs ce type de solution sur le barrage de Petit-Saut en Guyane, un site où la préservation d'un biotope rare est une obligation. Enfin, pour les petites retenues, il reste la possibilité d'injecter, dans la profondeur du lac, de l'eau sous pression. « C'est ce qu'on fait dans les retenues destinées à l'alimentation en eau potable, explique Jacques Masson, délégué hydraulique à EDF, là où une qualité minimale est requise avant traitement. »

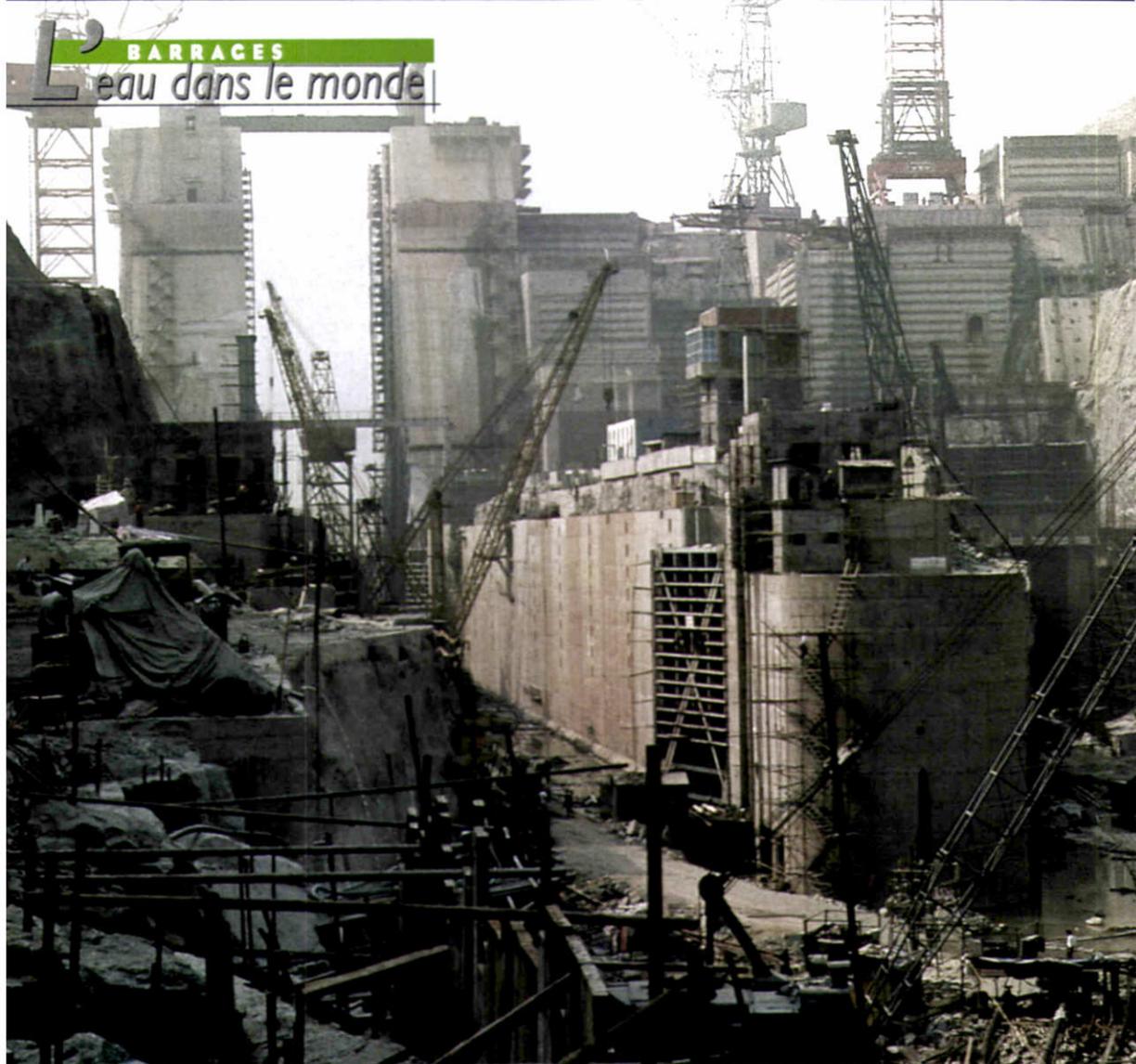
Toutes ces dispositions, certainement efficaces, partagent cependant une contrainte : elles nécessitent des investissements supplémentaires. Trop coûteuses donc pour les pays en voie de développement, arguent les Verts.

LES EFFETS SUR LA SANTÉ

Moins sujets à discussion sont les arguments qui exposent l'impact négatif des barrages sur la santé publique. En Egypte, la recrudescence de la bilharziose, quelques années après la mise en service du barrage d'Assouan, avait déjà été constatée. Depuis, une étude de l'OMS, menée en Côte d'Ivoire à proximité des grands barrages de Kossou et Taabo, a confirmé le constat. Dans les villages proches des lacs de retenue, la prévalence de la maladie a augmenté. Dans la région de Kossou, l'impact de cette pathologie est passé, depuis la construction du barrage, de 14 % à 53 %. Dans celle de Taabo, où la bilharziose n'existait pas, sa prévalence dans la population relogée aux alentours immédiats du lac atteint désormais 73 %. Même constat en Mauritanie, où le barrage édifié sur le fleuve Sénégal a introduit dans la région l'un des parasites de la bilharziose, ainsi que l'anophèle, le vecteur du paludisme.

BARRAGES

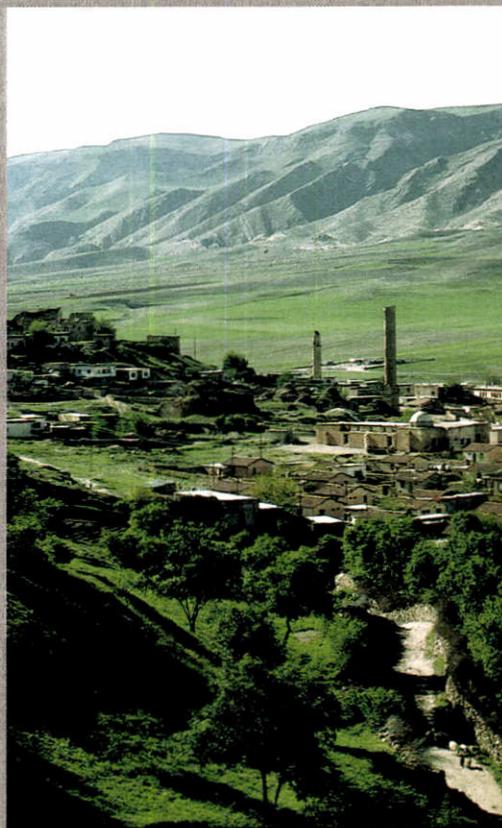
L'eau dans le monde



Une levée de boucliers

Dernier géant en construction, le barrage des Trois-Gorges, sur le Yang-Tsé, en Chine (ci-contre, chantier d'une écluse). Or pour leurs détracteurs, les gros barrages accumulent les inconvénients : déplacements de populations à grande échelle (à droite, Hasankeyf, ville kurde sur le Tigre, Turquie); eaux des lacs de retenue infertiles (barrage d'Assouan, 1965, en bas à gauche) – et pauvres en oxygène. Ce dernier problème n'est pas insoluble : placés en aval du barrage de Petit-Saut en Guyane (ci-dessous) des déversoirs permettent d'aérer l'eau turbinée.

WALLIS - SABA - REA



REVELLI - REA



A. CERQUEIL - MEDIATHEQUE EDF

Pour finir, les détracteurs des barrages évoquent un risque qui, pour être extrêmement faible, n'est pas inexistant : l'effondrement de l'ouvrage sous le poids de crues exceptionnelles. En 1975, en Chine, un tel accident – la rupture des ouvrages de Banqiao et Shimanqiao – aurait, selon *Human Rights Watch Asia*, causé la mort de plus de 200 000 personnes. Là encore, cependant, tous les pays ne sont pas égaux devant un tel risque. En France, des normes strictes de suivi et d'entretien interviennent tout au long de la vie du barrage et bien entendu, lors de sa construction. Or, jusque récemment et à en croire des quotidiens publiés à Hong-Kong, cette contrainte semblait peu présente sur le site des Trois-Gorges. Béton et acier de mauvaise qualité, plans de construction non respectés, fissures révélées au niveau des évacuateurs de crue auraient ainsi obligé les autorités chinoises à dépêcher sur le chantier près de 2 000 contrôleurs chargés de veiller à la qualité des travaux. Il va sans dire que la rupture, pour une raison ou une autre, d'un tel ouvrage provoquerait des dégâts à tout le moins considérables...

Toutes ces critiques viennent se cristalliser dans une contestation qui se développe sur le projet des Trois-Gorges. Une contestation qui apparaît toutefois plus discrète en Chine qu'en Occident, où les lobbies écologistes tentent de faire pres-

sion sur les banques d'investissement et les bailleurs de fonds internationaux. Déjà, plusieurs grands groupes financiers, comme la Citibank, auraient assuré leurs actionnaires que les capitaux investis en Chine ne seraient pas injectés dans les Trois-Gorges.

LE BRAS DE FER

Une telle stratégie a pu, semble-t-il, porter ses fruits. Au moins pour un temps. En 1991, sous la pression des Verts, le gouvernement japonais avait ainsi renoncé à financer le projet d'aménagement de la vallée de la Narmada, en Inde. Un projet qui prévoyait la création de plusieurs dizaines de barrages. En 1993, la Banque mondiale s'est ensuite alignée sur la décision nipponne et en 1995, la Cour Suprême indienne elle-même a rendu un arrêt de suspension des travaux. Depuis l'année dernière, elle est cependant revenue sur cet arrêt et aujourd'hui le projet se voit relancé.

Cet exemple est de fait révélateur des limites des stratégies qui utilisent le relais des financements externes pour obliger un Etat à renoncer à ses projets. S'agissant du barrage des Trois-Gorges, s'il est vrai que le coût élevé de l'investissement – 25 milliards de dollars – implique l'appel à des capitaux étrangers, qui peut sérieusement penser que Pékin, sans le relais d'une contestation nationale, puissante et organi-

sée du projet, s'inclinerait devant de telles pressions ?

L'histoire du projet GAP (Great Anatolian Project) en Turquie illustre à lui seul toute la complexité de ce type d'entreprise. Actuellement en cours de réalisation pour un achèvement prévu en 2015-2020, ce projet porte sur la construction de 22 barrages sur le Tigre et l'Euphrate. Son financement n'est pas à ce jour bouclé. Seule la moitié des 32 milliards de dollars nécessaires a été réunie, et sur cette somme, la part des prêts internationaux ne dépasse pas 2,1 milliards de dollars.

Le GAP doit s'intégrer à un projet global de développement économique du Kurdistan turc, une région pauvre et politiquement instable. Il doit, à terme, permettre l'irrigation de 1,7 million d'hectares (soit un cinquième des terres irrigables turques) et la fourniture de 27 milliards de KWh par an. En assurant le développement de la



DUMONT - REA

Un refuge de parasites

Une étude de l'OMS, menée en Côte d'Ivoire, le confirme : les lacs de retenue des barrages ont augmenté la prévalence de la bilharziose dans les villages alentour. (Barrage de Kossou.)

Tensions en série

Autre problème soulevé par les barrages : le partage des fleuves entre pays frontaliers. Ainsi, le projet de l'État turc de construire 22 barrages sur le Tigre et l'Euphrate alourdit le contentieux avec la Syrie et l'Irak, situés en aval. (Barrage Ataturk sur l'Euphrate.)



M. BEZIAT - COSMOS

région, Ankara espérait mettre en veilleuse durablement les troubles qui agitent depuis des décennies le Sud-Est anatolien. Mais des expropriations qui, là encore, promettent d'être massives et l'opposition croissante de la population locale conduisent à l'effet contraire : le GAP est finalement devenu le cheval de bataille des séparatistes.

Critiquée à l'intérieur de ses frontières, la Turquie s'expose à l'extérieur au mécontentement de la Syrie et de l'Irak, traversés en aval par le Tigre et l'Euphrate. En stockant des quantités considérables d'eau sur son territoire, elle en prive de fait ses deux voisins arabes.

Ce contentieux met en évidence le délicat problème du partage de l'eau des fleuves transfrontaliers. La « *Convention d'Helsinki sur l'utilisation de l'eau des cours d'eau et des lacs internationaux* », qui fait autorité en la matière, recommande que les parties partagent de façon « *raisonnable et équitable les ressources des bassins hydrographiques internationaux* ». Formulation assez vague qui prend en compte des facteurs aussi divers que la pluviométrie dont disposent les parties, la contribution de chacun à l'eau du bassin hydrographique ou encore l'utilisation traditionnelle de cette eau de part et d'autre des frontières. Dans ce cas précis, la forte contribution de la Turquie au bassin hydrographique des deux fleuves lui donne le droit de stocker sur son territoire la

quantité d'eau prévue par le GAP. Toutefois, l'utilisation « traditionnelle » du Tigre et de l'Euphrate faite par leurs populations donne également à la Syrie et à l'Irak le droit de contester le projet turc...

En dépit des tensions et difficultés auxquelles les barrages hydroélectriques sont désormais associés, il serait pourtant bien imprudent d'en prédire la disparition à terme. Acquérir une certaine indépendance énergétique est un objectif très fort – parfois vital – pour les pays qui les mettent en chantier. Face à lui, une forte mobilisation des mouvements écologistes ne pourra que ralentir la marche des constructions, démobiliser certains investisseurs, faire pression sur les bailleurs de fonds internationaux. Mais les Verts ne semblent pas en mesure de faire fléchir les nombreux pays qui ont choisi l'exploitation intensive de leur potentiel hydroélectrique.

L'avenir est-il aux petites installations, qui affectent moins l'environnement que les grands barrages ? « *Chaque cas est à étudier en fonction des objectifs que l'on recherche*, estime Jacques Masson. *En France, nous avons connu ce débat dans les années cinquante, notamment à propos d'un grand ouvrage sur la Durance qui est aujourd'hui reconnu par tous comme très utile : plus de réserves d'eau, plus de développement touristique dans une région auparavant assez pauvre...* » □

Traquer le gaspillage

Comme tous les agriculteurs du nord-ouest du Texas, James Mitchell sait que l'eau qui irrigue ses champs sera de plus en plus difficile à puiser. De nouvelles technologies lui permettent de limiter le gaspillage tout en accroissant ses rendements.



Texas :

Produire plus avec moins d'eau

L'agriculture peut-elle continuer à augmenter ses rendements tout en réduisant ses besoins en eau ? C'est le pari qu'ont lancé les agriculteurs des hautes plaines semi-arides du Texas. Une aventure risquée, dans laquelle ils jouent leur survie économique.

PAR EMMANUEL MONNIER



« Ici, chaque gallon ⁽¹⁾ d'eau puisé dans le sol doit produire un maximum ». Casquette vissée sur la tête pour se protéger du soleil.

Larry Gamble, 52 ans, résume d'une phrase l'obsession des milliers d'agriculteurs qui, comme lui, s'efforcent de faire des hautes plaines du nord-ouest du Texas l'une des régions agricoles les plus productives au monde. Ses terres, comme celles de ses voisins, sont encore nues en ce début d'avril. Mais dans quelques semaines toutes se couvriront de coton. Du coton à perte de vue, sur



Une plaine écrasée de soleil

Forte température, air sec et vents violents : les conditions climatiques que mesure l'ingénieur agronome Arland Schneider, à Bushland, provoquent une évapotranspiration énorme, proche parfois de celle qui règne dans les déserts.

des milliers d'hectares, entre les villes de Lubbock et d'Amarillo.

S'il le pouvait, Larry ferait aussi du maïs. Mais c'est une plante si mal adaptée à ce plateau semi-aride, perché à 1000 m d'altitude, balayé par les vents et écrasé de soleil. La température moyenne y dépasse 35°C tout l'été. Conséquence : une évaporation phénoménale. Chaque jour, le sol perd l'équivalent de 10 à 15 mm de pluie, deux fois plus qu'à Paris. Un cauchemar d'agriculteur. « *Le pire, c'était il y a deux ans, se souvient, boots aux pieds,*

Arland Schneider, un ingénieur agronome de Bushland. Le vent soufflait très fort, et les jours de grosse chaleur, l'évapotranspiration était de 18 mm d'eau par jour. Une valeur qu'on ne trouve, à ma connaissance, nulle part ailleurs dans le monde. Si ce n'est dans les déserts. »

Pourtant, il pleut... un peu : 500 mm par an environ. C'est deux fois moins qu'à Bordeaux, mais déjà plus qu'à Madrid ou Athènes. Et par chance, cette eau arrive en grande partie entre mai et septembre, durant la croissance du coton. Hélas, elle tombe souvent en orages violents et sporadiques, qui s'évanouissent aussi vite qu'ils ont éclaté. Une grande partie de cette pluie est donc perdue par ruissellement. Le reste s'évapore lorsque l'air, une heure après l'orage, redevient aussi chaud et sec qu'auparavant.

Difficile, dans ces conditions, d'obtenir des rendements mirobolants. Le coton a beau aimer le soleil, il lui faut de l'eau pour produire des fibres. Cinq inches d'eau par an exactement, soit 12,7 cm. S'il ne les a pas, il ne donnera pas un gramme de fibre. Au-delà, plus vous l'arrosez, plus il produit : pour chaque inch d'eau en plus, vous empochez 50 à 100 kg de fibres en plus à l'hectare. Alors Larry, comme la plupart de ses voisins, puise dans ses puits pour irriguer sa terre. Près de 700 litres par minute, en continu durant plusieurs jours, pour un champ de 25 hectares en bordure de route. Sept cents litres puisés dans l'une des plus grandes nappes souterraines du monde, qui s'étirant sous ces hautes plaines, traverse le Kansas, le Nebraska, jusqu'au Sud Dakota, et dont le nom lui-même a des sonorités de western : Ogallala.

LES RÉSERVES EN EAU S'ÉPUISENT

Les puits de Larry, bien sûr, n'épuiseront pas la nappe. Mais il y en a des milliers sur cette bande de terre de 500 kilomètres, appelée Panhandle. Or la nappe, coupée de par sa géologie de toute source de réapprovisionnement souterrain, se recharge très peu. Son niveau baisse donc d'année en année. Larry le sait. Et cela le préoccupe.

Il n'est pas le seul à s'en soucier. A 500 km plus au sud, en plein cœur d'Austin, la capitale du Texas, Bill Mullican dirige la planification des ressources en eau au sein du Texas Water Development Board, un organisme d'Etat chargé de prévoir les besoins en eau à l'échelle du Texas. Nous sommes à deux pas du Congrès : la cravate a remplacé le jean terreux, mais l'inquiétude est la même : « *Nos projections indiquent que s'ils continuent de puiser au rythme actuel, certains agriculteurs du Panhandle n'auront plus assez d'eau dans*



HIGH PLAINS UNDERGROUND WATER CONSERVATION DISTRICT (HPUCD)

10 ans pour continuer l'agriculture irriguée, s'alarme-t-il. Dans quelques zones, ils ont déjà tellement pompé qu'il n'y a plus aucune eau économiquement disponible. »

Le problème est d'autant plus sérieux qu'il concerne l'ensemble du Texas, dont la population totale devrait plus que doubler dans les 50 prochaines années, pour passer de 19 millions actuellement à près de 40 millions en 2050. Conséquence : durant la même période, la demande en eau, d'environ 17 milliards de mètres cubes d'eau aujourd'hui, devrait s'élever à plus de 24 milliards. Or les moyens d'accroître la quantité d'eau de surface disponible (en majorité des lacs) sont limités, la plupart des sites possibles étant déjà aménagés. Et la plupart des nappes souterraines, au même titre que l'Ogallala, sont d'ores et déjà utilisées au-delà de leur capacité de recharge naturelle.

« Cela ne peut qu'empirer, note Comer Tuck du même institut, qui travaille depuis 30 ans aux problèmes posés par l'irrigation au Texas. Or, si les municipalités peuvent se permettre de construire de nouveaux réservoirs plus éloignés et d'acheminer l'eau avec des pipelines, pour les agriculteurs ce n'est pas économiquement envisageable ». Pour ces derniers, le message est donc clair : il va falloir qu'ils économisent encore davantage leur eau. Ce que la plupart font pourtant depuis des

Ici, le coton est roi

Parfaitement adaptée au climat local, cette plante, dont le rendement est démultiplié pour peu qu'on l'irrigue, couvre aujourd'hui des milliers d'hectares entre Lubbock et Amarillo.

années, certaines régions du Texas ayant même adopté des mesures draconiennes, qui régulent entre autres la quantité d'eau que chacun est autorisé à répandre sur ses terres.

Le High Plains Underground Water Conservation District n°1, qui gère depuis 1951 l'utilisation de l'eau souterraine dans 15 comtés regroupés autour de Lubbock et de ses 200 000 habitants, a choisi dès le début une autre politique. Entre la carotte et le bâton, son directeur Wayne Wyatt a depuis toujours opté pour la carotte : « On n'a ni les moyens, ni l'envie, de dire aux agriculteurs ce qu'ils ont à faire et de les forcer à économiser leur eau. On préfère leur montrer qu'ils gagneront plus d'argent en le faisant. » Une philosophie toute texane, pour un homme dont l'allure tient plus d'un John Wayne que du jeune énarque et qui, la soixantaine bien tassée, partage son temps entre son bureau et son ranch où il élève une centaine de têtes de bétail.

L'objectif qu'il poursuit depuis plus de 20 ans est resté le même : utiliser au mieux les technologies



Une méthode : convaincre

A la tête du « Water District n°1 », Wayne Wyatt explique aux farmers qu'ils gagneront plus d'argent en gaspillant moins leur eau.



PHOTOS : HPWD

Des progrès constants

L'irrigation au Texas n'a cessé, depuis les débuts héroïques, de gagner en efficacité. Les premiers sprinklers, qui projetaient sous pression de fines gouttes dont près de la moitié s'évaporait, ont dû être abandonnés.

les plus évoluées, pour accroître les rendements tout en utilisant moins d'eau. Et pour cela, le « Water District » s'appuie sur un réseau de recherche locale, qui regroupe deux universités, Texas A & M. et Texas Tech, et les laboratoires agronomiques du département fédéral de l'agriculture (ARS-USDA). Les rôles, depuis le début, sont clairs : aux scientifiques de développer des technologies adaptées à la région, au Water District de convaincre les agriculteurs de les utiliser. Et ensemble, ils traquent sans relâche le moindre gaspillage, la moindre perte d'eau.

« Un jour, raconte Wayne Wyatt avec son inimitable accent texan, un agriculteur est venu nous voir pour que son exploitation soit plus rentable. On a commencé par vérifier ses puits : ils n'étaient pas efficaces. Puis on a vérifié le pipeline qui transportait l'eau jusqu'au champ : il fuyait. On lui a ensuite prêté de l'argent pour acheter un système d'irrigation plus performant. Résultat : son rendement a doublé. L'année d'après, il augmentait encore de presque 50 %. Tous ses voisins ont donc décidé de faire comme lui. En cinq ans, ils ont tous adopté ces nouvelles technologies. »

James Mitchell, un agriculteur de 66 ans, fait partie de ces pionniers. Son pick-up nous mène par des chemins poussiéreux vers ses 800 hectares de terre, qu'il irrigue depuis 60 ans. Comme tous ses voisins, il cultive essentiellement du coton. « Une plante qui nous remplit le tiroir-caisse », avoue-t-il d'un air complice. Le sorgho, utilisé pour l'alimentation animale, a beau être une plante parfaitement adaptée au climat de ces hautes plaines texanes, économiquement il ne fait pas le poids face au coton.

AU PLUS PRÈS DES RACINES

C'est dans l'un de ses champs qu'a été perfectionné, il y a 25 ans de cela, un système d'irrigation que tous depuis, ont adopté : le Lepa, ou Low Energy Precision Application. Son principe ? Une arrivée d'eau, au milieu du champ, alimente un gigantesque bras, qui supporte une rangée de tuyaux d'arrosage, espacés d'environ 1,5 m l'un de l'autre, qui pendent jusqu'au sol. Un moteur électrique fait tourner l'ensemble. Rien à voir, donc, avec les premiers sprinklers, qui se contentaient d'envoyer de l'eau sous pression au-dessus du feuillage, sous forme de fines gouttelettes dont beaucoup se perdaient dans l'atmosphère, par évaporation ou à cause du vent. Quant à celles qui retombaient sur la plante, elles s'évaporaient à leur tour sous le soleil brûlant. Bilan : la moitié de l'eau qui sortait du puits était perdue.

Le Lepa réduit cette évaporation en appliquant l'eau directement sur le sol. Une eau que James Mitchell puise à une cinquantaine de mètres, au moyen de trois à cinq puits. Elle s'écoule ensuite, sous faible pression, dans les différents tuyaux qui la déversent le long des sillons circulaires creusés dans la terre entre chaque rangée de coton.

Le Lepa déverse beaucoup d'eau sur une petite zone. Plus d'eau que le sol ne peut en absorber. Pour éviter que celle-ci ruisselle, on façonne donc des petites digues tous les deux mètres, qui forment autant de petits bassins de stockage.

Bien utilisé, ce système permet d'obtenir une efficacité de 95 %. En clair : sur 100 litres d'eau pompés du puits, 95 sont effectivement utilisés par la plante. Seuls 5 % sont perdus par infiltration et évaporation.

Le goutte-à-goutte faire encore mieux. Il s'agit d'enterrer des tuyaux d'irrigation, percés de trous minuscules, pour appliquer l'eau directement dans le voisinage des racines. Les pertes sont ainsi quasiment nulles. Et on peut irriguer plusieurs fois par jour. Cette technique, déjà utilisée dans d'autres Etats comme la Californie ou la Floride, pour des cultures à haute valeur ajoutée, fait ces dernières années de plus en plus d'adeptes chez les planteurs de coton. James Mitchell ne s'y est

pas encore mis. Mais un de ses voisins, Gid Moore, ne jure plus que par cette technique, qui lui a permis de doubler, voire de tripler sa production.

Larry Gamble, qui a lui aussi plus que doublé son rendement sur un champ équipé d'un tel système, parle de revendre son Lepa, acheté il y a deux ans à peine, pour acheter un nouveau goutte-à-goutte. Car le Lepa présente à ses yeux un inconvénient majeur : il est circulaire. Cette disposition permet de l'automatiser complètement, mais les champs, eux, sont rectangulaires. « Sur un champ de 30 hectares, je perds jusqu'à 10 hectares que je ne peux pas irriguer. En remplaçant le Lepa par un goutte-à-goutte, je pourrais irriguer 45 hectares avec la même quantité d'eau, et accroître mon



DTOS : HPWD



La révolution du Lepa

Pour limiter l'évapotranspiration, le Lepa déverse l'eau sous faible pression au niveau du sol. Cela grâce à une série de tuyaux, suspendus à un gigantesque bras qui couvre l'ensemble du champ. Une succession de petits réservoirs (photo ci-dessus) réduit les écoulements.





L.M.

La nouvelle coqueluche

Irriguer sans en perdre un litre, c'est possible grâce au goutte-à-goutte (dont on voit ci-dessus le dispositif de filtrage). Une technique qui enthousiasme depuis peu les planteurs texans.

rendement », calcule-t-il avec la dextérité d'un homme habitué à compter.

Daniel Krieg, professeur de physiologie végétale à Texas Tech, ne partage pourtant pas cet enthousiasme. Il reproche au goutte-à-goutte de laisser trop peu d'eau en réserve dans le sol. « Si l'alimentation en eau est bloquée ne serait-ce qu'une seule journée, l'évaporation est si forte que vous perdez la plante », prévient-il.

Autre inconvénient à ses yeux : le tuyau étant enfoncé à une trentaine de centimètres sous terre, l'eau dans un sol sableux ne peut pas remonter jusqu'à la graine pour la faire germer. L'agriculteur est donc souvent contraint d'utiliser un deuxième procédé d'irrigation pour faire germer le coton. Ou faire confiance au peu d'humidité que le sol a pu stocker durant l'hiver.

Une seule raison empêche pourtant les agriculteurs texans de tous se convertir au goutte à goutte : le prix. Equiper un hectare revient de 1 000 à 2 000 dollars (entre 7 000 et 14 000 francs). Trop cher pour James Mitchell, dont les Lepa ont déjà coûté la coquette somme d'environ 600 dollars (un peu plus de 4 000 francs) à l'hectare. Incapable de déboursier une telle somme sur ses 800 hectares, James irrigue l'un de ses champs avec un système plus rustique, appelé irrigation par vagues. Un pipeline amène l'eau du puits à l'extrémité haute du champ. Et une valve pilotée par un ordinateur la distribue alternativement dans une série de sillons puis dans une autre. Le cycle dure de quelques dizaines de minutes à quelques heures, selon la nature du sol, son inclinaison...

Le choc des formes

Le Lepa, système dit à « pivot central » façonne l'agriculture texane à son image. Cette disposition circulaire permet une totale automatisation. Mais elle se heurte au découpage, toujours rectangulaire, des parcelles.



HPWD



HPWD

En irriguant ainsi chaque sillon par intermittence, l'agriculteur évite de répandre plus d'eau que la terre ne peut en supporter. Il limite les pertes par ruissellement en bout de champ, et l'eau se répartit de façon plus uniforme que lors d'une irrigation « classique » par canaux, dans laquelle l'extrémité proche de la source est noyée, pendant que l'autre manque d'eau. Les infiltrations sont réduites, l'évaporation aussi. Efficacité : de 60 à 70 %. Parfois même 80 à 90 % dans certaines conditions, notamment d'inclinaison du champ. Contre 40 % à peine pour une irrigation classique.

N'APPORTER QUE CE QU'IL FAUT

Avec des rendements proches de 100 %, il est difficile aux agriculteurs du Panhandle de progresser. C'est pourtant ce qu'ils devront faire s'ils veulent continuer l'agriculture irriguée. Disposant de systèmes qui amènent l'eau pratiquement sans pertes jusqu'aux racines de la plante, ils cherchent maintenant à réduire la quantité d'eau que celle-ci aura à disposition.

« On s'est rendu compte qu'on mettait souvent plus d'eau que la plante n'en a réellement besoin », remarque Wayne Wyatt. Pour connaître la quanti-

Rustique mais efficace

Arroser par intermittence une série de sillons, puis une autre, réduit considérablement les pertes en eau. Moins coûteuse que les autres techniques, cette irrigation « par vagues » pourrait intéresser les pays en développement.

té exacte, nécessaire à la plante, les agriculteurs du Panhandle disposent aujourd'hui du « PET network », conçu par William Lyle en 1982.

Qu'est-ce que le PET, ou « Potential evapotranspiration » ? C'est la quantité d'eau totale que perd un gazon théorique durant une journée lorsqu'il est parfaitement irrigué. Une valeur qui dépend bien sûr des conditions climatiques, comme la température ou le degré d'humidité de l'air. En multipliant ce PET par un coefficient qui dépend du développement physiologique de la plante, on obtient la quantité d'eau que perd cette plante durant la même journée. « On faxe ces informations aux agriculteurs, et on les diffuse dans la presse locale ou sur Internet, explique Robert Lascano, qui gère ce projet à cheval sur trois laboratoires. L'agriculteur n'a plus qu'à les entrer sur son ordinateur pour savoir quelle quantité d'eau il doit apporter à ses cultures ».



HPWD

Un déficit rentable

Lorsqu'on ne couvre que 75 % de ses besoins en eau, le coton continue de fournir plus de 90 % de son rendement maximal. Pour l'agriculteur, l'opération reste intéressante.

Mieux : ce spécialiste de la physique des sols conseille aux agriculteurs de n'appliquer que 75 % environ de la valeur théorique. Car des recherches ont montré qu'en réduisant de plus d'un quart la quantité d'eau disponible pour la plante, le coton continue de produire 90 à 95 % de son rendement maximal. « *Et avec le goutte-à-goutte, on peut se contenter d'apporter la moitié des besoins en eau sans décroître de façon significative le rendement* », explique James Bordovski, qui a travaillé sur cette étude pour l'Université A & M. Son souci, à présent, est d'utiliser l'eau de pluie de façon plus efficace, en la stockant dans le sol, ce qui réduirait d'autant la quantité à apporter ensuite par irrigation. Il conçoit aussi un système qui combine les différentes techniques existantes pour appliquer des quantités différentes d'eau en chaque endroit du champ, selon la quantité que la parcelle peut stocker dans le sol. Une irrigation de haute précision, qui permettra probablement de gagner encore un peu plus en efficacité.

Certains voient plus grand. Comme Dan Upchurch, qui dirige le laboratoire de recherche agronomique de Lubbock du département fédéral de l'agriculture (ARS-USDA), un laboratoire qu'il s'est fait construire sur mesure. Il compte bien utiliser le réseau de satellites qui, dès 2003,

couvrira l'ensemble du globe deux fois par semaine pour en donner une image spectrale. « *Cet outil permettra d'évaluer sur une large échelle l'impact des précipitations, mais aussi d'observer un champ individuel, pour gérer de façon très fine l'irrigation ou l'apport de nutriments comme l'azote* », explique Dan Upchurch, dont l'une des équipes essaie actuellement de comprendre la relation qui existe entre le manque d'azote et le stress hydrique.

UN STRESS INVISIBLE

« *En général, le stress hydrique se manifeste par des feuilles plus foncées. Mais sous un manque d'azote, les feuilles deviennent jaunes. Lorsque ces deux stress interagissent, les colorations se neutralisent. On peut donc croire qu'on a une bonne canopée, alors qu'en fait elle est stressée. On réfléchit donc à différents moyens de séparer ces deux stress* », poursuit Dan Upchurch. Son laboratoire a mis au point un instrument qui contrôle en continu la température des cultures. Lorsque celle-ci est au-delà de la valeur optimale (soit envi-



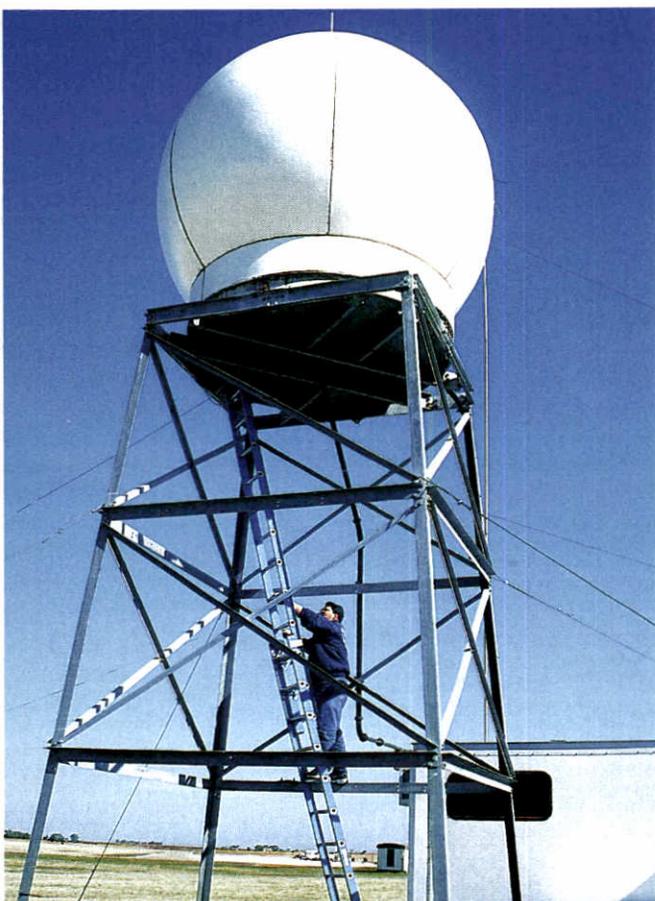
L.M.

Changer la plante elle-même

Wenwei Xu (Texas A & M University) sélectionne les variétés de maïs qui résistent le mieux à la chaleur et à la sécheresse. Des techniques d'hybridation lui ont permis d'obtenir une variété consommant jusqu'à 40 % d'eau en moins.

DE LA PLUIE SUR COMMANDE

Assurancetourix, dans les aventures d'Astérix, y parvenait en chantant. C'est aujourd'hui à grand renfort de technologies que les agriculteurs du nord-ouest du Texas, associés à leurs voisins du Nouveau-Mexique, s'efforcent depuis trois ans de réaliser un vieux rêve de l'humanité : faire pleuvoir. Comment ? En ensemençant les nuages, c'est-à-dire en répandant dans ces immenses réservoirs de vapeur d'eau, des cristaux d'iodure d'argent, sur lesquels cette humidité viendra se condenser en gouttelettes de pluie. Des cristaux qu'un avion déverse en se plaçant au-dessus du nuage, ou en se plaçant, au contraire, en dessous, pour profiter des vents ascendants. C'est Aaron Gilstad, un jeune ingénieur météorologiste qui, de sa minuscule base radar (photo ci-contre) perdue à une soixantaine de kilomètres de Lubbock, dirige sous un soleil de plomb les opérations. Son rôle : détecter les formations nuageuses et guider jusqu'à elle l'un des quatre avions mis à sa disposition. Comment choisit-il le nuage à ensemencher ? « J'utilise mes yeux plus que n'importe quel autre instrument », confie-t-il. Au feeling, en somme. Mais une fois l'avion sur les lieux, c'est au pilote de jouer. Lui seul prend la décision de déverser, ou non, les cristaux. Et là encore, c'est à l'œil nu qu'il évalue si les conditions lui paraissent favorables. Tout, en effet, peut basculer en deux ou trois minutes, ce qui laisse très peu de



temps pour consulter les instruments. Les résultats, eux, sont tout aussi rapides : lorsque l'opération réussit, la pluie tombe en moins de cinq minutes. Mais cette technique, utilisée depuis plusieurs dizaines d'années dans d'autres pays, comme le Canada, l'Argentine, ou d'autres régions des Etats-Unis, reste enco-

re un art. Et garde sa part d'aléatoire. « Nous ne sommes pas en mesure de prouver que ça marche, avoue prudemment Aaron Gilstad, mais il semble qu'on obtienne entre 20 et 40 % de pluie en plus ». Des chiffres qu'il manie avec délicatesse, tant il est difficile de prouver que la pluie ne serait pas tombée de toute façon.

E.M.

ron 28°C pour le coton), c'est un signal d'alarme : la plante manque d'eau.

L'idéal, bien sûr, serait que la plante elle-même consomme moins d'eau. Un rêve d'agriculteur, qui pourrait bien se réaliser : les chercheurs s'activent pour mettre au point des espèces qui sauront supporter au mieux la sécheresse, ou pour sélectionner celles qui utilisent le plus efficacement

possible la quantité d'eau dont elles disposent.

C'est le cas de Thomas Archer et de Wenwei Xu qui, au sein de la station expérimentale de Lubbock (Texas A & M university), ont mis au point par hybridation une variété de maïs qui utiliserait 30 à 40 % d'eau de moins que le maïs « classique » du Middle West. Un résultat intéressant, quand on sait que cette plante, parmi les plus



HPWD

La sobriété reste un mystère

Pourquoi certaines variétés de maïs, obtenues par hybridation, résistent-elles mieux que d'autres au manque d'eau ? Les chercheurs eux-mêmes l'ignorent. Seule certitude : cette capacité met en jeu un nombre important de gènes.

rentables économiquement, est aussi l'une de celles qui consomment le plus d'eau. Pour la rendre moins gourmande, les deux chercheurs ont sélectionné, parmi des variétés tropicales de maïs, celles qui résistaient le mieux à la sécheresse. « Pour l'instant on en est encore à un stade expérimental. Il faudra encore des années avant que ce maïs soit commercialisé », préviennent-ils cependant.

DES GÈNES ENCORE INCONNUS

Le problème, en effet, est complexe : personne ne connaît parfaitement, à l'heure actuelle, les mécanismes qui permettent à une plante de résister à la sécheresse. Et personne n'a encore localisé les multiples gènes qui pourraient être associés à cette résistance. Tout au plus est-on parvenu à isoler quelques caractères qui semblent favoriser la survie d'une plante momentanément privée d'eau. « Notre maïs résiste mieux à la sécheresse parce qu'il a un meilleur système de racines, qui peuvent pomper l'eau plus profondément dans le sol » remarque par exemple Wenwei Xu. « Son » maïs utilise ensuite plus efficacement cette eau pour produire des grains. Une fois isolés les différents gènes permettant à une plante de résister à la sécheresse ou à la déshydratation, il sera possible de les transférer dans d'autres plantes.

ENCORE UN EFFORT, CITADINS

Les agriculteurs des hautes plaines texanes ne seront bientôt plus seuls à économiser leur eau. Les citoyens devront s'y mettre aussi. Et de préférence sans tarder. Car le lac Meredith, qui alimente en eau potable la ville de Lubbock et ses 200 000 habitants, se tarit. Dans 25 ans, il sera vide.

L'échéance paraît lointaine ? Pas pour l'équipe municipale qui, confrontée aux millions de dollars qu'exige la mise en place d'une nouvelle infrastructure d'alimentation en eau, a décidé de tirer le signal d'alarme. Elle encourage désormais ses habitants à modifier leur comportement et à ne plus gaspiller cette ressource. « Nous partons pratiquement de zéro dans ce changement de mentalité, regrette Chapman, qui coordonne les

programmes d'éducation. Pour l'instant, les habitants de Lubbock se préoccupent surtout d'avoir un beau gazon devant leur maison. Ils n'arrivent pas à imaginer qu'il puisse y avoir un jour une pénurie d'eau. » Une mesure devrait pourtant, à partir d'octobre prochain, les y aider. La municipalité envisage en effet de rendre l'eau plus chère aux gros consommateurs : plus ils en utiliseront, plus ils devront déboursier pour chaque litre consommé. Confrontées au même problème, la plupart des villes texanes, dont beaucoup verront leur population doubler dans les 50 prochaines années (notamment Houston et Austin), cherchent elles aussi des solutions locales pour prévenir la pénurie. Certaines écoles commencent à recycler l'eau usée des toilettes,

qui est traitée puis réutilisée. Résultat : une consommation réduite de plus de 75 % par rapport aux écoles qui ne la recyclent pas.

« La réutilisation de l'eau municipale va devenir de plus en plus importante, prévoit Comer Tuck au Texas Water Development Board à Austin. Pour l'instant, cette eau n'est réemployée que pour l'agriculture ou l'industrie, mais il y a un potentiel important de réutilisation comme eau potable. » Les citoyens seront-ils prêts à consommer cette eau ? Rien n'est moins sûr tant les réticences sont encore fortes. Comer Tuck lui-même, pourtant convaincu que cette eau est parfaitement potable, n'a pu se résoudre pour l'instant à en boire le moindre verre.

E.M.

L'espoir pour les agriculteurs texans viendra-t-il de ces plantes transgéniques ? Daniel Krieg n'en est pas convaincu. Il regrette la confusion des termes qui règne dans ce domaine entre ce qu'on appelle d'une part la résistance à la sécheresse, qui intervient lorsque la survie de la plante est menacée par le manque d'eau, et d'autre part l'efficacité avec laquelle une plante peut utiliser l'eau dont elle dispose, que cette eau soit abondante ou non.

« Je ne pense pas qu'il y ait le moindre espoir pour que soient cultivées des plantes capables de résister à la sécheresse, martèle-t-il depuis des années. Car une plante ne peut résister au manque d'eau qu'en stoppant sa croissance. Le rendement ne peut donc que chuter. » Une productivité qui commence d'ailleurs à décroître bien avant que les mécanismes de survie (fermeture des stomates, changement de la forme des feuilles...) ne se mettent en place. En revanche, il est possible selon lui de faire en sorte que la plante utilise son eau plus efficacement.

Pour le coton, il prévient d'emblée que cela sera difficile : il existe en effet peu de variétés adaptées à cette région du Texas. Il y a donc très peu de gènes différents sur lesquels les scientifiques vont pouvoir jouer. « Je pense que si on parvient à gagner environ 10 % d'efficacité dans la façon dont le coton utilise son eau, on aura fait déjà beaucoup », estime le chercheur.

A Austin, au Water Development Board, le son de cloche est grosso modo le même. « Les agricul-



Une page est tournée

Élément incontournable de tout bon western, le moulin à vent puisant l'eau des High Plains symbolise une agriculture révolue.

teurs Texans ne seront probablement pas intéressés par des plantes qui résistent à la sécheresse car ils veulent des rendements maximaux », confirme ainsi Comer Tuck,

pour qui de telles cultures pourraient, en revanche, avoir un avenir sur les terres non irrigables. Les pays qui n'ont pas la possibilité de développer une agriculture irriguée pourraient, avec de telles plantes, se prémunir des famines liées à la sécheresse en s'assurant au moins un rendement minimal. Les autres technologies utilisées par les agriculteurs texans seront-elles exportables vers les pays du Sud ? « Beaucoup de ces technologies sont gourmandes en capitaux et nécessitent de grandes surfaces cultivées », souligne Comer Tuck, sceptique. Seule l'irrigation « par vagues » nécessite (relativement) peu d'investissements et s'adapte à la

taille du champ. C'est une technique qui a fait des adeptes en Argentine. Quelques systèmes simi-

laires au Lepa sont utilisés au Zimbabwe, au Kazakhstan, en Libye ou en Arabie Saoudite. L'ambition du Water District, de toute façon, n'est pas de changer le monde. « Notre objectif est plus modeste, confie Wayne Wyatt. Nous cherchons juste à atteindre le point d'équilibre où l'eau que l'on utilise n'excède pas les possibilités de recharge de la nappe. Si nous y parvenons, nous aurons de l'eau pour toujours. » Le défi est loin d'être gagné, mais il mérite d'être relevé. □

L'eau dans le monde |

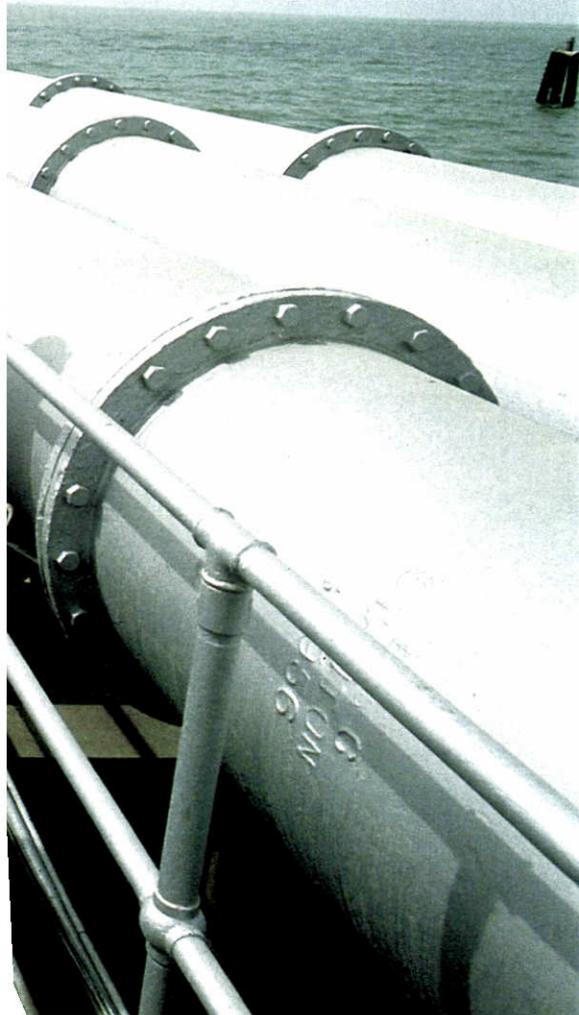
Dessaler, recycler, déplacer

La mer à boire

Les techniques de dessalement de l'eau de mer sont opérationnelles depuis de nombreuses années. Mais leur coût - 3 à 11 F le mètre cube - limite encore leur utilisation aux pays riches (ici, une installation au Koweït).

Dans un nombre croissant de pays, le manque d'eau relativement à la croissance de la population va imposer de s'en remettre à de nouvelles techniques pour satisfaire les besoins. Elles sont pour l'instant coûteuses, mais leur prix devrait baisser.

PAR STÉPHANE FOUART



E. KASHI - RAPHO

Les conclusions de la dernière Conférence internationale sur la gestion de l'eau en régions arides, tenue en décembre dernier dans la capitale jordanienne, sont sans appel. Les pays soumis à un fort « stress hydrique » devront, dans les prochaines années, mettre en œuvre des solutions « non conventionnelles » d'approvisionnement en eau pour faire face à l'augmentation de leurs populations. A ces techniques – dessalement de l'eau de mer, recyclage des eaux usées – devront, dans certains cas, s'ajouter de grands projets d'adduction du précieux liquide. Pour les pays du pourtour méditerranéen, et certaines régions d'Afrique, c'est tout simplement l'urgence. « *Si la Jordanie ne met pas en œuvre des techniques non conventionnelles* », explique Mohammed Shanatawi, expert du ministère jordanien de l'Agriculture et de l'Irrigation, *le déficit du pays approchera les 500 millions de mètres cubes par an à l'horizon 2020, contre 155 millions de mètres cubes aujourd'hui.* »

Pour l'heure, le coût encore très élevé de ces techniques réserve leur utilisation aux pays les plus riches : de 3 à 11 francs le mètre cube d'eau produit, selon la salinité de l'eau à traiter, le coût local de l'énergie, et les techniques employées. Ainsi, près de 50 % du marché du dessalement est concentré dans les seuls pays du Golfe (Arabie Saoudite, Emirats arabes unis, Qatar, etc.). Et au total, les quelque 12000 usines de dessalement d'eau de mer ne produisent quotidiennement « que » 50 millions de mètres cubes d'eau douce, soit 1 % de l'eau consommée chaque jour dans le monde.

LE CERCLE DES ADEPTES S'ÉLARGIT

Des innovations techniques apparaissent toutefois qui, dans les années à venir, vont démocratiser l'usage des techniques non conventionnelles. Pour ne citer qu'eux, Israël et la Jordanie sont d'ores et déjà en pourparlers avec des industriels pour installer des usines de dessalement ou de recyclage. La même tendance s'affirme de plus en plus dans les pays du Maghreb. Car comme le rappelle Adel El-Biltagy, directeur général de l'ICARDA (International Center for Agricultural Research in the Dry Areas), « *l'écart entre les ressources en eau et la demande ne cesse de se creuser et l'équation entre la disponibilité hydraulique et les besoins alimentaires devient chaque jour plus difficile à résoudre.* »

Deux procédés de dessalement se partagent aujourd'hui le marché : les techniques thermiques (par distillation) et membranaires (par osmose inverse).

La distillation représente environ 80 % du marché mondial du dessalement. Plus « rustique » que l'osmose inverse, elle est généralement moins délicate à mettre en œuvre. En fait, la distillation reproduit en milieu industriel le processus naturel de dessalement. Ce même processus qui fait aboutir, par évaporation puis condensation, l'eau des océans dans les nappes phréatiques. La composante majeure des coûts engendrés par cette technique repose dans l'apport énergétique nécessaire à vaporiser l'eau de mer, c'est-à-dire à la transformer en vapeur. Lorsque l'eau s'évapore, elle laisse les sels dissous dans la « saumure » (eau très salée) et devient douce après condensation. Si simple qu'il puisse paraître, le dessalement par distillation n'en connaît pas moins de fortes avancées technologiques.

Le Multi Flash (MSF), développé depuis les années 70, est la technique de distillation la plus employée. L'eau traverse des chambres successives dans lesquelles règnent des pressions de plus en plus basses. A chaque passage, une partie de l'eau de mer est transformée en vapeur.

L'intérêt énergétique du MSF tient dans le fait que plus la pression du milieu est basse, plus la température à laquelle l'eau passe à l'état gazeux est faible. Par exemple, à pression ambiante, l'eau se vaporise à 100°C. Lorsque la pression du milieu ambiant est ramenée à un dixième de la pression atmosphérique, le passage à l'état gazeux se fait dès 45°C.

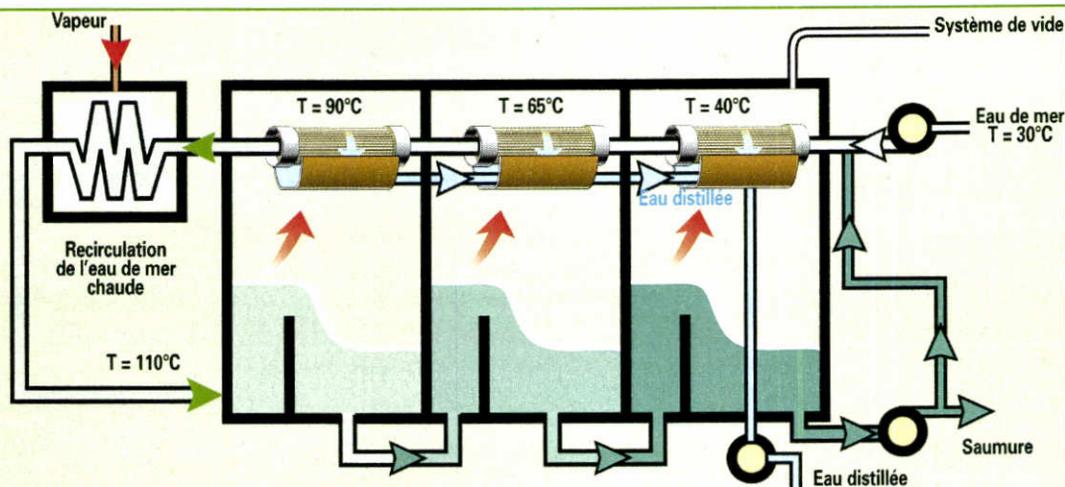
La distillation à effet multiple (MED), quant à elle, reste une technique moins courante que le Multistage Flash. Elle connaît toutefois de fortes innovations et pourrait vite détrôner le MSF. Elle permet des économies de l'ordre de 15 à 20 % par rapport au Multistage Flash, mais sa mise en place est encore délicate et coûteuse. De plus, les unités utilisant ce procédé ne sont pas, aujourd'hui, en mesure de produire de grandes quantités d'eau douce, à l'instar des unités de dessalement par MSF (jusqu'à 50 000 mètres cubes d'eau traitée par jour). Mais un nouveau procédé de distillation à effet multiple, mis au point par des chercheurs du Laboratoire des sciences du génie chimique de Nancy pourrait provoquer, dans le domaine une véritable révolution.

Le principe, simple, consiste en une association en série de modules évaporateur/condenseur dont la disposition permet non seulement de limiter les pertes thermiques, mais assure une faisabilité technique jusque-là inédite. De plus, ce procédé permet d'optimiser la récupération de la chaleur latente de condensation de l'eau, par rapport aux procédés de distillation à effet multiple en place actuellement. « Lorsque l'on fait chauffer de l'eau,

1 200 m³ par jour

Les capacités des unités de dessalement à effet multiple restent encore faibles. La technique, peu gourmande en énergie thermique, pourrait pourtant, à terme, s'imposer.





D. GALLAND D'APRES SIDEM

explique Jean-Marie Hornut, l'un des inventeurs du procédé, *on lui fournit une certaine quantité d'énergie. Lorsque l'eau se condense et passe de l'état de vapeur à l'état liquide, elle peut rendre une partie de cette quantité : c'est la chaleur latente de condensation.* » Cependant, ce dispositif n'en est qu'à ses premiers tests en laboratoire et sa mise en œuvre industrielle n'est pas pour demain. « *Les premiers tests grandeur nature ne pourront être effectués que dans deux à trois ans*, confie Viviane Renaudin, qui a également travaillé à la conception du procédé. *Pour le passage à une exploitation industrielle, il faudra sans doute encore attendre deux à trois ans de plus.* »

DERNIER ARRIVÉ

Si, d'une façon générale, la distillation a une avance de plusieurs dizaines d'années de savoir-faire sur l'osmose inverse, cette dernière est toutefois promise à une forte croissance. En témoigne le récent rachat d'US Filters par Vivendi dont les filiales dans le dessalement de l'eau de mer OTV et la SIDEM possèdent une compétence essentiellement tournée vers les techniques de distillation. Cette acquisition permet d'ores et déjà à l'entreprise française de se positionner sur le marché prometteur des techniques membranaires, spécialité de l'américain US Filters.

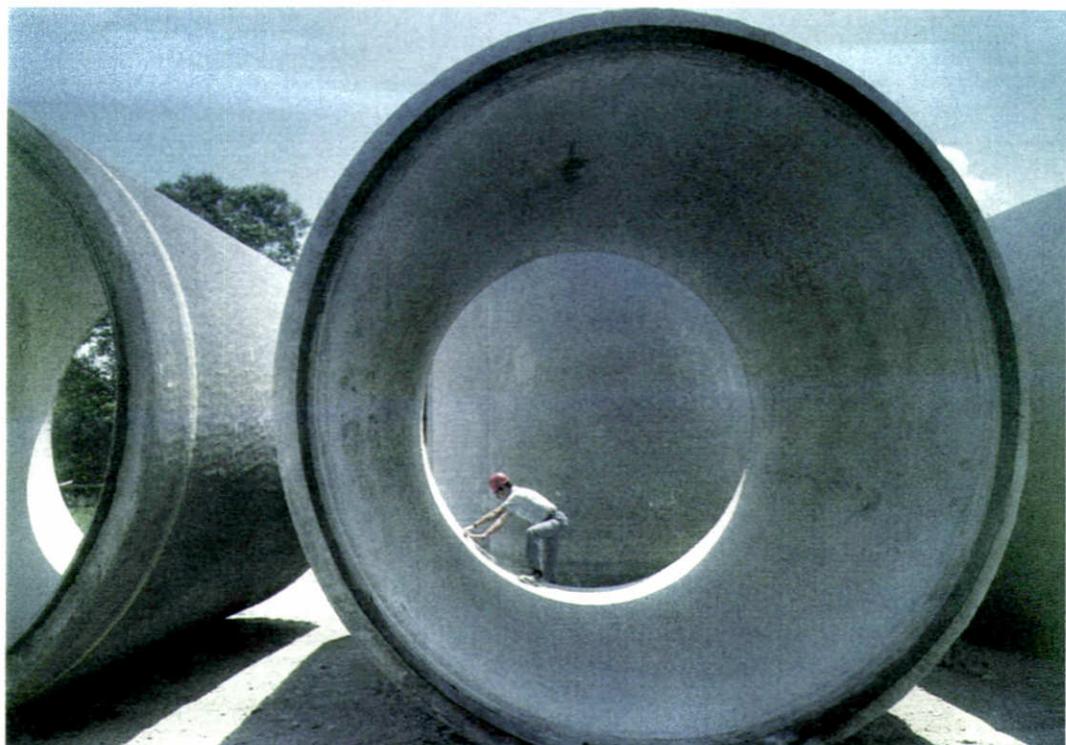
« *Ces techniques ont le vent en poupe*, se réjouit en effet Basile Jarmak, responsable du dessalement et du recyclage chez Degremont, une entreprise de la Lyonnaise des eaux. *Elles commencent à se justifier de plus en plus, en raison de leur coût, par rapport aux techniques par distillation.* » L'osmose inverse consiste à séparer l'eau douce de l'eau salée grâce à une membrane semi-poreuse.

Une technique éprouvée

Le procédé Multi Flach date des années 70. Chauffée à 110°, l'eau traverse des enceintes successives où règnent des pressions de plus en plus basses (de gauche à droite). Dans chacune d'elles, de la vapeur se dégage et se condense au contact des tubes d'eau froide, donnant de l'eau distillée.

En l'absence d'action extérieure, le système tend à s'équilibrer : l'eau douce migre à travers la membrane vers l'eau chargée en sels. Mais si l'on exerce une pression sur l'eau salée, le phénomène se renverse. Les sels dissous sont arrêtés par la membrane qui filtre les éléments dont la taille excède quelques angströms (soit un dix millionième de millimètre). Les coûts engendrés par l'osmose inverse se situent, eux, essentiellement dans l'énergie fournie pour mettre l'eau de mer sous pression, mais aussi dans le prétraitement nécessaire à la phase d'osmose inverse proprement dite. Avant de passer par la membrane osmotique, l'eau de mer doit en effet être débarrassée de toutes les particules qui y sont en suspension. Or ces phases de prétraitement – décantation, coagulation, filtration – sont lourdes et coûteuses. Mais les progrès réalisés dans la conception et la fabrication de nouvelles membranes laissent penser que le prix du mètre cube d'eau dessalée par osmose inverse va continuer de chuter. « *Non seulement les membranes d'osmose sont de moins en moins gourmandes en énergie*, poursuit Basile Jarmak, *mais de nouvelles membranes d'ultrafiltration permettent de faire également chuter le coût du prétraitement.* »

Que ce soit pour l'osmose inverse ou la distillation, la tendance actuelle est à la synergie indus-



ARAL - SIPA PRESS

Les pipelines de l'or bleu

Ce devrait être l'un des plus vastes réseaux de transfert et de distribution d'eau au monde : 4 500 km de canalisations souterraines pour acheminer, dès 2003, de l'eau pompée dans les nappes profondes du Sahara jusqu'en Libye.

trielle, qui permet de substantielles baisses de coût. Dans le cas de la distillation, il est de plus en plus courant de coupler l'usine de dessalement avec une centrale thermique : c'est la « cogénération ». La centrale thermique rejette de l'eau basse pression à 70°C, qui n'est en général pas exploitée. La récupérer dans les tuyaux d'une unité de distillation représente un apport d'énergie important. « Plus généralement, explique Viviane Renaudin, l'utilisation à des fins de dessalement de tous les processus industriels nécessitant le refroidissement d'un réacteur peut être envisageable. » S'agissant de l'osmose inverse, il est possible, pour amortir les coûts, de placer en sortie de processus des turbines qui utilisent la pression résiduelle de l'eau dessalée pour produire de l'électricité.

Des deux grandes techniques de dessalement – distillation et osmose inverse – l'une est-elle en particulier destinée à s'affirmer devant l'autre ? Sans doute pas. Mais, selon des spécialistes, l'osmose inverse devrait rattraper son retard d'ici à

2020 et représenter environ la moitié du marché du dessalement.

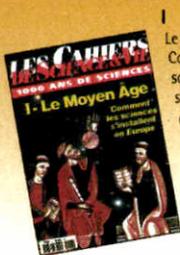
L'osmose inverse est d'autant plus prometteuse que les techniques membranaires assurent une continuité technologique entre dessalement et recyclage des eaux usées. Également en très forte croissance, le recyclage des eaux urbaines souffre toutefois de blocages d'ordre psychologique. De très rares pays réutilisent les eaux usées pour les consommer. « Techniquement, réinjecter directement l'eau recyclée dans le circuit d'eau potable ne pose aucun problème, explique Jean-Marie Brun, directeur délégué à l'international d'Omnium de traitement et de valorisation (OTV). Dans la plupart des cas, c'est la faire accepter par les populations qui est problématique. » Traitée, retraitée, l'eau n'en reste pas moins considérée comme impure. Outre le Zimbabwe, où l'eau recyclée de la capitale Windhoek est directement réinjectée dans les canalisations d'eau potable, aucun pays ne profite pleinement des possibilités offertes par la réutilisation des eaux usées. « En général, précise Jean-Marie Brun, les eaux ainsi retraitées sont rejetées dans le milieu naturel ou sont utilisées pour des usages industriels. » Mais une fois rejetées dans le milieu naturel ces eaux usées finissent par atteindre les nappes phréatiques ou les fleuves, dans lesquels, ensuite, l'eau potable est pompée.

COMMANDEZ DÈS AUJOURD'HUI

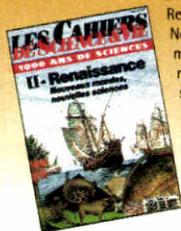
"1000 ANS DE SCIENCES"

UNE VÉRITABLE ENCYCLOPÉDIE DES PLUS GRANDS MOMENTS DE L'HISTOIRE SCIENTIFIQUE DE L'HUMANITÉ :

12 FASCICULES
DES CAHIERS
DE SCIENCE & VIE
 SOIT **1200 PAGES** AU PRIX
 EXCEPTIONNEL DE **159^F**



I Le Moyen-Âge :
 Comment les sciences s'installent en Europe



II Renaissance :
 Nouveaux mondes, nouvelles sciences



III XVII^e siècle :
 Science anglaise, science française



IV Qui sommes-nous ?
 Du Moyen-Âge à nos jours : Les différentes façons dont l'Homme s'est pensé.



V XVIII^e siècle :
 La Grande Encyclopédie.



VI XIX^e siècle :
 La folie de la mesure :
 Dénumérer, mesurer, calculer...



VII XIX^e siècle :
 La passion des mondes disparus.



VIII XIX^e siècle :
 Les sciences d'Europe s'imposent au monde.



IX XIX^e siècle :
 Les premiers grands laboratoires.



X XX^e siècle :
 Particules et galaxies.



XI XX^e siècle :
 Comment l'ordinateur transforme les sciences.



XII Moyen-Âge -
 Aujourd'hui :
 Le bilan des progrès.

BON DE COMMANDE

A compléter et à retourner avec votre règlement à :
 VPC Cahiers Science & Vie - 1 rue du Colonel Pierre Avia 75503 Paris cedex 15

Je choisis de régler par :

chèque bancaire ou postal à l'ordre des CAHIERS DE SCIENCE & VIE
 carte bancaire

N° _____
 expire à fin _____ mois _____ année

Dater et signer (obligatoire)

*Au lieu de 384 frs, prix de vente normal des 12 fascicules. Tarifs réservés aux envois en France métropolitaine uniquement. Prévoir un délai de réception de votre commande de 3 à 6 semaines.

*Dans la limite des stocks disponibles. Offre valable jusqu'à fin 2000
 Conformément à la loi Informatique et Libertés du 06/01/78, les informations ci-dessus sont indispensables au traitement de votre commande. Vous avez un droit d'accès et de rectification auprès d'Excelsior. Vous pouvez vous opposer à la communication ultérieure de celles-ci.

Cette élégante reliure vous permet de classer soigneusement 6 fascicules de la collection "1000 ans de sciences" des Cahiers de Science & Vie.



FC PARIS B 572 134 773

SV HS 211

OUI je commande la collection complète "1000 ans de science" des Cahiers de Science & Vie, soit 12 fascicules, au prix exceptionnel de **159 frs + 26 frs** de frais de port, soit un total de **185 frs.***

Je commande également _____ reliure(s) des Cahiers de Science & Vie au tarif unitaire de **65 frs.**

Nom _____

Prénom _____

Adresse _____

Code postal _____ Ville _____

Dessalement, recyclage... l'or bleu est en passe de devenir, dans les régions arides, un produit à forte valeur technologique ajoutée. Un peu à la façon du brut, qui doit subir de nombreuses opérations de valorisation avant de pouvoir être utilisé. Le parallèle ne s'arrête d'ailleurs pas là. Dans certains pays, le transport de l'eau sur de très longues distances n'est pas sans évoquer le transfert de combustibles fossiles par oléoducs ou gazoducs.

Tel est le cas en Libye, où le régime du colonel Kadhafi a mis en place l'un des plus vastes réseaux au monde d'acheminement et de distribution d'eau. Cette dernière, pompée dans les nappes fossiles très profondes du Sahara, dans l'extrême sud du pays, est acheminée via 3500 kilomètres de canalisations souterraines. Les sections de ces canalisations atteignent par endroit 5 mètres de diamètre. Le projet, baptisé « Grande rivière artificielle », entamé en 1984, doit être achevé en 2003. On comptera alors près de 4500 kilomètres de canalisations, reliant le sud du pays aux côtes méditerranéennes du nord, où est concentré l'essentiel de l'activité industrielle et agricole, de même que la majeure partie de la population. Il en coûtera au total près de 30 milliards de dollars. Et pour cause : il s'agit du plus gros projet d'adduction d'eau jamais réalisé dans un pays désertique. « *Le creusement de tranchées devant recevoir les canalisations aura nécessité le déblaiement de 155 millions de mètres cubes de terre et de roches soit douze fois plus que le barrage d'Assouan, assurent les autorités libyennes. Les matériaux de construction utilisés suffiraient à l'édification de 16 pyramides aussi grandes que celle de Khéops.* » Et d'ajouter que « *le béton servant à la fabrication des tubes permettrait de construire une route pouvant relier Tripoli à Bombay en Inde* ». Le vieux rêve bédouin de transformer le désert en oasis est en marche : déjà, la « Grande rivière artificielle » a permis l'irrigation de plusieurs régions désertiques. Mais jusqu'à quand sera-t-il possible de pomper ? La nappe d'eau fossile dans laquelle la Libye va désormais puiser l'essentiel de ses besoins en eaux d'irrigation et de consommation, enfouie à plusieurs centaines de mètres sous terre (parfois plus de huit cents), résulte de l'accumulation de plusieurs dizaines de milliers d'années de pluie. Son taux de renouvellement est extrêmement faible et le risque de surpompage, réel.

De fait, ce projet avait semblé si farfelu que la presse américaine avait, les travaux déjà entamés, accusé le régime libyen de construire des casernes

et des galeries souterraines pour stocker et acheminer du matériel de guerre, sans encourir l'indiscrétion des satellites américains. « *Le Libyen Mouammar Kadhafi a-t-il décidé de faire circuler son armée dans un mystérieux réseau de galeries creusées sous le Sahara ?* », s'interrogeait ainsi le *New York Times* en décembre 1997. Ces allégations ont toutefois été démenties par les faits : la « Grande rivière artificielle » est bien un projet d'adduction d'eau, et rien de plus. Rien de plus, excepté sans doute la cristallisation d'un fort nationalisme.

UN PROJET CONTROVERSÉ

De très grands projets d'adduction d'eau tels que la « Grande rivière artificielle » libyenne sont rares, mais n'en constituent pas moins une pratique émergente, malgré les coûts. A la mise financière de départ, nécessaire à la construction des infrastructures, s'ajoutent en effet des frais d'exploitation fortement conditionnés par la géographie. Le transport de l'eau nécessite suivant les dénivelés de grandes quantités d'énergie, et plus l'eau est acheminée sur de grandes distances, moins les projets sont rentables. Sous certaines conditions, la disposition du terrain rend aisée la mise en place de vastes systèmes de transfert. C'est notamment le cas pour l'Afrique du Sud, qui reçoit depuis peu 18 m³ d'eau par seconde du réservoir du barrage de Katsé, dans les hautes terres du Lesotho. A terme, lorsque toutes les canalisations auront été creusées, le Lesotho fournira près de 70 m³ d'eau par seconde à la région de Prétoria, en fort développement démographique.

Si, dans ce cas précis, un transfert d'eau transfrontalier n'engendre pas de polémiques, il n'en va pas de même dans toutes les configurations. En France et en Espagne, un grand projet d'adduction déchaîne les passions depuis plusieurs années. L'aqueduc Rhône-Catalogne, dont la mise en chantier n'est toujours pas décidée, doit pallier le manque de ressources hydriques de la région de Barcelone en détournant les eaux du Rhône, peu avant son embouchure. L'aqueduc, s'il voyait le jour, se déroulerait sur une longueur de près de 500 kilomètres. De Montpellier, il longerait les Pyrénées par l'est pour aboutir à l'usine de potabilisation de Cardedeu. Il permettrait de soutenir le développement industriel et démographique d'une région dont les deux fleuves, le Llobregat et le Ter sont surexploités. Pour l'heure, le projet rencontre de grandes résistances en France : l'eau est-elle un patrimoine national ou une ressource à partager ?

SCIENCE & VIE

HORS SÉRIE

Dans le prochain numéro
Grande enquête sur la mémoire



- Comment fonctionne la mémoire ?
- Troubles de la mémoire, vieillissement :
quels espoirs thérapeutiques ?
- Mieux apprendre à l'école, améliorer sa mémoire :
ce qu'il faut faire.
- Et aussi : testez votre mémoire.

SCIENCE & VIE HORS SÉRIE fait le point

— EN KIOSQUE LE 9 SEPTEMBRE 2000 —

Nous veillons sur la qualité de votre eau
24 heures sur 24.



UNE SOCIÉTÉ DE

VIVENDI

Leau du robinet est le produit alimentaire le plus contrôlé. Pour vous, nous surveillons l'eau 24 heures sur 24, pour détecter la moindre trace de pollution et agir rapidement. Plus de 500 000 analyses par an, sur 64 paramètres, vous garantissent un contrôle permanent de sa qualité. Après nos usines de traitement, la surveillance se


GÉNÉRALE
des **eaux**

poursuit dans les réservoirs d'eau et tout au long de notre réseau de distribution. Générale des Eaux a d'ailleurs été la première à recevoir les certifications Iso 9002 et 14001, récompensant son savoir-faire dans le domaine de la qualité et de l'assainissement de l'eau. Une belle source de satisfaction.