



Paul Altmayr/CORBIS

Les deux bouddhas géants de Bamiyan (à gauche, 38 mètres de hauteur et, à droite, 55 mètres) étaient des symboles de l'art de l'Afghanistan, carrefour de nombreuses cultures, tels les Grecs, les Perses sassanides, les Kouchans...

Shotorak et de Païtava témoignent d'un style local, proche de l'art des Parthes (-250 à 224). Cependant, ils annoncent aussi déjà l'art du Xinjiang, le Turkestan chinois, et, au-delà, la diffusion du Bouddhisme Mahayana sur la «route de la soie». Cette influence est également présente à Bamiyan, gîte d'étape sur la route des pèlerins, chinois ou coréens, qui font le voyage de la Chine jusqu'à l'Inde, le pays du Bouddha, du ^v^e jusqu'au ^{vii}^e siècle. Les bouddhas monumentaux (de 55 mètres ou de 38 mètres) sculptés dans la falaise témoignaient de l'apogée du style du Gandhara, par leurs dimensions, inconnues jusque là. Ce style influencera toute l'Asie du Nord, de la Chine au Japon.

Les peintures de Bamiyan inaugurent une période nouvelle, celle de l'art «irano-bouddhique» qui fait le lien entre l'art gandharien et l'art du Turkestan chinois : il place l'Afghanistan entre l'Inde des Gupta (320-496) et l'Iran sassanide (226-650). On observe également quelques réminiscences hellénisantes et des influences avec l'art de la Sogdiane. Cette région, actuel Tadjikistan, était alors dominée par l'empire des turcs occidentaux qui contrôlaient aussi l'Afghanistan du ^{vi}^e au ^{vii}^e siècle.

Outre ses relations avec l'Asie centrale, Bamiyan évoque aussi, à travers son architecture, des régions plus lointaines, telle la Corée du temps des trois Royaumes (du ⁱ^{er} au ^{vii}^e siècle). Le site voisin de la vallée de Kakrak montre, quant à lui, les premiers man-

dala qui annoncent le bouddhisme ésotérique du Japon de Heian (794-1185). Par ailleurs, les sites de Tapa sardar et de Fondukistan attestent des derniers feux de l'art bouddhique en terre d'Afghanistan.

Au schiste ou au stuc, succède alors la terre, un matériau très prisé dans l'art du Turkestan : ce matériau se prête merveilleusement à l'art maniériste de l'époque qui cherche d'abord à plaire. Parallèlement, l'hindouisme, inconnu jusqu'alors, se fait de plus en plus présent. L'art bouddhique d'Afghanistan s'achève ainsi dans un raffinement qui annonce l'art de la Haute-Asie.

Avec l'arrivée de l'Islam, s'ouvre un autre chapitre où l'Afghanistan joue, là encore, son rôle de carrefour et crée un art original : la mosquée de Balkh avec ses neufs coupes, l'un des plus anciens monuments conservés de l'époque abbasside (762-1258), ou bien le minaret de Jam, (^{xii}^e siècle), l'un des joyaux de l'architecture islamique, en sont de magnifiques exemples. À la liste des sites qui témoignent de l'apport de ces régions afghanes à la civilisation musulmane, ajoutons encore le palais de Lashkari-bazar, du temps des ghaznevides (du ^x^e au ^{xii}^e siècle) et le royaume de Hérat à l'époque timuride (1400-506). L'Afghanistan est alors à nouveau au carrefour de trois mondes, la Chine, l'Iran et l'Inde. Pourtant, l'art qui s'y développe lui est propre. En témoignent l'école de ses enlumineurs et de ses miniaturistes, et les mosquées, telle celle de Mazar-i-Sharif ou

celle de Hérat qui sont connues à travers tout l'Islam.

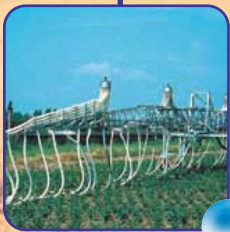
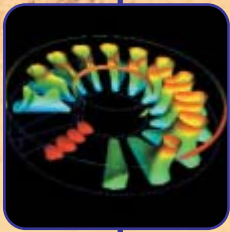
Que reste-t-il de tout ce patrimoine depuis le retrait soviétique? Des sites pillés, voire retournés au bulldozer, tel Aï Khanoum ou Tillia tepe ; un musée national à Kaboul en grande partie détruit lors des combats de l'hiver 1994-1995, et dont les collections ont fondu au fil des déménagements successifs destinés à les mettre à l'abri. On ignore encore ce qui a été détruit, pillé ou préservé. Aujourd'hui, le patrimoine afghan est au centre de l'actualité, alors que l'on ignore ce qu'il en reste.

Paradoxalement, les bouddhas de Bamiyan étaient au centre d'un débat qui les dépassait, quand la guerre qui fait rage est une guerre de l'image sur fond de catastrophe humanitaire. Bien plus que «religieux», le débat est politique et oppose des visions différentes de la vie et du monde. Il montre qu'il est dangereux de faire du patrimoine un enjeu dans une période de crise. Il souligne aussi qu'il est difficile de protéger le patrimoine de l'humanité sans tenir compte d'abord du patrimoine humain.

Pourquoi détruire s'il ne s'agit que de pierre? Pourquoi prendre en otage des populations étrangères, telles celles de l'Inde, de la Grèce et des pays bouddhistes, pour qui Bamiyan est (était) un symbole de leurs racines et de leurs traditions? Toutefois, comment se préoccuper des bouddhas de Bamiyan, en faisant abstraction du contexte général?

Pierre CAMBON,
Conservateur en chef, Musée Guimet

L'or bleu



L'eau est l'une des substances les plus communes dans l'Univers et notre planète bleue en est généreusement pourvue. Hélas, 97 pour cent de l'eau terrestre est salée, et une grande partie des trois pour cent restant est emprisonnée dans les glaces. Aussi, l'approvisionnement en eau douce stimule-t-il l'ingéniosité humaine, mais, également, les convoitises.

Au XXI^e siècle, la demande en eau douce, notamment dans les pays en développement, augmentera ; des déséquilibres entre les besoins en eau et la disponibilité de la ressource pousseront peut-être certains groupes à la violence. Trouver l'eau, la transporter, la conserver et l'économiser sont des enjeux essentiels.

Dans ce dossier, Peter Gleick décrit l'ampleur des difficultés que pose l'approvisionnement en eau de certaines régions en raison de l'explosion de la demande et des limites des réserves connues. Sandra Postel évoque la façon d'adapter l'irrigation, grande consommatrice d'eau douce, et d'améliorer cette technique agricole vitale. Quelques solutions devraient nous permettre d'échapper au manque d'eau.

L'or bleu est devenu un enjeu planétaire dont il est urgent de prendre conscience afin d'éviter une crise.



La valeur d'une goutte d'eau

PETER GLEICK

Nous en buvons ; elle produit de l'électricité ; elle est indispensable à nos cultures... Pourtant, nous gérons mal nos réserves en eau douce. Aurons-nous assez d'eau pour couvrir les besoins de la terre entière ?

A chaque grande civilisation est associée un grand fleuve, par exemple le Nil pour l'Égypte, le Tigre et l'Euphrate pour la Mésopotamie. Les premiers agriculteurs sont apparus là où la terre était fertile grâce à des pluies saisonnières et à des rivières pérennes. Puis de simples canaux d'irrigation ont amélioré le rendement des récoltes et allongé les périodes de culture dans les régions arides. Il y a 5 000 ans, dans la vallée de l'Indus, des communautés ont construit des habitations avec des canaux d'adduction d'eau et des fossés d'évacuation des eaux usées. À la fin du III^e siècle avant notre ère, les Romains bâtirent le premier aqueduc, l'Aqua appia, et organisèrent le drainage des eaux usées grâce au collecteur Cloaca maxima. À cette époque, Athènes, Pompéi et la plupart des villes gréco-romaines entretenaient également des systèmes d'approvisionnement en eau et des réseaux d'égouts.

Avec l'expansion des villes, l'eau est acheminée de sources de plus en plus éloignées, et l'on construit les premiers barrages et les premiers aqueducs. À l'apogée de l'Empire romain, neuf réseaux de canalisations et d'égouts sillonnent Rome. Chaque Romain dispose d'une quantité d'eau qui équivaut à celle dont disposent, aujourd'hui, les habitants de nombreux pays industrialisés.

Aux XIX^e et XX^e siècles, la révolution industrielle et l'explosion démographique ont accru la demande en eau : des dizaines de milliers d'ouvrages monumentaux ont été érigés

pour contrôler les inondations, améliorer l'irrigation et produire de l'énergie, ou encore pour protéger les réserves d'eau potable. En France, jusqu'à l'apparition des premières fontaines publiques en 1850, à Paris, et en 1880 dans les grandes villes, les porteurs d'eau assuraient l'approvisionnement en eau, mais la qualité était médiocre : en 1832, le choléra, véhiculé par l'eau, tua 20 000 Parisiens. En 1854, le baron Hausmann, préfet de la Seine, mit en place un programme de modernisation et d'assainissement du réseau d'eau : l'eau était captée dans des sources souterraines à des dizaines de kilomètres de Paris ; des rivières furent détournées ; les premières sociétés de distribution d'eau, telles la *Lyonnaise des eaux* et la *Compagnie générale des eaux* ont été créées à cette époque.

Grâce à ces systèmes de distribution perfectionnés, les maladies véhiculées par l'eau, autrefois endémiques partout dans le monde, ont été vaincues. Le réseau d'adduction d'eau a été progressivement développé et, aujourd'hui, 98,5 pour cent de la population rurale française est alimentée en eau potable.

De grandes villes, incapables de survivre avec les ressources locales, ont fleuri dans le désert grâce à l'eau prélevée dans des réserves situées à des centaines, voire à des milliers de kilomètres.

La production de denrées alimentaires a augmenté au même rythme que l'accroissement des populations, essentiellement grâce à l'extension des systèmes artificiels d'irrigations : sans eux, les récoltes globales diminueraient

de 40 pour cent. Environ 20 pour cent de l'électricité mondiale est produite par des turbines entraînées par de l'eau.

De l'eau pour tous

Tout semble aller pour le mieux dans le meilleur des mondes, mais la moitié de la population mondiale manque encore d'eau. En novembre 2000, les Nations Unies rappelaient que plus d'un milliard de personnes n'ont pas accès à l'eau potable et qu'environ un milliard et demi ne disposent pas d'installations sanitaires appropriées. La Banque mondiale prévoit qu'en 2025 trois milliards d'êtres humains souffriront de pénurie d'eau. En Afrique du Nord et au Moyen-Orient, les ressources seront inférieures au seuil critique, soit 2 000 mètres cubes par habitant (en France, les ressources sont actuellement de 4 000 mètres cubes par habitant). On estime que les maladies transmises par l'eau, dont la prévention serait possible, tuent environ 10 000 à 20 000 enfants. De vastes foyers de choléra sont apparus vers le milieu des années 1990 en Amérique latine, en Afrique et en Asie. Des millions de personnes au Bangladesh et en Inde boivent de l'eau contaminée par l'arsenic, et l'accroissement démographique des pays en développement accélère l'appauvrissement des réserves d'eau.

Les politiques de gestion de l'eau font bien plus que de mettre en danger la santé humaine. Des dizaines de millions de personnes ont été expulsées, souvent sans avertissement et sans indemnisation, pour que l'on puisse

construire de gigantesques réservoirs. Plus de 20 pour cent des espèces de poissons d'eau douce sont en voie de disparition ou en danger, car ces barrages et le détournement de certains cours d'eau ont modifié (parfois détruit) les écosystèmes où elles prospéraient. Certaines techniques d'irrigation dégradent la qualité des sols et réduisent les rendements. Dans certaines régions, par exemple en Inde, en Chine et aux États-Unis, les eaux souterraines sont pompées à un rythme trop rapide pour que les réserves aient le temps de se reconstituer. Des conflits dont l'enjeu est l'approvisionnement en eau ont créé des tensions locales, nationales et même internationales (voir l'encadré page 32).

Aujourd'hui, la façon dont les décideurs considèrent l'eau change : pourvoir aux besoins de l'homme, mais aussi respecter l'environnement, sont les priorités, afin d'assurer un peu d'eau pour chacun plutôt que beaucoup d'eau pour quelques-uns. Pour atteindre ces objectifs et répondre à la croissance démographique, certains préconisent de mieux utiliser les infrastructures existantes plutôt que de construire de nouvelles installations. Nous devons utiliser plus efficacement l'eau dont nous disposons, repenser l'usage que nous en faisons et trouver de nouvelles façons de nous procurer cette précieuse ressource.

Cette nouvelle «philosophie» n'est pas acceptée par tous et suscite une

certaine opposition de la part des organisations en place qui gèrent l'eau. Néanmoins, c'est sans doute la seule façon de faire pour que chacun dispose d'eau potable, pour que les cultures vivrières soient suffisamment irriguées et que les maladies liées à l'eau soient éradiquées. L'histoire nous montre que l'eau ne garantit pas la survie d'une civilisation, mais qu'à coup sûr les civilisations périssent en l'absence d'eau. Au premier rang des infrastructures mises en accusation, on trouve les barrages.

Les ravages des barrages

Depuis un siècle, la construction de canaux, de barrages et de réservoirs a été telle que la répartition de l'eau douce, d'une région à l'autre et d'une saison à l'autre, a changé au point de modifier un peu les oscillations de la Terre. Avant 1990, 40 barrages retenaient un volume global de 250 millions de mètres cubes ; aujourd'hui, 25 000 barrages, destinés principalement à l'irrigation et à la production d'énergie, submergent 50 millions d'hectares de terres et retiennent plus de 6 000 milliards de

mètres cubes d'eau, autant que le lac Ontario et le lac Michigan réunis. En France, 569 barrages ont été érigés, dont 60 de plus de 60 mètres de hauteur.

Auparavant, les barrages étaient le gage de la sécurité nationale, de la prospérité de l'économie et du développement de l'agriculture. Jusqu'au début des années 1980, les conséquences sur l'environnement de ces projets démesurés importaient peu. Aujourd'hui, on constate que les barrages ont détruit les écosystèmes d'innombrables rivières, de lacs et de ruisseaux. À la fin du XIX^e siècle, le bassin de la Loire et de l'Allier comptait environ 100 000 saumons. En 1996, bien que ce bassin soit le seul en Europe

où ce poisson vit encore, seules quelques dizaines d'adultes subsistaient. Sur le Haut-Allier, avant la construction du barrage de Saint-Étienne-du-Vigan, la ville de Brioude était la capitale européenne de la pêche au saumon. Aujourd'hui, ce barrage, ainsi que celui de Poutès-Monistrol, empêchent les saumons adultes de rejoindre les frayères. Dans la Vienne, le saumon avait disparu en 1930, après l'érection du barrage de Maisons-Rouges. De même, les saumons ont disparu de nombreuses autres rivières tant en Europe qu'aux États-Unis après la construction de barrages. Dans certaines régions, on estime à un pour cent la population des saumons qui a sur-

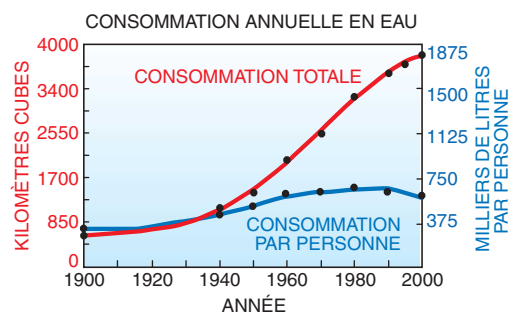
vécu. Qui plus est, la mer d'Aral, en Asie centrale, disparaît progressivement à cause du détournement des fleuves Amou Daria et Syr Daria qui irriguent les cultures de coton. On pense que 24 espèces de poissons qui n'étaient présentes que dans cette mer se sont éteintes.

Tous ces ravages ont renforcé le désir de protéger, voire de restaurer, certaines de ces ressources naturelles. Ainsi, en 1986, l'Établissement public d'aménagement de la Loire et de ses affluents a prévu quatre barrages sur le fleuve et sur ses affluents : le Veurdre et Naussac 2 sur l'Allier, Chambonchard sur le Cher et Serre-de-la-Fare, dans la haute vallée de la

L'eau disponible en 2025

La quantité totale d'eau prélevée aujourd'hui dans les rivières, dans les nappes phréatiques et autres sources d'eau douce du monde entier est sept fois supérieure à la quantité extraite en 1900. Toutefois, la consommation d'eau par personne a seulement doublé durant cette période et a même légèrement baissé durant les dernières années. Malgré cette tendance, la diminution de la consommation due à une meilleure utilisation ne compensera pas l'augmentation de la demande due à la croissance démographique. Selon les estimations, en 2025, au moins 40 pour

cent de la population mondiale, qui atteindra alors 7,2 milliards de personnes, seront confrontés à de graves problèmes d'approvisionnement tant pour l'agriculture que pour l'industrie, voire pour la consommation personnelle si l'on ne trouve pas comment compléter les ressources naturelles en eau douce. Le manque d'eau frappera même certaines régions des pays riches en eau, tels les États-Unis et la Chine. L'accès à l'eau dépend aussi de facteurs qui ne sont pas évoqués ici, tels les conditions politiques et économiques, les changements climatiques et les techniques disponibles.



- Eau abondante.** Plus de 120 mètres cubes par personne. Pour 59,3 pour cent de la population, les difficultés sont limitées à certaines régions et à certaines saisons.
- Quantité limitée** 70 à 120 mètres cubes par personne ; 32,6 pour cent de la population mondiale n'aura pas assez d'eau pour l'irrigation des cultures alimentaires.
- Eau rare** 35 à 70 mètres cubes par personne ; 5,3 pour cent de la population mondiale n'aura jamais assez d'eau, ni pour l'agriculture ni pour l'industrie.
- Manque d'eau** Moins de 35 mètres cubes par personne. Les risques agricoles, industriels et sanitaires seront graves pour 2,8 pour cent de la population mondiale.

Les risques de pénurie.

Loire. Le comité *Loire vivante*, puis l'association *SOS Loire vivante* se sont aussitôt créés pour s'opposer à ce programme. En 1994, le projet de barrage de Serre-de-la-Fare a été abandonné par le gouvernement le 4 janvier 1994. Le programme d'aménagement de la Loire a été entièrement revu ; il met l'accent sur la prévention des crues sans barrages et sur la sauvegarde du patrimoine naturel. Outre l'abandon du barrage de Serre-de-la-Fare, le nouveau plan d'aménagement prévoit le démantèlement des barrages de Maisons-Rouges et de Saint-Étienne-du-Vigan (voir la figure 1), ainsi que la réintroduction du saumon et d'autres espèces, telles que l'aloise et l'esturgeon.

Des barrages ont aussi été démantelés dans d'autres pays. Ainsi, en 1999, le barrage Edwards, construit en 1837 sur la Kennebec, dans le Maine, a été détruit ; quelques mois plus tard, le saumon, l'aloise, le hareng de rivière, le bar, l'esturgeon, l'éperlan et l'anguille avaient déjà repeuplé le cours supérieur de la rivière. En tout, 500 vieux barrages néfastes pour l'environnement ont été supprimés aux États-Unis durant ces dernières années.

Dans les années 1970, des projets de détournement de fleuves sibériens coulant vers l'Arctique ont soulevé un tollé sans précédent, qui a contribué à l'arrêt des projets. Dans de nombreux pays en développement, par exemple en Inde ou en Chine, l'opposition des populations aux grands projets hydrologiques est de plus en plus violente en raison du prix à payer pour l'environnement et pour les populations elles-mêmes.

Depuis peu, les organisations financières internationales, telle la Banque mondiale, réduisent ou suppriment les subventions destinées aux barrages. Après tant de constructions si peu rentables, de nombreux gouvernements refusent de payer de nouvelles structures destinées à pallier le manque d'eau. Toutefois, des barrages, des aqueducs et d'autres infrastructures seront nécessaires pour faire face à l'accroissement de la population mondiale, notamment dans les pays en développement, où les besoins élémentaires ne sont pas couverts. Cependant, ces projets répondront à des normes plus strictes : ils tiendront compte des populations locales, de l'environnement, des ressources et devront être peu onéreux. Heureusement, les besoins en eau



ERN European Rivers Network / SOS Loire Vivante

1. LE BARRAGE DE SAINT ETIENNE-DU-VIGAN (à gauche, en haut), sur l'Allier, produisait de l'électricité. Le 24 juin 1998, il a été soufflé par des charges explosives (à gauche, au centre). Les débris ont été dégagés (à gauche, en bas) et le site réaménagé (à droite).

n'augmentent pas aussi rapidement que prévu, et la demande de nouvelles infrastructures a diminué durant les 20 dernières années. Bien que la population et la production aient continué à augmenter dans les pays développés, le rythme de la consommation de l'eau s'est ralenti, voire a reculé dans certaines régions.

Baisse provisoire ou véritable tendance ?

Comment expliquer ce changement ? Par l'utilisation plus efficace de l'eau et une nouvelle définition des priorités. Entre 1900 et 1995, la quantité d'eau consommée par habitant a doublé alors que les prélèvements d'eau ont été multipliés par sept.

Depuis 1970, la population française est passée de 50 à 60 millions d'habitants, soit une augmentation de 20 pour cent, tandis que la consommation d'eau a crû de plus de 50 pour cent, pour atteindre aujourd'hui 700 mètres cubes par an et par habitant. Toutefois, depuis cinq ans, on observe une légère baisse de la consommation domestique.

La France, à l'abri du besoin, reçoit annuellement 440 milliards de mètres cubes sous forme de précipitations : 60 pour cent s'évaporent, 15 pour cent alimentent les cours d'eau et 25 pour cent rejoignent les réserves souterraines. Les prélèvements pour

la production d'énergie, les usages domestiques, l'agriculture et l'industrie s'élèvent à 41 milliards de mètres cubes.

Un usage plus rentable de l'eau est indispensable. Dans de nombreux pays, 30 pour cent ou plus de l'eau domestique disparaît dans des canalisations qui fuient, dans des équipements défectueux et dans des systèmes de distribution mal entretenus. Selon des estimations récentes, la quantité d'eau perdue dans le réseau de distribution de la ville de Mexico suffirait à alimenter une agglomération de la taille de Rome. Même avec des systèmes plus modernes, des pertes de 10 à 20 pour cent sont fréquentes.

Lorsque l'eau arrive jusqu'au consommateur, elle est souvent gaspillée. Dans les foyers, une grande partie de l'eau est gâchée. Un robinet ou une chasse d'eau qui fuient perdent jusqu'à 600 litres par jour, soit quasi l'équivalent de la consommation d'un foyer. La population française est sensibilisée au problème de gaspillage, et également au maintien de la qualité de l'eau. Ainsi, la faible consommation d'eau des appareils électroménagers, tels les lave-vaisselle ou les machines à laver le linge, est-elle devenue un argument de vente. Par ailleurs, de nombreuses sociétés proposent des appareils de surveillance de la consommation, qui alertent le consommateur en cas d'une

augmentation anormale, ou des systèmes économiseurs d'eau, tels des chasses d'eau à deux vitesses et des interrupteurs de douches.

Même dans les pays en développement, des systèmes tels que des toilettes plus économiques en eau jouent un rôle notable. À Mexico, menacé par la pénurie d'eau, les autorités remplacent 350 000 anciennes toilettes. Les remplacements déjà effectués ont entraîné l'économie suffisante pour alimenter en eau 250 000 habitants supplémentaires.

La quantité d'eau nécessaire pour les applications industrielles dépend du choix des consommateurs et des procédés de production choisis. L'eau intervient dans le processus de production même, le refroidissement, le lavage et l'évacuation des déchets. Le refroidissement représente l'essentiel de la

demande en eau des industries. La consommation industrielle française a diminué : de 5 107 millions de mètres cubes en 1985, elle n'était plus que de 3 942 millions de mètres cubes en 1995.

La production d'une tonne d'acier nécessitait avant la Seconde Guerre mondiale entre 60 et 100 tonnes d'eau : aujourd'hui, moins de six tonnes suffisent. La production d'une tonne d'aluminium ne requiert qu'une tonne et demie d'eau. Remplacer l'acier par de l'aluminium, par exemple dans l'industrie automobile, réduirait encore davantage la consommation d'eau.

Le télétravail permet également d'économiser les centaines de litres que requièrent la production, la livraison, la vente d'un litre d'essence et l'entretien des locaux professionnels, même si l'on tient compte de la

quantité d'eau nécessaire pour fabriquer les ordinateurs.

Dans l'agriculture, l'activité qui consomme le plus d'eau, des économies sont possibles. Par exemple, l'irrigation au goutte à goutte réduit de 30 pour cent les besoins en eau pour cultiver les tomates, et l'on peut cultiver des plantes qui consomment peu d'eau. Depuis 1970, la France a multiplié par trois ses surfaces irriguées pour atteindre 1 620 000 hectares, soit quatre pour cent des surfaces agricoles. La région Poitou-Charentes a multiplié par 10 ses surfaces irrigables, tandis que celles-ci sont restées stables dans les régions méditerranéennes.

Près de la moitié de l'eau consacrée à l'agriculture ne sert pas aux cultures : elle est perdue lors de la distribution ou lors de l'arrosage.

Les guerres de l'eau

L'histoire fait état de luttes répétées pour les ressources en eau douce depuis les temps anciens. Par exemple, des rouleaux mésopotamiens indiquent qu'il y a 4 500 ans les cités États d'Umma et de Lagash, au Moyen-Orient, se disputaient le contrôle des canaux d'irrigation.

L'eau a toujours été un objectif militaire et politique, une arme de guerre et même une cible militaire. Les discordes naissent souvent des frontières politiques arbitrairement fixées par les gouvernements, qui ne répartissent pas équitablement les ressources. Aujourd'hui, environ la moitié des terres émergées se situe dans des bassins internationaux de fleuves, et les bassins versants de 261 fleuves majeurs appartiennent à deux pays, voire plus. Des désaccords sur la répartition des ressources en eau ont récemment déclenché des conflits locaux et régionaux, les protagonistes pensant que l'attribution des ressources en eau n'était pas équitable.

Les quelques exemples de conflits qui suivent démontrent que les traités et la diplomatie internationale encouragent parfois les opposants à coopérer, mais pas toujours avant que le sang ait déjà été versé. Les différends seront de plus en plus fréquents au cours des prochaines décennies, à mesure que s'intensifiera le besoin vital de disposer de cette ressource rare.



En avril 1999, à Novi Sad, en Yougoslavie, l'attaque aérienne de l'OTAN détruit les installations d'adduction d'eau et le pont sur le Danube.

États-Unis,

Des fermiers de la région de Los Angeles dynamitent plusieurs fois l'aqueduc de la ville, dans l'espoir d'empêcher que l'eau de la rivière Owens ne soit détournée au profit des citoyens.

Inde et Pakistan, 1947 à 1960

Le partage des Indes britanniques répartit maladroitemment les eaux de la vallée de l'Indus entre l'Inde et le Pakistan. La nécessité d'obtenir de l'eau pour l'irrigation suscite de nombreux conflits entre les deux nations. L'Inde a même, une fois, bloqué complètement l'écoulement de l'eau vers les canaux d'irrigation du Pakistan. En 1960, après 12 ans de négociations dirigées par la Banque mondiale, un traité a contribué à l'apaisement des discordes.

Égypte et Soudan, 1958

L'Égypte envoie des troupes dans les territoires revendiqués par les deux nations alors même que se déroulent des négociations sur la politique régionale et sur la répartition de l'eau du Nil. En 1959, la signature d'un traité relatif aux eaux du Nil calme les tensions.

Israël, Jordanie et Syrie, dans les années 1960 et 1970

Les conflits au sujet de l'attribution, du contrôle et du détournement des fleuves Yarmouk et Jourdain persistent de nos jours.

Afrique du Sud, 1990

Parce qu'ils ont protesté contre leurs conditions de vie et d'hygiène misérables, 50 000 habitants noirs du ghetto de Wesseltown sont privés d'eau par un parti pro-Apartheid.

Irak, 1991

Pendant la guerre du Golfe, l'Irak détruit des usines de dessalement d'eau de mer au Koweït. Les Nations Unies pensent un moment tarir l'écoulement de l'Euphrate vers l'Irak à partir du barrage Atatürk, en Turquie.

Inde, de 1991 à nos jours

Environ 50 personnes sont mortes des violences qui opposent les États indiens Karnataka et Tamil Nadu, qui se disputent l'eau d'irrigation de la rivière Cauvery, laquelle coule d'un État vers l'autre.

Yougoslavie, 1999

L'OTAN détruit des installations d'adduction d'eau à Belgrade et des ponts sur le Danube pour interrompre la navigation.

Notre régime alimentaire influe également sur nos besoins en eau ; tandis que le blé nécessite entre 380 et 950 litres d'eau par kilogramme, le bœuf requiert entre 7 500 et 32 000 litres par kilogramme.

En France, la consommation d'eau varie selon plusieurs facteurs. La consommation d'eau à usage domestique en milieu rural (110 litres par jour et par habitant) est inférieure à la consommation en milieu urbain (150 litres par jour et par habitant). De surcroît, au Nord de la Loire, on consomme en moyenne 20 litres d'eau par jour de plus qu'au Sud. Enfin, le revenu, l'âge et surtout l'activité influent également sur la consommation. La pression sociale aboutira sans doute à un transfert de l'usage de l'eau du secteur agricole vers d'autres secteurs économiques. À moins que la communauté agricole ne fasse des efforts pour économiser l'eau, les tensions sociales entre les agriculteurs et les autres utilisateurs s'aggraveront.

Des solutions existent

Notre planète est presque entièrement recouverte d'eau, de sorte que l'on a peine à croire qu'on pourrait un jour en manquer. Pourtant, 97 pour cent des 1 400 millions de mètres cubes d'eau présents sur la Terre sont trop salés pour la consommation humaine ou pour les cultures, et la majeure partie des trois pour cent restants est inaccessible, piégée sous forme d'eaux souterraines profondes, de glaciers ou de calottes polaires.

Comment exploiter cette eau ? Différentes solutions existent. Par exemple, le dessalement de l'eau saumâtre ou de l'eau de mer est efficace, mais reste très cher et n'est donc une solution que pour les régions riches, mais arides, situées en bord de mer, tel le golfe arabique (voir *le dessalement de l'eau de mer*, par Diane Martindale, page 38).

D'autres sociétés proposent de transporter de l'eau douce par bateau ou même dans de gigantesques sacs en plastique des régions où cette ressource est abondante vers les parties du monde qui en manquent (voir *Le transport de l'eau*, par Peter Gleick, page 39). Toutefois, cette technique est contraignante.

Plutôt que d'exploiter des réserves d'eau très éloignées, certains responsables de l'approvisionnement préco-

nisent d'utiliser des types d'eau différents selon les usages : l'eau potable n'est pas nécessaire pour rincer les toilettes ou arroser le gazon. La majeure partie de l'eau finit dans les égouts après un usage unique, et les pays industrialisés dépensent des milliards d'euros pour la collecte et le traitement des eaux usées avant de les déverser dans une rivière ou dans l'océan. Le degré d'assainissement des eaux usées pourrait varier selon les applications : la reconstitution des nappes souterraines, l'utilisation industrielle, l'irrigation des cultures ou encore l'usage domestique.

Dans les pays plus pauvres, les eaux usées sont simplement déversées sans aucun traitement dans les rivières : elles représentent un danger pour la santé humaine ou pour l'environnement. On s'est récemment intéressé à la régénération et à la réutilisation de ces eaux. Par exemple, les habitants de Windhoek, en Namibie – le pays le plus sec d'Afrique –, utilisent de l'eau retraitée depuis 1968. À cette époque, les réservoirs des rivières saisonnières avaient été épuisés par la population en plein essor. Les responsables de la ville avaient alors décidé de construire une usine de retraitement des eaux usées ; aujourd'hui, elle fournit 3,5 millions de mètres cubes d'eau potable, soit 23 pour cent des besoins de la ville. Dans cette usine, l'eau décante, tandis que des filtres éliminent les petites particules organiques. Divers traitements suppriment ensuite l'ammoniaque, et des filtres de carbone et de sable retiennent les dernières matières organiques dissoutes. Enfin, l'eau est purifiée par addition de chlore et de chaux. L'eau recyclée est d'une qualité équivalente, voire supérieure à celle des eaux de sources locales. En été ou pendant les sécheresses, le recyclage des eaux usées fournit jusqu'à 30 pour cent des besoins en eau de Windhoek. Les responsables espèrent obtenir l'adhésion de la population au programme de recyclage de l'eau : ils lui ont notamment révélé que l'eau recyclée est l'ingrédient secret de la bière locale.

En Israël, 70 pour cent des eaux usées des villes sont traitées et réutilisées pour l'irrigation de cultures non alimentaires. La Jordanie fait aussi de gros efforts pour capter, traiter et réutiliser davantage d'eaux usées.

La demande en eau ne cesse de croître. Pour améliorer la gestion des



2. LA CAPITALE DE LA NAMIBIE, Windhoek, lutte contre la pénurie d'eau en rendant à nouveau potable des eaux usées recyclées.

ressources d'eau, on devra sans doute en augmenter le coût et fournir des informations aux consommateurs sur les nouvelles techniques moins consommatrices, et répartir l'eau de façon équitable. Les gouvernements devront abandonner les cultures intensives dans les régions arides et cesser de construire des barrages.

La gestion mondiale de l'eau nécessitera de profonds changements. Au lieu de continuer à chercher de nouvelles sources d'eau pour satisfaire des besoins grandissants, l'heure est à une utilisation optimisée des ressources disponibles aujourd'hui et au respect de l'environnement.

Peter GLEICK est le directeur de l'Institut du Pacifique pour le développement, l'environnement et la sécurité.

Stanislas WICHERECK, *L'eau, de la cellule au paysage*, Elsevier-Unesco, 2000.

Peter GLEICK, *The World's Water 2000-2001*, Island Press, 2000.



Produire plus avec moins d'eau

SANDRA POSTEL

Pour que la population mondiale en constante expansion puisse se nourrir, l'agriculture devra épargner l'eau et l'irrigation être disponible sur l'ensemble de la planète.

En Mésopotamie, il y a 6 000 ans, des agriculteurs creusent un fossé pour détourner l'eau de l'Euphrate : ils établissent ainsi la première civilisation fondée sur l'irrigation. Cette histoire des anciens Sumériens est bien connue, mais la suite l'est moins : ils ont également été l'une des premières civilisations à disparaître en partie à cause de l'irrigation.

Les agriculteurs sumériens ont produit d'abondantes récoltes de blé et d'orge pendant 2 000 ans grâce à l'eau tirée du fleuve. Cependant, le sol finit par «succomber» à cause de l'accumulation des sels et autres impuretés que laisse l'eau après son évaporation. Selon de nombreux historiens, le sol empoisonné, qui ne fournissait plus une nourriture suffisante, a été la principale cause du déclin du royaume de Sumer.

Toujours plus

Aujourd'hui, l'irrigation est synonyme de survie pour beaucoup plus d'êtres humains que du temps des anciens Sumériens. Près de 40 pour cent des denrées alimentaires mondiales poussent sur des sols irrigués, qui représentent 18 pour cent de l'ensemble des terres cultivées de la planète (voir la figure 2).

L'expansion de l'irrigation a permis à la production mondiale de céréales de tripler depuis 1950. Pratiquée correctement, l'irrigation jouera un rôle important pour nourrir l'humanité, mais l'histoire nous apprend qu'elle comporte également des risques.

L'irrigation représente les deux tiers de la consommation mondiale d'eau et jusqu'à 90 pour cent dans de nombreux

pays en développement. En France, l'agriculture consomme 12 pour cent des prélèvements d'eau. Toutefois, à la différence de la production d'énergie, pour qui la quasi-totalité des eaux usées sont réutilisables, l'eau d'irrigation est irrémédiablement perdue : l'eau utilisée par l'agriculture représente 42 pour cent de la consommation nette.

Les besoins en cultures prévus pour 2025, lorsque la population de la terre atteindra les huit milliards de personnes, exigeront 800 milliards de mètres cubes d'eau supplémentaires, soit un volume équivalent à près de dix fois le débit annuel du Nil. Personne ne sait comment fournir cette eau supplémentaire tout en protégeant les réserves pour une utilisation future : le manque d'eau est la plus grande menace qui pèse sur la production future des aliments.

De nombreuses sources d'eau douce (nappes souterraines et fleuves) sont aujourd'hui surexploitées, et huit pour cent des cultures vivrières proviennent de fermes qui utilisent l'eau souterraine plus vite que les nappes aquifères ne se reconstituent. De nombreux grands fleuves sont tellement détournés qu'une bonne partie de l'année, ils n'atteignent même plus la mer. À mesure que le nombre de citadins augmentera, pour atteindre cinq milliards en 2025, les agriculteurs, les industriels et les particuliers se disputeront de plus en plus cette ressource qui se raréfie.

Malgré cela, les agronomes comptent sur les terres irriguées pour produire la plupart des aliments supplémentaires qui seront nécessaires pour nourrir la population mondiale.

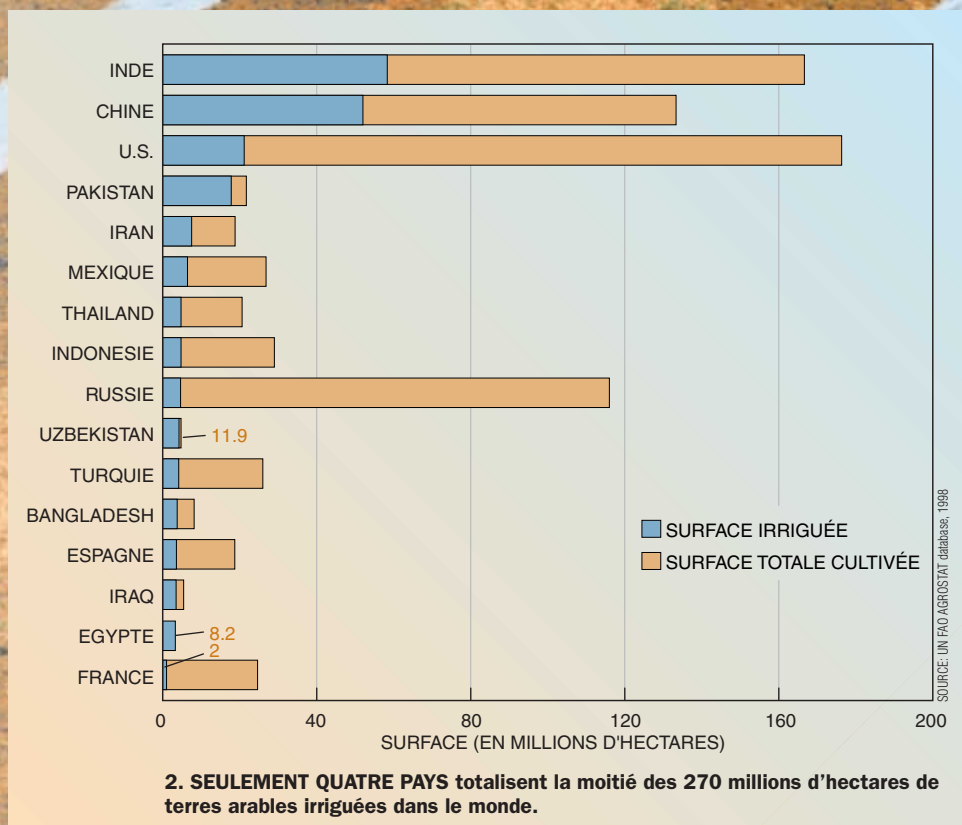
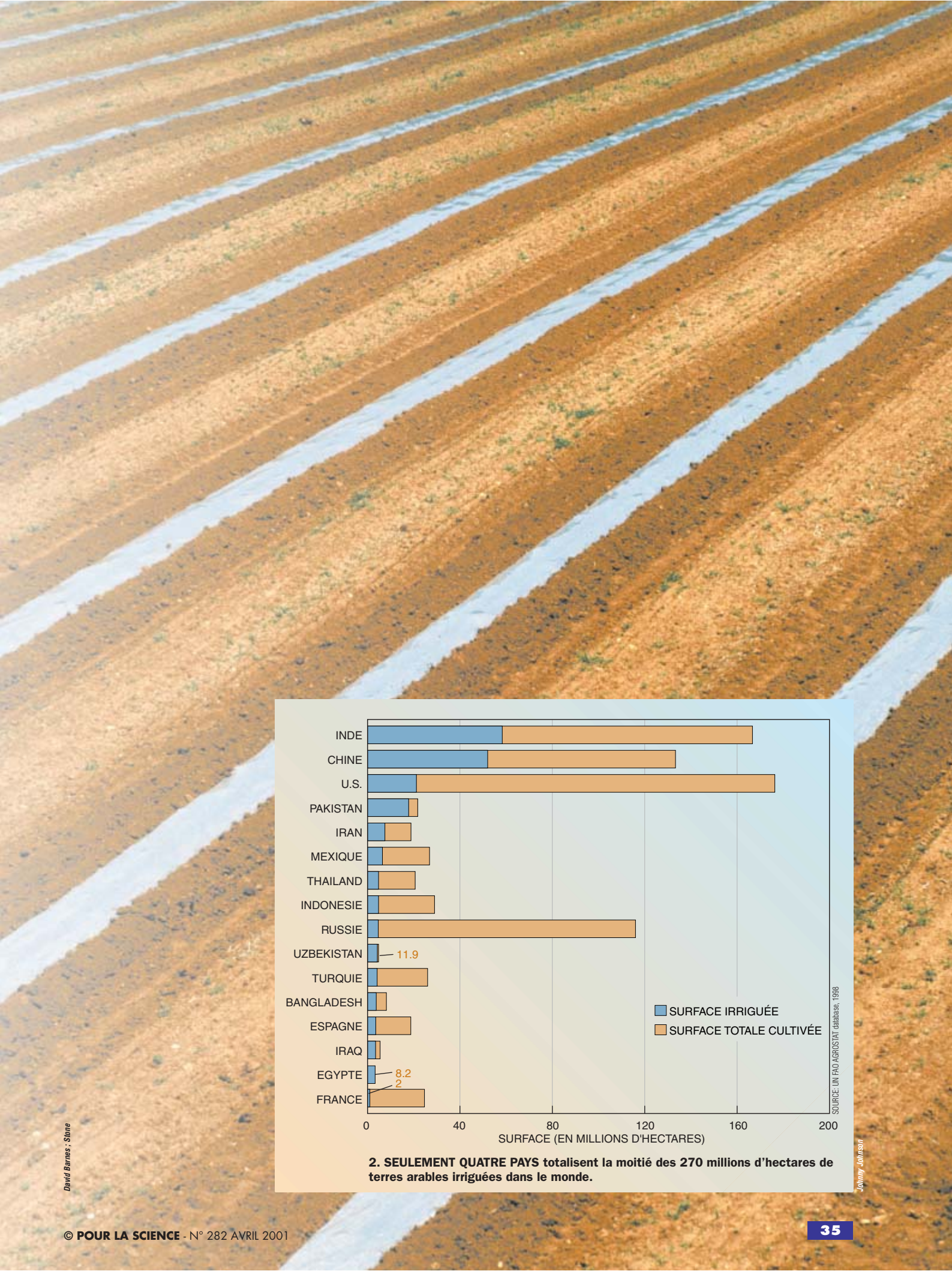
Grâce à une meilleure gestion des sols et de l'eau et à des techniques de culture plus inventives, la production des terres agricoles arrosées uniquement par les pluies augmentera. En revanche, pour survivre, l'agriculture irriguée devra être minutieusement réorganisée pour que la consommation d'eau soit réduite et que les coûts diminuent.

Consommer moins...

Comment améliorer la productivité de l'eau utilisée pour l'agriculture ? Une première solution consiste à augmenter l'efficacité de l'irrigation. Aujourd'hui, la plupart des agriculteurs irriguent leurs cultures grâce à la gravité, qui répand l'eau dans des fossés et dans des canaux jusqu'aux champs. En France, cette technique, principalement répandue dans le Sud-Est, où les systèmes d'irrigation sont anciens, est appliquée aux cultures fruitières : elle est présente sur quelques pour cent des surfaces irriguées.

Avec cette technique, les plantes n'absorbent qu'une petite quantité d'eau, tandis que le reste s'écoule vers des rivières ou s'évapore. D'une part, l'eau est gaspillée, d'autre part, elle est polluée. Par ailleurs, les sols sont dégradés par l'érosion, par la saturation des sols par l'eau et par l'excès de sels. Parmi les techniques efficaces qui respectent l'environnement, les dispositifs de goutte à goutte réduiraient de moitié la demande en eau des exploitations agricoles.

1. L'irrigation par des sillons qui parcourent les champs est une méthode qui gaspille beaucoup d'eau. Une grande partie de cette eau s'infiltre dans le sol ou s'évapore sans profiter aux plantes.



Ce système fournit de l'eau directement aux racines des plantes et évite pratiquement tout gaspillage. L'eau circule sous faible pression dans un réseau de tubes de plastique perforés installés sur le sol ou juste sous la surface, et s'écoule par de petits trous avec un débit faible, mais continu. Grâce à un degré d'humidité idéal, les plantes ont un meilleur rendement. En France, ce système, peu utilisé, est mis en œuvre pour les cultures pérennes, tels l'arboriculture et les la culture des légumes. Des études ont montré que l'irrigation au goutte à goutte réduit la consommation d'eau de 30 à 70 pour cent, et augmente le rendement des cultures de 20 à 90 pour cent par rapport aux méthodes d'irrigation «classiques».

L'irrigation par aspersion est aussi efficace que les dispositifs de goutte à goutte, quand elle est utilisée correctement. L'eau est pulvérisée sur les grands champs de maïs et de blé par des canons ou par des rampes. L'irrigation par aspersion constitue le moyen d'irrigation le plus fréquent.

Des arroseurs bien conçus ont parfois des performances proches des dispositifs de goutte à goutte. Ils pulvérisent l'eau sous pression dans

l'air, afin de couvrir la plus vaste surface possible. Toutefois, plus l'eau reste en suspension dans l'air, plus elle s'évapore et plus elle est déviée par le vent avant d'atteindre les plantes. De nouveaux arroseurs à basse énergie pulvérisent l'eau par petites doses à travers des becs placés au ras du sol. Avec de tels arroseurs, les plantes absorbent jusqu'à 95 pour cent de l'eau déversée.

Malgré leurs avantages, les coûts élevés des arroseurs et des dispositifs de goutte à goutte empêchent leur multiplication : les premiers n'irriguent que 10 à 15 pour cent des champs dans le monde, et les seconds à peine plus de un pour cent. De surcroît, les politiques de gestion de l'eau n'encouragent pas l'utilisation de dispositifs d'irrigation efficaces, car les prix de l'eau d'irrigation sont très bas : les agriculteurs sont peu motivés pour investir dans des dispositifs d'irrigation efficaces et qui consomment peu d'eau. Enfin, la plupart des gouvernements ne contrôlent pas le pompage des eaux souterraines, même dans des régions où les nappes aquifères sont surexploitées. Ce n'est pas le cas en France, où même le pompage de petites quantités fait l'objet d'une déclaration à la préfecture, tandis

que pour les pompages plus importants on doit demander une autorisation préfectorale. Par ailleurs, dans certains pays, les agriculteurs pourraient économiser leurs propres réserves en eau s'ils avaient le droit de vendre ce qu'ils ne consomment pas, mais cette pratique est généralement critiquée, voire interdite.

Outre les systèmes d'irrigation qui consomment moins d'eau, d'autres méthodes permettraient une réduction de la demande en eau dans le secteur de l'agriculture. Par exemple, la programmation sur ordinateur des cycles d'irrigation, c'est-à-dire de l'arrosage en fonction des besoins des plantes, de la teneur en eau des sols et de la pluviométrie, minimise la quantité d'eau utilisée. Le cultivateur détermine ainsi, avec une grande précision, quand et comment irriguer ses cultures tout au long de la période de croissance. En 1995, grâce à cette technique, des agriculteurs californiens ont réduit leur consommation d'eau d'environ 10 pour cent en moyenne et augmenté le rendement des cultures de près de 10 pour cent.

Pour tirer un meilleur bénéfice de l'eau, on peut aussi l'utiliser plus d'une fois. Par exemple, les eaux usées recyclées comptent pour 30 pour cent de

L'irrigation en France



PARMI LES SYSTÈMES D'IRRIGATION qui consomment peu d'eau, on trouve les arroseurs à canon (*ci-dessus*), les dispositifs de goutte à goutte (*à gauche, en bas*) et les arroseurs à basse pression (*à gauche, en haut*).

En France, les 1 900 000 hectares irrigués représentent six pour cent des terres cultivées : la surface irriguée a été multipliée par trois depuis les années 1970. Comment alimenter en eau ces terres ? Les solutions varient selon les régions. En Provence-Alpes-Côte d'Azur, le Languedoc-Roussillon et la Corse, l'irrigation est très ancienne : la faible extension des surfaces irriguées n'a pas nécessité une augmentation notable des volumes stockés dans les barrages ou prélevés sur les rivières à haut débit. Dans ces régions, il convient surtout de moderniser les systèmes de transport et de distribution.

En Aquitaine et en Midi-Pyrénées, les surfaces irriguées ont doublé en 30 ans. Le volume des réserves n'a pas augmenté suffisamment, et les pouvoirs publics mettent en place une politique de gestion des rivières pour répondre à la demande.

Enfin, dans les régions où la superficie des zones irriguées a beaucoup augmenté, comme en Poitou-Charentes où elle a été multipliée par 11, les ressources devront être à la fois améliorées en quantité et en qualité.

Pourquoi un tel engouement des agriculteurs français pour l'irrigation ? Elle permet l'accroissement de la compétitivité puisque l'on passe de une à deux, voire trois récoltes par an. De plus, elle régularise la production tout au long de l'année, elle autorise la diversification des cultures, et, enfin, elle améliore la qualité des produits. Elle est surtout nécessaire pour compenser le décalage temporel entre les périodes de forte pluviométrie (l'automne et l'hiver) et celles où le prélèvement d'eau est le plus important (l'été).

l'eau utilisée par les agriculteurs, en Israël, et la proportion atteindra sans doute 80 pour cent d'ici 2025. Par ailleurs, l'épandage des boues d'épuration issues du traitement des eaux profite également à l'agriculture (voir l'encadré page 41).

Les agronomes participent aussi à l'économie d'eau en augmentant les rendements des cultures : celles-ci produisent plus de nourriture avec la même quantité d'eau. Par exemple, les variétés hybrides de blé et de riz, qui ont déclenché la révolution verte, convertissent davantage d'énergie de la plante, et donc d'eau prélevée, en céréales comestibles. Les variétés de riz à haut rendement et à maturation précoce ont triplé la quantité de riz récoltée par unité d'eau consommée. Aujourd'hui, on imagine mal une stratégie (d'hybridation classique ou par génie génétique) qui donnerait d'aussi bons résultats, mais quelques petites améliorations restent possibles.

... Et moins cher

L'économie d'eau en agriculture est nécessaire, mais l'irrigation ne vaincra jamais à elle seule la faim dans le monde ni la pauvreté. Parmi les 800 millions de personnes sous-alimentées dans le monde, des millions de familles de cultivateurs pauvres, particulièrement en Asie et en Afrique, où sévissent de longues périodes de sécheresse, pourraient profiter de l'irrigation ou d'une meilleure utilisation des ressources locales en eau. Pour ces populations, les techniques traditionnelles d'irrigation sont trop coûteuses pour leurs petites surfaces, souvent inférieures à deux hectares. Même les pompes motorisées les moins chères, qui puisent dans les eaux souterraines, coûtent plus de 2 000 francs, soit l'équivalent d'un an de salaire. Toutefois, des dispositifs moins onéreux ont fait leurs preuves.

Des pluies torrentielles inondent le Bangladesh durant les mois de la mousson, mais, en dehors de cette période, les précipitations sont peu abondantes. Beaucoup de champs sont en jachère pendant la saison sèche, bien que l'on trouve de l'eau souterraine à moins de six mètres de profondeur. Depuis 1984, une «pompe à pédales» actionnée au pied, a rendu de nombreuses exploitations agricoles productives toute l'année.

Cette pompe ressemble à un stimulateur de marche : l'utilisateur

appuie alternativement sur deux longues perches de bambou qui entraînent deux cylindres d'acier. L'eau souterraine est aspirée dans les cylindres, puis déversée dans un sillon qui parcourt le champ. Chaque jour, la pompe doit être actionnée durant quatre à six heures pour l'irrigation des rizières et des cultures de légumes. Malgré ce dur labeur, les paysans qui utilisent cette technique ne souffrent plus de la faim pendant la saison sèche et produisent même un surplus de légumes qu'ils vendent sur les marchés.

La pompe à pédales, qui coûte environ 200 francs, augmente de 600 francs par an le revenu moyen de ces paysans (qui gagne environ cinq francs par jour). Aujourd'hui, environ 1,2 million de pompes à pédales accroissent la productivité de plus de 240 000 hectares de terres cultivées. De plus, ces pompes sont fabriquées et vendues localement : elles ont augmenté de plus de 2,2 milliards de francs les revenus de l'économie bangladaise.

Dans d'autres régions pauvres et sèches, les cultivateurs utilisent des dispositifs de goutte à goutte et des arroseurs peu coûteux. Grâce à ces systèmes adaptés aux différents revenus et à la taille des exploitations, les paysans qui disposent de peu d'eau irriguent efficacement leurs terres. Sur les contreforts de l'Himalaya du Nord de l'Inde, où les cultures sont disposées en terrasses et irriguées avec une eau peu abondante, les paysans espèrent doubler leurs surfaces cultivées grâce à des systèmes de goutte à goutte bon marché.

Une large diffusion de ces techniques peu onéreuses requiert la création de chaînes d'approvisionnement locales qui incluraient des fabricants, des détaillants et des installateurs, ainsi que des campagnes de promotion. La pompe à pédales a connu un grand succès au Bangladesh, car des entreprises locales ont fabriqué et vendu le produit, dont les paysans ont eu connaissance grâce à des films projetés sur des écrans installés en plein air et à des démonstrations dans les villages.

Sandra POSTEL dirige le Projet de politique globale de l'eau, à Amherst, dans le Massachusetts.

Stephen FOSTER et al. *Groundwater in Rural Development*, Technical Paper, n° 463 World Bank, Washington, 2000.



3. DES POMPES À PÉDALES PEU ONÉREUSES aident plus d'un million de paysans bangladais à irriguer leurs champs. En appuyant alternativement sur les deux morceaux de bambou, ils actionnent une pompe qui déverse l'eau dans un sillon.

La diffusion de techniques d'irrigation à un prix abordable pour les petites exploitations pourrait réduire, dans les 15 prochaines années, la faim et la pauvreté de 150 millions de personnes parmi les plus pauvres du monde, et ainsi augmenter le revenu net dans ces zones rurales pauvres d'une vingtaine de milliards de francs par an.

Au cours des 20 prochaines années, le nombre d'habitants des pays qui manquent d'eau passera de 500 millions à 3 milliards. De nouveaux dispositifs aideront les agriculteurs à produire de la nourriture pour la population en expansion, tout en protégeant les fleuves, les lacs et les nappes aquifères. Toutefois, des changements socio-économiques plus profonds, notamment un ralentissement de la croissance démographique et de la consommation, seront nécessaires. Aujourd'hui que nous connaissons les menaces qui pèsent sur l'irrigation moderne, il nous appartient d'en tirer les conséquences.

Sandra POSTEL et W. NORTON, *Pillar of Sand ; Can the Irrigation miracle Last ?*, 1999.

Thorkild JACONSEN et Robert ADAMS, *Salt and Silt in Ancient Mesopotamian Agriculture*, in *Science*, vol. 128, pp. 1251-1258, novembre 1958.

Le dessalement de l'eau de mer

DIANE MARTINDALE • BERNARD TABOURIER

L'extraction d'eau douce des océans salés connaît un regain d'intérêt depuis la mise au point de nouvelles techniques.

Une crise de l'eau sur la planète bleue semble paradoxale. Pourtant, sur la Terre, 97 pour cent de l'eau est trop salée pour désaler ou pour irriguer les cultures. Pour résoudre leurs difficultés d'approvisionnement en eau, certains pays désertiques du Moyen-Orient, des Caraïbes et du pourtour méditerranéen produisent de l'eau douce potable à partir de l'eau de mer. À mesure que le coût du dessalement baisse et que la demande en eau douce augmente, des pays des régions tempérées se tournent eux aussi de plus en plus vers le dessalement de l'eau de mer.

La distillation

Par exemple, aux États-Unis, l'un des pays les plus riches en eau du monde, les responsables de la gestion de l'eau dans la région de la baie de Tampa, en Floride, ont entrepris la construction d'une usine de dessalement capable de produire 95 000 mètres cubes d'eau dessalée par jour. Ils comptent sur le dessalement pour répondre aux besoins futurs en eau de la région.

La seule unité installée en France se trouve sur l'île de Sein, dans le phare. Elle est petite (environ 50 mètres cubes par jour) et subvient, en été, aux besoins d'eau supplémentaires liés à l'afflux de touristes.

L'extraction d'eau douce des océans existe depuis des siècles : elle est fondée sur l'évaporation, qui élimine les sels et les autres constituants indésirables.

On chauffe l'eau salée pour accélérer l'évaporation, on piège la vapeur d'eau qui se condense en refroidissant. C'est un procédé qui utilise de l'énergie dégradée, par exemple la chaleur dégagée par une centrale électrique. On peut améliorer son rendement en réutilisant une partie de la vapeur de distillation.

Ce procédé fonctionne bien, mais consomme plus d'énergie que le pompage souterrain dans des nappes propres ou que le traitement des eaux de surface pour les rendre potables. Toutefois, il est très utilisé dans les pays où le coût de l'énergie est faible, tels le Koweït, les Émirats arabes unis et l'Arabie Saoudite.

Certaines îles des Caraïbes, telles les îles de Saint-Martin, Saint-Barthélemy aux Antilles françaises ou l'île de Curaçao aux Antilles néerlandaises, de nombreuses îles de la Méditerranée font exception : depuis plusieurs dizaines d'années, les municipalités ont recours au dessalement de l'eau de mer (depuis 1928 pour Curaçao!).

Dans certaines de ces îles, le développement touristique a créé un déséquilibre entre les faibles ressources naturelles suffisantes pour la population autochtone et les besoins considérables et souvent saisonniers des touristes. Dans d'autres îles, et c'est le cas de Curaçao ou d'Aruba, au Venezuela, la production d'eau par dessalement a historiquement accompagné un développement industriel insulaire ancien, qui correspond à l'installation des raffineries du pétrole vénézuélien, extrait à proximité, dans la baie de Maracaïbo.

L'osmose inverse

Le dessalement de l'eau de mer par filtration à travers une membrane est apparemment moins onéreux que la distillation, mais utilise une énergie noble, l'électricité. Le dessalement par membrane représente 15 pour cent des installations mondiales, soit environ 16 millions de mètres cubes. Il est fondé sur l'osmose inverse : deux réservoirs, l'un contenant de l'eau salée et l'autre de l'eau pure, sont mis en contact par l'intermédiaire d'une fine membrane dont les pores sont suffisamment petits pour ne laisser passer que les molécules d'eau. L'eau salée subit une pression élevée qui «pousse» les molécules d'eau à traverser la membrane et à enrichir l'eau pure en molécules d'eau, tandis que le sel et les autres impuretés restent du côté de l'eau salée.

Toutefois, les premières membranes, constituées de fibres de polyamide ou de feuilles d'acétate de cellulose, étaient fragiles et se rompaient facilement sous l'effet de la pression ; elles avaient des durées de vie limitées, trois ans seulement environ. De plus, ces matériaux sont très sensibles aux composés de l'eau de mer, notamment au chlore qui durcit les membranes et aux micro-organismes qui bouchent les pores. Pour éviter cela on pratique des prétraitements rigoureux, telle la filtration des sédiments et des bactéries.

Une nouvelle génération de membranes minces, nommées composites,

constituées de films de polyamide, évitera peut-être ces difficultés. Ces nouvelles membranes seront toujours sensibles à la contamination, mais, plus solides, assureront une filtration plus sélective des seules molécules d'eau. Elles dureraient jusqu'à dix ans, bien que l'on n'ait pas encore le recul nécessaire pour l'affirmer.

Ces installations de dessalement de l'eau de mer ont une capacité de quelques litres par jour (certains canaux de sauvetage en sont équipés) à plusieurs dizaines de milliers de mètres cubes par jour (pour les systèmes municipaux).

Si la Société EDF installait une centrale nucléaire au bord de la Méditerranée, elle aurait sans doute recours, pour des raisons de sécurité et d'indépendance pour ses installations, à plusieurs unités de dessalement de taille moyenne (quelques milliers de mètres cubes par jour). En 1982, la Société SIDEM a fourni à EDF une unité de dessalement par évaporation. Entièrement électrique, cette unité fournissait 1 500 mètres cubes par jour. Elle a fonctionné quelques années sur le site nucléaire de Flamanville, dans la Manche, avant d'être vendue à l'île de Fuerteventura, aux Canaries.

Les centrales électriques exportées par EDF s'accompagnent souvent d'unités de dessalement pour l'approvisionnement en eau d'appoint.

Plus l'installation de dessalement est importante, plus le prix de revient de l'eau baisse. Une centrale électrique produit de la chaleur qu'un système de refroidissement à eau doit évacuer ; quand on utilise cette chaleur pour distiller de l'eau de mer, le coût de production de l'eau douce est quasi nul. Au contraire, l'osmose inverse nécessite de l'électricité.

Aujourd'hui, selon les estimations, moins de un pour cent de l'eau potable mondiale est fournie par 12 500 usines de dessalement. Demain (ou après-demain), la source de notre eau de table pourrait bien être l'océan.

Diane MARTINDALE, journaliste scientifique ; Bernard TABOURIER, Société SIDEM.

Transport d'eau

On transporte parfois de l'eau dans d'énormes sacs.

Des tuyaux transportent à faible coût de l'eau douce sur de grandes distances... sur terre. Peut-on en faire autant sur les océans ? Pour améliorer la répartition des ressources en eau, on pourrait transporter l'eau en la traînant dans de gigantesques sacs en plastique ou en tissu derrière des remorqueurs.

Au début de l'année 1997, durant la saison touristique, alors que la demande en eau potable était maximale, une Société britannique a eu l'idée de remorquer de l'eau de la Grèce continentale jusqu'aux îles voisines dans d'énormes sacs en polyuréthane. De même, une société norvégienne a transporté de l'eau dans des conteneurs en tissu de la Turquie vers le Nord de Chypre.

Pendant longtemps, des navires-citernes et des péniches ont approvisionné des régions riches en petites quantités d'eau douce, par exemple, les Bahamas, Chypre et d'autres îles qui n'ont pas de sources d'eau douce suffisantes. Les navires-citernes ont également apporté de l'eau durant de courtes périodes de sécheresse et après des catastrophes, tel le tremblement de terre de Kobe au Japon en 1995. Toutefois, ce mode de transport est cher, bien qu'au début des années 1980, l'idée des sacs d'eau soit née de la volonté de réduire les coûts de transport de l'eau.

L'entreprise britannique *Aquarius Water Trading and Transportation Ltd* a d'abord fabriqué huit sacs de 790 tonnes et deux autres de 2 200 tonnes : ces derniers contiennent environ deux millions de litres d'eau chacun. Cette Société met également au point des modèles dix fois plus grands, et depuis 2000, la société norvégienne fabrique des sacs d'environ 30 millions de litres.

Ces sacs, dont le coût varie entre 750 000 et un million et demi de francs, pourraient remplacer les navires-citernes, mais des problèmes techniques subsistent, telle la résistance aux contraintes d'un voyage dans l'océan. Ainsi, Chypre et les îles grecques sont à une centaine de kilomètres du continent : on sait remplir les sacs sans difficultés, mais ils se déchirent facilement durant le transport.

De grosses fermetures éclair, avec des dents de plus de deux ou trois centimètres relient les sacs tel des wagons. Pour l'instant, cette technique n'a été utilisée que pour des livraisons d'eau douce en cas d'urgence et dans des régions côtières victimes de la sécheresse ; l'eau y devenait vitale, quel que soit le prix. Les sacs à eau représentent une façon nouvelle et astucieuse de s'approvisionner en eau.

Peter GLEICK

LES SACS À EAU sont remorqués dans l'océan afin de pallier le manque d'eau de certaines régions.



AP PHOTO

Informatique et économie d'eau

PASCAL BUSCH

Un modèle mathématique améliore la qualité de l'eau produite par les usines de traitement et réduit les coûts.

Chaque étape du traitement de l'eau dans une usine de production d'eau potable participe à la qualité de l'eau, à son goût et à son prix de revient. Afin d'optimiser tous ces paramètres, la Société *Lyonnaise des Eaux* a modélisé, en collaboration avec l'Institut national des sciences appliquées de Toulouse, le fonctionnement d'une usine de production d'eau potable. Grâce à des images virtuelles en trois dimensions, le programme, nommé Usine virtuelle™, simule le parcours de l'eau dans l'usine et, à chaque étape, on peut contrôler les paramètres de qualité. Cet outil est utilisé lors de la construction ou de la réhabilitation d'installations de production d'eau ; la modélisation des différentes contraintes de production fournit la taille optimale des différents éléments de l'usine et prédit l'évolution de la qualité de l'eau traitée, tout au long des étapes du traitement selon la qualité d'eau qui entre dans l'usine. Grâce à ce modèle, les

coûts d'exploitation sont parfois réduits de 30 pour cent, notamment parce que l'on peut diminuer notablement la quantité de réactifs chimiques nécessaires au traitement, et la consommation d'énergie. De surcroît, les coûts de réhabilitation, eux-mêmes, sont réduits (l'économie atteint parfois 50 pour cent des coûts prévus).

Aujourd'hui, le montant annuel des dépenses dans le domaine de l'eau potable en Europe s'élève à environ 46 milliards de francs en coût d'investissement et à 118 milliards en coût de fonctionnement. En outre, la directive européenne de décembre 1998 renforce la nécessité de mise en conformité des usines de production d'eau potable. Aussi l'Usine virtuelle™ pourrait-elle aider les constructeurs à mettre aux normes les installations à réhabiliter.

Par ailleurs, en période de crise, par exemple quand de fortes pluies augmentent la turbidité de l'eau brute, le modèle indique les corrections à apporter aux conditions de fonctionnement

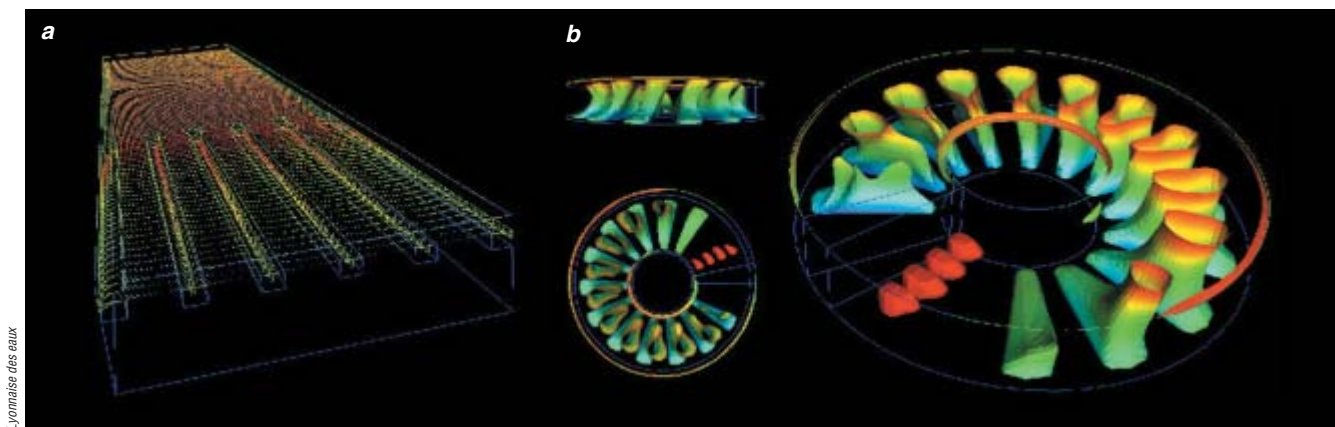
de l'usine pour garantir une qualité d'eau constante.

Cet outil a déjà été mis en œuvre pour certaines étapes de traitement d'usines de production. Ainsi, à Amman, en Jordanie, la *Lyonnaise des Eaux* a utilisé ce modèle afin de réhabiliter les installations, et d'augmenter la quantité et la qualité de l'eau produite par l'usine de Zai : la production d'eau a ainsi été suffisante durant l'été 2000.

À Morsang-sur-Seine, dans l'Essonne, la réhabilitation de l'étape de désinfection de l'eau a réduit les coûts de fonctionnement de cette étape d'environ 20 pour cent, grâce à une meilleure utilisation des réactifs chimiques.

Issu d'une collaboration entre plusieurs partenaires industriels et universitaires, notre modèle contribuera, avec les autres solutions proposées, aux deux objectifs qui préoccupent tous ceux qui traitent l'eau : épargner cette précieuse ressource et respecter l'environnement.

Pascal BUSCH
Lyonnaise des eaux



SUR UN ORDINATEUR, on optimise les différents éléments d'une usine de production d'eau potable afin d'améliorer la qualité et de diminuer les coûts. Par exemple, sur l'image d'un décanteur (a), on observe la vitesse de l'eau selon les zones (plus la couleur est proche du rouge,

plus la vitesse de l'eau est grande). Sur la modélisation du transfert d'oxygène (b), les quatre agitateurs qui assurent la circulation d'eau sont en rouge ; les colonnes représentent les panaches de bulles d'air ; les couleurs indiquent l'évolution de la pression sur la hauteur de chaque colonne.

Les boues d'épuration

Les eaux usées sont aujourd'hui trop polluées pour qu'on puisse les rejeter dans les cours d'eau ou les épandre sur des sols agricoles. Les stations d'épuration ont pris le relais : les substances polluantes sont extraites par plusieurs traitements. Les boues récupérées après décantation contiennent des particules solides, des substances organiques et minérales obtenues lors des traitements chimiques d'épuration et une biomasse, dite excédentaire, constituée de micro-organismes qui se sont nourris des substances dissoutes.

En France, ces boues représentent, chaque année, plusieurs dizaines de millions de mètres cubes, ramenées à environ 10 millions de tonnes de boues brutes après divers traitements. On estime que cette production croîtra de 50 pour cent (en masse de matière sèche) dans les années à venir si la France respecte les objectifs négociés avec ses partenaires européens. L'enjeu n'est autre que la qualité des milieux aquatiques, qui exige une amélioration constante de l'épuration des rejets.

Traditionnellement, ces boues sont utilisées en agriculture où elles fertilisent la terre. Toutefois, des alertes sanitaires récentes (la maladie de la vache folle, la dioxine...) qui étaient toutes liées à la gestion des déchets et à la contamination de la chaîne alimentaire, ont soulevé la question des risques liés à cette pratique. En 1999, un comité technique national a été mandaté pour élaborer un dossier d'information sur les tenants et les aboutissants de l'épandage agricole des boues d'épuration. Après un rappel des conditions d'obtention de ces boues et des conditions de leur épandage, une analyse des risques a été faite ; on a différencié, d'une part, les risques immédiats dus à la présence d'agents pathogènes dans les eaux usées, et, d'autre part, les risques différés dus à une dégradation de la qualité des sols et des cultures, à cause de l'accumulation de substances chimiques présentes en infimes quantités (cadmium, mercure, plomb...).

Une réglementation, qui tient compte des connaissances acquises dans de nombreux domaines, précise la qualité des boues à respecter, la quantité de contaminants tolérée (même pour les substances présentes à l'état de trace), la restriction des épandages pour certaines productions (les légumes et les fourrages notamment).

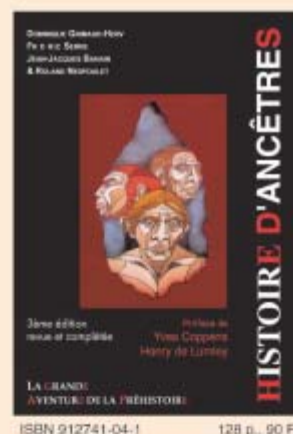
Destiné à la population, le dossier montre aussi que tout ne se résoudra pas par des approches curatives, celles qui consistent à éliminer les polluants des différents rejets anthropiques. Inéluctablement, une approche préventive devra prendre le relais : les boues ne seront pas contaminées, ou, mieux encore, elles ne seront pas produites !

Curieusement, on connaît mieux les cycles biologiques, géologiques et chimiques qui ont lieu dans la nature que les activités humaines qui produisent les contaminants. Quand on étudie les impacts, même potentiels, d'une pratique industrielle, on peut en conclure ce qu'il ne faut pas faire, mais pas nécessairement quelles seraient les solutions plus performantes. Or, dans une logique de prévention des pollutions et de développement durable, ce sont bien les pratiques humaines qui devront évoluer.

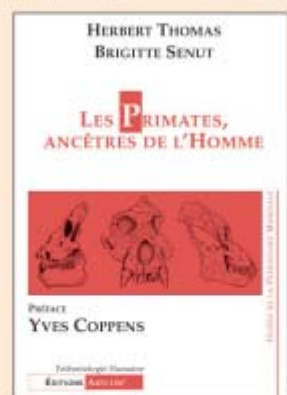
La démarche préventive est d'une tout autre nature que la démarche curative : elle doit évaluer les conséquences d'un processus industriel, mais aussi envisager les effets des autres procédés possibles. La chaîne des responsabilités s'en trouvera modifiée.

Le recours au principe de précaution requiert d'épuiser les vertus de la prévention. Sa prise en compte est indispensable et les débats autour de l'épandage des boues illustrent les difficultés que cela pose.

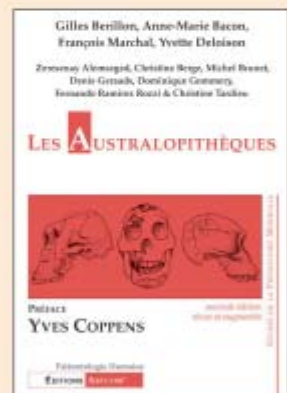
Jean-Marc MÉRILLOT, ADEME



ISBN 912741-04-1 128 p., 90 F



ISBN 912741-22-X 184 p., 90 F



ISBN 912741-21-1 256 p., 90 F



ISBN 912741-07-6 344 p., 230 F

ÉDITIONS ARTCOM[®]
53, rue Boissière 75116 - Paris

