

unesco 1983 n°1

# impact

science et société

la gestion  
de nos ressources  
en eau douce

# impact

science et société

Revue trimestrielle  
publiée par l'Organisation  
des Nations Unies pour  
l'éducation, la science  
et la culture,  
7, place de Fontenoy  
75700 Paris (France)

Imprimerie des  
Presses Universitaires  
de France, Vendôme

---

Directeur de la publication  
Jacques Richardson

Consultante pour ce numéro  
Bineta Keita

Directeur adjoint  
Robert Maybury

Directeur artistique  
Rolf Ibach

Conseiller technique pour ce numéro  
Sorin Dumitrescu

Maquette  
George Ducret

Secrétaires de rédaction  
Arlette Pignolo  
Anne Sacher

Illustrations  
Le Noir

Préparation de copie  
Josette Laumônier

#### Correspondants

S. Biswas, Calcutta  
A. A. Buzzati-Traverso, Milan  
Nobuyuki Fukuda, Sakura (Japon)  
Christian Magnan, Paris  
Ignacy Malecki, Varsovie  
Mircea Malitza, Bucarest  
Federico Mayor, Madrid  
Carol A. Tavis, New York

Adresser les demandes d'abonnement aux agents de vente  
de l'Unesco (voir liste), qui vous indiqueront les tarifs en  
monnaie locale. Toute notification de changement d'adresse  
doit être accompagnée de la dernière bande d'expédition.

Abonnement annuel : 68 F  
Le numéro : 20 F



A Hong-kong, l'eau douce est une ressource particulièrement précieuse. Malgré de grands efforts, notamment l'achat d'eau à la République populaire de Chine et la construction de nouveaux réservoirs, il est très difficile de pourvoir aux besoins de la population qui s'accroît rapidement. Durant ces vingt dernières années, il a fallu à de nombreuses reprises imposer un rationnement sévère. Il en résulte des habitudes d'économie, qui sont profondément enracinées dans la population. Beaucoup d'immeubles disposent d'une alimentation de secours en eau de mer et l'eau de mer est également utilisée pour la lutte contre les incendies.

Nombreux sont les habitants de Hong-kong qui vivent sur des bateaux comme ceux-ci, ancrés à Causeway Bay, à l'abri des violents typhons tropicaux. Ces bateaux sont reliés à la mer par un va-et-vient incessant de petits sampans qui transportent des passagers, des provisions et de l'eau. Celui qu'on voit sur ce tableau est chargé de jarres en terre cuite contenant de l'eau douce destinée à la consommation et à la cuisine.

Ray MILLARD

Aujourd'hui à la retraite, Ray Millard, qui habite à Drapers Cottage, 93 High Street, Odiham, Basingstoke, Hants. RG25 1LB (Royaume-Uni), et qui a peint cette toile, était autrefois conseiller en travaux publics (ponts et chaussées) à la Banque mondiale. Durant toute sa carrière d'ingénieur civil, il n'a cessé de s'adonner à la peinture. Le tableau reproduit ici a été présenté lors d'une exposition-vente organisée par la Banque mondiale au bénéfice de l'Unicef, à l'occasion de la Décennie internationale de l'eau potable et de l'assainissement.

# La gestion de nos ressources en eau douce

impact  
1983, n° 1

- 
- 3 Présentation
- 
- 5 Les ouvrages hydrauliques des anciens : les leçons de l'histoire  
*Gunther Garbrecht*
- 
- 19 L'influence de la science sur les institutions du secteur de l'eau  
*Guillermo J. Cano*
- 
- 29 Du bon et du mauvais usage du cycle hydrologique  
*Arie Issar*
- 
- 37 Les ressources en eaux souterraines sont-elles suffisamment protégées ?  
*György Kovács*
- 
- 51 L'irrigation bat les records de consommation d'eau  
*K. K. Framji*
- 
- 61 Une nouvelle conception des aménagements hydrauliques en Tunisie  
*Slaheddine El Amami*
- 
- 71 L'impact de l'énergie hydraulique sur la société  
*Maurice L. Albertson*
- 
- 89 Gestion d'un réservoir polyvalent  
*R. P. Mohanty*
- 
- 105 Réservoirs artificiels  
*Letitia E. Obeng*
- 
- 115 GEMS/EAU. Surveillance de la qualité de l'eau  
*Silvio Barabas*
- 
- 127 Les répercussions des phénomènes de subsidence  
*R. K. Gabrysch*
- 
- 135 Tribune des lecteurs
-

---

## Avis aux lecteurs

*Impact : science et société* est publié régulièrement par l'Unesco non seulement en anglais et en français, mais également en espagnol, en arabe, en chinois et en russe. Pour obtenir des informations concernant ces quatre dernières éditions, prière de s'adresser à :

*Espagnol.* Oficina de Educación Iberoamericana, Ciudad Universitaria, Madrid 3 (Espagne).

*Arabe.* Centre de publications de l'Unesco au Caire (Unesco Publications Centre in Cairo), 1 Talaat Harb Street, Le Caire (Égypte).

*Chinois.* The Association for the Journal of Dialectics of Nature, c/o Academia Sinica, 20th Building, Friendship Hotel, Beijing (République populaire de Chine).

*Russe.* The USSR State Committee for Publishing, c/o The USSR National Commission for Unesco, 9 Prospekt Kalinina, Moskva G-19 (URSS).

*Les auteurs sont responsables du choix et de la présentation des faits figurant dans leurs articles ainsi que des opinions qui y sont exprimées, lesquelles ne sont pas nécessairement celles de l'Unesco et n'engagent pas l'Organisation.*

Les références supplémentaires de la rubrique intitulée « Pour approfondir le sujet », qui apparaît à la fin de la plupart des articles, sont normalement choisies par la rédaction de la revue.

Les textes publiés peuvent être librement reproduits et traduits (sauf lorsque le droit de reproduction ou de traduction est réservé) à condition qu'il soit fait mention de l'auteur et de la source.

---

## Présentation

L'eau est indispensable à la nutrition et à la santé et presque toutes les branches de l'économie en dépendent. Or l'eau contaminée est responsable de 80 % de toutes les maladies et plus des trois quarts de la population rurale du globe ne disposent pas d'eau salubre et potable.

La quantité d'eau nécessaire à la boisson ne constitue toutefois qu'une fraction de celle dont on a besoin pour les cultures. Pour nourrir une population qui s'accroît au rythme actuel, il faudrait, dans les vingt années qui viennent, doubler l'approvisionnement en eau destinée à l'irrigation. Aujourd'hui, un hectare de terre fait vivre 2,6 personnes, mais, en l'an 2000, ce même hectare devra en nourrir quatre. L'accroissement de la productivité dépendra en grande partie de l'extension des terres irrigables.

Cependant, au cours des vingt prochaines années, la consommation d'eau par des industries telles que le tannage des peaux, la pâte à papier, le fer et l'acier, ainsi que la production thermo-électrique, etc., va enregistrer une importante augmentation et ajouter aux déchets des effluents industriels.

Face aux problèmes posés par l'utilisation de l'eau, un groupe de travail composé de savants de renommée internationale\* a demandé que soit faite une utilisation plus rationnelle de l'eau!

L'eau, élément indispensable à la vie, est aussi la plus maniable des ressources naturelles ; on peut la dériver, la transporter, l'emmagasiner et la recycler. Toutes ces propriétés confèrent à l'eau une grande utilité pour l'homme. Sa qualité et sa distribution, dans le temps et dans l'espace, sont extrêmement variables, mais le volume total d'eau utilisable reste constant. L'homme est donc confronté, quand il gère ses ressources hydriques, à une vaste gamme de choix. Mais, en même temps, nombre de ces choix s'excluent mutuellement. C'est pourquoi aucune décision mettant en jeu les ressources en eau ne peut

---

\* Groupe de travail Unesco/FAO de la Décennie hydrologique internationale, dans *L'influence de l'homme sur le cycle hydrologique*, numéro spécial (n° 17) du *Bulletin d'irrigation et de drainage*, Rome, FAO, 1974.

s'envisager isolément, mais en toute connaissance de ses répercussions hydrologiques et écologiques et des solutions éliminées. En bref, l'homme doit doser ses initiatives eu égard au cycle hydrologique, de manière qu'un volume d'eau déterminé puisse servir à satisfaire ses divers besoins sans effets secondaires indésirables.

Sur les conseils de M. S. Dumitrescu, directeur de la Division des sciences de l'eau à l'Unesco, nous avons invité des hydrologues spécialisés dans les problèmes de mise en valeur de l'eau à faire le point, pour nos lecteurs, de l'influence de l'homme sur les ressources en eau, y compris la gestion de ces ressources. Le groupe de travail est convaincu que « les futurs besoins de l'humanité ne seront satisfaits que si l'on prend conscience de l'importance de l'eau dans la nature, des relations entre l'eau et l'homme et des obstacles que l'homme porte en lui et oppose à la maîtrise rationnelle de cette ressource ».

Nous pensons que nos auteurs auront contribué largement à faire prendre conscience de ce problème crucial pour les décennies à venir. ■

**impact** : *science et société*

*Les ouvrages construits pour assurer, d'une part, la protection contre les afflux excessifs d'eau, d'autre part, la conservation de réserves qui sont limitées comptent parmi les premières réussites technologiques de l'humanité. L'irrigation par cuvettes en Égypte, les canaux et les dispositifs élévatoires en Mésopotamie, les conduites souterraines (ou kanats) de l'Assyrie et de la Perse, les aqueducs de Rome et l'agriculture fondée sur l'exploitation des eaux de ruissellement au Moyen-Orient ont été des innovations historiques dont l'époque moderne pourrait encore tirer des enseignements.*

---

## **Les ouvrages hydrauliques des anciens : les leçons de l'histoire**

Gunther Garbrecht

---

*Gunther Garbrecht, président du Groupe de travail sur l'histoire formé par la Commission internationale des irrigations et du drainage, est l'auteur de soixante-dix publications et ouvrages sur l'irrigation et l'hydraulique appliquée. Ses travaux d'enseignement et de recherche dans le domaine de l'hydraulique l'ont conduit en Turquie, en Arabie saoudite, en Zambie et au Pérou. Il est professeur d'hydraulique générale et d'hydraulique appliquée et dirige l'Institut Leichtweiss de recherche hydraulique de l'Université technique de Brunswick, 3300 Braunschweig (République fédérale d'Allemagne).*

## Introduction

En se sédentarisant voilà quelque 6 000 ans, l'homme, qui jusqu'alors avait été nomade, a dû mener contre cet élément qu'est l'eau une lutte sur deux fronts à la fois : d'une part, il fallait qu'il se prémunisse contre ses mouvements les plus violents, inondations et grandes marées, de l'autre, il ne pouvait vivre ni même survivre qu'en s'assurant une alimentation en eau régulière pour couvrir ses besoins domestiques et pratiquer l'irrigation. Aussi les grandes réalisations techniques destinées à parer, dans ce domaine, à l'excédent comme à la pénurie, comptent-elles parmi les réussites technologiques de l'humanité les plus anciennes (fig. 1).

Les premières grandes civilisations, celles des vallées du Nil, de l'Euphrate et du Tigre, de l'Inde du Sud et du Houang-ho n'ont pu s'épanouir et prospérer qu'en s'appuyant sur un système d'aménagement des eaux complexe et perfectionné. Dans toutes ces régions, les conditions topographiques, climatologiques et hydrologiques n'ont pu se prêter à un peuplement permanent et à une production alimentaire suffisante que grâce aux moyens mis en œuvre pour maîtriser les inondations, drainer et irriguer. Le « chaos hydrologique » de ces vallées, vaincu par un réseau dense et étroitement tissé de digues, de canaux, de réservoirs et de dispositifs élévatoires, se métamorphosa en jardins, en champs et en prairies florissantes. Le lien étroit et réciproque qui, dans ces empires, existait entre la gestion des ressources en eau et les conditions politiques et sociales explique qu'on ait pu les qualifier de « civilisations hydrauliques ».

Dès le quatrième millénaire avant notre ère, les premières grandes agglomérations urbaines étaient formées : Jéricho, Ur, Uruk, Suse, Memphis et Babylone, suivies ultérieurement de grandes métropoles telles qu'Athènes, Carthage, Alexandrie et Rome. Les ingénieurs d'alors ont dû s'atteler à une lourde tâche : trouver de l'eau de qualité en quantité suffisante, l'amener

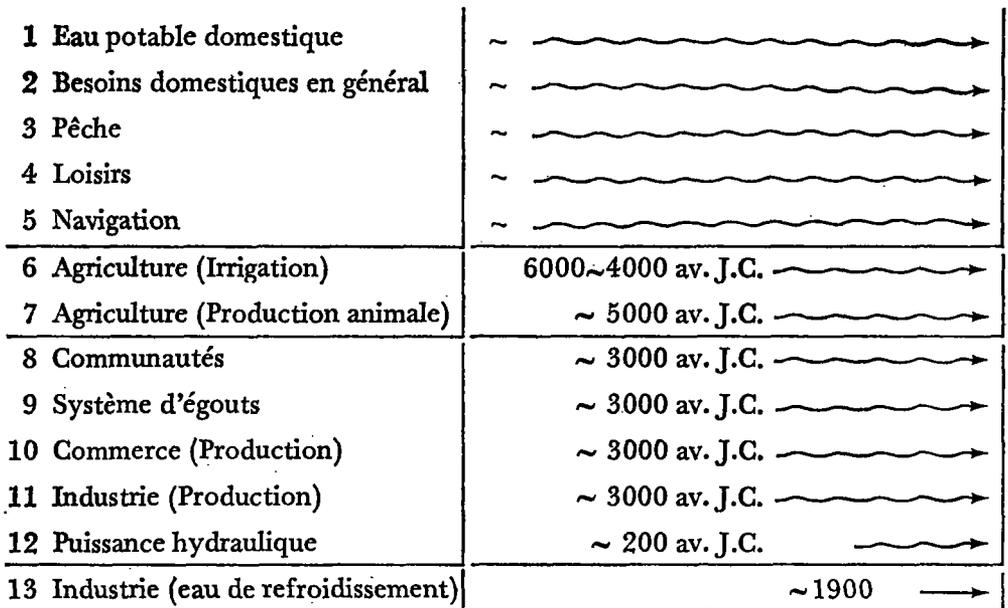


FIG. 1. Utilisation de l'eau douce au cours de l'histoire.

jusque dans les villes, construire au besoin des barrages pour la stocker, la distribuer et enfin l'éliminer lorsqu'elle était usée. De grands ouvrages hydrauliques ont donc, en ces temps reculés déjà, été conçus et exécutés pour fournir de l'eau, qui, par l'audace de leur conception et la haute qualité de leur exécution, se placent au même rang que les grandes réalisations architecturales de la même époque<sup>1</sup>.

Nous évoquerons d'abord quelques-uns des ouvrages hydrauliques les plus impressionnants de l'antiquité pour analyser ensuite, à la lumière de la science moderne, leurs mérites et leurs défauts. De cette rétrospective, qui embrasse deux ou trois millénaires, devraient ressortir quelques enseignements dont le développement des ressources en eau pourrait aujourd'hui encore faire son profit. Nous verrons que, bien souvent, les connaissances et l'expérience de nos ancêtres ont été méconnues, et même oubliées, pour n'être à nouveau appréciées à leur juste valeur qu'au vu des échecs des ouvrages modernes. Nous constaterons aussi que, en général, on n'a pas tiré de ces échecs catastrophiques les conclusions qui s'imposaient et que de vieilles erreurs ont été indéfiniment répétées.

### **L'Égypte, exemple classique du rapport entre l'homme et l'eau**

L'Égypte est l'exemple même d'un pays où l'homme et l'eau sont en relation d'interdépendance. Il n'en est au monde aucun autre où la vie dépende aussi étroitement des eaux d'un seul fleuve. Si loin qu'aient pu atteindre les frontières de l'Empire égyptien, la vallée et le delta du Nil ont toujours constitué le cœur du pays. Car c'était la seule région où l'eau était assez abondante pour satisfaire aux besoins de la population et permettre l'irrigation des cultures vivrières.

C'est la fertilité des alluvions du Nil et le phénomène de ses crues annuelles qui ont fondé la prospérité de l'Égypte. L'irrigation, de tout temps, s'y est faite par submersion. En juillet-août, dans les semaines de crue, l'eau, amenée dans des bassins préparés à l'avance, recouvrait le sol pendant une période allant de six à huit semaines sur une profondeur de 0,50 à 3 mètres, selon l'éloignement du fleuve. Les inconvénients de ce type d'agriculture, totalement subordonnée au comportement d'un seul fleuve, sont évidents. Comme il n'y avait qu'une crue par an, il n'y avait aussi qu'une récolte, et, comme la hauteur des crues variait irrégulièrement d'une année à l'autre, la superficie irriguée n'était jamais la même. Les crues trop faibles, qui irriguaient trop peu de terre, étaient suivies de famines, tandis que les crues trop fortes inondaient les villages, détruisaient les bassins d'irrigation et propageaient des épidémies (fig. 2).

Ces points faibles du procédé d'irrigation par submersion qu'utilisaient depuis toujours les Égyptiens sont indéniables. Il avait pourtant un avantage considérable : c'est que l'infiltration des eaux à travers le sol en assurait le lessivage et, qu'en même temps, le limon charrié par le Nil renouvelait sa fertilité. D'où le rendement élevé des terres cultivables qui ont permis à l'État et au peuple égyptiens de se constituer et de prospérer pendant plus de 5 000 ans.

Il convient de remarquer que la première intervention humaine moderne sur le régime hydrologique que la vallée du Nil avait connu de toute éternité n'a aucunement perturbé l'équilibre naturel des rapports entre l'eau et les sols : le premier barrage construit sur le Nil, près d'Assouan, en 1933, ne

retenant que la dernière partie, la partie descendante de l'onde de crue, n'opposait aucune entrave à la crue du Nil et à sa charge solide.

### *Le barrage d'Assouan perturbe le régime hydrologique*

La construction, plus récemment, entre 1965 et 1971, du haut barrage d'Assouan a bouleversé le régime hydrologique de la vallée du Nil. L'hydrographie du fleuve s'en trouve modifiée et tout le limon reste prisonnier du lac ainsi créé. La place nous manque ici pour rendre compte dans le détail des conséquences tant écologiques que socio-économiques de cette modification radicale des conditions hydrologiques propres à la vallée du Nil. Bien que de tels « effets secondaires » aient sans doute été prévus, du moins quant à leur nature, lors de l'élaboration du projet, leur ampleur et celle des efforts qu'il faudrait faire pour les contrebalancer ont dépassé toute attente et ne peuvent pas être bien mesurées, même aujourd'hui.

L'histoire de l'irrigation en général et de ce qui vient de se passer dans la vallée du Nil en particulier montrent que plus un projet d'aménagement des eaux est ambitieux et plus les problèmes qui se posent alors sont énormes, que ceux-ci concernent les processus géomorphologiques en cours, l'aménagement des sols, les divers écosystèmes présents ou les conditions socio-économiques. Jamais, auparavant, l'intervention humaine sur un régime hydrologique n'avait revêtu une telle ampleur. Or, dès lors qu'on a affaire à un si grand nombre de paramètres, si complexes et si étroitement interdépendants, toute prévision de leur incidence à long terme sur l'environnement et les conditions socio-économiques devient incertaine. Ce n'est qu'à la lumière des réalisations actuelles et des résultats des dernières recherches que nous pourrions élargir les limites physiques des grands projets de transport et d'aménagement des eaux.

### **La Mésopotamie : des conditions d'irrigation encore plus difficiles**

En Mésopotamie, l'irrigation se faisait dans des conditions bien plus défavorables qu'en Égypte. Les crues de l'Euphrate et du Tigre, tout d'abord, étaient extrêmement capricieuses et se produisaient au « mauvais moment », entre avril et juin, trop tard pour les récoltes d'été et trop tôt pour celles d'hiver. De plus, les deux fleuves charrient bien plus de sédiments que le Nil. Et, enfin, la très faible déclivité de la plaine alluviale (1/26 000) et l'extrême finesse des particules constitutives du sol favorisent l'engorgement et la salinisation (absence de drainage naturel).

Dans les conditions physiques (topographiques, hydrologiques et morphologiques) qui sont celles de la plaine mésopotamienne, il fallait, pour que les hommes puissent s'y établir et y produire assez de nourriture pour leur subsistance, qu'ils se prémunissent contre les crues, drainent et irriguent, autrement dit mettent en place, fassent fonctionner et entretiennent de vastes réseaux très denses de levées, de canaux, de déversoirs, de réservoirs et de dispositifs élevatoires. Du bon fonctionnement de tout ce système complexe dépendaient la survie de chaque paysan et celle de l'État lui-même. C'est ainsi que l'hydraulique et l'irrigation agricoles finirent par dominer tous les aspects de la vie rurale et urbaine et que les terres situées entre les deux fleuves jumeaux purent être bonifiées au point de mériter dans la mythologie le nom de « jardin d'Éden ».

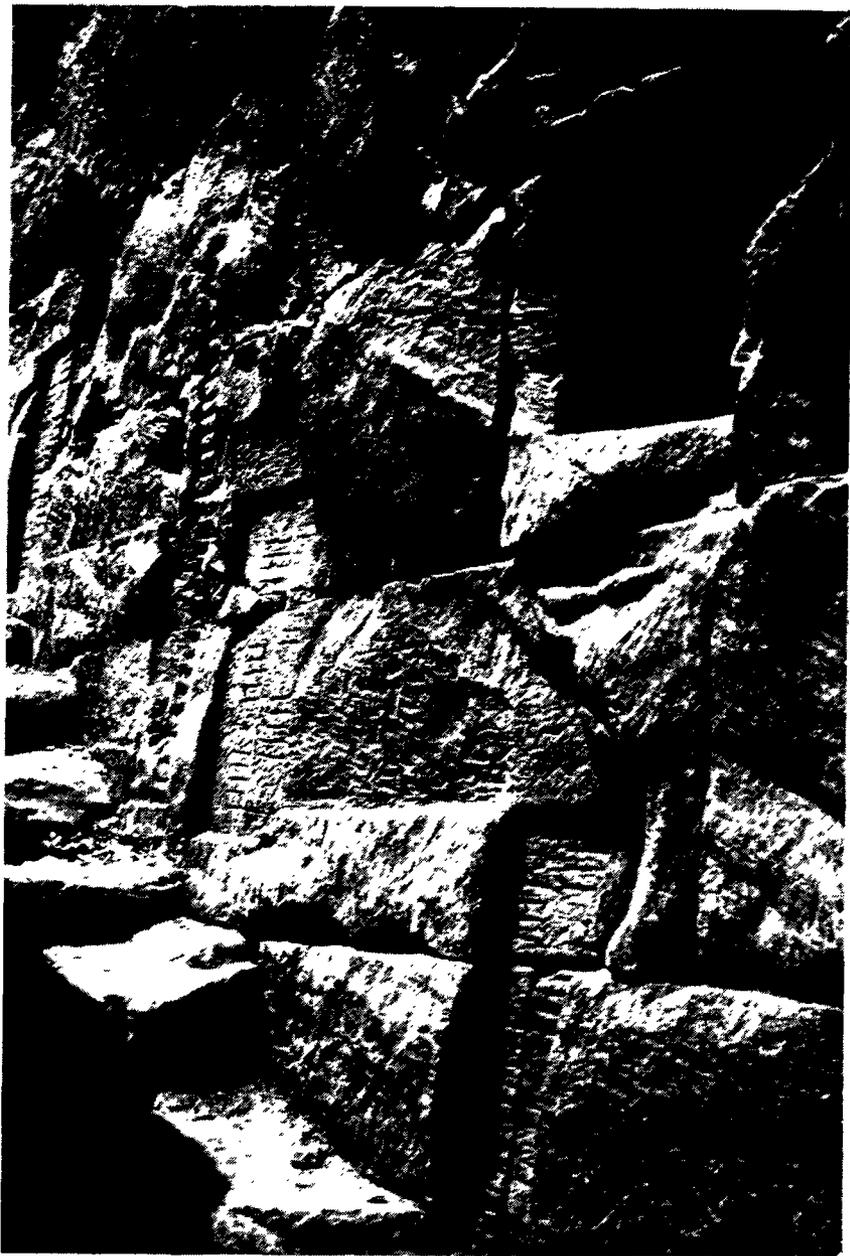


FIG. 2. Ancienne échelle d'étiage (nilomètre) de l'île Éléphantine sur le Nil.  
[Photo : Gunther Garbrecht.]



FIG. 3. Forte salinisation d'un champ de canne à sucre. [Photo : Gunther Garbrecht.]



FIG. 6. Adduction d'eau à Nîmes (1<sup>er</sup> siècle de notre ère), sur le Gard (pont du Gard). [Photo : Gunther Garbrecht.]



FIG. 8. Terrasses cultivées dans le sud-est de l'Anatolie. [*Photo : Gunther Garbrecht.*]

*Une terre menacée par la sédimentation et le sel*

Il y a lieu de se demander quelle peut bien avoir été la cause du déclin et, en définitive, de l'abandon de systèmes hydrauliques si complexes au <sup>xii</sup>e et au <sup>xiii</sup>e siècle. Tout au long des millénaires précédents, la forme d'agriculture qui en dépendait n'avait été exposée qu'à deux dangers : la sédimentation dans les canaux d'irrigation et l'accumulation du sel dans le sol. On combattait l'envasement par un curage et un entretien constants des canaux. Nombreux sont les documents témoignant des efforts colossaux qui furent déployés pour que les ouvrages d'irrigation puissent continuer à fonctionner.

Le drainage naturel étant très faible dans la plaine toute plate de l'Euphrate et du Tigre, de l'eau se perd par infiltration tout au long des canaux et aussi du fait de la méthode d'irrigation pratiquée, celle de l'arrosage par excès, de sorte que le niveau de la nappe phréatique tend à s'élever et que, de là, les sels montent et s'accumulent peu à peu jusque dans les couches supérieures du sol. De vastes étendues de terres jadis fertiles sont ainsi devenues improductives. Faute d'un système d'aménagement hydraulique approprié et d'un drainage efficace, les habitants de la Mésopotamie n'ont pas pu faire échec à la salinisation. Il semble bien que les problèmes dus à l'accumulation du sel se soient posés à eux dès le début. L'épopée d'Atrahasis (1800 av. J.-C.) fait allusion à des « champs noirs qui blanchissent » et à des « plaines suffoquées de sel ». Et, d'ailleurs, Assurbanipal (668-626 av. J.-C.) ne se vantait-il pas d'avoir « répandu du sel sur les champs de ses ennemis » ? (fig. 3).

Les populations du sud de la Mésopotamie (civilisation sumérienne), se sont vues chassées par la salinisation de leurs terres devenues stériles et contraintes à migrer vers les terres vierges du nord. Ce phénomène s'est répété pendant des siècles. L'irrigation n'était pas le seul recours des cultivateurs, ils essayaient aussi de combattre les effets de la salinisation en laissant reposer leurs terres par moitié, une année sur deux, en faisant alterner les cultures et en adoptant celles qui toléraient le sel. Vers 3500 av. J.-C., en Mésopotamie méridionale, le blé et l'orge étaient cultivés à peu près à égalité, mais en 2500 av. J.-C. la part du blé — sensible au sel — était tombée à 15 % environ et, vers l'an 2000, à 2 %, alors que dans le nord du pays, pendant la même période, on continuait à le cultiver. C'est aussi à la salinisation qu'il faut imputer au premier chef le déclin de la production d'orge, dont le rendement, qui était de 2 600 litres à l'hectare en 2400 av. J.-C., devait tomber à 1 500 litres à l'hectare en 2100 et à 1 000 litres à l'hectare en 1700. Petit à petit, le sel a fini par envahir l'ensemble de la plaine mésopotamienne. Aujourd'hui c'est environ 80 % des terres cultivables qui sont touchées à des degrés divers et près d'un tiers ont dû être abandonnées. Ce qui avait passé pour le « jardin d'Éden » n'était plus, au début du <sup>xx</sup>e siècle, qu'une région frappée de pauvreté et de misère<sup>a</sup>.

Le cas de la Mésopotamie illustre de façon tragique la manière dont une gestion inadéquate des eaux et des sols peut, à la longue, aboutir à la ruine de toute une civilisation. C'est un fait surprenant qu'il fallut attendre jusqu'au <sup>xx</sup>e siècle pour que l'on commence à comprendre que l'irrigation est à l'origine de graves problèmes d'engorgement et de salinisation et que le drainage doit constituer l'un de ses compléments essentiels. De grands projets d'irrigation ont pu être conçus, même à l'époque de la deuxième guerre mondiale, et réalisés sans qu'aucun plan de drainage ne les accompagnât. Ce n'est que depuis peu que, dans de nombreux pays, des millions d'hectares irrigués sont enfin équipés de dispositifs de drainage et qu'on est en train,

à grands frais, d'en remettre en culture d'autres depuis longtemps délaissés à cause de la salinisation.

Il arrive encore que des projets d'irrigation modernes échouent du fait que le drainage n'a pas été prévu ou ne l'a été que dans une mesure insuffisante, mais la leçon du passé commence enfin à être comprise. Les connaissances et l'expérience qu'il nous livre doivent être encore plus systématiquement intégrées à la pratique de l'agriculture irriguée.

**« Il creusa une conduite principale... »**

Lorsque Sargon II, roi d'Assyrie (721-705 av. J.-C.), envahit Urartu, son voisin du nord, il détruisit le réseau d'irrigation très élaboré qui entourait la ville d'Ulhu, à côté du lac Urmia. Il n'en admira pas moins le système d'alimentation en eau de cette zone irriguée : « ... Ursa, leur roi et seigneur... révéla les points d'eau. Il creusa une conduite principale qui amenait l'écoulement des eaux... Il les fit couler aussi abondantes que celles de l'Euphrate. Il en fit dériver d'innombrables rigoles... et en arrosa les champs<sup>8</sup>. » Ce récit de la victoire de Sargon dans le Taurus arménien est le premier document qui témoigne de l'existence et de l'emploi des *kanats* (parfois écrit *quanat* ou *karez*).

Les *kanats* sont en fait des conduits souterrains très légèrement inclinés qui amènent l'eau à la surface sans qu'il soit besoin de dispositifs élévatoires. Ils acheminent l'eau depuis les cônes de déjection ou les formations d'aqui-

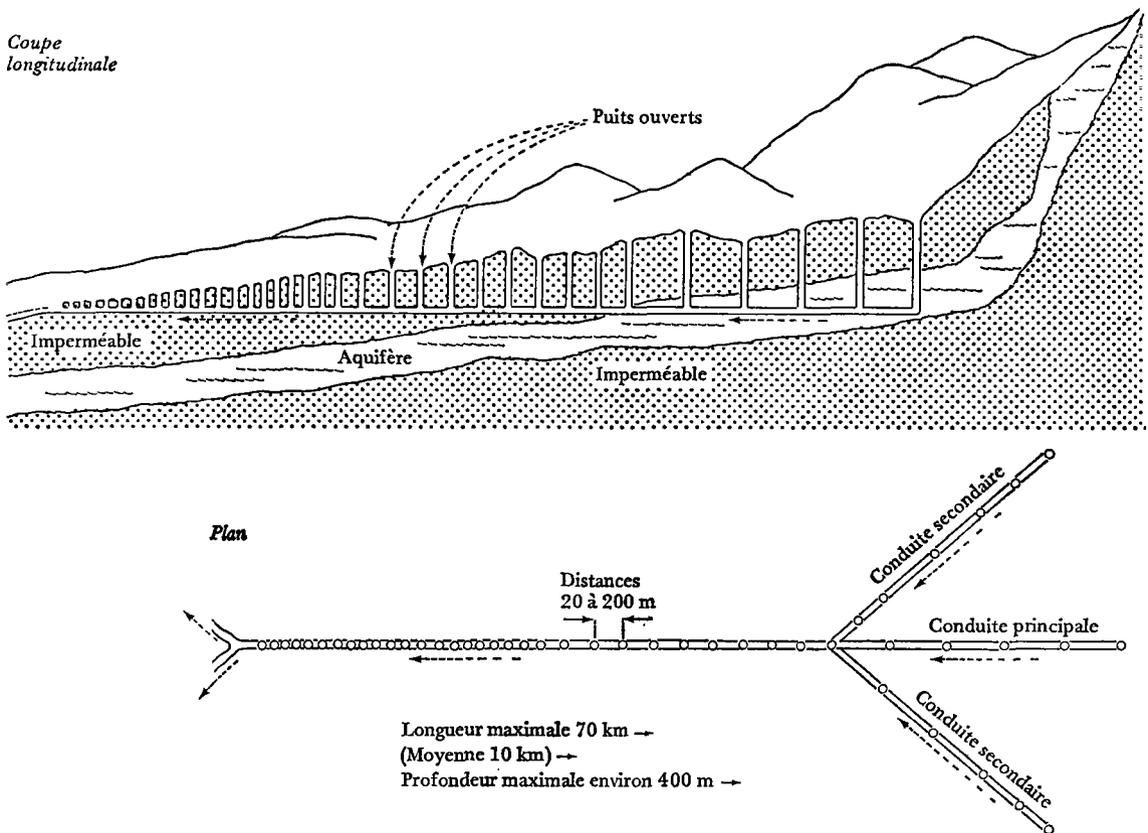


FIG. 4. Croquis sommaire d'un *kanat*.

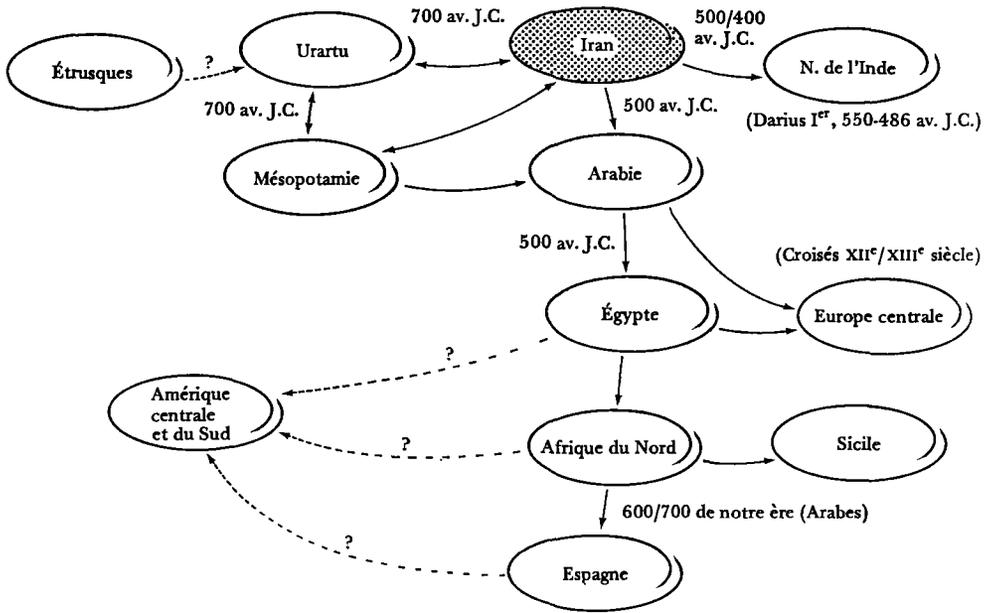


FIG. 5. Diffusion des *kanats* depuis les montagnes irano-arméniennes jusqu'à la Méditerranée et le Moyen-Orient.

fères jusqu'aux vallées agricoles. Les galeries mesurent en général 50 à 80 cm de large et de 90 à 150 cm de haut. Leur longueur peut varier de 1 à 70 km et leur débit de 1 l/s à 500 l/s (fig. 4)<sup>4</sup>.

Au fil de l'histoire, l'usage des *kanats*, d'abord connu dans les royaumes d'Urartu et en Perse, s'est répandu vers l'est jusqu'en Inde, vers le sud jusqu'à l'Arabie, l'Égypte et l'Afrique du Nord, vers l'ouest jusqu'en Espagne et, enfin, dans le Nouveau Monde (fig. 5). Rien qu'en Perse, il en a été creusé de 40 000 à 50 000, dont la moitié sont encore en service. Leur longueur totale excédait la distance de la Terre à la Lune et le débit total des *kanats* qui fonctionnent encore aujourd'hui se monte à quelque 700 m<sup>3</sup>/s, ce qui représente 70 % du débit moyen de l'Euphrate en Irak ou les trois quarts de la moyenne quotidienne des besoins en eau de l'Iran (irrigation et consommation domestique).

### Les *kanats*, procédé ingénieux

Dans leur simplicité, les *kanats* sont une invention d'autant plus remarquable qu'elle est le fruit des efforts accomplis par une population ignorante pour améliorer ses conditions de vie. La somme de travail investie dans la construction des milliers de *kanats* que possède la Perse est certainement comparable à celle qu'a dû coûter l'érection des pyramides. Mais, alors que celles-ci apparaissent d'emblée au visiteur dans toute leur splendeur — car bien qu'elles aient été des tombeaux, elles attestent la puissance d'un empire immense — les *kanats*, eux, étant souterrains et dispersés à travers de vastes étendues, restent invisibles et n'évoquent le nom d'aucun roi ni d'aucun empire particulier. Leur construction a demandé beaucoup de temps ; des

milliers d'individus anonymes les ont creusés afin que les habitants de ces zones arides ou semi-arides puissent disposer d'eau, cet élément vital entre tous. Il est rare qu'on sache à quel point les *kanats* ont été indispensables à l'épanouissement de certaines civilisations et qu'on rende à ceux qui les ont construits l'hommage qui leur est dû.

Depuis plus de 2 000 ou 3 000 ans qu'ils existent, les *kanats* constituent l'essentiel du système d'alimentation en eau de l'Iran et contribuent à l'accroissement de celle-ci dans bien d'autres pays. L'importance de ces cours d'eau artificiels pour l'Iran est comparable à celle de l'Euphrate et du Tigre pour la Mésopotamie. La première vertu des *kanats*, c'est qu'ils n'exploitent les réserves souterraines que jusqu'à un certain point et jamais au-delà du seuil de réapprovisionnement naturel et, ainsi, ne menacent pas l'équilibre hydrologique et écologique de la région.

La technologie moderne nous donne les moyens (les pompes par exemple) d'exploiter les réserves d'eau souterraine sans se soucier des limites du réapprovisionnement naturel. On peut certes ainsi augmenter le volume de l'alimentation en eau — du moins pendant un certain temps — mais, tôt ou tard, les réserves s'épuiseront tandis que l'agriculture et l'ensemble de l'économie retomberont à leur niveau antérieur, évolution qui ne manquera pas d'avoir de graves incidences socio-économiques.

Si les *kanats* ont été si efficaces, c'est que, à l'instar des procédés d'irrigation de l'ancienne Égypte, ils canalisent un écoulement libre qui se règle de lui-même dans les limites fixées par la nature. Dès lors qu'on recourt à des moyens susceptibles de nuire à l'équilibre hydrologique et à l'harmonie du milieu, il ne faut agir qu'avec une extrême prudence.

### **Alimentation des villes en eau, dans l'Antiquité**

L'histoire montre que l'emplacement des agglomérations humaines appelées à devenir de grandes villes a souvent été choisi, à l'origine, sans aucun souci des possibilités d'accroissement futur de l'alimentation en eau. C'étaient des considérations moins lointaines — d'ordre militaire, commercial ou simplement politique — qui en décidaient. Dans ces conditions, il était fatal que toute progression démographique fît surgir le problème de l'alimentation en eau et celui de l'élimination des eaux résiduaires. Parfois, néanmoins, les ingénieurs de l'antiquité parvinrent, en aménageant les ressources de la région, à assurer aux villes qui grandissaient un approvisionnement suffisant en eau de bonne qualité (fig. 6).

L'exemple le plus notoire en est peut-être celui de Rome, capitale de l'empire. Lorsque les eaux des sources et des puits qui se trouvaient sur place et celles du Tibre ne suffirent plus aux besoins de sa population qui ne cessait de s'accroître, on établit une conduite pour amener l'eau de loin (l'Aqua Appia de 312 av. J.-C.). Dans les cinq siècles qui suivirent, onze très longues conduites furent encore construites, totalisant plus de 500 km (fig. 7). Huit d'entre elles captent l'eau de sources de la vallée de l'Anio et dans les montagnes avoisinantes. Les Romains, comme les Grecs avant eux, ne buvaient que des eaux de source et de puits de qualité supérieure.

Il est intéressant de noter que nos ancêtres, qui vivaient dans la zone semi-aride du bassin méditerranéen, avaient pour l'eau un très grand respect, voyant en elle l'élément essentiel de la nature vivante. Dieux des fleuves et de la pluie, nymphes et démons aquatiques, sources et lacs sacrés témoignent de cette attitude générale à l'égard de l'eau. Hérodote rapporte qu'en Perse

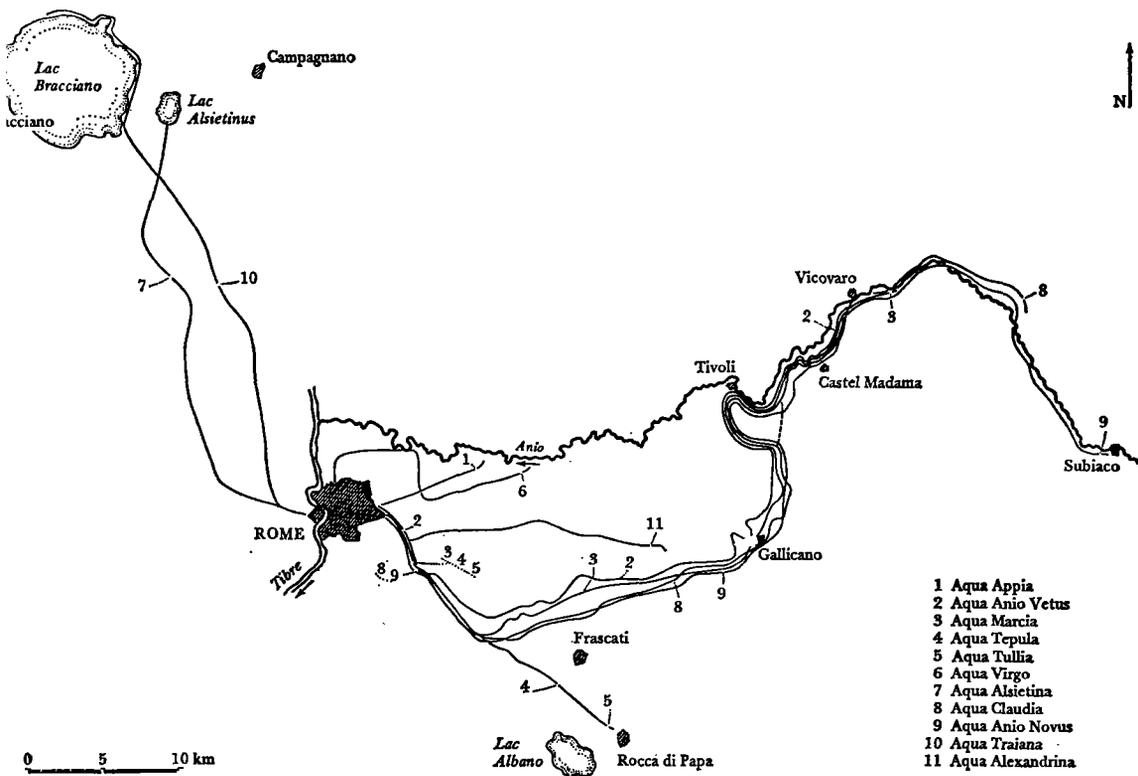


FIG. 7. Les aqueducs de Rome.

il était formellement interdit de polluer les cours d'eau et qu'il n'était même pas permis de s'y laver les mains, « car ils [les Persans] les vénéraient ». En Grèce, l'eau potable, qui provenait exclusivement de sources, était amenée jusque dans les villes par des conduits fermés (tuyaux) et soigneusement protégée contre toute contamination. A l'époque hellénistique, une réglementation sévère s'appliquait aux nombreuses citernes que possédait la ville de Pergame. Il y était interdit sous peine de lourdes sanctions d'en polluer l'eau et même d'avoir une attitude cavalière à son égard.

Il est regrettable que l'eau, ressource naturelle si précieuse et si indispensable, ne nous inspire plus un pareil respect. On ne s'étonne pas, surtout dans les pays industrialisés, de n'avoir qu'à tourner le robinet pour obtenir n'importe quand autant d'eau d'excellente qualité que l'on veut. Vu l'augmentation continue des besoins, il serait fort utile que, pour préserver nos ressources en eau, nous en revenions un peu à l'attitude de nos ancêtres.

### *Les égouts de la Rome antique*

Le réseau des égouts, à Rome, s'est développé parallèlement à celui de la distribution de l'eau. A ses débuts, la ville abandonnait ses déchets solides et liquides au fil des cours d'eau naturels et des fossés de drainage qui traversaient l'agglomération. C'est en 500 av. J.-C. que le premier égout fermé, le célèbre Cloaca Maxima, a été construit. Peu à peu, tous les égouts à ciel ouvert ont été couverts et les canalisations en provenance des divers quartiers

raccordés à ces collecteurs. Ce réseau de canalisations souterraines était constamment rincé par l'excédent du généreux système d'alimentation en eau. Frontinus, qui fut « Curator Aquarum » de Rome de 97 à 103 de notre ère, rapporte que « même l'eau qui déborde du système d'alimentation est utilisée. L'eau courante emporte les miasmes, les rues sont nettes, l'air qu'on respire est plus propre, l'atmosphère malsaine pour laquelle la ville, à l'époque de nos pères, était tristement célèbre a été dissipée ». Une telle abondance d'eau salubre disponible et un système d'égouts si bien adapté et si efficace étaient pour l'époque exemplaires.

Après la chute de l'empire, la conscience du rapport étroit qui existe entre l'eau et l'hygiène, d'une part, la santé et le milieu physique, de l'autre, vint à se perdre. Ce n'est que 1 500 ans plus tard, à la suite des progrès énormes réalisés dans le domaine de la science et des terribles épidémies du XIX<sup>e</sup> siècle, qu'on redécouvre l'importance de la qualité de l'eau et de l'hygiène. Aujourd'hui, si beaucoup de villes, grandes et petites, et de villages de par le monde disposent de réseaux d'alimentation en eau et d'égouts modernes, il reste encore de vastes régions où les conditions sanitaires sont très inférieures à celles qu'avaient su créer les Romains il y a 2 000 ans.

### **Des ressources en eau médiocres, mais bien utilisées**

Les déserts sont des zones où les précipitations sont faibles, de l'ordre de 200 mm par an tout au plus. Les pluies y sont peu abondantes, incertaines et irrégulières. D'où la pauvreté du couvert végétal et l'impossibilité d'y pratiquer l'agriculture. Pourtant, nous avons des preuves historiques du fait qu'autrefois, dans la région méditerranéenne, entre l'Atlantique et la pointe orientale de la péninsule Arabique, les hommes savaient tirer un parti étonnant du peu d'eau qu'ils avaient à leur disposition. L'Arabie du Sud, d'un bout à l'autre du monde antique, était célébrée pour ses produits agricoles et l'Afrique du Nord était le grenier de l'Empire romain. Ces admirables réussites tenaient à une technique agricole fondée sur une utilisation très efficace des faibles quantités d'eau qui apparaissent de-ci de-là sous forme de ruissellement (les crues éclairs).

Ce type d'agriculture se pratiquait soit dans de petits domaines dans les bassins versants de faible ampleur, soit lorsqu'il s'agissait de bassins versants plus vastes<sup>5</sup> dans de grandes exploitations aménagées dans les vallées, où l'eau était amenée par des canaux de dérivation. Dans le désert du Néguev, en Israël, on a retrouvé des milliers d'anciens domaines agricoles constitués de champs en terrasses (de 0,5 à 2 hectares). L'eau des crues provoquées par des précipitations brèves, mais violentes, était amenée dans les champs par tout un réseau de rigoles. La surface de captage nécessaire pour irriguer un champ était de 20 à 30 fois plus étendue que ce dernier. S'il s'agissait de mettre en valeur toute une vallée, l'eau du lit principal était détournée vers des canaux au moyen de digues peu élevées (de 5 à 6 mètres tout au plus). La plus haute devait être celle de Marib, qui atteignait 14 mètres. Des canaux larges de 4 à 8 mètres et longs de 1 à 3 kilomètres amenaient les eaux de la crue jusqu'aux terrasses, qui couvraient de 2 à 10 hectares. Des expériences effectuées dans des reconstitutions d'exploitations anciennes dans le Néguev ont démontré qu'il est effectivement possible, en « glanant » l'eau de cette manière, d'obtenir, dans les conditions qui sont celles du désert, des récoltes (de pêches, d'abricots, de raisin, de figues, d'amandes, d'orge, de blé, de tournesol et de luzerne) satisfaisantes.

L'agriculture irriguée par ruissellement est, dans son ingénieuse simplicité, un excellent exemple du parti qu'on peut tirer de ressources en eau douce limitées. Il ne faut aucune compétence ni aucun moyen technique particuliers pour la mettre en place et la pratiquer. Adapté aux conditions locales, c'est un système à la fois peu coûteux et efficace, et qui a fait la preuve historique qu'un modeste effort de conservation des ressources en eau des sols peut bien souvent donner des résultats meilleurs et plus rapides que de vastes projets d'irrigation dont l'étude et la réalisation auront pris des dizaines d'années. C'est en conjuguant les leçons du passé et les connaissances scientifiques actuelles sur les interactions du climat, du sol et de l'eau qu'on emploiera au mieux les ressources naturelles disponibles. Malheureusement, il est bien rare que les concepts de nos projets modernes tiennent compte des premiers.

### **L'eau et le sol, matières premières de l'agriculture**

L'eau et le sol sont les matières premières de la production végétale et animale. On peut, dans une certaine mesure, corriger l'inégalité de la répartition des ressources en eau dans l'espace et dans le temps, en veillant à leur conservation et en édifiant des ouvrages d'adduction. Quant à la conservation et à la mise en valeur des sols, c'est une tâche autrement plus ardue et qui coûte bien plus d'argent et de temps. En outre, l'érosion du sol est un processus irréversible. Abstraction faite des répercussions des changements climatiques et des variations météorologiques de grande extension (chaleurs et froids extrêmes, inondations et sécheresses), le principal responsable de la dégradation des terres cultivables est l'homme, par ses pratiques dévastatrices : surpâturage des troupeaux, exploitation de terrains marginaux (peu arrosés, pentus), inadéquation des façons culturales et déboisement<sup>6</sup>.

Ces problèmes ont commencé à se poser dès que l'homme a cessé de vivre de la chasse et s'est mis à cultiver le sol, il y a 5 000 ou 6 000 ans de cela. Platon, le philosophe grec (427-348 av. J.-C.), dans un dialogue intitulé *Critias*, nous a laissé une description très vivante des bouleversements hydrologiques et morphologiques déjà survenus en Attique : « ... la qualité du sol était en ce pays-ci supérieure à ce qu'elle est partout ailleurs ; ce qui permettait en outre au territoire de nourrir une armée, complètement dispensée de travailler aux travaux de la terre. Voici d'ailleurs, de cette qualité de son sol, un témoignage qui compte : c'est que les restes actuels de l'ancien pays peuvent, pour la variété des productions, pour l'excellence des récoltes, pour celle des pâturages qu'ils offrent à tous les animaux, soutenir la concurrence contre n'importe quel autre pays... ce qui subsiste, offre, si l'on compare l'état présent à celui d'alors, l'image d'un corps que la maladie a rendu squelettique, une fois que tout ce que la terre a de gras et de mou eut coulé de dessus ses os et que, du pays, il resta seulement son corps décharné. Mais, à cette époque ancienne, rien ne l'ayant entamée, la contrée avait pour montagnes des collines élevées et ces plaines qu'on appelle maintenant les « plaines-au-liège », elle les possédait, pleines d'une terre grasse ; elle avait sur ses montagnes de vastes forêts dont l'existence nous est encore aujourd'hui clairement attestée... ».

Cette citation de Platon montre que, même à des époques où la Terre était faiblement peuplée, l'érosion du sol était un problème grave. Avec l'accroissement rapide de la population mondiale et l'expansion de l'agriculture et de l'élevage, la destruction de ce qui est l'une de nos principales ressources

naturelles a atteint des proportions alarmantes. La nécessité d'augmenter la production alimentaire a, dans maintes régions, conduit à la mise en exploitation de zones qui s'y prêtent très mal de par leur topographie. Trop nombreux sont les cas où, très vite, de grandes superficies sont dévastées par l'érosion. A l'occasion d'une étude concernant Java, la FAO estime que, du train où vont les choses, le potentiel alimentaire des bassins fluviaux de l'île aura diminué de 60 % d'ici à 40 ans. On peut citer maints exemples récents de bassins de retenue dont la capacité prévue s'est trouvée considérablement réduite au bout de 30 ans du fait de la sédimentation<sup>7</sup>.

Il existe plusieurs manières de conserver les sols. L'une d'elles est aussi ancienne que l'agriculture elle-même et se pratique un peu partout dans le monde : c'est la culture en terrasses, laquelle permet d'exploiter jusqu'à des pentes très raides. Point n'est besoin de savoir-faire spécial et les matériaux disponibles sur place suffisent. Ce sont des ouvrages de dimensions modestes que tout cultivateur peut édifier lui-même. Ils ne supposent aucun investissement important et n'exigent qu'un peu d'initiative et beaucoup de travail (fig. 8). Les avantages de la culture en terrasses — conservation de sol et mise à profit des précipitations — sont évidents et d'ailleurs connus depuis longtemps. La pratique s'en est pourtant perdue dans maintes régions, où elles occupaient jadis les pentes escarpées des vallées. Quelles que soient les causes de cet abandon, il devrait suffire de considérer la perte irrémédiable de sol fertile qui s'est ensuivie pour vouloir trouver, en dépit des obstacles, une solution harmonieuse qui combine les méthodes éprouvées du passé et celles de l'agriculture moderne mécanisée.

### Conclusions

Au cours de leur histoire, les hommes ont su concevoir, mettre au point et réaliser des systèmes et des dispositifs remarquablement efficaces pour fournir à une population qui, partout, ne cessait d'augmenter l'eau nécessaire à ses besoins domestiques et agricoles. Nombre de ces inventions admirables ont longtemps continué à fonctionner. Qu'elles aient été possibles sans que les principes techniques et scientifiques les plus élémentaires aient été connus de leurs auteurs ne laisse pas d'étonner, mais elles reposaient sur une compréhension profonde des phénomènes naturels, une expérience de l'aménagement des ressources en eau accumulée par de nombreuses générations et une grande habileté technique.

Une bonne part de ce savoir et de cette expérience s'est perdue au moyen âge. Il fallut l'avènement de la science moderne au XVIII<sup>e</sup> et au XIX<sup>e</sup> siècle pour que la valeur des procédés hydrauliques anciens soit confirmée, les principes occultés par les tourbillons de l'histoire redécouverts et pour que de nouvelles applications en soient tirées. Il y a encore, dans les milliers d'années d'expérience de l'antiquité en matière d'hydraulique et d'irrigation, bien des choses qui restent à découvrir ou à remettre en honneur. L'époque moderne, imbue de sa science nouvelle, semble n'avoir que faire du fabuleux héritage technique du passé. La solution des problèmes que pose le développement des ressources en eau, à cause des grandes perturbations qui peuvent en résulter pour les délicats processus hydrauliques et écologiques, exige non seulement l'application de théories scientifiques abstraites, mais aussi la volonté d'opérer une synthèse entre ces dernières et le trésor d'expérience que nous ont légué les siècles passés. ■

## Notes

1. G. Garbrecht, « Engineers have made history, but they have failed to record it », *Commission internationale des irrigations et du drainage (CIID), Onzième Congrès, conférence et rapports*, Grenoble, 1981.
2. R. Van Haart, « Le drainage et la récupération des terres dans la basse Mésopotamie », *Nature et ressources* (Unesco), vol. X, avril-juin 1974 ; J. Maleika, « Irrigation conditions and problems in Iraq », *5th Irrigation Practices Seminar*, New Delhi, 1964.
3. R. J. Forbes, *Studies in ancient technology*, vol. I, Leiden, E. J. Brill, 1964.
4. H. E. Wulff, « The *qanats* of Iran », *Scientific American*, avril 1968 ; M. A. Butler, « Irrigation in Persia by *kanats* », *Civil engineering*, février 1933.
5. L. Shanan, M. Evenari et N. H. Tadmor, « Ancient technology and modern science applied to desert agriculture », *Endeavour*, vol. XXVIII, mai 1969.
6. R. L. Raikes, *Formation of deserts in the Near East and North Africa, arid lands in perspective*, Tucson, Arizona, The University of Arizona Press, 1969.
7. C. L. Albernethy, « Problems of soil erosion and sedimentation in the context of population growth and economic development », *AIRH/Unesco, Séminaire sur la recherche hydraulique et le développement des bassins fluviaux en Afrique*, Nairobi, 1980.

---

International Union of Air Pollution Prevention Associations  
(IUAPPA)

Union internationale des associations pour la prévention de  
la pollution atmosphérique (UIAPPA)



*VI<sup>e</sup> Congrès  
mondial  
pour la qualité  
de l'air*

*VIth World  
Congress  
on Air Quality*

16-20 mai 1983  
Paris

Écrire au secrétariat du Congrès :  
SEPIC/APPA, 40, rue du Colisée, 75381 Paris Cedex 08 (France).  
Tél. : (1) 359-10-30; télex 640450 Sepic; télécopieur : poste 447, avant le  
31 mars 1983.

---

*Les institutions du secteur de l'eau sont destinées à aider les pouvoirs publics dans la gestion de l'eau et sa législation, ainsi que dans l'administration des services qui concernent l'eau. La science et la technologie ont apporté des changements dans chacun de ces importants domaines, l'accent étant mis sur la conservation de la qualité de l'eau.*

---

## **L'influence de la science sur les institutions du secteur de l'eau**

Guillermo J. Cano

---

*Guillermo J. Cano est président de l'Association internationale des ressources en eau (AIRE/IWRA). Il est également président honoraire de l'Association internationale des droits des eaux (AIDE/LAWL), Buenos Aires (Argentine). Son adresse est la suivante : Arenales 2040-7.º B, 1124 Buenos Aires (Argentine).*

## Introduction

La notion d' « institution » du secteur de l'eau s'ordonne autour de trois grands axes, reliés mais distincts : la politique, la législation et l'administration de l'eau. Par politique de l'eau, il faut entendre la définition et le choix des grands objectifs que le décideur assigne à l'action du gouvernement et des habitants — et qui doivent être réalisés par l'exploitation des ressources en eau ou la protection contre ses effets préjudiciables ainsi que par la définition et le choix des stratégies à retenir pour atteindre ces objectifs ; cette politique peut se situer au niveau international (multilatéral ou bilatéral), national, régional ou local ; elle porte sur toutes les utilisations et tous les effets de l'eau et sur leurs interactions ; enfin, elle doit être rattachée aux politiques relatives aux autres activités humaines et gouvernementales.

La législation des ressources en eau, au sens large, est l'un des instruments d'exécution de la politique adoptée en la matière et non une fin en soi. Elle définit les droits et les devoirs de l'individu en ce qui concerne l'utilisation de l'eau et la protection contre ses effets préjudiciables ; elle doit prévenir et résoudre les conflits liés à l'utilisation de l'eau.

L'administration de l'eau recouvre les organismes chargés de connaître et d'étudier, de planifier, de distribuer et de gérer les ressources en eau, ainsi que la prestation de services collectifs reposant sur l'utilisation de l'eau ou la protection contre ses effets préjudiciables. Les organismes de recherche scientifique et technique, de formation du personnel et de prestation d'assistance technique ou financière pour l'utilisation de l'eau entrent également dans cette catégorie. Il s'agit ici surtout de services publics, mais l'administration des ressources en eau peut aussi être semi-publique ou para-étatique et même purement privée.

## Sciences relatives aux caractéristiques physiques et sociales

Les sciences et les techniques qui relèvent du domaine de l'eau sont, premièrement, celles concernant les caractéristiques physiques ou structurelles (hydrologie, hydrogéologie, écologie, ingénierie dans ses différentes spécialités, agronomie, médecine, biologie, cartographie) et celles relatives aux sciences politiques et sociales (politique, économie — y compris l'analyse de systèmes et la planification — démographie, sociologie, droit, science administrative). La gamme en est très étendue, mais, faute de place, l'auteur doit renoncer ici à être exhaustif pour ne s'attacher qu'à l'analyse de quelques aspects marquants.

## Historique des institutions de l'eau

Dans ce bref historique des institutions de l'eau, nous indiquons seulement des tendances, en retenant parfois certains cas isolés. Dès la préhistoire, les hommes ont commencé à utiliser l'eau à leur profit, en la tirant et en la dérivant des fleuves ou des lacs par des ouvrages individuels, ou en la puisant de la même façon dans le sous-sol, ou encore en stockant pour leur usage personnel les eaux de pluie. Il y avait alors plus d'eau disponible que d'hommes qui en eussent besoin.

Lorsque cette relation s'est inversée à cause de la croissance démographique, les hommes ont commencé à réaliser des travaux collectifs de déri-

vation, d'adduction et de stockage. C'est alors que se manifeste pour la première fois l'impact de la science et de la technologie sur la législation. D'une part, parce qu'il a fallu que la loi régitte, en fonction de données techniques, les modalités de l'action collective, c'est-à-dire les droits et les devoirs de chacun concernant la construction, l'entretien et l'exploitation des ouvrages et travaux hydrauliques réalisés collectivement par des particuliers. D'autre part, parce que, ultérieurement, il a fallu que des organismes d'État prennent à leur charge la réalisation et la gestion de travaux publics, notamment dans le secteur de l'eau.

Par ailleurs, les premières formes d'exploitation répondaient à des fins spécifiques : approvisionnement domestique, arrosage et irrigation, abreuvement du bétail, flottage et navigation ou actionnement des moulins. Rapidement, les progrès techniques des sciences de l'ingénieur ont permis d'utiliser une même ressource en eau ou une même source à des fins multiples. Cette donnée nouvelle a influé sur la législation, entraînant la nécessité d'établir un régime juridique de priorités entre les différents types d'utilisation et obligeant à fixer des règles pour que certaines formes d'utilisation n'entraient pas les autres.

En général, on utilisait l'eau pour les usages individuels à mesure qu'on la puisait, sans la stocker, et le nombre d'usagers était conditionné par le débit de la source. Les textes législatifs régissaient donc les droits de chacun en fonction de ce débit et, plus précisément, du régime de basses eaux. Dans les cas d'extrême sécheresse, ils prévoyaient une répartition proportionnelle entre les usagers et fixaient la durée et le lieu d'utilisation ainsi que le volume utilisable par chacun.

Quand le progrès technique a permis de stocker l'eau pendant les périodes où elle était excédentaire, on a pu, grâce aux réserves ainsi constituées, répondre aux besoins de nouveaux utilisateurs et envisager de nouveaux types d'utilisation (production d'électricité, navigation). Aussi a-t-il fallu introduire un important changement dans la législation de l'eau : il était en effet nécessaire de fixer des règles pour savoir à qui on donnerait le droit d'utiliser les nouvelles ressources ainsi dégagées.

### **Des facteurs sociologiques entrent en jeu**

Récemment, des facteurs d'ordre sociologique ont joué, faisant intervenir les disciplines scientifiques dont ils relevaient, tout en déterminant dans les aspects quantitatifs de l'utilisation de l'eau de sérieux changements, sanctionnés par les dispositions législatives. Ces facteurs, au nombre de trois, sont les suivants : a) le taux de croissance élevé de la population mondiale (explosion démographique) face au volume invariable des ressources en eau existantes sur notre planète, ce qui réduit la quantité disponible par habitant ; b) la redistribution de la population, en raison de l'exode rural vers les villes (implosion démographique) et de la création — parfois extrêmement rapide — de villes et d'agglomérations nouvelles (Brasilia, par exemple) ; c) le développement, même dans les pays non socialistes, des attributions de l'État en ce qui concerne la gestion de l'eau, qui est liée dans certains cas au fait que la complexité technique ou l'ampleur économique des ouvrages et des travaux hydrauliques excède la capacité d'entreprise des particuliers.

Le premier de ces facteurs a eu pour conséquence un revirement complet dans la politique et, partant, dans la législation de l'eau : cessant à ces deux niveaux de favoriser une plus large exploitation de l'eau, on s'est mis au

contraire à la limiter, cherchant ainsi à ménager cette ressource et incitant même à la recycler. La démographie a alors commencé à être utilisée comme un instrument de la politique de l'eau.

Du deuxième facteur découle un des principaux problèmes actuels de la législation des ressources en eau : la réorientation des usages et des priorités en la matière. Ainsi, certains droits, concessions ou permis d'utilisation de l'eau, initialement accordés à des fins agricoles, ont dû être affectés à d'autres usages, municipaux ou industriels, avec les effets que cela suppose sur les droits acquis.

Le troisième facteur a obligé, dans la législation comme dans l'administration de l'eau, à redéfinir et à limiter les droits de l'utilisateur individuel, le pouvoir de réglementation et de contrôle exercé par l'État sur l'utilisation de l'eau étant parallèlement étendu. Ici aussi les sciences politiques ont un rôle à jouer.

### *Un renouveau d'intérêt pour la qualité*

Le renouveau d'intérêt pour la qualité de l'eau a eu aussi d'importantes répercussions sur la législation et sur l'administration. A partir de la Conférence de Stockholm (1972), le monde a pris conscience de ce problème, notamment dans le cadre du droit fluvial international. A l'origine de cette crise, on trouve deux facteurs déterminants : l'un démographique — l'implosion démographique susmentionnée — et l'autre issu de l'accélération du développement industriel.

L'apparition et l'utilisation sans précaution de technologies industrielles toujours nouvelles qui polluent les eaux sont une des principales raisons pour lesquelles des textes législatifs régissant les industries ont été établis, afin de prévenir la pollution. Cette réglementation a suscité, à son tour, l'apparition de nouvelles technologies destinées à prévenir et à combattre la pollution ; tout cela s'est traduit dans la législation et a aussi entraîné une restructuration des institutions administratives : la création des agences de bassin françaises, avec leur régime fiscal particulier, en est un exemple tangible.

Les ouvrages et les travaux hydrauliques ont une incidence sur leur environnement, parfois négative, comme on l'affirme dans le cas d'Assouan (sans vouloir nier pour autant les avantages qui découlent de cette réalisation). Les études visant à définir et à évaluer cet impact sur l'environnement ont donné naissance à une nouvelle discipline scientifique qui va assez au-delà de l'écologie pure, car elle se rattache aussi aux sciences sociales, et dont les résultats s'inscrivent déjà dans la législation de l'eau. En effet, dans certains pays et à travers certaines institutions de crédit internationales, celle-ci impose déjà l'obligation d'étudier et de déclarer l'impact sur l'environnement, d'en évaluer les conséquences et de subordonner à ces dernières l'octroi des permis d'utilisation de l'eau (le terme « utilisation » englobant à la fois la consommation ou l'usage de l'eau, le déversement dans l'eau d'autres substances, ou le chauffage ou réchauffement de l'eau sans consommation proprement dite).

### **Le cycle hydrologique influence la loi naturelle**

L'étude de plus en plus approfondie menée par les hydrologues sur les effets de la loi naturelle du cycle hydrologique et de son unité conduit peu à peu

à une révision et une unification de la législation, ainsi qu'à une restructuration de l'administration de l'eau. Si l'on feint d'ignorer l'existence d'un tel cycle — comme le font encore la majorité des pays du monde — il devient de plus en plus difficile d'édicter des règles séparées, reposant sur des principes juridiques distincts, concernant les eaux de surface, les eaux souterraines et les eaux d'origine atmosphérique, sous leurs aspects quantitatifs et qualitatifs. Il est également difficile, en particulier dans les zones côtières et les estuaires, de régir et d'administrer séparément l'eau douce et l'eau de mer. La pollution de la haute mer à partir de sources terrestres et, à l'inverse, les effets préjudiciables de l'eau de mer à l'intérieur des terres, comme c'est le cas pour le Sénégal et le Rio de la Plata, rendent le maintien d'une séparation entre la législation et l'administration de l'eau douce et celles de l'eau de mer de moins en moins justifiable.

L'interdépendance entre les différentes ressources naturelles (y compris les ressources en eau) et surtout les interférences que produit l'intervention humaine dans les différents cycles naturels ont été découvertes et analysées par les naturalistes : c'est un ingénieur des eaux et forêts, Gifford Pinchot<sup>1</sup>, qui le premier les a perçues. Ce sont eux également qui ont mis au point les techniques permettant d'atténuer ces interférences ou d'en tirer un parti positif. Les problèmes d'érosion édaphique, de salinisation des sols et des eaux, d'inondations, de sédimentation des cours d'eau, d'eutrophisation des lacs, ou de pluies acides, sont tous issus de la mauvaise gestion des ressources naturelles non hydriques. La législation de l'eau commence à prendre en considération ces problèmes, en se dotant de règles de protection. Citons par exemple le code des ressources naturelles et de l'environnement de la Colombie et celui de la province de Corrientes en Argentine<sup>2</sup>, dans lesquels les juristes, qui font et appliquent les lois humaines, ont inséré les lois de la nature énoncées et mises en forme par des naturalistes spécialisés dans différentes disciplines : écologistes, hydrologistes, météorologues, agronomes, biologistes, botanistes et zoologistes.

### **Les satellites ont contribué au progrès de la connaissance des ressources en eau**

La connaissance des ressources en eau a enregistré un progrès considérable avec l'apparition des satellites artificiels et des systèmes de télédétection. Les images transmises par les satellites et les informations recueillies par les systèmes de télédétection ont permis, en 1982, de gagner des batailles (auparavant, lorsqu'on jouait franc jeu, ces batailles n'opposaient que le courage des deux combattants, maintenant, la victoire est remportée par celui qui a accès aux satellites espions) et aussi d'obtenir des prévisions sur les ressources en eau disponibles, de mettre en garde contre les risques d'inondation ou de détecter les sources de pollution des eaux et les endroits où elle sévit. Les progrès de l'hydrogéologie ont permis, grâce aux profilages électriques et à l'utilisation d'isotopes, de découvrir des formations d'aquifères et des bassins souterrains et d'en dresser le bilan, en fournissant les informations nécessaires pour leur exploitation rationnelle. Tout cela peut et doit se traduire dans la législation des ressources en eau et conduire à l'adaptation correspondante des structures de l'administration des eaux. Le développement des techniques d'analyse de systèmes et l'utilisation de l'informatique permettent de définir et de choisir des solutions de rechange et de prendre des décisions concernant la politique de l'eau, en faisant

intervenir non seulement les facteurs physiques, mais aussi les facteurs non structurels, d'ordre économique et social. Tout cela doit se traduire au niveau de la législation et de l'administration des ressources en eau par l'obligation d'utiliser ces nouveaux instruments dans le processus de prise de décision. Les techniques d'analyse des perceptions sociales, en plein essor, permettant de consulter l'opinion publique sur ces questions et de lui assurer une participation, doivent également s'inscrire dans ce processus.

L'eau et les sciences sociales qui s'y rattachent ne sont pas sous une cloche de cristal, isolées du reste de l'univers. Un éminent géographe, doté d'un esprit pénétrant, a défini une stratégie des moyens multiples à des fins multiples pour l'utilisation de l'eau<sup>3</sup>. En d'autres termes, il s'agit de recourir à des moyens qui ne relèvent pas strictement du secteur de l'eau (comme les systèmes de sécurité ou de délimitation de zones d'exploitation des sols pour pallier les effets des inondations) au lieu de n'utiliser à cette fin que des travaux hydrauliques. Mais il s'est également rendu compte, en s'attachant au cas de son pays — encore que ce phénomène soit universel — qu'aucun service public ne dispose, dans son seul domaine de compétence, des moyens divers qu'il faut mettre en œuvre pour parvenir à une meilleure utilisation de l'eau à des fins multiples. C'est là un défi à relever pour la science administrative, qui n'a pu le faire avec succès que dans quelques rares cas, dans le cadre restreint de la gestion de certains bassins.

### **Science et technologie jouent un rôle dans la politique de l'eau**

La science et la technologie ont une influence croissante sur la politique de l'eau, sa législation, son administration. Sans doute est-ce en entraînant chez certains dirigeants — malheureusement trop peu nombreux encore — la conviction qu'il était nécessaire de définir et d'appliquer une politique dans le secteur de l'eau que la science et la technologie ont joué leur rôle le plus important à ce niveau. Dans bien des zones du monde l'unique politique en la matière consiste encore ou bien à s'asseoir en attendant qu'il pleuve, ou que les eaux s'écoulent dans le sens déterminé par la topographie, ou bien à réaliser les travaux hydrauliques réclamés par les groupes de pression assez puissants politiquement pour être écoutés, sans tenir compte d'aucune autre considération et en ayant en outre la ferme conviction qu'il s'agit là de la meilleure politique au monde.

Parmi les autres influences, on peut citer, notamment, le passage d'une politique de développement des utilisations de l'eau à une politique de limitation et de conservation et également le souci de préserver la qualité de l'eau et d'introduire des facteurs écologiques dans la formulation de la politique de l'eau. La science et la technologie ont favorisé l'internationalisation de la politique de l'eau dans ses aspects tant juridiques qu'administratifs en ce qui concerne tant les ressources partagées bilatéralement (fleuves et lacs) que celles qui constituent le patrimoine de l'humanité (haute mer, atmosphère). En effet, la reconnaissance de la prééminence des aspects sociaux sur les aspects purement économiques est étudiée dans le plan d'action de Mar del Plata, établi à la Conférence des Nations Unies sur l'eau (1977).

Des technologies nouvelles en matière de gestion des ressources en eau et de travaux hydrauliques sont adaptées au milieu physique et humain auquel on envisage de les appliquer, alors que l'utilisation d'autres techno-

logies (réalimentation des aquifères, irrigation au goutte à goutte, traitement des effluents pollués, imperméabilisation des aqueducs, utilisation de compteurs de consommation, ingénierie du climat, entre autres) permet d'élargir les attributions de l'État vis-à-vis des particuliers, en ce qui concerne le contrôle de l'utilisation de l'eau. Enfin, l'utilisation de modèles et de l'analyse de systèmes prenant en compte les aspects tant qualitatifs que quantitatifs permet de décider du bien-fondé de certains travaux hydrauliques et de l'adoption et de la mise en œuvre progressive de « plans cadres » à très long terme de mise en valeur des ressources en eau à l'échelle nationale, comme les « réseaux de distribution de l'eau » (*Water grids*), dans des pays où les ressources en eau sont inégalement réparties sur le plan géographique.

### **Les conférences internationales recommandent des amendements**

Trois conférences internationales réunies récemment ont formulé des recommandations concrètes sur les amendements à apporter aux législations existantes dans le secteur de l'eau, pour les adapter aux changements dictés par le progrès scientifique et technique et par les conditions sociales. Il s'agit de la Conférence internationale sur les systèmes globaux de législation de l'eau dans le monde, réunie à Valence (Espagne) en 1975, de la II<sup>e</sup> Conférence internationale sur le droit et l'administration de l'eau organisée à Caracas (Venezuela) en 1976 et, enfin, de la Conférence des Nations Unies sur l'eau (Mar del Plata, Argentine, 1977) dont le plan d'action contient des recommandations concrètes à ce sujet. Les deux premières conférences ont été organisées sous l'égide de l'Association internationale du droit des eaux (IAWL).

### **Réforme de la législation de l'eau**

La première répercussion de la science et de la technologie sur la législation de l'eau s'est manifestée dans certains pays par une réforme des textes législatifs en vigueur de manière à en faire des instruments d'application des réformes politiques mieux adaptées.

Concrètement, on note, tout d'abord, une tendance à transférer au domaine public une plus grande variété de ressources en eau et à développer la réglementation et le contrôle de l'exploitation de l'eau et de la propriété privée. On note également une tendance à rendre plus strictes les conditions juridiques requises en matière d'attribution de la propriété des ressources en eau, de concession ou de permis d'utilisation de l'eau ; par ailleurs, la fixation d'échéances plus courtes pour les concessions et les permis d'utilisation des eaux domaniales a permis, à expiration du délai, d'en changer l'affectation sans verser d'indemnisation. Il y a aussi un assouplissement des ordres de priorité entre les différents usages de l'eau (domestique, municipal, hydro-électrique, notamment) et entre les usagers, en s'attachant à des paramètres généraux, plutôt qu'à une hiérarchie rigide des priorités. De nouveaux critères juridiques ont été adoptés pour définir l'usage des eaux emmagasinées, y compris en ce qui concerne la vente ou la location d'aires de stockage dans les bassins de retenue.

*Des normes satisfaisantes pour l'utilisation de l'eau*

Des normes techniques satisfaisantes ont été établies pour le forage et l'exploitation de puits pour la recherche des eaux souterraines ainsi que pour certaines utilisations de l'eau (usage domestique, agriculture, navigation, en particulier) comportant, dans certains cas, l'obligation de recycler l'eau ou de réalimenter les aquifères une fois leurs eaux usées. Des normes sont également appliquées en ce qui concerne l'utilisation des autres ressources naturelles (terres, forêts, faune, pâturages) dans la perspective d'un bon usage de l'eau ; on a notamment adopté des normes de qualité des eaux tant pour les cours d'eau récepteurs des eaux usées que pour les effluents à déverser. L'établissement de modèles de qualité a permis d'adapter ces normes juridiques de façon à tenir compte de la destination du récepteur en cause à l'endroit et au moment du déversement de l'effluent. Il convient aussi de noter l'adoption de normes visant à un usage conjoint ou combiné des eaux de surface et des eaux souterraines et, dans certains cas, des eaux météoriques.

Enfin, on a institué des impôts et des obligations, aussi bien pour utiliser les ressources en eau que pour y déverser des effluents (mesures d'incitation et versements de compensation ; obligation d'utiliser telle ou telle technique d'épuration des eaux usées, notamment). Les plans de développement dans le secteur de l'eau sont rendus obligatoires tant auprès des services publics que des usagers par promulgation de lois.

### **Mauvaise coordination des organismes chargés de l'administration de l'eau**

L'influence des innovations scientifiques et techniques s'est également fait sentir au niveau de l'administration de l'eau par les pouvoirs publics suivant les pays et également suivant les époques. On a initialement créé des organismes ayant autorité sur une seule utilisation de l'eau ou sur un risque déterminé, mais n'étant pas coordonnés et relevant de départements ou ministères différents. C'est le cas des organismes chargés de la distribution d'eau potable et des services d'assainissement, ou de la production hydro-électrique, des institutions assurant le contrôle de la navigation fluviale, ou la lutte contre les inondations, notamment. Cependant, dans certains pays, tous les organismes responsables des différentes utilisations sont fondus en un seul ou, du moins, la formulation de la politique, l'élaboration et le contrôle de l'exécution des plans relèvent d'une seule institution, centralisée. C'est le cas des pays qui, comme la Colombie, ont regroupé en un seul ministère la gestion de toutes les ressources naturelles y compris les ressources en eau. Autre exemple, le Venezuela, qui a chargé un seul ministère non seulement de la gestion des ressources naturelles, y compris les ressources hydrauliques, mais également des problèmes écologiques connexes. Il convient d'adjoindre à ces grandes tendances les variantes suivantes : les pays qui ont fondu en un même organisme la gestion des aspects qualitatifs et quantitatifs de l'utilisation de l'eau, autrement dit qui associent à la distribution de l'eau le contrôle de sa qualité ; les pays qui attribuent à un même organisme la gestion des eaux souterraines et celle des eaux de surface (voire même, dans certains cas, celle des eaux atmosphériques, à travers l'ingénierie du climat).

## Création des agences de bassin

Il faut également rappeler l'influence de la science politique et de la science administrative sur la création des agences de bassin. Ce mode de gestion, apparu en Espagne en 1926 avec la création des confédérations hydrographiques, a connu un essor rapide à partir de l'institution, au début des années trente, de la Tennessee Valley Authority aux États-Unis d'Amérique et devait être adopté, sous des formes variées, par de nombreux pays. Il s'agit là encore d'une solution qui a ses détracteurs, ces derniers estimant que, dans bien des cas, les responsabilités des agences de bassin doivent être élargies. Ces mêmes détracteurs affirment, en outre, que l'administration de l'eau dans un pays donné ne peut se réduire à une fédération d'agences de bassin, une politique de l'eau à l'échelle nationale devant avoir pour eux une autre dimension.

Les agences de bassin se sont également multipliées à l'échelon international. Toutefois, il faut préciser que, dans de nombreux cas, leur compétence se limite à la réalisation et à la gestion de certains travaux hydrauliques et ne couvre pas la totalité des activités du bassin.

La liaison entre la recherche scientifique, la recherche sur la technologie appliquée et la formation du personnel, qui vise à donner à l'administration de l'eau les moyens d'appliquer la politique adoptée, est également une innovation, dont l'Argentine et le Venezuela ont déjà fait l'expérience. La multiplication d'organismes autonomes de gestion de l'eau, para-étatiques ou même purement privés, est une illustration du fait que le secteur privé — normalement plus souple que le secteur public — a davantage de possibilités d'introduire des technologies nouvelles et les données de l'expérience pratique dans l'administration des ressources en eau.

## Conclusions

Le droit des eaux est en soi une branche spécialisée du droit. L'Association internationale du droit des eaux, qui compte déjà plus de 500 spécialistes, a organisé deux conférences internationales et projette d'en organiser une troisième. Les spécialistes de cette branche du droit sont à ce titre également des scientifiques. Mais les juristes, les administrateurs des ressources en eau, les décideurs et responsables des politiques et les législateurs devraient se rendre compte qu'il n'est pas possible d'adopter et d'appliquer des lois efficaces sur l'eau ni de mettre en place les administrations appropriées dans ce domaine sans l'indispensable concours de scientifiques et de technologues spécialistes des autres branches du savoir qui se rattachent à la connaissance et à la gestion des ressources en eau. Ces derniers devraient parallèlement admettre que, sans les juristes, ils ne peuvent pas non plus assumer seuls les fonctions de décideurs politiques, de juristes, de législateurs ou d'administrateurs. Il est évident que la question est à la fois multidisciplinaire et interdisciplinaire. Les remarques précédentes s'appliquent également aux juristes non spécialistes du droit des eaux qui, souvent, surtout dans la sphère du droit international, y font pourtant des incursions. ■

---

Notes

1. G. Pinchot, *Breaking new ground*, New York, Harcourt and Brace, 1947.
  2. FAO. *Informe sobre asistencia técnica al Gobierno de Colombia en relación con el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente*, Bogotá, 1976 (doc. PNUD/FAO/RLAT/72/028).
  3. G. White, *Strategies of American water management*, Ann Arbor, University of Michigan Press, 1969.
- 

*Pour approfondir le sujet*

- CANO, G. Historical and geographical evolution of water law and its role in the management and development of water resources. *Proceedings of the International Conference on Global Water Law Systems. Valencia (Spain), 1975*. Publié par Colorado State University, Fort Collins, 1976.
- . The legal and administrative implications of the hydrological cycle and water related resources facing the 21st Century. *Water international*, vol. 4, n° 4, décembre 1979, p. 20-24.
- . The recommendations of the U.N. Water Conference (Mar del Plata 1977), and related meetings on national water laws. *Journal of hydrology*, vol. 51, 1981, p. 884.
- . Water law and legislation: how to use them to obtain optimum results from water resources. *Water supply and management*, vol. 1, 1977, p. 313-334. London, Pergamon Press. (Doc. des Nations Unies, E/CONF. 70/A.1.)
- MAJOR, C. ; LENTON, L. *Applied water resources systems planning*. Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1979.
- Plan d'action de Mar del Plata. Rapport de la Conférence des Nations Unies sur l'eau. Mar del Plata, 14-25 mars 1977*. (Doc. E/conf. 70.29.)

*Il est difficile pour nos esprits encore sous l'influence de préjugés anciens d'accepter que l'eau douce qui jaillit d'une source n'est que l'accumulation d'une multitude de gouttes de pluie ou de flocons de neige. Il subsiste, profondément ancrées chez l'homme, aussi savant soit-il, des idées fausses sur les systèmes naturels qui continuent de modeler son attitude face au cycle hydrologique, au détriment des pays situés en zones arides. Il faudrait donner une formation plus appropriée aux spécialistes en hydrologie, qui pourraient contribuer à extirper ces idées fausses.*

---

## **Du bon et du mauvais usage du cycle hydrologique**

Arie Issar

---

*Arie Issar est titulaire de la chaire Alain Poher d'hydrologie des zones arides et chef du Département d'hydrologie et d'hydraulique de l'Université Ben Gourion dans le Néguev. Il a participé à de nombreuses missions d'experts sur la mise en valeur des eaux souterraines : de 1961 à 1965 en Iran, en tant que conseiller de la FAO, et de 1965 à 1975 au Venezuela, en Colombie, en République de Corée, à Sri Lanka, au Népal, en République-Unie de Tanzanie et au Brésil. Il a publié près de 50 exposés et rapports sur des questions liées à la mise en valeur des ressources en eau. Son adresse est la suivante : The Jacob Blaustein Institute for Desert Research, Ben-Gurion University of the Negev, Sede Boqer Campus, 84990 Israël.*

## De la goutte de pluie au jaillissement de la source

La vision qu'avaient les anciens de l'univers est aujourd'hui encore présente dans le langage. Nous parlons toujours du lever du soleil et de son coucher ; les jours de la semaine tirent leur nom des dieux et des étoiles ; nous disons de la fortune qu'elle nous sourit ou qu'elle nous fuit, et de quelqu'un qu'il est mélancolique ou qu'il a le cœur tendre. Si ces modes d'expression s'expliquent par les conventions de la communication, il subsiste dans l'esprit contemporain plus d'éléments anciens qu'on ne croit.

Toutefois, il ne sera pas question ici de la suppression de l'irrationnel dans la pensée moderne. Ce qui nous intéresse, c'est de savoir dans quelle mesure les concepts modernes ont remplacé ceux d'hier dans la vision contemporaine du monde et, notamment, dans l'approche que l'homme a de son environnement. Selon nous, indépendamment de tout progrès scientifique, l'homme, aussi savant soit-il, persiste à croire que la nature éternelle est plus forte que l'éphémère existence humaine et ce qu'elle produit et que les processus naturels viendront toujours corriger ses erreurs.

Cette méconnaissance des systèmes naturels est profondément enracinée et particulièrement nette en ce qui concerne le cycle hydrologique de la terre. Il n'est que de constater les immenses bénéfices réalisés par les sociétés qui mettent en bouteille et expédient dans le monde entier des eaux minérales captées à des sources célèbres qui ne sont pourtant, des recherches hydrologiques l'ont prouvé, que l'eau provenant de la pluie ou de la fonte des neiges en amont desdites sources, laquelle ne diffère en rien de celle que la plupart des consommateurs trouvent à leur robinet après qu'elle a suivi un cycle identique dans la région et a été acheminée par des puits et des canalisations.

La conviction que les profondeurs de la terre ont des vertus purificatrices remonte peut-être aux temps de la mythologie, lorsque l'homme pensait que les volcans étaient les cheminées d'une forge divine. Cela n'explique pas toutefois pourquoi il se refuse toujours à admettre que toute eau douce, y compris celle qui jaillit des entrailles de la terre, provient tout simplement de la pluie et de la neige.

Cette réticence tient sans doute en partie à la difficulté qu'a l'esprit à saisir l'effet cumulatif d'une multitude de petits éléments et à faire le rapport entre de petites gouttes de pluie ou de légers flocons de neige et les énormes quantités d'eau qui jaillissent de sources importantes ou que charrient sans répit les fleuves jusqu'à la mer. Apparemment, le passage d'un fait ténu, isolé dans le temps et dans l'espace, à un mouvement important et constant est un processus intellectuel plus complexe qu'on ne l'imagine généralement.

### Des théories expliquent l'origine de l'eau douce

Depuis que l'homme essaie de comprendre les phénomènes naturels, il a échafaudé les théories les plus ingénieuses pour expliquer l'origine des grandes sources et des rivières. Ainsi, il a imaginé que les grands tourbillons océaniques pénétraient dans la terre, dont la chaleur permettait la distillation de l'eau. Bien d'autres théories ont été avancées pour expliquer comment l'eau de mer se transforme en eau douce et arrive dans les montagnes, de manière à se conformer aux suppositions des savants. Ce n'est qu'au XVII<sup>e</sup> siècle, avec Bernard Palissy, Perrault, Mariotte et leurs confrères italiens et anglais que l'on a vu apparaître l'explication simple (du moins

pour nous) du cycle hydrologique. Aujourd'hui, si la plupart des personnes instruites peuvent expliquer la provenance des sources et des fleuves, l'ampleur de ces phénomènes a un impact tel sur l'esprit qu'il reste malaisé de saisir le rapport entre le phénomène final et l'accumulation d'une série de petits événements et, par voie de conséquence, la fragilité du processus. De même, face à ses propres entreprises, l'homme est incapable de prévoir les effets à long terme d'une multitude de petites opérations sur un ensemble plus vaste, par exemple l'effet des égouts et des ordures sur la qualité de l'eau des fleuves et des grands lacs.

On pourrait penser que ce que les responsables de la planification ont appris à leurs dépens depuis dix ans en ce qui concerne la détérioration qualitative et quantitative des systèmes aquatiques leur aurait servi de leçon et qu'ils auraient tenu compte de toutes les conséquences éventuelles d'un mauvais traitement des ressources hydrauliques. Une telle hypothèse n'est pas toujours exacte, car elle méconnaît le rôle du décideur, lequel doit concilier ces enseignements avec son programme politique et tenter d'intensifier le climat politique et économique nécessaire à leur mise en pratique.

### **Une mauvaise évaluation du temps**

S'il n'y parvient pas, c'est par manque de jugement, comme dans le cas du cycle hydrologique, à cela près qu'il commet cette fois une erreur de temps plutôt qu'une erreur d'espace ou de volume. Par rapport à l'horizon temporel des hommes politiques, le processus de détérioration du cycle hydrologique est assez lent, surtout dans le domaine des écoulements souterrains où plusieurs dizaines d'années séparent la cause de l'effet.

C'est ainsi que, bien souvent, le responsable « pragmatique » considère que la protection de l'environnement coûte trop cher et sa négligence sera punie trop tard pour qu'elle ait un poids quelconque dans le projet.

Quand cette attitude prévaut dans les pays en développement, en particulier ceux de la zone aride, le retour de bâton peut se produire plus rapidement que prévu, en raison de l'écoulement accéléré qui intervient à certains moments du cycle hydrologique, à savoir le taux d'évaporation et, donc, le processus de salinisation. Dans ces pays, où il faut tenir compte, d'une part, des pressions qu'exerce sur le gouvernement une population affamée pour qu'il la dote des moyens de production nécessaires — avant tout, de l'eau d'irrigation — et, d'autre part, des coûts respectifs de la rapidité et de la prudence, si l'on veut éviter toute détérioration de l'environnement à long terme, il n'est pas étonnant que la solution choisie soit la moins chère et celle qui donne les résultats les plus rapides. La plupart du temps, les torts sont partagés (si l'on peut donner tort à des gens qui sont au bord de la famine), entre les planificateurs et les hommes politiques, étant donné que les hydrauliciens sont soi vent incapables de voir que l'objet du projet de développement, que ce soit, un fleuve, un lac ou une formation aquifère, fait partie d'un ensemble homogène et que les hommes politiques, lorsque les plans leur sont soumis, s'en servent pour tenter de gagner la faveur du public.

### **Les erreurs portent sur le cycle hydrologique**

Dans les pays en développement au climat aride, on constate les conséquences d'une double erreur de jugement : la première porte, comme on l'a vu, sur le

cycle hydrologique et la seconde sur le caractère particulier de ce cycle en climat aride.

La plupart des pays industrialisés étant situés dans des zones humides, le gros de la recherche scientifique a porté sur des environnements où l'eau est abondante. Les efforts scientifiques et techniques ont donc visé pour l'essentiel à gérer cette richesse et à assurer son utilisation optimale. En revanche, on avait tendance à considérer que l'eau souterraine était d'une importance secondaire et qu'elle présentait plus d'inconvénients — problème de drainage — que d'avantages.

Ainsi, alors que les hydrologues et les hydrauliciens avaient déjà des connaissances très poussées en ce qui concerne le régime hydrologique des rivières ou la construction des barrages et des canaux, l'hydrologie souterraine en était encore au stade des balbutiements. Cette mentalité subsistant dans de nombreux établissements d'enseignement, il n'est pas étonnant qu'elle influence les étudiants des pays en développement situés en zone aride. De retour chez eux, ils y apportent à la fois le savoir et le préjugé, faute de connaissances générales ou du courage nécessaire pour modifier les méthodes et les doctrines, sans parler d'en inventer de nouvelles. Les magnifiques barrages qui se dressent, dérisoires, au-dessus de fleuves à sec, les réservoirs envasés ou même rompus par des crues soudaines dans des zones désertiques sont un spectacle désolant, mais qui donne à réfléchir dans de nombreuses zones arides.

En sa qualité de consultant pour des projets de développement régional exécutés par des organismes des Nations Unies, ainsi que des gouvernements dans de nombreux pays arides, l'auteur a été le témoin, parfois impuissant, de projets de ce type qui avaient exigé des investissements considérables et ne donnaient, dans le meilleur des cas, que des résultats minimes.

### *Une conception de l'eau révélatrice*

L'importance respective des eaux de surface et des eaux souterraines illustre un point capital : la façon dont on conçoit l'eau et son utilisation en zone aride. Selon nous, les hydrauliciens travaillant dans ces régions comprennent rarement toutes les conséquences qu'ont la rareté de l'eau et la nécessité de la conserver à long terme pour lutter contre les insuffisances et les aléas de l'approvisionnement.

Prenons, à titre d'exemple, une étude prospective en vue d'un projet agricole dans les zones arides. On a toutes chances de constater que les calculs économiques sont, dans la plupart des cas, basés sur l'augmentation de la production par unité de surface, qu'il s'agisse d'acres, d'hectares, de dunam ou de fedan ; il est bien rare en effet que le revenu soit calculé par rapport au volume d'eau. Mais s'il feuillette le rapport, le lecteur constatera peut-être avec surprise que, le plus souvent, ce sont des problèmes d'eau et non des problèmes de surface qui limitent le développement de la région. La plupart des investissements vont à la mise en valeur et à la distribution de nouvelles ressources en eau. Les sols arides abondent et l'on est souvent dans l'impossibilité de les mettre en valeur dans le cadre du projet soit parce que l'eau manque, soit parce qu'elle est trop chère. Les économistes prétendent peut-être que, du moment que l'on calcule le rapport coût-utilité, l'unité de base importe peu, mais, selon nous, cette méthode de calcul est très révélatrice.

## La conservation des eaux souterraines est un problème

Autre question primordiale, celle de la conservation à long terme des ressources en eau souterraine, quand elles existent. En zone aride, elles sont par définition rares et irrégulières ; le grand problème est donc de les préserver et de les conserver, lorsqu'il y en a, en prévision des périodes de sécheresse. De nombreux organismes se sont adaptés au milieu aride en modifiant radicalement leur niveau de consommation d'eau, donc leur niveau d'activité. L'homme étant moins apte et encore moins disposé à changer sa consommation ou son mode de vie, il a de tout temps imaginé divers moyens de conserver l'eau ou ses produits, à savoir la nourriture et le capital, c'est-à-dire de conserver le produit des bonnes années en prévision des mauvaises.

Un des meilleurs réservoirs naturels est celui que constituent les couches souterraines perméables, appelées formations aquifères : chaque particule de sable ou de gravier forme barrage et ralentit l'écoulement de l'eau qui s'est infiltrée dans le sol et qui filtre entre les fragments de roche. Les anciens connaissaient ces réservoirs naturels et les avaient aménagés de façon très perfectionnée, comme en témoignent les systèmes nabatéens ou les systèmes de zone radriculaire des arbres utilisés dans les déserts d'Edom et du Néguev et des environs. Les galeries filtrantes, qu'on appelle *ghanat*\* en Iran, *karez* au Béloutchistan et *foggara* au Sahara, en sont un autre exemple. Les experts modernes, qui, pour la plupart, viennent de l'étranger ou ont été formés à l'étranger, n'ont malheureusement pas compris le principe de ces systèmes, qu'ils considèrent comme dépassés. Il a donc été décidé de les remplacer par des dispositifs modernes.

Dans les années soixante, l'auteur du présent exposé a participé à une discussion avec un groupe de planificateurs qui envisageaient de canaliser les eaux d'un fleuve du plateau iranien à l'aide d'un barrage et d'un nouveau système de distribution comprenant des canaux revêtus. Si ce projet avait abouti, il aurait asséché les nombreux *qanats* servant de réservoir aux eaux d'infiltration.

L'un des arguments avancés contre l'autre solution — la constitution progressive du réservoir souterrain en creusant des puits et en amenant l'eau au niveau du sous-sol — était que les eaux souterraines sont mystérieuses et qu'elles ne peuvent être mesurées. Cette approche des eaux souterraines, mystérieuses et donc indomptables, reflète un système d'éducation élaboré dans des pays aux fleuves abondants.

Au sud du même pays, un grand barrage a été édifié, dont le nom doit perpétuer à jamais la mémoire de celui qui en a décidé la construction. Toutefois, ce barrage n'a pas tardé à faire monter la surface de la nappe phréatique, ce qui a provoqué un dépôt de sels dans les sols qu'il était censé irriguer. Les constructeurs ont méconnu d'importantes réserves qui auraient pu alimenter pendant longtemps la région en abondance et à faible prix. C'est ainsi que la vanité du monarque et l'aveuglement des ingénieurs ont engendré une monstruosité sur le plan écologique.

\* Il s'agit de galeries souterraines horizontales, creusées dans les couches contenant de l'eau à l'aide de nombreux puits verticaux. Les galeries drainent l'eau qui s'est accumulée par gravité et assurent l'irrigation des champs et l'alimentation en eau potable. (*Ghanat* : nom donné à ces galeries dans les provinces d'Iran où l'on parle farsi.)

## Changer les mentalités... un objectif de l'éducation

Si l'on veut modifier les mentalités, par où commencer ? Par l'éducation, bien sûr, l'éducation au sens large, celle qui va de l'enseignement classique aux programmes destinés à changer la mentalité des planificateurs et des responsables politiques. L'éducation doit faire comprendre que la nature est un tout, dont le cycle hydrologique est un élément capital et qu'on ne peut endommager impunément.

Il n'est pas dans notre propos d'examiner la question de l'éducation en matière d'environnement. C'est un domaine trop vaste et trop important pour faire l'objet d'une évocation superficielle, mais nous pouvons relever certains points qui nous intéressent directement.

Dans l'enseignement primaire et secondaire, le cycle hydrologique peut être systématiquement utilisé, car il fournit un excellent exemple de l'approche systémique. Le rôle de l'eau dans le monde vivant et le monde inanimé peut être un sujet d'observation, de recherche et de réflexion novatrice. Quant à l'interaction des différents cycles et à leurs relations à l'intérieur d'un vaste cycle continu, c'est un monde qui se prête aux recherches scientifiques les plus diverses et qui, sans interdire la spécialisation dans tel ou tel domaine, permet de considérer la nature d'un point de vue général et d'y voir un ensemble de systèmes agissant les uns sur les autres.

En matière d'études et de recherche universitaires, c'est évidemment la spécialisation qui doit retenir l'attention et, à ce niveau, on peut, pour mettre en lumière l'approche environnementale, mettre davantage l'accent sur la théorie des systèmes et ses conséquences mathématiques, ainsi que sur ses applications — assistance technico-commerciale et recherche opérationnelle, par exemple. La philosophie des systèmes en est encore à ses balbutiements, mais il est probable que, dans un avenir proche, elle fera partie de la philosophie des sciences.

### *Venir à bout des défauts de l'enseignement*

A notre avis, il est plus difficile de venir à bout des autres défauts de l'enseignement supérieur décrits précédemment. Il faut réorganiser les cours et la recherche de manière à familiariser l'étudiant dès le début de ses études universitaires avec le côté pratique de sa spécialisation. Cette formation ne se limitera pas à de simples travaux pratiques, l'étudiant devra aussi être initié à la complexité des petits systèmes dans son domaine de spécialisation et à leurs relations avec des systèmes plus vastes, qu'ils soient naturels ou artificiels. Ainsi, un futur ingénieur chimiste devrait avoir une connaissance pratique des problèmes du traitement des déchets ou même de la pollution des rivières ; un étudiant en hydraulique devrait passer un certain temps dans un pays en développement et participer à un projet de développement régional d'ensemble pour s'initier à tous les aspects d'une approche systémique intégrée au plan régional.

L'éducation des étudiants originaires de pays en développement, et surtout de pays arides, est une question encore plus complexe. Il nous semble que la meilleure solution serait de fonder sur place des instituts où enseignerait un personnel universitaire de haut niveau, recruté à l'étranger et dans le pays même.

Un tel projet se heurtera sans doute à d'énormes difficultés d'ordre per-

sonnel et organisationnel que des programmes de coopération binationale ou internationale devraient permettre de résoudre. L'Unesco a un rôle important à jouer dans la création de ces instituts.

Ces établissements d'enseignement supérieur « sur le terrain » favoriseront l'apparition de chercheurs, de professeurs et de techniciens locaux mieux placés pour comprendre les problèmes du pays et pour élaborer avec une mentalité nouvelle les méthodes et les théories adéquates. Le problème de la « fuite des cerveaux » sera peut-être résolu en même temps que celui du drainage des eaux.

La création d'un noyau de jeunes scientifiques de valeur, qui soient fiers de servir leur pays dans quelque région reculée et voient dans cette tâche un défi personnel et humanitaire, est un objectif digne d'être atteint. ■

### *Bibliographie*

- BAKER, M. ; HORTON, R. Historical development of ideas regarding the origin of springs and groundwater. *Transactions of the American Geophysical Union*, p. 395-400, 1936.
- EVENARI, M. ; SHANAN, L. ; TADMOR, N. *The Negev, the challenge of the desert*. Cambridge, Harvard University Press, 1971.
- FAO. *L'influence de l'homme sur le cycle hydrologique*. Numéro spécial (n° 17) du *Bulletin d'irrigation et de drainage*. Rome, FAO, 1974.
- ISSAR, A. On the source of the water of the thermo-mineral springs of Lake Kinneret (Israel). (A paraître dans le *Journal of hydrology*.)
- MEINZER, O. The history and development of groundwater hydrology. *Journal of the Washington (State) Academy of Science*, vol. 24, n° 1, 1934.
- NATIV, R. ; ISSAR, A. ; RUTLEDGE, J. *Chemical composition of rain and flood water in the Negev, Israel*. (A paraître.)
- UNESCO. Contributions to the development of the concept of the hydrological cycle. Paris, Unesco, 1974. (SC.74/Conf. 804/Col. 1.)

---

# THE BULLETIN

of the atomic scientists



*Where can you turn in times like these?*

If you are concerned with the course of world events, if you feel that scientific and technological developments should be used for the betterment of mankind, if you worry about world peace and human survival, then *The Bulletin of the Atomic Scientists* is the magazine for you.

*The Bulletin* will provide you with knowledge of the political and scientific events that shape our world and give you a basis for informed opinion on science and public affairs.

Ten times a year you will read clearly written commentaries, articles and reviews on: energy, human rights and science, the arms race, Third World development, international relations and more. And now you can subscribe at a special rate for new subscribers only.

---

**THE BULLETIN** 5801 S. Kenwood Ave., Chicago, IL, 60637

Yes, enter my subscription to *The Bulletin of the Atomic Scientists* for one year (ten issues) at a savings of \$4.50—25% off the regular subscription price.

I enclose \$15.00.  Please bill me.

Subscribers outside of the United States add \$4 for postage.

Name \_\_\_\_\_

Address \_\_\_\_\_

City \_\_\_\_\_ State \_\_\_\_\_ Zip \_\_\_\_\_ Country \_\_\_\_\_

Guarantee: I may cancel at any time and receive a refund on my unmailed copies.

---

*L'utilisation rationnelle des ressources en eau de la planète est subordonnée à une gestion qualitative et quantitative complète des bassins hydrogéologiques. Les processus hydrologiques qui interviennent dans ces aquifères peuvent donner lieu à une accumulation de sel dans les sols, voire dans l'eau elle-même, ce qui constitue une sorte de pollution naturelle. Mais l'homme peut lui aussi polluer ces aquifères en évacuant ses déchets dans de mauvaises conditions et, de plus en plus, en utilisant des produits chimiques et des techniques d'irrigation pour l'agriculture.*

## **Les ressources en eaux souterraines sont-elles suffisamment protégées ?**

György Kovács

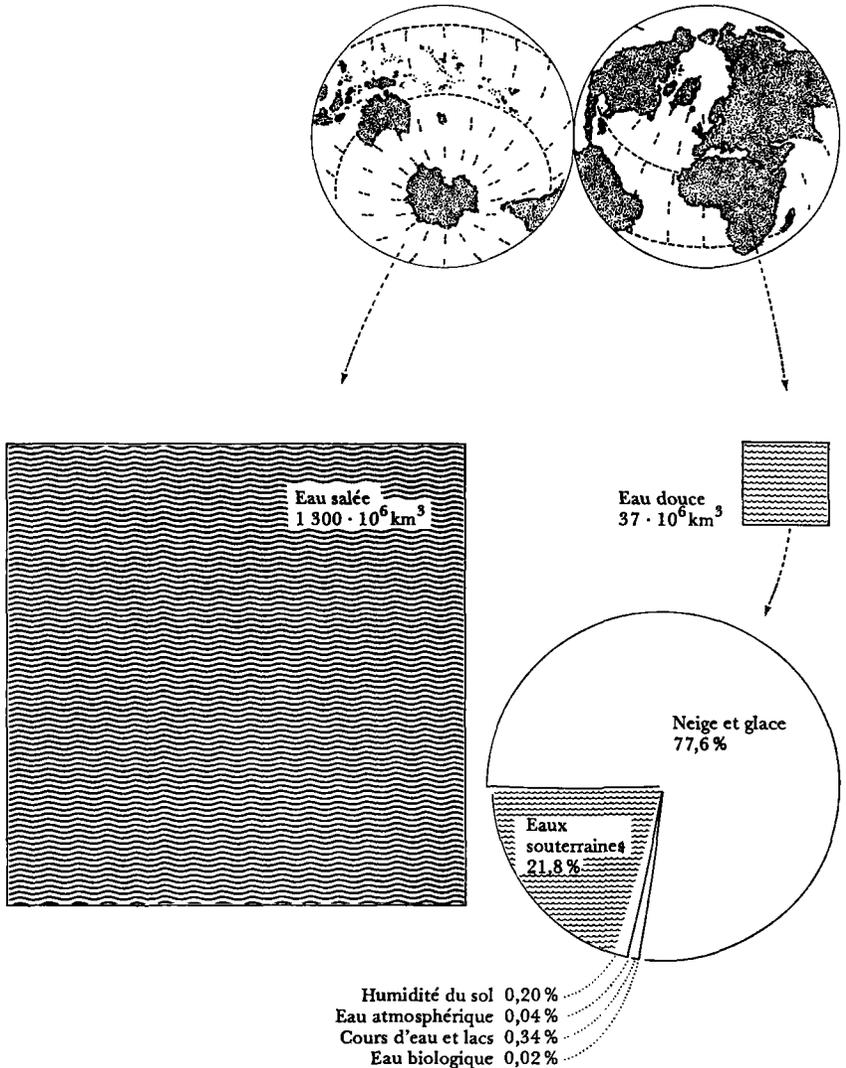
*Directeur général du Centre de recherche pour le développement des ressources en eau (VITUKI) à Budapest, le professeur György Kovács est également président du Conseil intergouvernemental du Programme hydrologique international de l'Unesco (PHI). Ingénieur de génie civil de formation, possédant une très grande expérience des travaux de conception-construction, il a dirigé un département de l'Administration nationale hongroise des eaux. En 1979, il a été élu membre correspondant de l'Académie hongroise des sciences. Son adresse est la suivante : VITUKI, P.O. Box 27, H-1453 Budapest (Hongrie).*

Dans tous les pays, à mesure que l'économie se développe, les communautés, l'industrie et l'agriculture exigent de plus en plus d'eau. Parallèlement, la quantité d'effluents rejetés par ces utilisateurs pollue l'environnement, entravant ainsi le recyclage et l'utilisation multiple des ressources en eau.

Dans de nombreuses régions, les eaux souterraines jouent un rôle prédominant pour faire face à une demande d'eau sans cesse croissante. L'utilisation rationnelle des ressources en eau implique donc nécessairement une gestion qualitative et quantitative complète des bassins hydrogéologiques.

### Les eaux souterraines : l'un des éléments fondamentaux de la biosphère

La quantité d'eau stockée dans le sous-sol sous forme d'eau souterraine et d'humidité du sol représente plus de 20 % du total des ressources en eau douce de la terre (fig. 1). Toutefois, cette eau ne peut être utilisée directement



que de façon limitée, car l'exploitation des eaux situées à grande profondeur ou en terrain argileux est encore coûteuse. Par ailleurs, il n'est pas envisageable de consommer en grande quantité l'eau ainsi stockée parce qu'elle constitue l'un des éléments fondamentaux de la biosphère et que son épuisement aurait des conséquences graves : le bilan thermique, par exemple, serait perturbé par la diminution de l'évaporation ; la végétation serait détruite par suite de l'abaissement de la surface de la nappe phréatique dans de vastes zones où les eaux souterraines satisfont une part importante des besoins des plantes en eau.

A l'état naturel, les aquifères connaissent une situation d'équilibre : en d'autres termes, l'alimentation et le débit se neutralisent sur des périodes de plusieurs années. Les bassins fermés sont principalement alimentés par infiltration des précipitations (pluie, neige, etc.) et les aquifères drainés par évapotranspiration et par un réseau d'écoulement superficiel. L'exploitation des eaux souterraines provoque une diminution de la percolation entre aquifères et cours d'eau ainsi que de l'évaporation. L'infiltration n'est pratiquement pas modifiée par ces ponctions artificielles.

Le mouvement de descente de la surface de la nappe phréatique que provoque l'exploitation par pompage a également pour effet de libérer un volume additionnel d'eau en réduisant la quantité stockée pour deux raisons : premièrement, elle draine l'eau de porosité contenue entre la surface naturelle de la nappe phréatique et la surface de rabattement ; deuxièmement, la

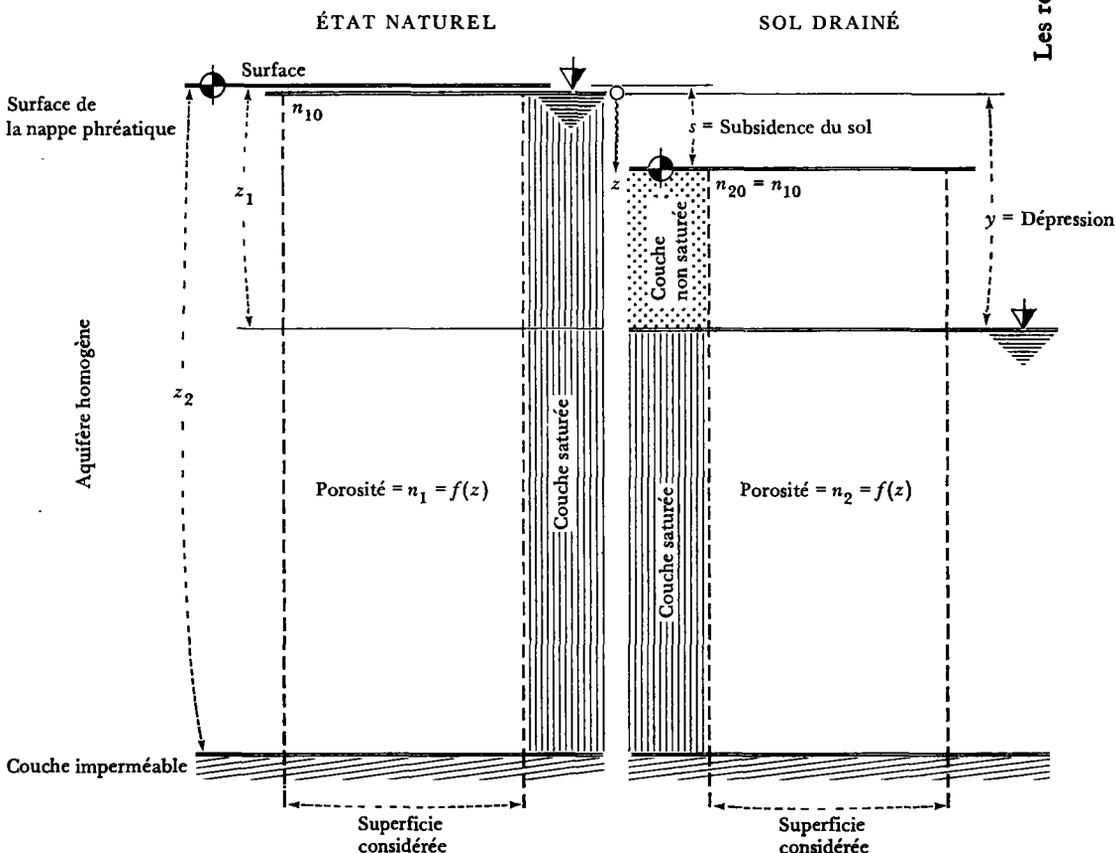


FIG. 2. Les effets du pompage des eaux souterraines.

baisse de pression entraîne un phénomène de consolidation qui a pour résultat de réduire à la fois la taille des pores et le volume d'eau conservé dans les couches profondes (fig. 2). Il est possible de remplir les pores vides en réapprovisionnant l'aquifère, mais, les couches n'étant pas complètement élastiques, l'eau libérée par consolidation ne peut être que partiellement remplacée. Il en résulte une subsidence due à la diminution du volume total des couches affectées.

### *Impact sur l'environnement*

En raison de la relation étroite qui existe entre les eaux de surface et les eaux souterraines, on ne peut considérer ces dernières comme une source indépendante d'approvisionnement en eau. En fait, l'exploitation des eaux souterraines implique une ponction considérable sur les eaux de surface par diminution du débit de base. En abaissant la surface de la nappe phréatique, on ne tire qu'une quantité d'eau relativement faible des aquifères exploités. De plus, il faut tenir compte, quand on envisage de recourir à cette source d'eau, de l'impact sur l'environnement représenté notamment par la diminution de l'évapotranspiration ou par la subsidence.

L'exploitation des eaux souterraines a bien évidemment de nombreux avantages. Tout d'abord, elles sont disponibles dans des zones étendues, en particulier les bassins sédimentaires, et non pas seulement le long des cours d'eau. Ensuite, les aquifères peuvent servir de réservoirs naturels. Enfin, il n'est généralement pas nécessaire de traiter les eaux souterraines pour qu'elles satisfassent aux exigences de la consommation humaine. La qualité supérieure de ces eaux étant l'un de leurs atouts majeurs, il est essentiel de prendre les mesures voulues pour les protéger contre la pollution.

### **Description des apports et des restitutions**

D'un point de vue dynamique, les eaux souterraines sont toujours en état d'équilibre, car la surface de la nappe phréatique se situe à une profondeur où les différences entre les quantités apportées et restituées verticalement (infiltration, évaporation et suintement) et entre les quantités apportées et restituées horizontalement se neutralisent. La surface de la nappe phréatique suit le relief général, encore qu'on puisse observer un certain nivellement. Les parties hautes du bassin constituent la zone d'alimentation, où le bilan vertical positif est contrebalancé par le bilan horizontal négatif, ce qui entraîne un écoulement à l'extérieur. Le système naturel acquiert de l'eau par infiltration des précipitations et en perd par évaporation et écoulement vers les cours d'eau.

### *Accumulation de sels dans le sol*

L'une des conséquences importantes du processus hydrologique décrit ci-dessus est la migration et l'accumulation de sels dans le sol. Lorsqu'elles atteignent la surface du sol, les précipitations (pluie et/ou neige) ne comportent pratiquement pas de substances chimiques en solution ; elles ont donc un grand pouvoir de dissolution des sels présents dans le sol lors du processus de percolation. Le sodium est lessivé en premier et s'enfonce lentement. Au terme d'une longue période, tous les ions positifs échangeables ont disparu de la partie supérieure du profil du sol. On peut trouver du calcium

à proximité de la surface de la nappe phréatique, alors que le sodium s'accumule dans les eaux souterraines. Dans les zones d'alimentation, on obtient ainsi des sols lessivés et parfois acides (du fait de la présence d'ions hydrogène  $[H^+]$ ). Les eaux souterraines acheminent jusqu'aux vallées les sels recueillis dans ces zones. Tant que les eaux souterraines se trouvent dans la zone d'alimentation, le débit et le volume total du sel s'accroissent progressivement.

La trajectoire parcourue par l'eau comporte parfois des sections où les quantités apportées et restituées verticalement se neutralisent. Dans ces sections, la teneur totale en sel du profil n'est pas modifiée. On peut généralement les identifier par la présence de sols noirs ou tchernozioms.

Dans les parties inférieures du bassin (zone de restitution), la teneur des eaux souterraines en sel est maximale. Cette zone est généralement drainée en partie par des cours d'eau et en partie par évaporation. Le débit de base des cours d'eau a la même teneur en sel que les eaux souterraines d'origine ; le système d'eaux souterraines et de sols rejette donc ainsi une certaine quantité de sels (voir fig. 3).

L'écoulement d'eau souterraine par ascension capillaire et l'évaporation qui s'ensuit n'entraînent, en revanche, aucune élimination de sels, car l'humidité qui s'évapore et transpire du sol n'en comporte virtuellement pas. Les sels s'accumulent dans les sols et le sodium, qui est le plus soluble des ions positifs, atteint la surface alors que le calcium se dépose à proximité de la nappe phréatique. Ce processus explique la formation de sols alcalins (salins).

### **Pollution des eaux souterraines par les déchets**

Par le passé, c'est à proximité des fosses où étaient rejetés les déchets et les boues et, en cas de fuites, le long des canaux d'évacuation des eaux usées que les eaux souterraines peu profondes étaient le plus fortement contaminées. Les composants organiques et inorganiques des polluants accumulés dans la zone contaminée sont lentement éliminés par des phénomènes géochimiques et biochimiques à mesure que les eaux souterraines se répandent en suivant la pente de la nappe phréatique. Il se produit aussi, quand les eaux souterraines se répandent, une certaine dilution de ces polluants. Les prélèvements chimiques et biologiques effectués à proximité de la zone de dépôt des déchets indiquent que les polluants organiques se décomposent selon des processus anaérobies. La zone où se produisent ces phénomènes de réduction est caractérisée par la présence d'un grand nombre de bactéries spécifiques. On trouve ensuite une zone de transition où une grande partie des composés ferreux dissous sont précipités et transformés en composés ferriques. Plus loin en aval, l'oxygène apporté par diffusion de l'air dans le sol ou dissous dans l'eau de percolation permet l'oxydation des substances inorganiques.

Dans la plupart des cas, cependant, les déchets et les effluents industriels polluent les eaux souterraines par apport de substances chimiques réfractaires aux processus microbiologiques ou à la filtration. Ces polluants ne subissent pas un processus de précipitation dans les pores ; ils ne sont pas non plus absorbés par le complexe de sols. Si la dilution ou la dispersion sont minimales, la concentration de ces substances reste pratiquement inchangée. La figure 4 illustre clairement ce processus en indiquant, en fonction des variations du pH, la distance parcourue par les polluants à proximité d'un bassin de traitement des effluents d'une papeterie. Cette figure

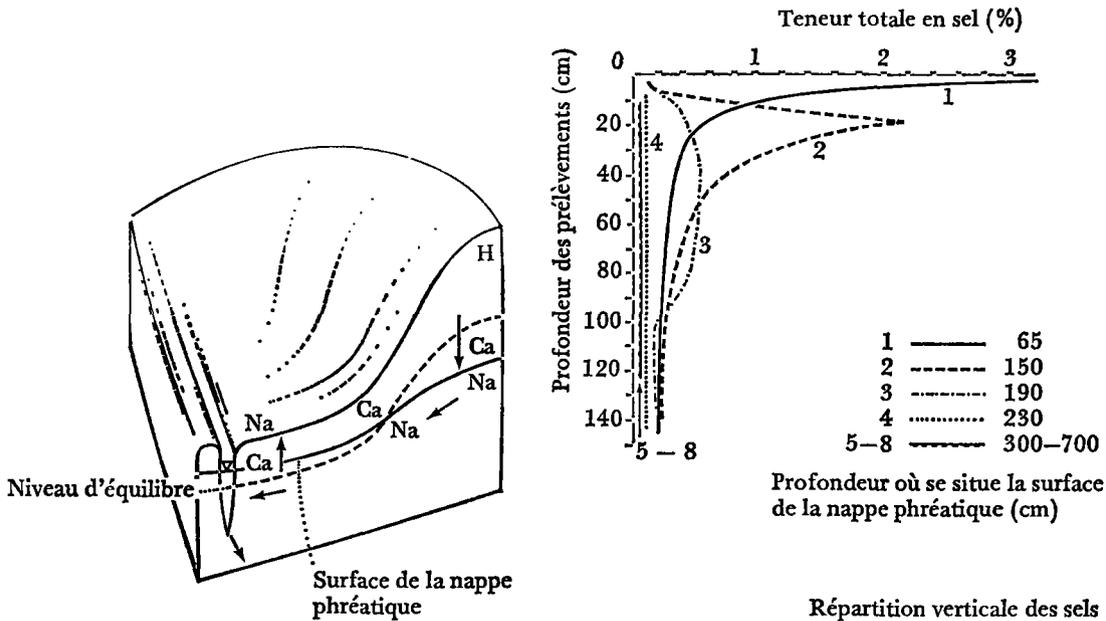


FIG. 3. Accumulation de la quantité de sels.

montre que l'eau polluée a mis cinq ans pour atteindre le cours d'eau situé à 500 mètres de distance environ, le pH passant en sept ans de 5 à près de 7, valeur proche de celle du pH du bassin de filtration lui-même, qui est de 8.

Les déchets radio-actifs, les substances toxiques et les métaux lourds sont des polluants particulièrement dangereux, car leur décomposition est lente. Ils peuvent donc s'accumuler dans le sol et contaminer de vastes zones éloignées du point de déversement en se propageant avec les eaux souterraines. Les aquifères protégés de la pollution de surface par des couches imperméables peuvent également être contaminés par des déchets enfouis à grande profondeur ou par des puits abandonnés servant à l'évacuation des eaux usées. C'est ainsi que l'eau des aquifères, qui représente une source d'approvisionnement si importante, est devenue impropre à la consommation humaine autour d'un grand nombre d'agglomérations.

#### *Lessivage des polluants présents dans les décharges*

La première mesure à adopter pour empêcher la propagation des polluants lessivés dans les décharges consiste à implanter ces dernières dans un environnement géologique approprié où des couches imperméables assurent une faible vitesse réelle d'écoulement en milieu poreux. Dans certains cas, il est nécessaire de renforcer le sol au moyen d'un revêtement étanche. Les roches dures — formations carbonatées notamment — exigent une meilleure protection, car les polluants se propagent rapidement le long des fractures et dans les grandes ouvertures qu'elles ménagent. En l'absence de tout revêtement, des intumescences de nappe se forment, le taux d'infiltration plus élevé à travers le sol de la décharge entraînant un écoulement radial. On peut y remédier, par exemple, par pompage continu d'eau souterraine au centre de la décharge, de façon à créer un cône de dépression et à diriger ainsi l'écoulement vers le puits. Bien entendu, il faut alors traiter l'eau ainsi évacuée.

Parmi les formes d'intervention nocives de l'homme, il ne faut pas négliger la pollution accidentelle. En cas de fuite ou de rupture accidentelle de canalisations, les liquides transportés — hydrocarbures, par exemple — peuvent pénétrer des aquifères et provoquer sur une vaste zone une dégradation difficilement remédiable de l'eau souterraine. Les fuites des citernes des postes d'essence, la négligence dont font parfois preuve les exploitants de stations-service, les accidents ferroviaires ou routiers peuvent également causer une pollution par des hydrocarbures. Ces derniers se répandent largement au-dessus de la surface de la nappe phréatique et dans la frange capillaire. La zone touchée par ces infiltrations est agrandie par la migration de leurs composants solubles dans l'eau, ce qui rend d'autant plus difficile l'élimination des hydrocarbures ayant pollué accidentellement les aquifères.

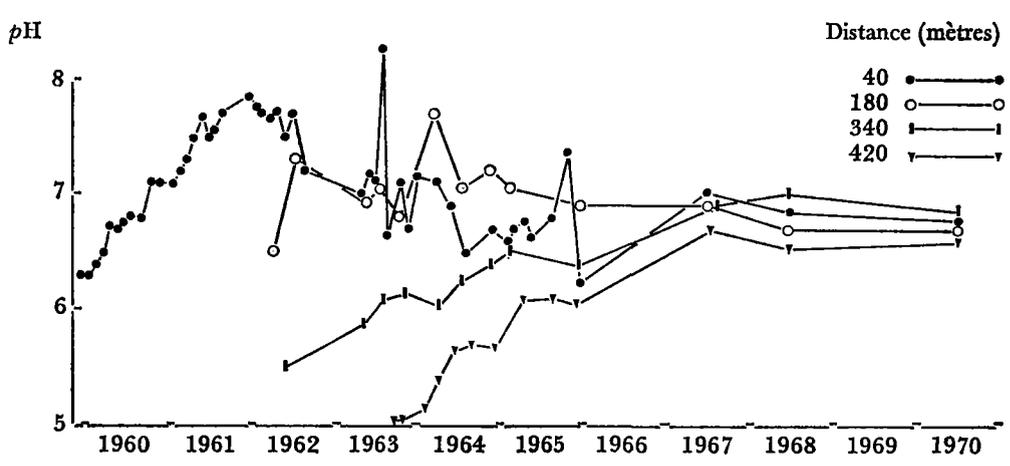
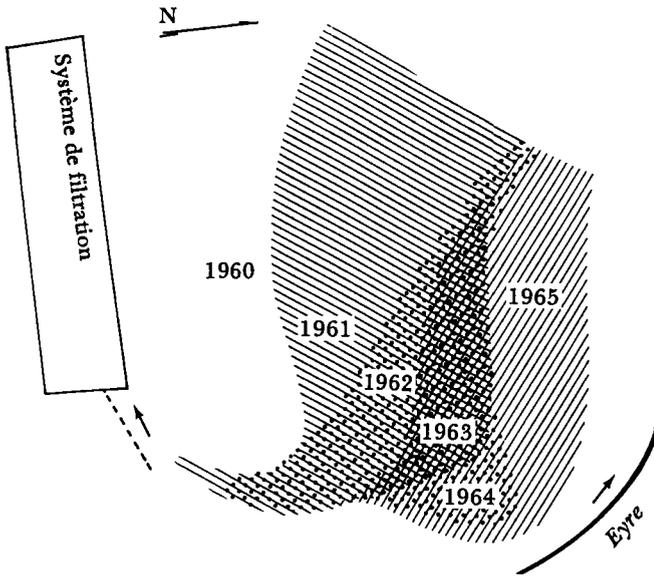


FIG. 4. Dispersion de la pollution.

## Avantages de l'utilisation des aquifères

S'il est généralement indispensable de protéger les eaux souterraines de la pollution, il arrive parfois que le déversement d'eaux usées dans des aquifères apporte, dans un bassin, la solution la mieux adaptée et la plus avantageuse. Il peut offrir, par exemple, un moyen peu coûteux d'évacuer les eaux usées d'une agglomération ou d'une usine éloignées de tout cours d'eau. Il importe que la gestion des bassins hydrogéologiques tienne compte du rôle des effluents qui viennent alimenter les couches aquifères. Il est ainsi possible de retarder le tarissement de réservoirs souterrains.

Il arrive qu'on puisse prévenir l'intrusion d'eau salée dans les aquifères d'un littoral en élevant la surface de la nappe phréatique par déversement d'eaux usées de façon à créer une barrière locale. Il faut alors que les effluents soient au préalable suffisamment traités, en particulier lorsqu'ils contiennent des polluants biologiques et des substances toxiques. La direction de l'écoulement en milieu poreux et sa vitesse doivent être étudiées, ainsi que l'effet de diffusion. Le temps nécessaire à la décomposition des polluants restant dans l'eau traitée doit être comparé à celui que met l'eau pour passer du point de déversement aux structures de restitution. Un plan d'exploitation détaillé est donc indispensable pour assurer, sur les plans quantitatif et qualitatif, une utilisation complète des ressources en eaux souterraines.

## Comparaison de la pollution ponctuelle et de la pollution diffuse

Les effluents provenant de sources ponctuelles sont généralement plus concentrés que les polluants uniformément disséminés sur de vastes zones. Toutefois, il est plus facile de collecter et de traiter ces effluents que de protéger les eaux souterraines d'une pollution très diffuse. Celle-ci peut être provoquée par des processus naturels ainsi que par une contamination d'origine humaine dont la source n'est pas ponctuelle.

### *Causes de la forte teneur en sels des eaux souterraines*

La forte teneur en sels des eaux souterraines résulte de l'accumulation de sels, telle que nous l'avons décrite précédemment, ou de la migration d'eaux connées d'origine marine. C'est ce que permet de constater la figure 5 qui présente une coupe géologique de la plaine du Nord en Argentine, le long de la rive droite du fleuve Paraná, entre Resistancia et Santa Fé. La base des couches les plus récentes se compose de sédiments marins imperméables datant du Tertiaire, qui contiennent des eaux connées\* dont la teneur en sel est élevée. Elle est le plus souvent recouverte d'une formation diluviale composée d'une séquence de minces couches d'argile, de limon, de loess\*\* et de sable. La capacité de transport de cette formation dépend pour beaucoup de la proportion de limon et d'argile par rapport à celle du sable. L'un des éléments qui contribuent le plus au drainage du profil est une couche de

---

\* Ce sont des eaux qui, à une époque très ancienne, ont reçu des dépôts sédimentaires et se sont ensuite trouvées emprisonnées dans les pores de la couche géologique.

\*\* Loess : dépôt de terre grasse.

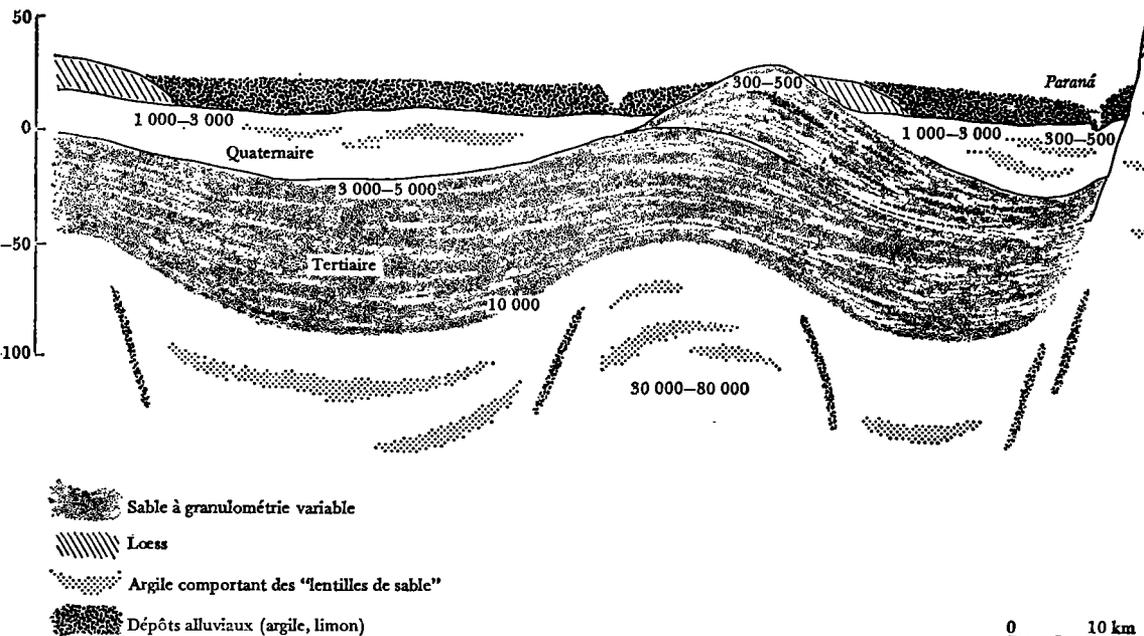


FIG. 5. Coupe schématique de la plaine du Nord en Argentine.

sable continue déposée à l'époque postglaciaire. En certains endroits cette couche affleure, alors qu'en d'autres elle est recouverte de formations holocènes, surtout des sédiments alluviaux imperméables qui se sont déposés dans les lacs et les marais peu profonds que l'eau douce a créés en inondant la surface.

Lorsque la surface perméable garantit une forte infiltration des précipitations et que les eaux de surface sont directement reliées à l'eau stockée dans les couches arénacées, la quantité totale de sels dissous est inférieure à  $500 \text{ mg/l}^{-1}$ . Cette quantité est de  $3\,000\text{--}5\,000 \text{ mg/l}^{-1}$  dans la couche alluviale imperméable et en dessous, car la concentration augmente progressivement par suite de la faible infiltration et de la forte évaporation. L'eau connée a préservé la teneur élevée en eau de mer qui a été accrue par l'évaporation et atteint aujourd'hui environ  $10\,000 \text{ mg/l}^{-1}$ . On a même relevé une concentration de  $80\,000 \text{ mg/l}^{-1}$  dans l'argile tertiaire d'origine marine. L'intrusion d'eau connée est décelable dans la partie inférieure de la couche arénacée et l'eau salée peut être transportée encore plus loin par le jeu des processus hydrologiques.

La précipitation de matières riches en fer dans les pores des aquifères est un autre type de pollution naturelle qu'on observe fréquemment. Le fer provient généralement de la décomposition de roches volcaniques dans des conditions climatiques bien définies. Les couches polluées par ces matières contiennent une eau à très forte teneur en ions  $\text{Fe}^{++}$  ou  $\text{Fe}^{+++}$ .

### *Lutte contre la pollution naturelle*

Le moyen le plus efficace de lutter contre ces divers types de pollution naturelle consiste à alimenter artificiellement les couches aquifères. Lorsque l'on pompe de l'eau salée impropre à la consommation humaine ou aux utiliza-

tions agricoles et industrielles et qu'on la remplace par de l'eau douce de surface, on améliore considérablement les paramètres qualitatifs. L'aquifère sert tout à la fois de filtre et de réservoir d'eau de surface. La littérature spécialisée fait état d'excellents résultats obtenus grâce à ce type de gestion complexe de l'eau. Ainsi, une station qui distribuait de l'eau contenant au total plus de  $3\ 000\ \text{mg/l}^{-1}$  de solides dissous et présentant une forte teneur en fer a pu fournir une eau propre à la consommation directe quelques mois après l'introduction d'une technique d'alimentation artificielle avec l'eau d'une rivière voisine.

### Pollution des eaux souterraines par les substances chimiques utilisées dans l'agriculture

L'utilisation massive de substances chimiques dans l'agriculture moderne entraîne la pollution à grande échelle des eaux souterraines. Les phosphates, en particulier, ne sont généralement pas décelés dans les eaux souterraines, car ils sont en grande partie absorbés par la zone humidifiée du sol ou décomposés pendant le temps qui leur est nécessaire pour parvenir jusqu'à la nappe phréatique. Par contre, l'utilisation de quantités excessives de fertilisants accroît de plus en plus la teneur en nitrates. L'accumulation d'azote dans les eaux souterraines s'explique peut-être aussi par l'épandage de fumier et la réalimentation des aquifères par des eaux usées. C'est ainsi que l'eau est devenue impropre à la consommation humaine au voisinage d'un grand nombre d'agglomérations rurales.

L'observation expérimentale indique que ces polluants d'origine agricole se propagent lentement à travers la zone non saturée. La figure 6 présente

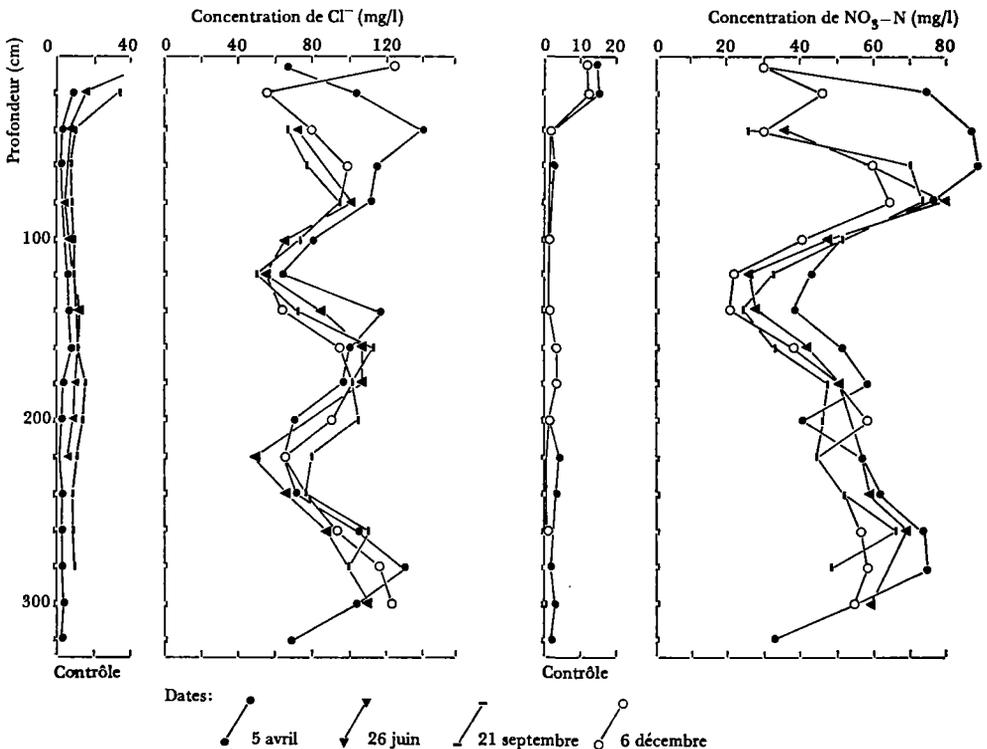


FIG. 6. Modification dans la répartition des polluants.

sous forme schématique les résultats de mesures effectuées dans la couche de craie non saturée. On a mesuré la concentration de chlorure et de nitrate pour déterminer la pollution provoquée par l'épandage de fertilisants inorganiques. Les graphiques indiquent la modification de la répartition verticale des composants sur une période de huit mois, la vitesse de propagation étant calculée soit à partir de la diminution de valeurs caractéristiques au cours de la période d'observation, soit d'après la différence de profondeur des concentrations maximales clairement observables, qui permettent de connaître le rythme annuel d'infiltration. On a pu ainsi établir que la vitesse moyenne de propagation était de  $0,9 \text{ m/an}^{-1}$ .

La lente propagation des polluants vers le bas dans la zone non saturée est particulièrement inquiétante. Une grande quantité de polluants s'accumule ainsi au-dessus du niveau profond auquel se situe la surface de la nappe phréatique avant qu'ils puissent être décelés dans l'eau souterraine. Il est donc nécessaire de mettre au point un système approprié d'observation régulière de la qualité de l'humidité du sol. En effet, si la pollution n'est décelée qu'après avoir atteint la nappe phréatique, il est probable que l'eau souterraine est déjà contaminée depuis longtemps.

L'accumulation des pesticides et d'herbicides dégrade de façon analogue la qualité du premier horizon hydrologique. Les substances chimiques très résistantes sont particulièrement dangereuses. La pollution étant diffuse, le contrôle de qualité est limité à l'utilisation de substances chimiques dont le temps de décomposition est relativement bref, à la prévention de surdosage et à la surveillance continue de la qualité de l'eau souterraine et de l'humidité du sol. L'observation de l'accumulation de certains polluants permet de contribuer à recréer les conditions voulues par une réalimentation artificielle.

### *Impact de l'irrigation sur les eaux souterraines*

L'irrigation affecte l'équilibre des eaux souterraines de deux façons fondamentalement différentes. En premier lieu, le suintement à partir des systèmes de distribution réalimente les réservoirs d'eau souterraine sans modifier les processus hydrologiques dans la zone humidifiée. Un écoulement horizontal se crée et le niveau de la nappe phréatique s'élève. En second lieu, l'irrigation augmente l'humidité du sol à proximité de la surface et modifie les processus hydrologiques dans cette zone. (La percolation au-dessous de la zone racinaire augmente la croissance naturelle ; parallèlement, au cours des périodes sèches, l'abaissement de la tension vers le haut du profil, c'est-à-dire à proximité de la surface, réduit la décroissance naturelle.)

Lorsque la surface de la nappe phréatique atteint la couche supérieure du sol, les pores se trouvent privés d'air par saturation et les végétaux se dégradent. Même les engorgements temporaires peuvent être nocifs en détruisant la structure en agrégats des sols à grain fin — condition nécessaire d'une aération suffisante du profil — et en faisant obstacle à l'emploi de machines lourdes pour l'agriculture.

Plusieurs autres effets de l'irrigation méritent d'être mentionnés. Elle accélère l'accumulation des substances chimiques dans les eaux souterraines en provoquant un plus fort suintement vertical à travers la zone humidifiée. En outre, elle accroît la concentration de sels dissous dans les réservoirs et les systèmes de distribution. Une très forte proportion de ces sels reste dans le sol parce que c'est seulement en quantités négligeables qu'ils s'incorporent aux matières sèches des végétaux et que l'eau transpirée ne contient aucune

matière en solution. L'accumulation de sels dans le sol est particulièrement dangereuse si l'ion positif dominant dans l'eau est un ion de sodium. Une forte teneur en sodium détruit la structure en agrégats des grains fins et réduit ainsi à la fois l'humidité du sol et la quantité d'air disponible dans le profil pour les végétaux.

*Pertes agricoles provoquées par les sols salins*

Les formes habituelles d'irrigation, en surface ou par aspersion, élèvent la surface de la nappe phréatique sous les champs irrigués et aux alentours. Les sels présents dans l'eau d'irrigation sont lessivés et s'accumulent dans les eaux souterraines, qui les entraînent au-dessous des zones environnantes. Pour équilibrer cette réalimentation, il faut augmenter le débit des eaux

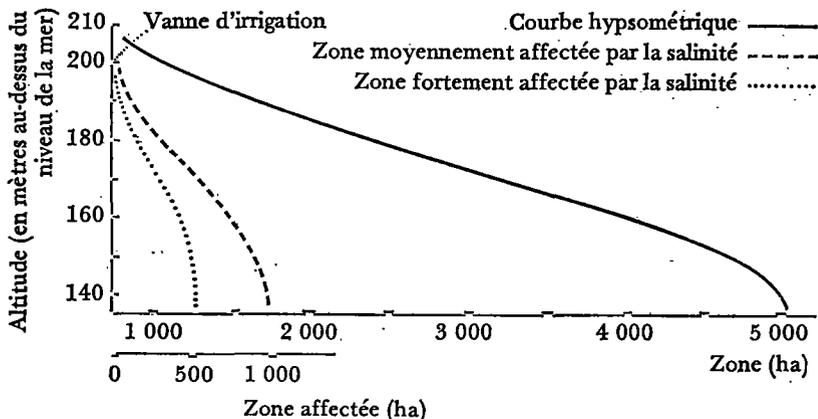
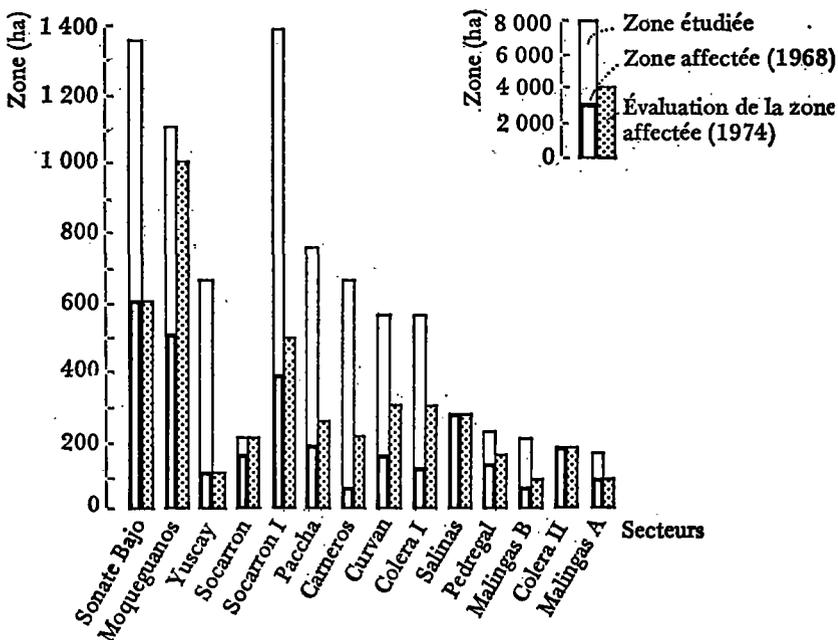


FIG. 7. Les effets de l'irrigation.

souterraines par croissance naturelle, ce qui accélère l'accumulation de sels. Si aucune mesure n'est prise pour éviter les effets nocifs de l'irrigation, il faut sacrifier les zones de drainage ainsi créées. En Australie, un quart du bassin hydrographique est devenu impropre à l'agriculture par suite du processus d'alcalinisation résultant de l'irrigation des trois autres quarts. On a pu observer le même phénomène dans le cadre d'un projet entrepris à San Lorenzo au Pérou, où l'irrigation extensive a entraîné un fort accroissement des sols chargés en sel. Le premier graphique de la figure 7 indique que les sols alcalins s'étendent plus rapidement dans les parties de bassin hydrographique où l'irrigation est extensive. Le deuxième graphique montre qu'il y a une relation étroite entre l'élévation du terrain au-dessus du niveau de la mer et l'extension des zones affectées par la salinité, ce qui confirme qu'il existe bien, comme nous l'avons déjà expliqué, un rapport entre la migration des sels et les processus hydrologiques.

Un bon drainage des terres irriguées assure une protection suffisante contre l'accumulation de sels et l'engorgement. Il faut que l'écoulement soit suffisant pour assurer une maîtrise complète du bilan de salinité ou, en d'autres termes, que la quantité de sels drainés soit égale ou supérieure à celle qui est amenée par l'eau d'irrigation. Des efforts sont faits pour réduire le coût du drainage et la quantité d'eau nécessaire à l'irrigation. On ne pourra y parvenir que si les sels sont drainés au-dessous de la zone radiculaire des végétaux. Toutefois, il reste encore à prouver qu'un drainage aussi limité offre une protection suffisante à long terme et que les sels accumulés en profondeur ne remonteront pas à proximité de la surface. Il ne nous paraît donc pas indiqué de ne tenir compte que de considérations économiques et nous proposons, au contraire, d'assurer en permanence une maîtrise complète de la salinité.

## Conclusions

Les connaissances théoriques qui ont été acquises et les expériences concrètes qui ont été faites amènent à formuler certaines conclusions sur la gestion moderne et rationnelle des ressources renouvelables en eaux souterraines. Dans les bassins fluviaux, grands bassins sédimentaires notamment, les ressources en eaux souterraines offrent une solution de rechange pour satisfaire la demande d'eau.

On ne peut dissocier les eaux de surface des eaux souterraines ; il faut les considérer comme une entité : une seule et même ressource. Il convient donc, dans chaque cas, d'étudier l'interaction entre ces deux types d'eau.

L'utilisation mixte des eaux de surface, des eaux souterraines et des effluents constitue, souvent, du point de vue technique et économique, la meilleure solution. La gestion des systèmes régionaux d'exploitation des eaux doit reposer sur la combinaison optimale de ces ressources.

La qualité des eaux souterraines — surtout du point de vue biologique — les rend généralement propres à la consommation humaine directe, alors que les eaux de surface exigent la plupart du temps un traitement particulier. Il est donc raisonnable que les eaux souterraines soient utilisées en priorité pour répondre aux besoins des populations urbaines et rurales.

La capacité naturelle de stockage et la réalimentation artificielle des aquifères peuvent offrir un moyen, qu'il ne faut pas négliger, de corriger les fluctuations des ressources en eau disponibles. Cela confirme encore l'importance d'une utilisation combinée des eaux de surface et des eaux souterraines.

La réalimentation artificielle constitue également une façon efficace d'améliorer la qualité des eaux souterraines, surtout si les éléments qui font obstacle à l'utilisation de ces eaux dans de larges zones résultent de processus naturels ou d'une pollution non ponctuelle (forte teneur en sels, concentration de fer, etc.).

La lente propagation des polluants à travers la zone non saturée est particulièrement dangereuse. De grandes quantités de substances chimiques nocives peuvent s'être accumulées au-dessus de la nappe phréatique avant que la pollution ne soit décelable dans les eaux souterraines. Dans certains cas particuliers, un contrôle régulier de la qualité de l'humidité du sol peut être indispensable.

Les effluents provenant de sources ponctuelles doivent être traités avant de servir à réalimenter les réservoirs souterrains. L'évacuation des eaux usées est aussi un atout pour la gestion quantitative des ressources en eau. Un plan complet de mise en valeur des ressources en eau d'un bassin hydrogéologique doit tenir compte à la fois des aspects qualitatifs et quantitatifs.

L'irrigation porte atteinte à l'équilibre des eaux souterraines au-dessus des champs irrigués et même autour d'eux. Les modifications ainsi provoquées peuvent entraîner l'engorgement de vastes superficies. Pour assurer une protection complète, la seule solution consiste à mettre en place un système de drainage efficace, capable d'évacuer l'eau excédentaire du « territoire » des eaux souterraines.

L'irrigation accélère l'accumulation de sels dans les zones de drainage. Ce processus d'alcalinisation secondaire peut aussi être évité par un système de drainage suffisant, dans les zones arides et semi-arides notamment. Le drainage ne peut être efficace que si le bilan de salinité de la zone est complètement maîtrisé. ■

*La production de denrées alimentaires et de fibres consomme plus d'eau (environ 80 %) que toute autre activité humaine. L'explosion démographique pousse au renforcement des capacités de production de denrées alimentaires, augmentant les besoins en eau, notamment pour l'irrigation, qui est malheureusement l'utilisatrice d'eau la plus vorace. L'irrigation promet de satisfaire ces besoins croissants, mais la promesse ne pourra être tenue que si les ressources en eau bénéficient d'une gestion efficace.*

---

## **L'irrigation bat les records de consommation d'eau**

K. K. Framji

## Introduction

Depuis les temps les plus reculés, l'eau est considérée comme indispensable à la vie. Les premières civilisations se sont épanouies sur des terres que fertilisaient de grands fleuves, comme, par exemple, le Tigre et l'Euphrate, le Nil, l'Indus ou le fleuve Jaune. Environ 98 % des aliments consommés par l'homme proviennent de cultures, principalement de céréales, qui occupent 10 % environ des terres émergées. Consommant plus d'eau que tout autre usage, la production de denrées alimentaires et de fibres absorbe environ 80 % de toute l'eau utilisée par l'homme. Les terres irriguées produisent généralement deux fois plus que celles qui sont arrosées seulement par la pluie. Ce qui est véritablement tragique dans la répartition de la population, par rapport à la répartition des terres, c'est que près des deux tiers de la population mondiale vivent dans des pays qui possèdent moins de la moitié des terres cultivables, mais environ les trois quarts des terres irriguées.

## L'accroissement exponentiel de la population

La population mondiale, qui était de 1 milliard d'habitants en 1800, est passée à 2 milliards en 1930 : il lui avait donc fallu 130 ans pour doubler. Depuis lors, l'accroissement de la population est exponentiel. Au cours des 30 années suivantes, de 1930 à 1960, la population avait encore augmenté de 1 milliard, puis, en moitié moins de temps, c'est-à-dire 15 ans, elle a dépassé la barre des 4 milliards. En 1980, elle était de 4,4 milliards d'habitants, et les chiffres projetés sont de 5 milliards pour 1987, 6 milliards pour 1998 et 6,2 milliards pour l'an 2000 (voir le tableau 1).

Encore que, d'après les projections, le taux d'accroissement, qui était de 2 % en 1960, ne doit plus être que de 1,6 % en l'an 2000, l'aspect le plus inquiétant de cette augmentation de la population mondiale est que l'écart entre le taux d'accroissement démographique des pays en développement et celui des pays développés ne cesse de s'élargir, comme le montre une comparaison entre la colonne 7 et la colonne 6 du tableau 1. Dans certains pays en développement, le taux d'accroissement devrait même dépasser

TABLEAU 1. Population mondiale

Année	Population (millions d'habitants)			Pourcentage annuel de croissance			Colonne 7/ Colonne 6
	Monde	Pays développés	Pays en développement	Monde	Pays développés	Pays en développement	
1	2	3	4	5	6	7	8
1950	2 153	832	1 681	0,8	0,8	0,9	1,1
1960	3 027	945	2 082	2,0	1,3	2,3	1,8
1975	4 033	1 093	2 940	1,8	0,8	2,2	2,8
1980	4 415	1 131	3 284	1,8	0,7	2,2	3,1
1990	5 275	1 206	4 069	1,8	0,6	2,1	3,5
2000	6 198	1 272	4 926	1,6	0,5	1,8	3,6

Source. Nations Unies. Département des affaires économiques et sociales internationales. *Population studies*, n° 72, 1978, p. 9.

3 % en l'an 2000, ce qui est proprement catastrophique\*. Pendant la deuxième moitié du xx<sup>e</sup> siècle, l'écart entre la population des pays en développement et celle des pays développés augmentera de 400 % (de 800 millions à 3 600 millions environ). Le plus préoccupant dans cette perspective est que la multiplication par 8, entre 1950 et l'an 2000, du nombre des habitants des pays en développement s'accompagnera d'une multiplication correspondante des besoins alimentaires de ces pays. Il est donc naturel que le système des Nations Unies, œuvrant à sa III<sup>e</sup> Décennie pour le développement (1981-1990), considère que la tâche la plus urgente est de nourrir les masses de plus en plus nombreuses de ceux qui ont faim, dans les pays en développement.

### L'insuffisance des rations alimentaires

Les aliments sont la source de l'énergie qui entretient la vie. L'eau entre à raison de 63 % environ dans la composition de la nourriture consommée par l'homme. Physiologiquement, un adulte a besoin d'une ration alimentaire lui apportant 2 700 calories\*\* par jour. A l'échelon mondial, le total des calories alimentaires nécessaires, qui était de 12 000 milliards en 1980, s'élèverait à 17 000 milliards en l'an 2000. Pour les pays en développement, le déficit de calories alimentaires, qui était d'environ 1 529 milliards en 1976, passerait à 1 626 milliards en l'an 2000. Mettre en place, en moins de 20 ans, une capacité de production de cet ordre de grandeur représente pour l'humanité une tâche extraordinairement difficile.

Selon l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), il faudra que, en l'an 2000, la production agricole dépasse de quelque 50 à 60 % celle de 1980. Toujours selon des estimations de la FAO, qui sont considérées comme prudentes, il y avait, en 1974-1976, 436 millions de personnes sous-alimentées dans 90 pays en développement ; on pense que leur nombre passera à 588 millions en l'an 2000. Le tableau 2 présente ces statistiques par continent.

A l'heure actuelle, la ration alimentaire journalière par personne, dans les pays développés, est de 3 315 calories, soit 23 % de plus que les 2 700 calories considérées comme nécessaires ; dans les pays en développement, en revanche, la ration alimentaire s'établit à 2 180 calories par personne, soit 19 % de moins que la ration normale. D'ici à l'an 2000, toutefois, la consommation alimentaire par personne dans les pays développés passera à 3 475 calories, soit 29 % de plus que la ration normale, tandis que la consommation par personne dans les pays en développement n'atteindra que 2 370 calories, soit 12 % de moins que la ration normale. Par ailleurs, la différence qui existe actuellement entre les rations par personne, selon qu'il s'agit des pays en développement à faible revenu ou des autres pays en développement, devrait également s'accroître.

\* K. K. Framji *et al.*, « Introduction », *Irrigation and drainage in the world*, p. XIII, City and Publisher.

\*\* Selon les physiiciens, la calorie est la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température d'un gramme d'eau liquide de 1 °C. Dans la pratique, il s'agit d'une quantité de chaleur minime. Dans les régimes alimentaires, on parle aussi d'une « calorie », mais cette « calorie » est en réalité la kilocalorie (Kcal) qui est une quantité 1 000 fois plus élevée que la calorie définie par les physiiciens.

TABLEAU 2. Consommation moyenne de calories par personne et nombre de personnes sous-alimentées

	Consommation (en calories)		Millions de personnes sous-alimentées	
	1974-1976	2000	1974-1976	2000
34 pays développés	3 316	3 476	—	—
90 pays en développement	2 180	2 270	436	588
Afrique	2 180	2 305	72	127
Extrême-Orient	2 026	2 200	304	292
Amérique latine	2 525	2 700	41	46
Proche-Orient	2 560	2 846	19	23
Pays en développement à faible revenu	2 010	2 175	349	477

Source. FAO. *Agriculture : toward 2000*, p. xv, 3, 20 et tableau 7 (Statistical annex). Rome, 1981.

### *Les besoins en eau pour la production alimentaire*

L'augmentation des besoins en eau pour la production alimentaire dans le monde a été mise en évidence par l'importance des mauvaises récoltes, qu'un petit déficit affectant la partie continentale du cycle de l'eau a suffi à causer. L'Organisation des Nations Unies a lancé plusieurs « grandes conférences » pour alerter l'opinion mondiale et attirer son attention sur l'ampleur des problèmes sociaux, économiques et humains et sur les efforts massifs qui s'imposent si on veut les résoudre. L'eau occupait une place prépondérante dans toutes ces conférences mondiales, qui étaient consacrées respectivement à l'environnement (1972), à la population (1974), à l'alimentation (1974), aux établissements humains (1976), à l'eau (1977), à la désertification (1977), à la science et à la technique au service du développement (1979) et, enfin, aux sources d'énergie nouvelles et renouvelables (1981). La Commission internationale des irrigations et du drainage, qui, sur les instances de l'auteur du présent article, a tenu une session spéciale sur les perspectives de l'agriculture irriguée en l'an 2000 (Téhéran, 16-17 mai 1977), a chargé un groupe de travail sur l'irrigation en l'an 2000 de poursuivre et d'approfondir les études relatives à ce thème d'importance vitale.

### **L'irrigation consommatrice d'eau**

Même dans l'un des pays les plus développés, les États-Unis d'Amérique, l'irrigation (à des fins agricoles) est, de toutes les utilisations de l'eau, celle qui consomme le plus (voir le tableau 3).

Dans les pays en développement, où les utilisations industrielles et autres sont relativement peu importantes, l'agriculture et l'irrigation, en particulier, consomment relativement encore plus d'eau, et ce d'autant plus que les méthodes d'irrigation sont moins efficaces. Cependant, toutes les utilisations de l'eau ne réduisent pas les volumes disponibles d'une quantité égale à la quantité prélevée. Il arrive que de l'eau soit prélevée, utilisée, puis restituée à sa source pour être réutilisée. Dans les industries manufacturières, 98 %

TABLEAU 3. Utilisations de l'eau aux États-Unis d'Amérique (en pourcentage)

	Prélèvements		Consommation	
	1975	2000	1975	2000
	%	%	%	%
Terres du domaine public	0,5	0,9	1,3	1,2
Utilisations domestiques et commerciales	8,5	12,1	6,9	7,0
Industries manufacturières et extraction minière	17,2	10,1	7,7	13,6
Production d'électricité à partir de vapeur	26,3	25,9	1,3	7,8
Agriculture	47,5	51,0	82,8	70,4

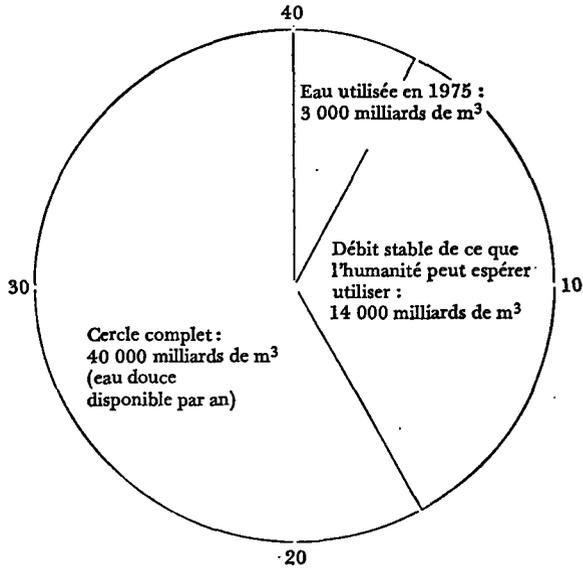
*Source. The nation's water resources 1975-2000. Vol. I : Summary, p. 30-33. Second National Water Assessment by the U.S. Water Council.*

environ de l'eau prélevée revient à son point de départ pour réutilisation, alors que la proportion n'est que de 40 % environ dans le cas de l'agriculture irriguée, les 60 % restants, rangés sous la rubrique « utilisation consommatrice », étant perdus par évapotranspiration. Par ailleurs, plus de 50 % de l'approvisionnement mondial en denrées alimentaires proviennent de 16 % seulement de la superficie cultivée dans le monde. L'irrigation, bien qu'elle soit l'utilisation la plus fortement consommatrice d'eau, est et restera sans doute toujours la principale utilisation délibérée faite par l'homme. Le volume des denrées alimentaires provenant des cultures pluviales est stationnaire ; la culture marine et l'aquaculture, dont les produits sont riches en protéines, n'interviennent que pour une part insignifiante dans la production alimentaire mondiale ; enfin, la superficie cultivable par personne diminuera, tombant de 0,4 hectare en 1975 à 0,25 hectare en l'an 2000. La consommation d'eau d'irrigation pour une superficie donnée varie considérablement : comprise entre 4 000 et 6 000 m<sup>3</sup>/ha dans les pays européens, elle est de 5 500 à 12 500 m<sup>3</sup>/ha dans les pays d'Asie, de 12 500 m<sup>3</sup>/ha en URSS et de 8 000 à 15 000 m<sup>3</sup>/ha dans les pays d'Afrique.

Pour augmenter la production alimentaire, on peut mettre en culture des superficies nouvelles (expansion horizontale) et/ou augmenter les rendements unitaires (expansion verticale). Dans l'ensemble, on peut espérer que l'irrigation permettra de satisfaire les besoins alimentaires de l'an 2000, à la condition, toutefois, que les ressources en eau soient gérées efficacement.

### La répartition inégale de l'eau

Le volume annuel d'eau douce disponible, qui représente la partie renouvelable de l'écoulement mondial, est de l'ordre de 40 000 milliards de mètre cube. L'écoulement stable (c'est-à-dire, l'écoulement de crue non compris qui est ce que l'humanité peut espérer utiliser), n'est que d'environ 14 000 milliards de mètres cubes. Le prélèvement total d'eau en 1975 a été de quelque 3 000 milliards de mètres cubes, dont 80 % pour la seule irrigation. On pense que la superficie irriguée mondiale, qui est actuellement de 240 millions d'hectares, passera à 400 millions d'hectares d'ici à l'an 2000. Les prélèvements d'eau correspondants seront de 5 000 milliards de mètres cubes, à condition qu'on ait partout d'ici là suivi des méthodes rationnelles de gestion de l'eau, consenti des investissements considérables et adopté des



technologies de pointe. La répartition géographique de l'eau, des terres cultivables et de la population est très irrégulière et, dans certaines régions, l'insuffisance des ressources en eau est devenue l'un des principaux obstacles à la poursuite du développement socio-économique. Dans 40 % des pays du monde, la quantité d'eau actuellement disponible par habitant est faible (1 000 à 5 000 mètres cubes par an), et, dans une dizaine de pays, elle est même très faible, puisqu'elle est inférieure à 1 000 mètres cubes. Cette situation se dégradera encore d'ici à l'an 2000, date à laquelle 60 % des pays seront dans la catégorie « faible » et 20 pays dans la catégorie « très faible ». La pollution provoquée par le rejet sans contrôle d'effluents non traités, provenant tant de l'agriculture que de l'industrie, contribue aussi à réduire rapidement les quantités d'eau de bonne qualité disponibles. Ainsi, dans de vastes régions du monde, le manque d'eau sera un facteur entravant le développement économique et social. Beaucoup plus inquiétant est le fait que les deux tiers de la population mondiale vivent dans des pays où la ration alimentaire est insuffisante et qui possèdent moins de la moitié des terres cultivables, mais environ les trois quarts des terres irriguées.

### Pour une utilisation efficace de l'eau

Bien que les moyens d'améliorer l'utilisation de l'eau diffèrent d'une région à une autre, le mieux est d'encourager une utilisation plus efficace de l'eau actuellement disponible ou réservée à la production agricole. Même dans un pays développé comme les États-Unis d'Amérique, des améliorations restent possibles. En effet, de nombreux réseaux d'irrigation (construits il y a une quarantaine d'années ou davantage) sont maintenant dépassés et ne permettent pas les interventions qui donneraient à l'irrigation le maximum d'efficacité. De ce fait, des quantités d'eau considérables sont gaspillées chaque année par l'irrigation. Dans les pays en développement, comme l'Inde, on accorde une priorité élevée à la modernisation des vieux systèmes, qui permet d'éviter le gaspillage.

Il faut, par ailleurs, s'attacher à augmenter la production alimentaire mondiale en améliorant la production dans les zones de cultures pluviales et

en défrichant de nouvelles terres qui n'exigeront pas un gros apport d'eau supplémentaire. Il faut aussi promouvoir la conservation de l'eau, les mesures de lutte contre l'érosion des sols, le drainage et le contrôle des crues.

C'est cependant surtout à une amélioration de la gestion des terres irriguées que, dans les décennies à venir, les programmes d'utilisation de l'eau devront viser. La fourniture d'eau d'irrigation à la prise privée d'un champ (et beaucoup moins encore à la prise d'eau de distribution) à partir d'un système tertiaire de distribution n'est pas, en soi, le garant d'une bonne gestion de l'eau. La surface du champ doit être préparée et nivelée pour permettre un contrôle de l'environnement de l'eau du sol ; les facteurs de production nécessaires (semences sélectionnées, engrais, etc.) doivent être livrés au cultivateur en temps utile. Dans les pays en développement, en particulier, il faut organiser la distribution dans les exploitations agricoles et tirer parti à la fois des eaux souterraines et des eaux de surface, pour éviter inefficacité et gaspillage dans l'utilisation de l'eau.

### *Le drainage élimine l'eau en excès*

Le drainage, qui permet de débarrasser les terres agricoles de l'eau en excès, joue un rôle important dans la gestion des ressources en eau. Si, dans toutes les régions en développement, il est prévu que les dispositifs de drainage doivent être mis en place dès l'origine, en même temps que les dispositifs d'irrigation, il arrive souvent que cela ne soit pas fait dans la pratique. Dans les régions irriguées, il est particulièrement important de contrôler la montée de la nappe phréatique et de se doter des moyens de lutter contre l'accumulation des sels dont les eaux d'irrigation imprègnent la terre. Il est également important d'harmoniser les politiques de développement de l'irrigation avec les politiques et pratiques agricoles du pays considéré.

### **Les avantages d'une bonne gestion des ressources en eau**

Gérer efficacement les ressources en eau sert les intérêts socio-économiques de n'importe quel pays. Pour cela, c'est avant tout dans le secteur de l'irrigation qu'il faut appliquer les techniques de gestion voulues. Il faut aussi envisager un certain nombre d'autres mesures et, notamment : gestion intégrée de la qualité et de la quantité ; effets sur l'environnement ; intégration rationnelle de la gestion des eaux souterraines et des eaux de surface ; pratiques appropriées de gestion des champs d'inondation et de lutte contre la sécheresse ; insertion des décisions relatives au transport de l'eau dans la politique générale des transports du pays ; importance des besoins en eau pour la production d'énergie ; enfin, et surtout, accroissement des efforts pour la conservation des ressources en eau.

Dans le passé, il est arrivé bien souvent, dans des pays développés, que, pour n'avoir pas suffisamment prêté attention à la qualité de l'eau aux stades initiaux d'un projet, on ait dû par la suite prendre des mesures coûteuses pour faire revenir la qualité de l'eau à des niveaux acceptables. Mieux vaut prévenir que guérir et, si l'on veut s'éviter de futurs problèmes de pollution, on a tout intérêt, d'un point de vue socio-économique, à s'occuper de la planification et de la gestion de la qualité de l'eau au même titre que des autres aspects de la mise en valeur des ressources en eau.

*La qualité de l'environnement*

Jusqu'à présent, on ne s'est pas soucié autant qu'il aurait fallu, aux stades de la planification et de la prise de décisions, d'assurer la qualité de l'environnement et, notamment, de protéger les systèmes écologiques. En particulier, dans la zone tropicale — qui correspond, malheureusement, aux régions en développement — les pratiques actuelles sont généralement nuisibles à l'environnement. Les forêts disparaissent à un rythme à peine croyable, parce qu'on abat des arbres pour faire des cultures qui procureront des gains rapides, fût-ce pour un temps limité ; la faune et la flore s'appauvrissent d'une façon consternante ; les sols subissent une érosion anormale ; de grandes quantités de sédiments envahissent les cours d'eau et sont charriés par eux, et le niveau des fleuves s'élève, provoquant des inondations plus fréquentes et plus importantes, dont chacune est une catastrophe ; tant et si bien que, d'ici à l'an 2000, des millions d'hectares redeviendront très peu productifs. Si l'on veut que les exploitations agricoles aient des rendements élevés et soutenus, il est indispensable de recourir à l'irrigation. Il n'est d'ailleurs pas vrai que les grands projets d'irrigation soient toujours nuisibles à l'environnement. Sous les tropiques, en effet, l'irrigation permet aussi de stabiliser l'utilisation des sols, de pratiquer une agriculture plus intensive dans les plaines et dans les terres basses, de protéger les bassins versants et les terres hautes, de prévenir l'érosion des terres et l'apport excessif de sédiments dans les cours d'eau, enfin de conserver les ressources naturelles. Encore faut-il, pour cela, que les nouveaux projets d'irrigation se caractérisent par des pratiques efficaces de gestion des ressources en eau.

*Il n'y a pas contradiction*

Ainsi, des programmes bien conçus de mise en valeur et de gestion des ressources en eau pourraient apporter une contribution substantielle à la réalisation des objectifs nationaux de développement économique, en particulier dans les pays en développement, sans qu'il y ait nécessairement contradiction entre la mise en valeur des ressources en eau et la qualité d'un environnement que l'on veut propre, sain et plus agréable. D'ailleurs, l'un des objectifs de la protection de l'environnement est d'assurer la qualité de l'eau potable et il convient, à cet égard, d'intensifier les recherches pour mettre au point de nouvelles méthodes de traitement de l'eau.

**Nécessité d'une intégration scientifique des plans**

Il est nécessaire d'intégrer scientifiquement les plans de gestion des eaux souterraines et des eaux de surface, à la fois pour optimiser l'exploitation technique et pour bénéficier des avantages socio-économiques que procure la sauvegarde de la qualité de l'environnement.

Les pertes en biens et en vies humaines provoquées par les inondations constituent toujours un grave problème, dans les pays développés comme dans les pays en développement, mais ces derniers sont, en outre, victimes de sécheresses effroyables qui font subir des ravages étendus à l'environnement. Quand on planifie la mise en valeur des ressources en eau, il faut donc prévoir des protections, qui seront ou non des ouvrages construits, pour éviter, ou au moins atténuer, les dommages imputables aux inondations et à la sécheresse.

Pour gérer effectivement et efficacement les ressources en eau, il faut également prendre en considération la nécessité du pompage pour l'agriculture et pour l'industrie, qui accroît assez fortement la demande d'énergie. Il convient donc de ne pas perdre de vue cette demande quand on établit un plan d'ensemble pour l'utilisation des ressources en eau.

Ni les « besoins », ni les « disponibilités » en eau n'ont de caractère permanent et immuable. Il existe une technologie et des méthodes de gestion qui permettent d'agir sur l'offre et sur la demande d'eau dans l'intérêt général. Les projets et programmes de conservation de l'eau dans un bassin hydrographique donné devraient donc accorder la priorité aux régions où des mesures immédiates s'imposent. Lorsque l'eau reste une contrainte pesant sur le développement, il est possible, à l'intérieur du bassin, d'opérer des transferts entre les zones excédentaires et les zones déficitaires en eau, sous réserve que les zones excédentaires restent constamment excédentaires, compte tenu de tous les besoins de la région.

De toute évidence, la mise en valeur planifiée des ressources en eau et l'emploi de techniques de gestion efficaces pour l'utilisation de ces ressources représentent à la fois, pour le développement socio-économique, un défi majeur et une chance à saisir. ■

**Me gusta la gente que recurre  
a mí en busca de ciencia y tecnología.  
Su preferencia confirma  
mi prestigio entre los que ofrecen  
información especializada.**

# ciencia y desarrollo

PUBLICACION BIMESTRAL. DE  
DESCUENTO, GRANDES  
Y LIBRERIAS.

FAVOR DE SUSCRIBIRME  
A LA REVISTA CIENCIA Y DESARROLLO

	UN AÑO	DOS AÑOS	
NORMAL:	<input type="checkbox"/> 240 pesos	<input type="checkbox"/> 420 pesos	Incluido
EXTRANJERO:	<input type="checkbox"/> *33 Dls.	<input type="checkbox"/> *60 Dls.	Porte Aéreo

NOMBRE \_\_\_\_\_

DIRECCION \_\_\_\_\_

CIUDAD \_\_\_\_\_ C.P. \_\_\_\_\_

DELEGACION \_\_\_\_\_ TEL. \_\_\_\_\_

ADJUNTO CHEQUE  GIRO POSTAL

CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGIA  
DIRECCION DE PUBLICACIONES

000 109

*En Tunisie, la gestion traditionnelle des ressources en eau reflétait les coutumes locales et l'influence du climat dans les zones pluvieuses ou arides. Il est à remarquer que cette gestion était assurée par des particuliers. Il s'est produit un bouleversement dans cette organisation traditionnelle lorsque les puissances coloniales introduisirent les lois « nationalisant » les ressources en eau, favorisant ainsi une centralisation croissante de la gestion de l'eau par les pouvoirs publics, accompagnée de grandes inégalités dans la distribution de l'eau et entraînant d'autres perturbations.*

---

## **Une nouvelle conception des aménagements hydrauliques en Tunisie**

Slaheddine El Amami

---

*Slaheddine El Amami est directeur du Centre de recherche du génie rural à Tunis. Il a été récemment promu au grade d'ingénieur général. En 1962, il a obtenu un diplôme d'ingénieur agronome auprès de l'Institut national d'agronomie de Paris, et est l'auteur d'une cinquantaine d'ouvrages publiés. M. El Amami a été rapporteur de la Commission sectorielle de recherche agricole du plan quadriennal tunisien et directeur du projet Unesco/FAO sur l'amélioration des techniques d'irrigation et de drainage. On peut le joindre à l'adresse suivante : 74, avenue de l'Afrique, El Menzah V, Tunis (Tunisie).*

La conception des aménagements hydrauliques en Tunisie a considérablement évolué dans le temps. Alors que les ouvrages hydrauliques traditionnels se caractérisent par une dispersion géographique et une large décentralisation, la colonisation a donné naissance, au début du siècle, à une nouvelle politique centralisée. Depuis l'indépendance (il y a vingt ans), cette tendance s'est encore renforcée. Le présent article se propose d'analyser les causes de cette mutation et d'évaluer son impact sur le développement régional.

### Les caractéristiques des aménagements hydrauliques traditionnels

L'aménagement traditionnel de l'espace agricole se caractérise par la création de foyers hydrauliques relativement autonomes faisant l'objet, dans le cas d'ouvrages importants (oasis, dérivation d'oueds, etc.), d'une gestion collective et communautaire. Cette gestion s'inspire de coutumes locales renforcées par une législation islamique d'orientation malékite en matière d'aménagement des eaux. Les caractéristiques essentielles de ces foyers hydrauliques sont, d'une part, une technologie faisant appel à un savoir-faire et à des matériaux locaux et, d'autre part, leur relative autonomie par rapport au pouvoir central. En effet, ce sont les bénéficiaires de ces foyers qui en assurent intégralement la gestion. La nouvelle politique allait donc marquer une rupture avec cette pratique.

Les ouvrages traditionnels se fondent avant tout sur l'étroite relation existant entre l'exploitation des eaux souterraines et celle des eaux de surface, l'une étant toujours fonction de l'autre, comme le montre la figure 1. Le flanc des montagnes est aménagé de façon à favoriser la reconstitution de

Types d'aménagement :

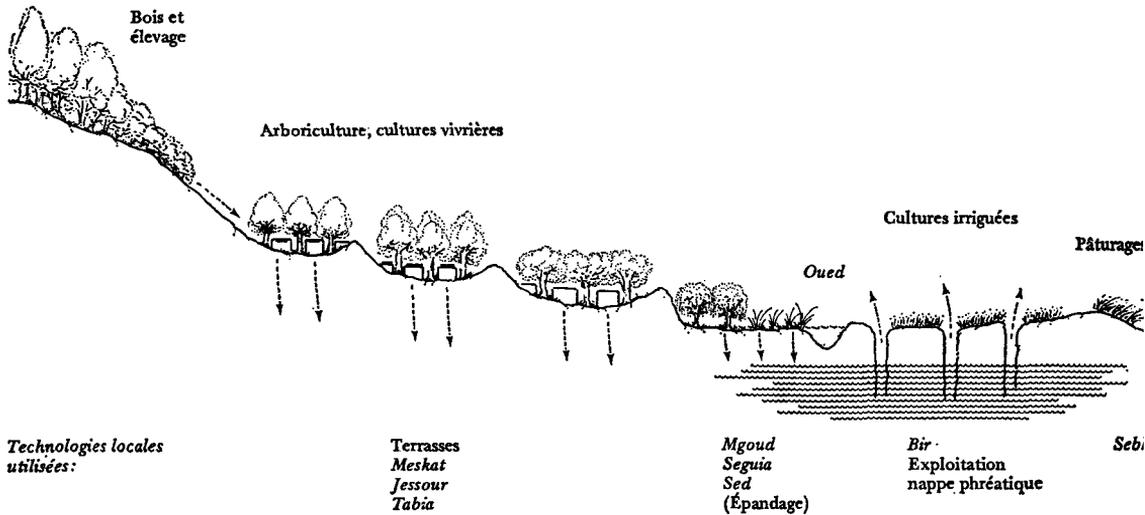


FIG. 1. Types d'aménagement hydraulique local de l'espace agricole en Tunisie. (S. El Amami, « L'étude des aménagements hydrauliques du type 'Meskat' du Sahel de Sousse », *Les cahiers du Centre de recherche du génie rural*, n° 7, août 1977.)

la nappe phréatique, exploitée à son tour en aval par puisage. Le développement, dans les montagnes, des systèmes hydrauliques traditionnels est indispensable à l'exploitation des eaux dans les plaines et assure une fondation hydrogéologique des installations traditionnelles (voir fig. 2).

Ce type d'aménagement répond en outre à une logique climatique ainsi qu'il ressort de la carte des foyers hydrauliques traditionnels : en milieu méditerranéen, le développement des cultures pluviales et hivernales suppose un aménagement spécifique pour chaque bioclimat.

En zone subhumide, où la pluviométrie suffit largement aux cultures, l'exploitation des eaux consiste à stocker l'excédent de pluies dans des lacs collinaires ou dans des réservoirs de montagne spécialement conçus à cet effet.

En zone semi-aride, où les précipitations sont tout juste suffisantes, le flanc des montagnes et les terrains en pente sont aménagés de façon à empêcher le ruissellement des eaux, d'où la présence de terrasses et de banquettes dans ce type de bioclimat.

Enfin, dans les zones arides où la pluviométrie est insuffisante, la « récolte » des eaux de ruissellement est rendue possible par la construction de *jessours* et de *meskats*. Ce type d'ouvrages consiste en un impluvium ou bassin qui permet de collecter les eaux. Leur dimension est fonction de la pluviométrie. En Tunisie centrale (Kairouanais, Gammouda, etc.), la technique traditionnelle d'inondation dirigée, appliquée en zone aride et dans les plaines traversées par de grands oueds, a permis le développement d'une civilisation hydraulique florissante. Le tableau ci-après résume les divers types d'aménagement en fonction des bioclimats.

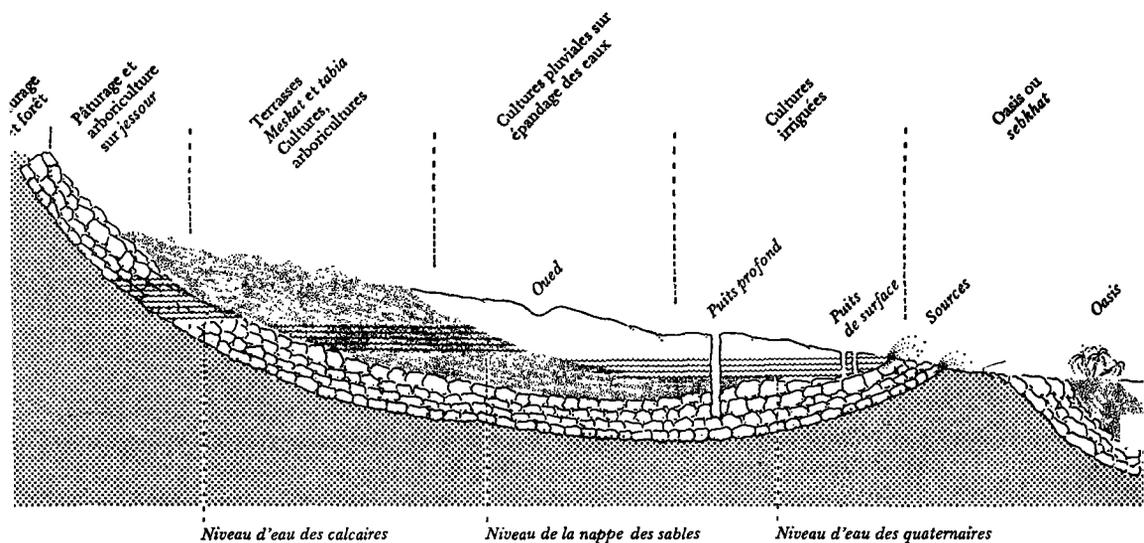


FIG. 2. Aménagement de l'espace rural maghrébin en fonction des facteurs hydrogéologiques. (D'après Gosselin, *L'hydraulique en Tunisie*, Tunis, Archives de l'Institut Pasteur, 1941.)

## Divers types d'aménagements hydrauliques.

Types de bioclimats	Besoin en eau des cultures hivernales en période de sécheresse	Aménagement hydraulique adapté
Subhumide $P > 550$ mm	$ETR < P$	Lacs collinaires, réservoirs, etc.
Semi-aride supérieur et moyen $400 < P < 550$ mm	$ETR = P$	Terrasses, banquettes, etc.
Aride supérieur à inférieur	$ETR > P$ $ETR = P + R$	<i>Meskat</i> , <i>jessour</i> , inondation dirigée, etc.

ETR = Evapotranspiration réelle, concept qui exprime les besoins en eau des cultures.  
P = Pluviométrie moyenne annuelle.  
R = Ruissellement des impluviums.

**La législation rompt avec les coutumes locales**

La législation concernant l'eau représentait la première rupture avec les coutumes et usages locaux relatifs à l'utilisation de l'eau. Alors qu'avant la colonisation, les coutumes locales subordonnaient la jouissance de l'eau à sa mise en valeur et à son exploitation, le Code des eaux promulgué le 25 septembre 1885, soit quatre années après le début de la colonisation française, puis révisé en 1920, allait consacrer une « étatisation » des ressources hydrauliques. Ce code stipule qu'« en Tunisie, les cours d'eau de toutes sortes et les terrains compris dans leurs francs-bords, les sources de toute nature font partie du domaine public ». Cette mesure devait marquer, pour les collectivités et les régions, le premier pas vers une dépossession de cette importante ressource naturelle. Le Code tunisien des eaux, promulgué le 31 mars 1975, allait encore renforcer cette réglementation sur « la conservation et l'utilisation des eaux du domaine public ».

Ainsi s'est effectuée la mainmise de l'administration sur la gestion de l'eau. Dès le début du siècle, les collectivités locales doivent, pour entreprendre la réfection des ouvrages hydrauliques, contracter des emprunts auprès de l'administration centrale et les rembourser en espèces sous forme d'annuités. Cette pratique consacre une nouvelle fois la rupture avec les usages coutumiers selon lesquels le paiement de l'eau s'effectuait en nature, par le travail, la réfection et l'entretien des ouvrages hydrauliques, par la fourniture ou l'exploitation d'une *mechia*, c'est-à-dire une unité de travail composée d'une bête de trait, d'une niveleuse et d'un conducteur.

De telles mesures ne pouvaient qu'aboutir à un manque d'intérêt de la part des bénéficiaires, hâtant ainsi le transfert de la gestion des eaux à l'administration. Ce processus de bureaucratisation a été décrit au début du siècle en ces termes : « Les comptes de travail sont encore centralisés au contrôle civil\* en attendant que les amines\*\* des oueds soient familiarisés

\* Contrôle civil : autorité régionale coloniale équivalente à la préfecture en France.

\*\* Amine : gérant traditionnel des eaux désigné et payé par la collectivité.

avec la tenue d'un livre de journées... »<sup>1</sup>. C'est ainsi que l'eau devient une marchandise vendue par les « offices des périmètres irrigués », nouveaux organes administratifs chargés de la gestion des eaux.

Ce code des eaux stipule en outre « la valorisation maxima du mètre cube d'eau », ce qui accule les producteurs agricoles à l'abandon des cultures diversifiées de subsistance au profit de cultures spéculatives qui leur permettent de faire face au prix toujours croissant du mètre cube d'eau.

L'opposition de deux modèles culturels — l'un moderne, l'autre traditionnel — engendrée par la colonisation, l'agression des technologies importées et le discours moderniste de l'élite politique nationale ont fini par discréditer tout savoir-faire et toute technique traditionnels, fussent-ils les mieux adaptés aux conditions locales. Qui plus est, les écoles d'ingénieurs ont joué un rôle déterminant dans la diffusion du modèle technologique dominant, en créant un « moule » de spécialistes acquis à un modèle technologique sophistiqué, au mépris de tout patrimoine technologique local, et confortés dans cette croyance par leurs maîtres, qui propagent des préjugés tels que « les technologies les plus basses exigent une main-d'œuvre considérable... ».

### **Abandon généralisé des ouvrages hydrauliques traditionnels**

La déstructuration des sociétés rurales maghrébines (dont certaines raisons historiques ont été évoquées plus haut), le recul et la disparition de la gestion collective, l'exode rural et le dépeuplement des piémonts et du flanc des montagnes ont entraîné l'abandon généralisé de l'entretien des ouvrages hydrauliques traditionnels et un début de dégradation considérable. Cet abandon a eu de graves conséquences dans le domaine hydrologique : augmentation du ruissellement et, donc, de l'érosion au détriment de l'infiltration ; réduction de la reconstitution des nappes et début d'assèchement et de salinisation des puits.

Les conséquences sur le plan social sont plus graves encore : elles se sont traduites par un dépeuplement des piémonts, un entassement dans les bidonvilles et par la menace de déperdition d'un savoir-faire et d'une accumulation technologique locale très précieuse.

Enfin, on assiste, avec l'explosion du puisage, à une surexploitation individuelle sans précédent des nappes, le nombre des puits ayant triplé en vingt ans (de 20 000 au début des années soixante, il est passé à 60 000 en 1980). Cette explosion a provoqué le déséquilibre hydraulique le plus important de l'histoire de la Tunisie, d'autant qu'il coïncide avec l'abandon des aménagements hydrauliques traditionnels des piémonts et du flanc des montagnes, qui constituaient un support indispensable à une gestion équilibrée des eaux. Ce déséquilibre actuel, qui ne fait que refléter celui de l'aménagement régional de l'ensemble du territoire, est encore accentué par la politique menée jusqu'à ce jour en matière d'aménagements hydrauliques.

#### *L'initiative locale a été supplantée*

Le plus souvent, le choix des techniques s'opère sans tenir compte du patrimoine technologique local. On tend en effet à importer des techniques modernes et à concevoir de grands projets d'aménagement. Ainsi, l'autonomie et l'initiative locales dans la gestion des ressources en eau ont fait place à une

dépendance à l'égard d'un gigantesque réseau hydraulique qui prévient toute prise de décision à l'échelon des producteurs agricoles. Les exemples qui suivent illustrent le caractère centralisé des aménagements hydrauliques proposés.

La Tunisie centrale est traversée par deux grands oueds qui convergent dans la plaine de Kairouan : l'oued Zeroud et l'oued Marguellil, qui couvrent un bassin versant de 800 000 hectares, peuplé d'un demi-million d'habitants. Dans le passé, la maîtrise de ces deux oueds a donné naissance, dans la région, à une civilisation hydraulique florissante. Vers les années soixante on identifie dix sites de barrages pour la seule cuvette de Foussana. Kasserine compte deux barrages, dont un construit au XVIII<sup>e</sup> siècle<sup>2</sup>. Un autre barrage, construit sur l'oued El Fekka, est maintenant détruit. Il permettait d'irriguer 3 000 hectares dans la plaine de Gammouda. Il est également fait état, au début du siècle, d'aménagements hydrauliques à Sbiba et Rohia. Ainsi, le centre tunisien comptait une trentaine de sites hydrauliques principaux et des périmètres d'épandage dirigé qui favorisaient l'alimentation

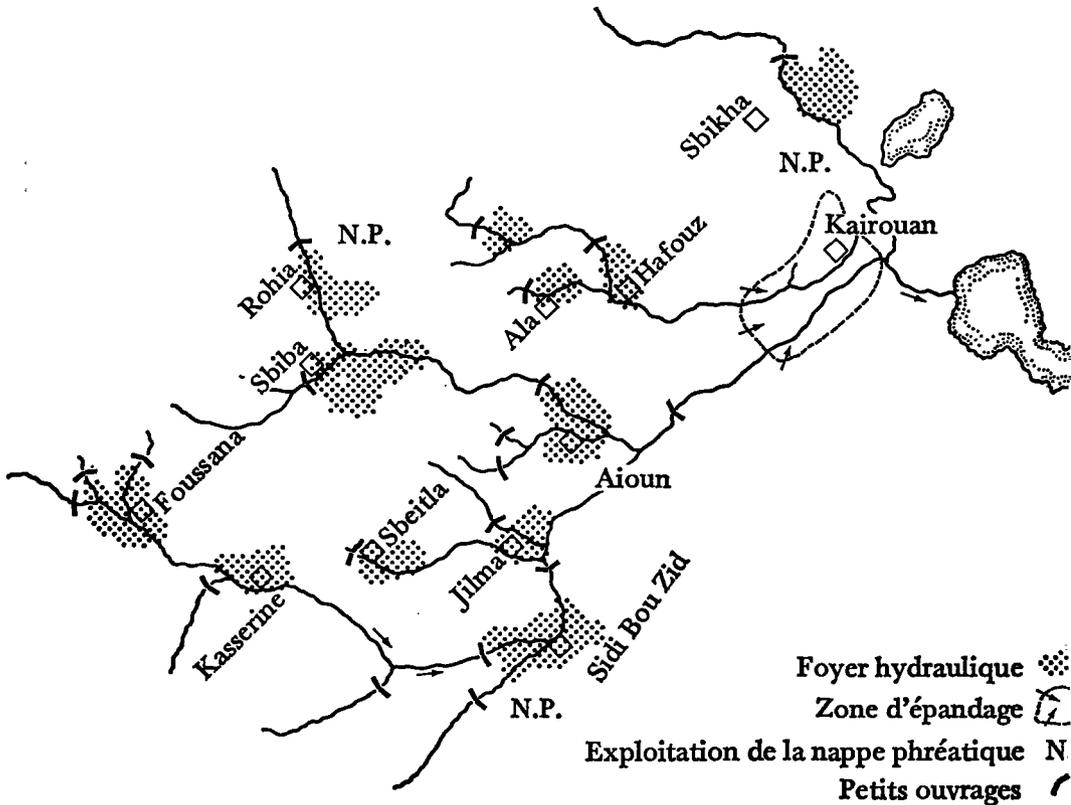


FIG. 3. Aménagement décentralisé du bassin de l'oued Zeroud.

Coût : 6 millions de dinars tunisiens [D.T.] (30 ouvrages)

Matériaux locaux

Travail local

— Création : 30 000 ha irrigués  
 40 000 emplois

— Renforcement nappe phréatique

— Lutte contre l'érosion et protection de l'infrastructure de communication et des agglomérations

de la nappe phréatique exploitée dans le Kairouanais (4 000 puits), à Gam-mouda (2 500 puits), à Rohia ainsi que dans d'autres régions.

Il aurait suffi de renforcer et d'améliorer ce patrimoine technologique existant en mobilisant les ressources humaines, sans pour autant recourir à une ingénierie et à des investissements en matériel (voir fig. 3) et, par la création de foyers hydrauliques décentralisés, de favoriser un équilibre régional créateur d'emplois, mettant ainsi un frein à l'exode rural et à l'érosion hydrique. Cependant, l'administration a choisi de construire un impor-tant barrage situé en aval. Ce faisant, il a consacré l'ensemble des investis-sements matériels et financiers à un seul ouvrage qui assure l'irrigation de 1 000 hectares seulement sur les 4 000 prévus. La construction de ce barrage a coûté 120 millions de dollars.

### Intensification de la centralisation des aménagements...

Cette conception centralisée (voir fig. 4) de l'aménagement hydraulique crée un espace agricole déshumanisé, érodé, ainsi qu'une dépendance de la col-lectivité à l'égard d'une « technostructure » engendrée par la nécessité de gérer un ouvrage d'une telle importance. Cette centralisation des aména-gements est rendue encore plus évidente par la décision qui a été prise de construire, en aval, un second barrage géant sur l'oued Marguellil, à un emplacement inapproprié. Ainsi, des milliers d'hectares seront inondés dans une zone à forte évaporation (1,6 m/an), alors que le bassin versant de l'oued

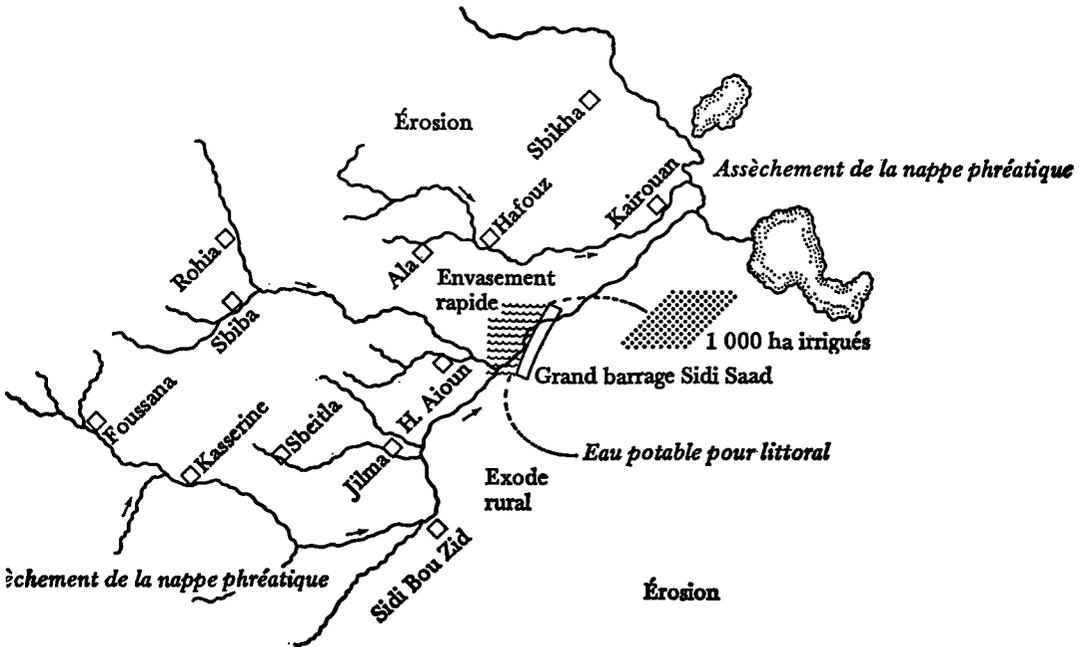


FIG. 4. Aménagement centralisé du bassin de l'oued Zeroud.

→ Érosion

Coût : 60 millions de D.T.

Emplois : 1 000

Marguellil a fait l'objet, dans les années soixante, dans le cadre d'un projet tuniso-américain (AID), de nombreuses études détaillées qui proposaient une mise en valeur globale de l'ensemble du bassin versant (150 000 hectares) par la création de 40 lacs collinaires, l'aménagement de parcours, de terrasses et de banquettes pour lutter contre l'érosion, le reboisement et la création de foyers arboricoles qui auraient garanti des revenus complémentaires aux 50 000 habitants du bassin versant. Ces aménagements, entrepris dans les années soixante, ont été interrompus dans les années soixante-dix, et l'on a récemment décidé de tout abandonner pour faire porter tous les efforts sur la réalisation d'un important ouvrage extrêmement onéreux, mais dont l'impact sur le développement régional sera réduit.

### **... mais seule la décentralisation peut assurer le développement**

Il semble pourtant évident que seul un modèle d'aménagement décentralisé, inspiré de techniques locales rénovées et mis sur pied avec la participation effective des populations rurales puisse assurer un développement régional équilibré.

C'est pourquoi une révision de l'actuelle politique centralisatrice s'impose si l'on veut enrayer le transfert massif des ressources en eau de l'intérieur vers le littoral. En effet, ce transfert accentue le déséquilibre régional et engendre une dépendance à l'égard du littoral. C'est le cas du Sahel de Sousse, qui traverse une crise dramatique en raison du comblement du barrage de Nabhana sur lequel repose son développement. Cette dépendance mutuelle littoral-intérieur constitue la manifestation la plus grave de la fragilité de l'ensemble du système hydraulique mis en place en Tunisie.<sup>3</sup> ■

---

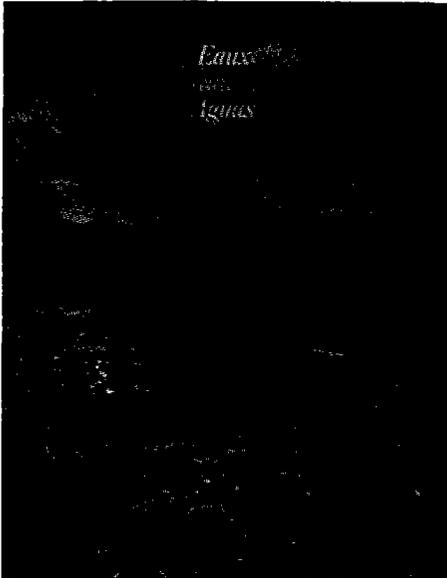
#### *Notes*

1. Penet, Les syndicats d'inondation de la plaine de Kairouan — Zeroud et Marguellil. *Bulletin de la Direction de l'agriculture et du commerce*, n° 46, 1908.
2. Tixeront, *L'aménagement du bassin versant de l'oued Zeroud*. Bureau d'inventaire de ressources hydrauliques, 1959. Multigraphié.
3. S. El Amami, *Pour une nouvelle politique d'économie d'eau dans la région du cap Bon et au Sahel tunisien* ; Commission méditerranéenne de planification, IV<sup>e</sup> Conférence internationale sur la planification et la gestion des eaux, Marseille, 10-12 mai 1982.

---

*Un album contenant 53 photos*

**Eaux rares  
Precious waters  
Aguas preciadas**



Unesco, 1981, 72 p.  
Prix : 45 F.  
Édition trilingue :  
français-anglais-espagnol.

A commander dès maintenant à :  
Unesco, 7, place de Fontenoy, 75700 Paris.

---

Prière de m'envoyer \_\_\_\_\_ exemplaire(s) de l'ouvrage *Eaux rares/Precious waters/Aguas preciadas*

Je joins la somme de \_\_\_\_\_.

Nom \_\_\_\_\_

Adresse \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

*Seulement 13,6 % du potentiel hydro-électrique mondial ont été exploités à ce jour ; cette source d'énergie pourrait donc répondre en grande partie aux besoins énergétiques du Tiers Monde au cours du siècle prochain. Des facteurs économiques autant que sociaux entrent en jeu dans la décision d'exploiter l'énergie hydraulique et la Chine et le Pakistan ont démontré que l'initiative locale peut jouer un rôle énorme dans le développement des mini-centrales.*

---

## **L'impact de l'énergie hydraulique sur la société**

Maurice L. Albertson

---

*Maurice L. Albertson, docteur en génie hydraulique de l'Université d'État de l'Iowa (États-Unis d'Amérique), 1948, et docteur ès sciences physiques de l'Université de Grenoble (France), 1954, enseigne dans les domaines du génie hydraulique et des réseaux de ressources en eau à l'Université d'État du Colorado. Auteur de quatre ouvrages et d'une centaine de communications, il est fréquemment appelé comme consultant en matière d'exploitation des ressources en eau dans les pays en développement. Il a dirigé, en 1974, la délégation des spécialistes des ressources en eau envoyés dans la République populaire de Chine. Il est membre et ex-président du Comité national des États-Unis de la Commission internationale pour l'irrigation et le drainage. Son adresse est la suivante : 1502 Mathews Street, Fort Collins, CO 80524 (États-Unis d'Amérique).*

L'énergie hydraulique est exploitée dans le monde depuis des millénaires. En effet, bien des siècles avant notre ère, les roues à eau permettaient de moudre le grain et d'élever l'eau à des fins d'irrigation ou d'approvisionnement. Ces tout premiers aménagements eurent essentiellement pour cadre l'Égypte, le Moyen-Orient, l'Inde et la Chine. Vers l'an 200 de notre ère, les Romains construisirent un ensemble de 16 moulins à farine équipés de roues à auges à axe vertical et d'engrenages permettant des changements de vitesse. Ils obtenaient ainsi 28 tonnes de farine par jour. Dotées de différents types de perfectionnement au cours des siècles, ces roues à eau, les unes à axe vertical, les autres à axe horizontal, fournissaient de l'énergie pour moudre et broyer diverses céréales, scier du bois, faire fonctionner des machines à filer et des métiers à tisser dans l'industrie textile, tailler la pierre, actionner des marteaux à bascule, faire du vin et élever l'eau (voir fig. 1). Dès le XIV<sup>e</sup> siècle, des dizaines de milliers de roues à eau alimentaient l'Europe en énergie mécanique.

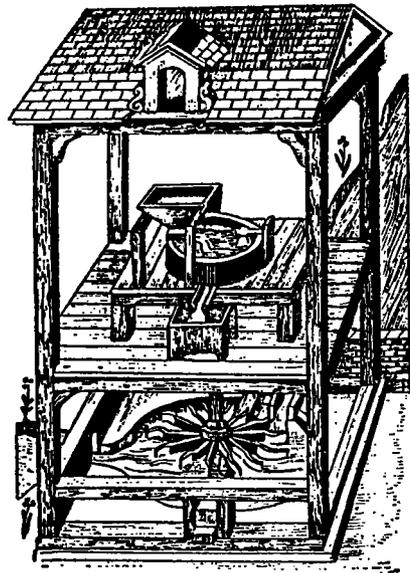


FIG. 1. Ancienne roue à eau.

Ce ne fut qu'au cours du XIX<sup>e</sup> siècle, toutefois, que l'énergie hydraulique devint non seulement une source d'énergie mécanique, mais également d'énergie électrique, avec l'invention de la turbine par l'ingénieur français Benoît Fourneyron, en 1827, avec la mise au point de la turbine à réaction par James Francis à Lowell, dans le Massachusetts, en 1849, avec la création de la turbine Pelton en Californie, en 1880, enfin avec le couplage des turbines et des générateurs d'électricité dans le Wisconsin, en 1882. La dernière grande étape fut l'« invention du courant alternatif par George Westinghouse à Niagara Falls, en 1901. Toutes ces réalisations ont préparé le terrain pour les progrès récents accomplis dans le domaine de l'hydro-électricité.

### **Le potentiel hydro-électrique est énorme**

Le potentiel hydro-électrique mondial est énorme puisqu'il dépasse 2,2 millions de MW, mais 13,6 % seulement de ce potentiel sont exploités (voir

TABLEAU I. Potentiel et capacité de production d'énergie hydro-électrique dans le monde (1974)

Région ou continent	Potentiel total (MW)	Pourcentage du potentiel total mondial	Potentiel exploité (MW)	Pourcentage du potentiel exploité	Capacité de production annuelle moyenne (GW/h)	Pourcentage de la capacité de production totale mondiale	Capacité de production annuelle moyenne exploitée (GW/h)	Pourcentage de la capacité de production exploitée
Afrique	437 104	19,3	8 154	1,9	2 019 934	20,6	30 168	1,5
Asie (moins l'URSS)	684 337	30,3	47 118	6,9	2 638 169	26,9	198 433	7,5
Europe (moins l'URSS)	215 407	9,5	103 998	48,3	722 368	7,4	382 317	52,9
URSS	269 000	11,9	31 500	11,7	1 095 000	11,2	123 000	11,2
Amérique du Nord	330 455	14,7	90 210	27,3	1 487 847	15,2	453 334	30,5
Amérique du Sud	288 289	12,7	18 773	6,5	1 637 031	16,7	91 415	5,6
Océanie	36 515	1,6	7 609	20,8	202 071	2,0	28 897	14,3
<b>TOTAL</b>	<b>2 261 107</b>	<b>100,0</b>	<b>307 362</b>	<b>13,6</b>	<b>9 802 420</b>	<b>100,0</b>	<b>1 307 564</b>	<b>13,3</b>

Sources. Conférence mondiale de l'énergie. *Inventaire des ressources énergétiques*. New York, 1974. *Energy perspectives 2*, juin 1976. U.S. Department of the Interior.

tableau 1)<sup>1</sup>. Sur ce total, l'Afrique, par exemple, possède un potentiel de 437 000 MW (près de 20 % des réserves mondiales dont moins de 2 % ont été exploitées). Assouan, sur le Nil, Kariba, en Afrique de l'Est, et Akosombo, au Ghana, représentent la moitié de cette mise en valeur<sup>2</sup>.

Les ressources totales de l'Asie et de l'Amérique du Sud sont également considérables, respectivement de 684 000 et de 288 000 MW — alors que le pourcentage exploité n'est que de 6,9 et de 6,5, ce qui signifie que le potentiel hydro-électrique de ces trois continents est encore presque intact. On peut en déduire qu'avec une planification attentive, l'hydro-électricité devrait répondre dans une large mesure aux besoins énergétiques du Tiers Monde au cours du XXI<sup>e</sup> siècle.

Le plus souvent, il n'est ni souhaitable ni économique d'exploiter les ressources en eau uniquement pour produire de l'énergie. En d'autres termes, il vaut généralement mieux diversifier la mise en valeur et combiner plusieurs des utilisations suivantes : hydro-électricité ; irrigation ; régularisation des crues ; alimentation en eau urbaine et industrielle ; navigation ; régularisation de la sédimentation ; loisirs ; pêche.

L'application de techniques de génie hydraulique permet de déterminer très facilement et avec efficacité l'importance à accorder à chacune de ces utilisations dans la planification et la conception d'un projet<sup>3</sup>. Avec l'apparition du calculateur numérique électronique, ces techniques de simulation, d'optimisation et de maximisation sont devenues des outils indispensables.

### Schéma d'une centrale hydraulique

La figure 2 présente un schéma de centrale hydraulique classique. Le générateur entraîné par une turbine produit l'électricité. L'eau est amenée dans la turbine par une conduite forcée qui traverse la base du barrage, lequel retient l'eau à la fois pour régulariser son débit et pour la stocker en vue d'une utilisation ultérieure. La hauteur de la chute sous laquelle fonctionne la turbine est la dénivellation entre la surface de l'eau d'amont et celle de l'eau d'aval.

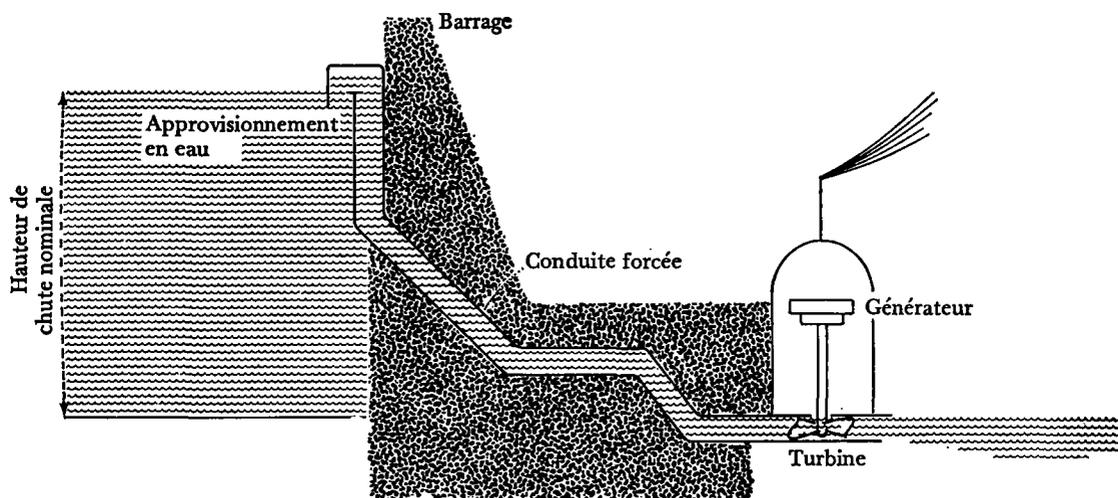


FIG. 2. Schéma d'un aménagement hydro-électrique. (D'après L. Goodman, I. Hawkins et R. Love, *Small hydroelectric projects for rural development*, New York, Pergamon Press, 1981.) [Avec l'autorisation de Pergamon Press.]

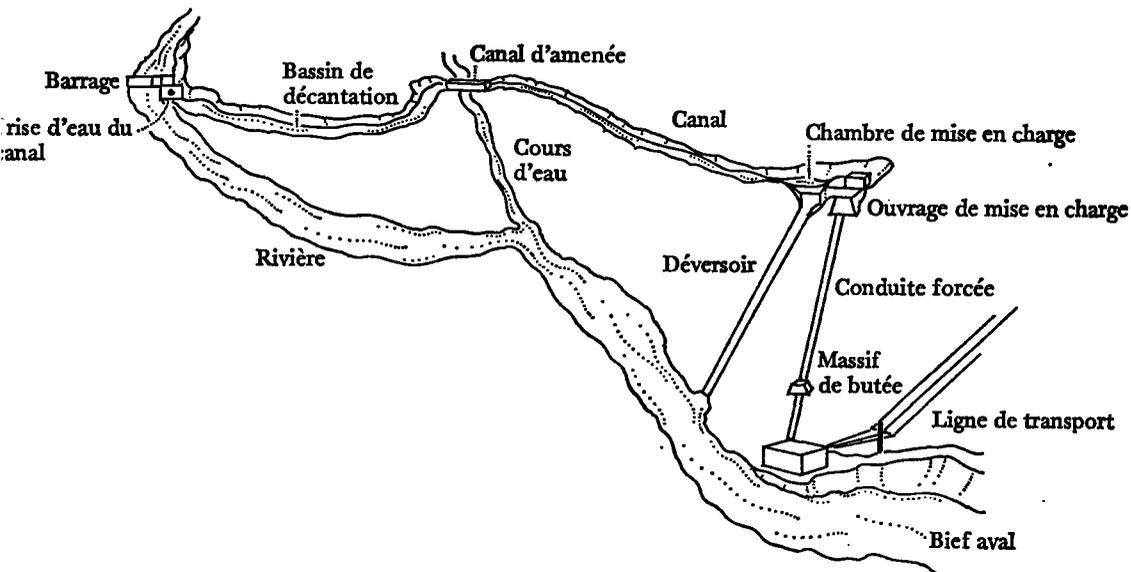


FIG. 3. Centrale hydraulique au fil de l'eau. (D'après NRECA, 1980.)

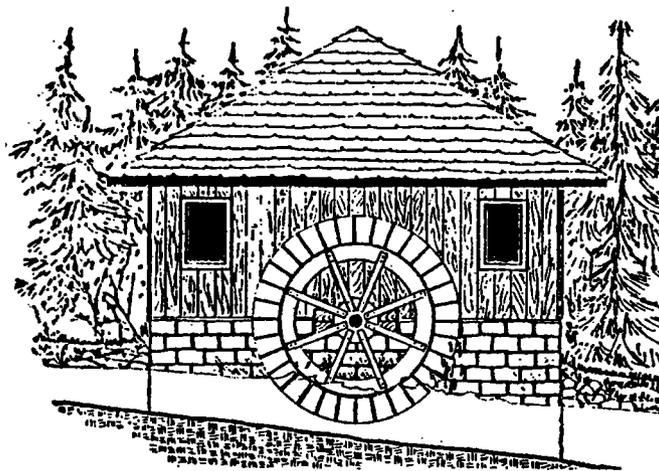
La centrale hydraulique la plus simple est l'usine au fil de l'eau, qui ne comporte pas de barrage de retenue. L'eau est dérivée de la rivière dans un canal à ciel ouvert ou dans une galerie et menée à une certaine distance par une pente plus faible que celle de la rivière, ce qui permet d'obtenir une dénivellation suffisante avant que l'eau soit introduite par une conduite forcée dans la turbine installée au niveau du cours d'eau en aval (voir fig. 3). Cet aménagement permet d'éviter l'installation coûteuse d'un barrage de retenue et d'un réservoir. Au niveau de la prise d'eau en amont, il suffit d'un barrage de dérivation qui stabilisera et régularisera le débit de l'eau détournée.

Les études hydrologiques s'attachent à analyser le débit de la rivière et les eaux souterraines ainsi que les relevés pluviométriques. Les données ainsi obtenues et les informations topographiques permettent de déterminer la taille maximale de la turbine et du générateur à utiliser. Toutefois, les besoins de la collectivité n'exigent pas toujours l'utilisation de la taille maximale. C'est pourquoi il faut tenir compte de la charge ou de la demande potentielle en matière d'hydro-électricité.

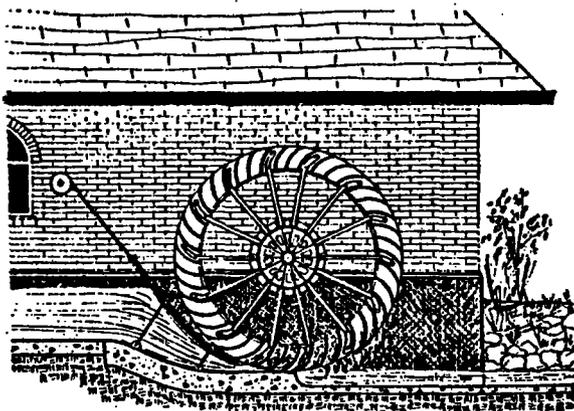
### *Roues à eau et turbines*

Les divers types de roues à eau et de turbines utilisés pour la production d'hydro-électricité sont illustrés par les figures 4, 5 et 6. La roue à eau verticale (voir fig. 4) à axe horizontal a un mouvement lent et est particulièrement utilisée pour broyer et moudre ; elle actionne des outils tels que perceuses sur colonne, tours ou scies ainsi que des pompes et des générateurs électriques avec un mécanisme d'engrenages pour augmenter la vitesse de l'axe. Son rendement est très inférieur à celui de la turbine, mais elle est plus simple et moins coûteuse. En outre, elle peut être fabriquée et entretenue par un personnel local non qualifié.

Une turbine (voir fig. 5 et 6) est un dispositif rotatif producteur d'énergie mécanique qui est mis en action par l'énergie cinétique ou potentielle de l'eau. Elle peut être raccordée directement à des machines telles que tours,

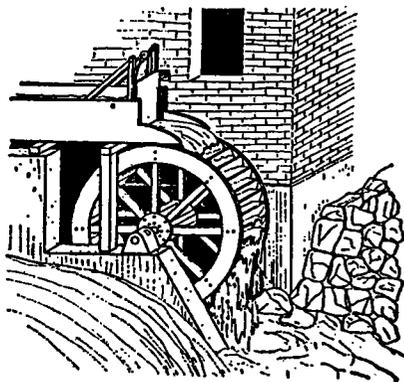
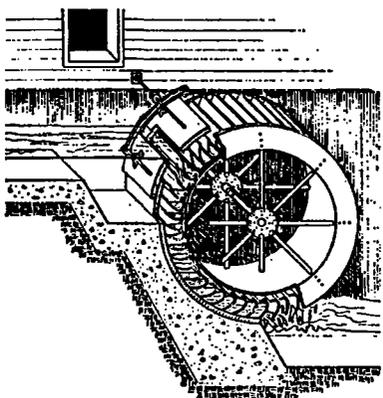
FIG. 4. Roues à eau. (D'après Alward *et al.*, 1979.)

a. *Roue à aubes*. C'est la roue à eau la plus élémentaire. L'eau qui passe sous la roue vient frapper les aubes ou palettes, faisant ainsi tourner la roue. Cette roue peut fonctionner avec une hauteur de chute minimale de 30 cm (l'énergie produite à cette hauteur est pratiquement nulle), mais elle a un faible rendement. Les hauteurs de chute optimales s'échelonnent entre 1,80 et 4,50 mètres. Le diamètre minimal de la roue étant d'environ 4,50 mètres.

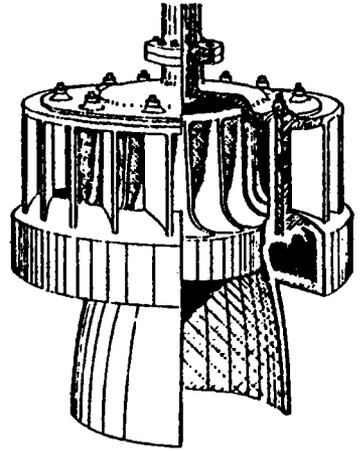


b. *Roue Poncelet*. C'est une adaptation de la roue à aubes dans laquelle les palettes sont incurvées de manière à accroître l'efficacité de l'interaction de l'eau et de la roue. Cette roue utilise la vitesse de l'eau qui a été retenue et qui doit s'écouler par un passage étroit. Le diamètre minimal d'une roue Poncelet est d'environ 4 mètres et son fonctionnement optimal est généralement atteint avec des hauteurs de chute de 2 mètres ou moins. Les rendements sont supérieurs à ceux de la roue à aubes. Ce type de roue doit être bordé par une construction de béton pour que l'eau reste dans les augets. L'entrefer étant faible, il faut utiliser une grille pour éviter que des pierres et du bois ne pénètrent dans le système et ne provoquent des dégâts.

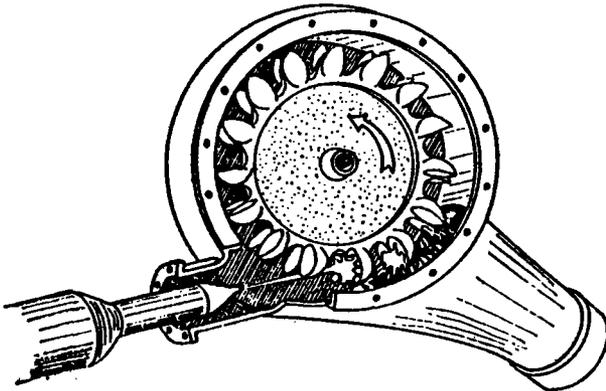
c. *Roue de côté*. L'eau pénètre dans la roue de côté au-dessous de la partie supérieure de celle-ci. Un flasque enserme la roue et maintient l'eau dans les augets jusqu'à ce qu'elle soit rejetée à peu près au point le plus bas. Le fonctionnement optimal de cette roue est obtenu avec des hauteurs de chute inférieures à 3 mètres et le diamètre de la roue varie généralement entre la hauteur de chute et trois fois celle-ci. Les roues hautes (où l'eau pénètre au-dessus de l'axe central) ont un rendement qui peut approcher 65 %. Les roues basses (où l'eau pénètre au-dessous de l'axe central) ont généralement un rendement qui varie entre 35 et 40 %. Les roues de côté nécessitent la construction d'un ouvrage incurvé assez complexe. En outre, les augets doivent être ventilés pour permettre à l'air de passer dans l'auget immédiatement supérieur quand l'un se remplit. La proximité de la construction présente les mêmes inconvénients que dans la roue Poncelet en ce qui concerne les débris transportés par l'eau. Les techniques de construction compliquées qui entrent en jeu et les rendements relativement faibles, en particulier pour les roues basses, font généralement préférer d'autres types de roue.



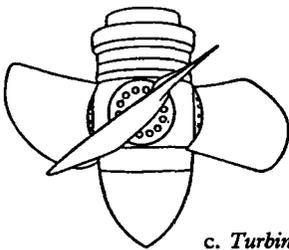
d. *Roue à augets*. L'eau arrive au sommet de la roue par un couloir presque horizontal. Le poids de l'eau sur les augets fait tourner la roue. L'eau vient généralement frapper les augets avec une vitesse un peu supérieure à celle de la jante afin de ne pas être frappée par l'arrière des augets et de ne pas rejaillir sur la roue. L'arrivée d'eau et, par voie de conséquence, la production d'énergie sont réglées par une vanne actionnée à la main. Les roues à augets sont généralement celles qui ont le meilleur rendement. Elles peuvent fonctionner avec n'importe quelle hauteur de chute supérieure à 3 mètres. Actuellement, la limite supérieure de la hauteur de chute est d'environ 9 mètres en raison du coût de construction d'une roue de ce diamètre.

FIG. 5. Turbines. (D'après Alward *et al.*, 1979.)

a. *Turbine Francis*. Les turbines Francis sont spécialement installées dans les aménagements hydro-électriques très importants. L'eau est introduite juste au-dessus de l'aubage mobile et sur le pourtour de celui-ci et s'écoule ensuite en direction axiale entraînant ainsi un mouvement rotatif. Elles sont conçues très spécifiquement en fonction de leur installation, utilisent un système de soupapes compliqué et ne sont donc généralement pas utilisées dans les microcentrales hydro-électriques.



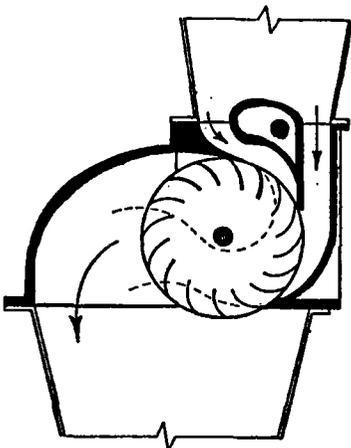
b. *Turbine Pelton*. D'une manière générale, une turbine Pelton est un disque muni à sa périphérie d'aubes ou augets. L'eau passe par une buse et frappe les aubes l'une après l'autre, faisant ainsi tourner la roue. La forme des augets est telle que le jet d'eau se divise en deux parties qui sont déviées dans la direction opposée au jet initial, ce qui assure le plus haut rendement. La forme des augets est importante et il faut également que leur surface soit lisse. Étant donné que l'énergie produite par la turbine Pelton dépend dans une large mesure de la vitesse de l'eau, cette turbine convient bien aux installations à grande hauteur de chute et à faible débit. Les rendements de l'ordre de 80 % sont courants et des micro-unités utilisant la turbine Pelton sont produites par plusieurs firmes d'Amérique du Nord.

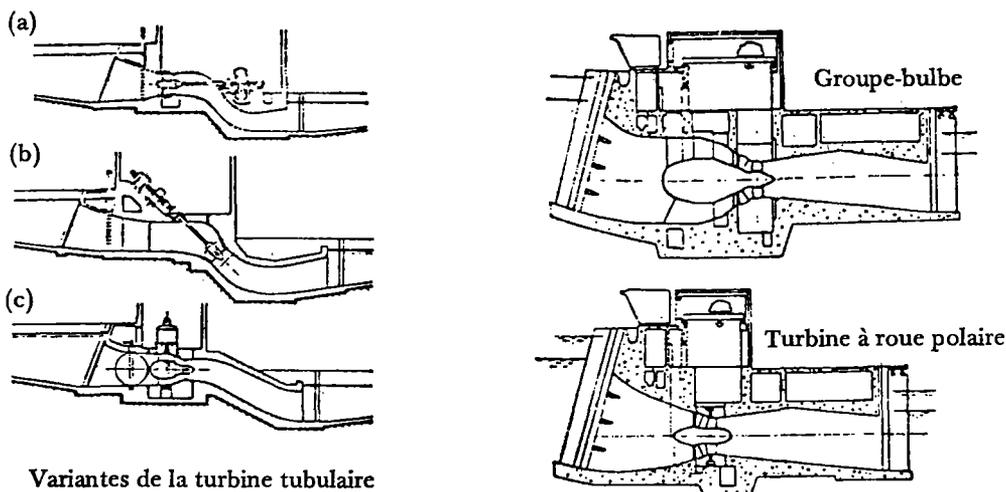


### c. Turbine Kaplan

*Turbine-hélice.* Ce modèle ressemble à une hélice de bateau actionnant un tube et fonctionne selon le même principe. Comme en ce qui concerne la turbine Francis, l'eau est en contact permanent avec toutes les aubes et il est donc impératif que la pression dans la section efficace du tuyau soit uniforme. Si, par exemple, la turbine fonctionnait horizontalement et que la pression dans la partie supérieure du tube soit inférieure à celle de la partie inférieure, le rotor serait déséquilibré. Il y a plusieurs variantes dans l'application du même principe : le groupe-bulbe, dans lequel la turbine et le générateur constituent un ensemble étanche installé directement dans le cours d'eau ; la turbine à roue polaire, dans laquelle le générateur est fixé directement à la périphérie de la turbine ; la turbine tubulaire, dans laquelle la conduite forcée fait un coude juste avant ou après la roue, permettant ainsi un raccordement en ligne droite avec le générateur qui est à l'extérieur du tuyau. Dans la turbine Kaplan, qui est une variante de tous ces modèles, l'hélice est munie de pales à pas variable pour pouvoir suivre les variations de débit. En fonction des conditions de l'emplacement, la turbine peut être installée dans n'importe quelle position allant de l'horizontale à la verticale. Le modèle le plus courant de turbine à réaction utilisée dans les microcentrales est le tube, quelquefois avec le système de pales de la turbine Kaplan.

*Turbine à double impulsion (« crossflow »).* La roue de cette turbine a la forme d'un tambour dont les aubes sont fixées radialement sur la face externe. Ouverte au centre, elle ressemble à une soufflante à « cage d'écureuil ». Si on la regarde de profil comme si c'était le cadran d'une pendule, l'eau pénètre à 9 heures, traverse le centre et sort à 16 heures d'où son nom de *crossflow* en anglais. La plupart des modèles disponibles dans le commerce sont fabriqués par Ossberger (République fédérale d'Allemagne) ou par d'autres, sous licence. En raison de sa conception, ce modèle est considéré comme autonettoyant et est adapté aux basses chutes. En fait, Ossberger en a installé avec succès sous un mètre de chute seulement. Cette turbine utilise une ailette réglable à l'entrée et assure un rendement élevé pour des débits très variables. Étant donné que la roue et son enveloppe s'emboîtent exactement, un tube d'aspiration est utilisé en bas de la turbine, ce qui permet une certaine souplesse dans l'installation en ce qui concerne l'emplacement de la turbine et le niveau aval. Cette turbine est utilisée dans le monde entier, quoiqu'elle soit assez peu courante aux États-Unis d'Amérique.





Variantes de la turbine tubulaire

FIG. 6. Comparaison de la turbine tubulaire, du groupe-bulbe et de la turbine à roue polaire. (D'après NRECA, 1980.)

broyeurs ou fraises ou à un générateur de courant alternatif ou continu. La quantité d'énergie produite par une turbine est directement proportionnelle au produit de la hauteur de chute par le débit, soit  $P \sim H \times Q$ . Cela signifie qu'une haute chute et un débit faible peuvent produire la même énergie qu'une basse chute et un fort débit.

Les turbines sont généralement classées en deux types : les turbines à action et les turbines à réaction. Les turbines à action utilisent la vitesse de l'eau pour actionner l'aubage mobile et elles sont soumises à la pression atmosphérique. La turbine Pelton est un bon exemple de turbine à action ; c'est une version plus compacte et plus sophistiquée de la turbine Poncelet. La turbine à double impulsion (*crossflow*) est un autre exemple remarquable de turbine à action. Ses aubes sont incurvées et elle ressemble beaucoup à une soufflante à cage d'écureuil (qui fonctionne comme une pompe à air). L'eau pénètre dans cette turbine à peu près comme dans la roue de côté, mais la forme des aubes est telle que, lorsque l'eau entre dans la turbine d'un côté, elle leur donne une poussée vers le bas et que, lorsqu'elle est à l'intérieur de la turbine, elle vient frapper les aubes de l'autre côté pour leur donner une poussée vers le haut avant de retomber dans le réservoir au-dessous. Elle peut fonctionner pour des hauteurs de chute aussi faibles que 1 mètre et son rendement, généralement de 60 à 70 %, peut atteindre un maximum de 80 %. Le tableau 2 récapitule les rendements obtenus.

TABLEAU 2. Rendements typiques des petites roues à eau et des turbines

Roues à eau		Turbines	
Types	Pourcentage	Types	Pourcentage
Roue à aubes	25-45	A réaction	80
Roue de côté	35-65	A action	80-85
Roue Poncelet	40-60	A double impulsion	60-80
Roue à augets	60-75		

Source. Alward et al., 1979.

## Le rapport coût/utilité

La décision de construire une centrale hydro-électrique doit être précédée d'une analyse économique afin de déterminer le rapport coût/utilité et d'éviter au maximum les surprises aux divers stades du projet : conception, construction, fonctionnement et entretien. Les points à inclure dans les avantages et les coûts dépendront du type de l'analyse effectuée et de la nature et des objectifs de l'organisation responsable<sup>4</sup>. L'utilité d'un projet de production d'hydro-électricité se calcule d'après la valeur actuelle des avantages qui en résulteront, ce qui met en cause un ou plusieurs des aspects suivants.

1. L'existence d'une capacité installée et une production d'énergie qui permettent de retarder d'autres projets de production d'électricité.
2. Une économie sur le coût des combustibles des centrales thermiques existantes, le cas échéant.
3. L'économie sur le coût de l'électricité que le propriétaire est peut-être actuellement obligé d'acheter à d'autres producteurs.
4. L'économie sur les coûts de construction, de fonctionnement et d'entretien de l'autre source d'énergie la plus économique, si elle n'est pas présentement réalisable.
5. Les avantages sociaux.

La partie de l'analyse relative aux coûts est constituée par la valeur actuelle des coûts initiaux auxquels s'ajoutent les coûts futurs comme suit : a) coûts initiaux de planification, de conception et de construction ; b) coûts futurs

TABLEAU 3. Principaux facteurs techniques et économiques à considérer dans les études de faisabilité

Rassembler et étudier les données existantes	Rechercher et confirmer les droits de propriété sur le terrain et les droits relatifs à l'eau
Étudier le site afin d'établir le profil du cours d'eau, des coupes transversales et, si besoin est, la topographie	Établir un plan de financement du projet
Étudier le sol de fondation et la géologie de l'emplacement	Déterminer les incidences fiscales
Effectuer des études hydrologiques et hydrauliques	Procéder à une évaluation préliminaire de l'environnement
Définir l'ordre de grandeur des différents aménagements possibles	Établir les épures des aménagements possibles sélectionnés
Déterminer le type de turbine approprié et se procurer des renseignements auprès des vendeurs	Évaluer les coûts du projet en ce qui concerne l'autorisation des travaux, les études techniques, la construction et le fonctionnement
Établir les schémas théoriques et les prévisions de dépenses préliminaires des différents aménagements	Établir le calendrier des travaux en ce qui concerne l'autorisation, les études techniques, la construction et la mise en service
Évaluer la capacité et le potentiel énergétique du site	Établir un plan de commercialisation de l'électricité et déterminer la valeur de l'électricité et de l'énergie
Sélectionner les aménagements possibles, qui seront étudiés plus en détail	Effectuer une analyse économique et financière du projet
	Établir le rapport de faisabilité

Source. CUNNINGHAM, Raymond E., *Design and economic considerations*, p. 4. Washington, D.C., The Energy Bureau Conference, 27-28 avril 1981.

de réparation ou de remplacement ; c) coûts de fonctionnement ; d) coûts d'entretien ; e) coûts de l'inflation.

Divers ouvrages de référence donnent les détails de ces calculs coût/utilité<sup>5</sup>. Des informations sont fournies dans le tableau 3, qui présente les principaux facteurs techniques et économiques intervenant dans les études de faisabilité, et dans la figure 7, qui donne une idée approximative du coût d'une centrale hydraulique.

Outre ces considérations économiques, il est nécessaire de tenir compte de facteurs tels que les utilisations concurrentes de l'eau, ou les considérations sociales, culturelles, politiques et institutionnelles, avant de prendre la décision de réaliser un projet de construction d'une centrale hydraulique.

### Étude de l'impact socioculturel

Lorsqu'ils considèrent un projet de production d'hydro-électricité, les ingénieurs et les planificateurs négligent souvent l'impact socio-culturel que ce projet aura sur la collectivité locale et sur la région. Si le projet implique un barrage important et un réservoir ou si des questions d'irrigation, de régularisation des crues ou de navigation entrent en jeu, il peut en résulter des conséquences à la fois favorables et défavorables<sup>6</sup>. Une petite centrale aura peut-être moins de résultats négatifs, mais il est très important de prévoir et d'évaluer ses résultats à l'avance pour éviter d'avoir des surprises quand la centrale sera construite et en service. Les facteurs devant faire l'objet d'une étude préalable sont notamment les effets sur : a) l'agriculture ; b) la pêche ; c) l'exploitation forestière ; d) l'exploitation minière ; e) la santé ; f) l'emploi ; g) la répartition du revenu ; h) les facteurs politiques ; i) le niveau de vie ; j) l'écologie et l'environnement ; k) l'autosuffisance de la collectivité locale ; l) l'érosion et la sédimentation.

La production d'électricité permet de réduire considérablement la dépense d'énergie musculaire pour une grande quantité de travaux manuels. Ainsi les hommes, affranchis de tâches longues et pénibles, sont disponibles pour en exécuter d'autres qui contribueront à améliorer les conditions de vie de la collectivité. Pour qu'une collectivité s'intéresse à la production d'énergie hydraulique et d'électricité, elle doit y trouver un avantage culturel et politique : pouvoir, par exemple, utiliser un matériel mécanisé et disposer de la lumière électrique qui accroît le nombre des heures de travail et améliore les conditions d'éclairage, à des fins de loisirs entre autres.

#### *L'initiative locale en Chine*

Quoiqu'un gouvernement puisse toujours être tenté d'emprunter de l'argent (à la Banque mondiale, par exemple) afin d'affecter des crédits à la production d'énergie hydraulique, cette démarche n'est pas toujours la plus favorable aux intérêts de la population elle-même. La Chine a prouvé très clairement que la construction de dizaines de milliers de petites centrales hydrauliques pouvait être le fait de la seule initiative locale, pratiquement sans subvention du gouvernement central. C'est l'exemple d'une population qui, encouragée par les autorités, manifeste son indépendance et, par conséquent, son autosuffisance. Dans toute la Chine, l'initiative locale a permis la construction des différents types de turbines et de générateurs.

En 1949, la Chine comptait une cinquantaine de petites centrales hydrauliques dont la puissance installée atteignait approximativement 5 000 kW.

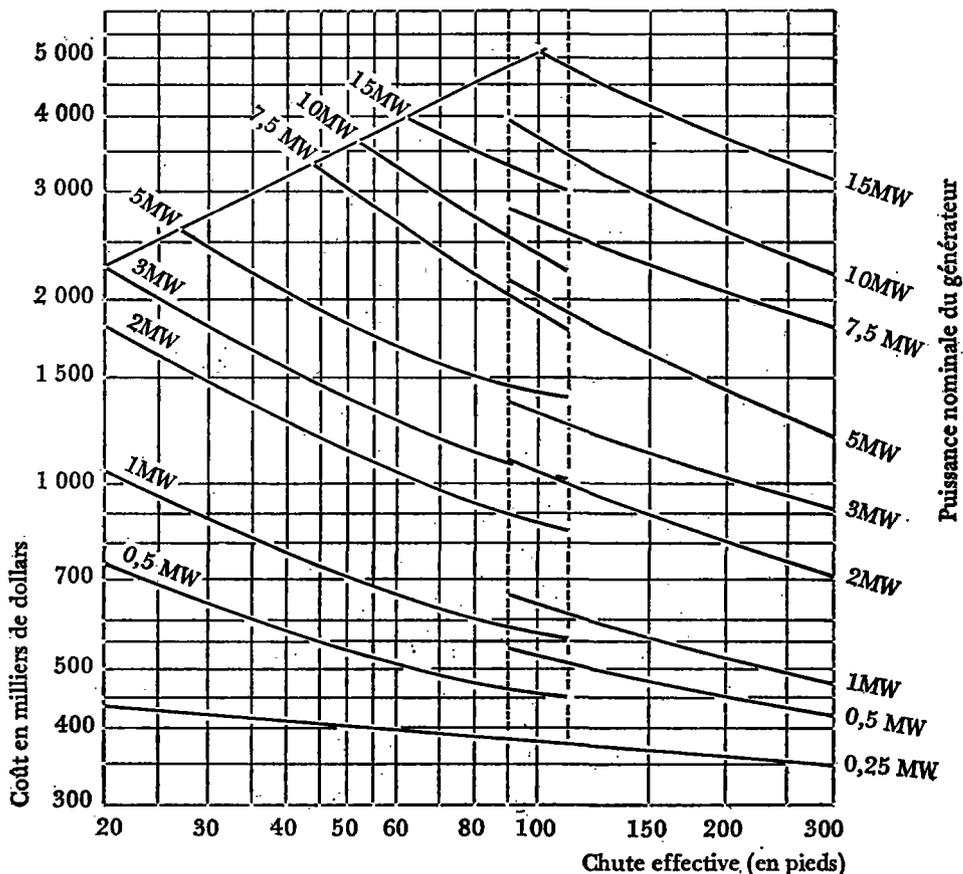


FIG. 7. Coût d'une centrale. (D'après Corps of Engineers, 1979.)

1. Le montant estimatif des coûts est fondé sur une turbine typique ou normalisée couplée avec un générateur soit directement, soit par l'intermédiaire d'un démultiplicateur de vitesse, selon le type de turbine utilisée.
2. Les coûts visent : la turbine, le générateur et leurs accessoires, la centrale, son matériel électrique, son équipement, les travaux d'excavation nécessaires, les travaux publics pour le poste, une vanne à glissières en amont et les coûts de construction et d'installation.
3. Les coûts non compris sont : la ligne de transport, la conduite forcée, la construction de la conduite de décharge et le matériel du poste.
4. Date de référence pour les coûts : juillet 1978.
5. Il se produit une zone de transition lorsque les types de machines changent en raison d'une augmentation de la hauteur de chute.
6. Pour une centrale à unités multiples, les coûts supplémentaires du matériel sont :  $20\,000 + 58\,000 \times (n - 1)$  dollars, où  $n$  = le nombre total d'unités.

En 1977, il y en avait plus de 60 000 (construites depuis 1966). Actuellement, on estime à 400 ou 500 MW par an l'augmentation de la production d'énergie hydraulique des petites centrales.

### *L'exemple du Pakistan*

Au Pakistan, des réalisations récentes démontrent assez clairement que le matériel ainsi que les installations et le financement nécessaires à la production d'hydro-électricité peuvent être fournis grâce à l'initiative locale, à l'exemple de la Chine. Cette formule présente plusieurs avantages, à savoir : a) si un projet est financé entièrement par des fonds locaux, il ne sera pas si coûteux que les engagements financiers futurs mettent la collectivité dans une situation difficile ; b) la collectivité locale ayant fabriqué et construit l'ensemble du matériel et de l'équipement nécessaires est à même d'entretenir ce matériel pour qu'il reste en état de fonctionnement ; c) le fait de résoudre seul ses problèmes à l'aide de ressources locales procure une grande satisfaction et beaucoup de fierté. A la suite d'une telle réalisation, la population locale est convaincue qu'elle est capable de résoudre d'autres problèmes grâce à l'initiative et aux ressources financières locales.

### **Stimuler et animer une communauté**

On procède actuellement à d'importants aménagements hydro-électriques non seulement en Chine et au Pakistan, mais également dans beaucoup d'autres pays du monde. En outre, les petites centrales jouent un rôle de plus en plus important, car d'autres pays suivent l'exemple de la Chine et du Pakistan en utilisant de petites installations simples pour fournir de l'énergie renouvelable (sous la forme d'électricité et d'énergie mécanique) aux populations des zones rurales éloignées.

La petite centrale (< 50 MW) est particulièrement utile comme source d'énergie renouvelable, car elle constitue un point de convergence autour duquel une collectivité peut planifier, concevoir, financer, construire, faire fonctionner et entretenir son propre système énergétique ; ce qui peut se faire pratiquement sans aide extérieure. Une telle collectivité en concevra donc un sentiment de fierté et d'autosuffisance qui lui permettra de résoudre d'autres problèmes communautaires — ce qui n'est pas le cas de bien des populations du Tiers Monde qui, faute de confiance en soi, attendent patiemment que le gouvernement ou quelqu'un d'autre résolve leurs problèmes à leur place.

La production d'énergie hydraulique peut également être le point de départ d'autres projets d'aménagement des ressources en eau qui seront extrêmement profitables à la population concernant, par exemple, l'irrigation et le drainage, la régularisation des crues, la navigation et un réseau fiable d'alimentation en eau potable pour répondre aux besoins en eau urbaine et industrielle.

Enfin, la centrale hydraulique peut fournir l'énergie nécessaire à des usines de traitement de produits locaux (par exemple, pour alimenter des chambres froides permettant, en attendant l'amélioration d'un marché saturé, de conserver des pommes qui, plus tard, pourront être soit vendues, soit mises en compote) et d'autres industries. Il en résulte deux avantages distincts : le prix des produits locaux monte ; des emplois s'offrent à la main-d'œuvre excédentaire des zones rurales qui, sinon, serait obligée de migrer vers les villes, où elle susciterait de nouveaux problèmes.

Pour conclure, non seulement la production d'énergie hydraulique contribue à fournir à une collectivité l'énergie renouvelable qui lui est indispensable, mais elle peut aussi constituer un élément moteur de nature à animer une communauté et à stimuler son action bien au-delà du problème de l'énergie lui-même. ■

---

#### Notes

1. L. Goodman, J. Hawkins et R. Love, *Small hydroelectric projects for rural development*, New York, Pergamon Press, 1981.
  2. D. Deudney, « An old technology for a new era », *Environment*, vol. 23, n° 7, 1981.
  3. W. Hall et J. Dracup, *Water resources systems engineering*, New York, McGraw-Hill Book Company, 1970.
  4. Tudor, *Reconnaissance evaluation of small, low-head hydroelectric installations*, rapport établi par Tudor Engineering Co. pour le U.S. Bureau of Reclamation, Denver, Colo., juillet 1980.
  5. Tudor, *Simplified methodology for economic screening of potential low-head, small-capacity hydroelectric sites*, rapport établi par Tudor Engineering Co. pour l'Electric Power Research Institute, Palo Alto, Calif., janvier 1981 ; Tudor, *ibid.*, 1980 ; Corps of Engineers, « Feasibility studies for small scale hydropower additions », *U.S. Corps of Engineers guide manual*, Davis, Calif., Hydrologic Engineering Center, juillet 1979.
  6. D. Deudney, *op. cit.*, 1981.
- 

#### Pour approfondir le sujet

- ALBERTSON, M. ; PETERSON, D. *Agricultural engineering. Mechanical engineering*, juin 1975.
- ; NICKUM, J. *From ideology to action. Mechanical engineering*, mars 1975.
- ALWARD, R. ; EISENHART, S. ; VOLKMAN, J. *Micro-hydropower: reviewing an old concept*. Butte, Montana, National Center for Appropriate Technology, 1979.
- CORPS OF ENGINEERS. *Waterpower 79: An International Conference on Small-Scale Hydropower*. Actes d'une conférence organisée conjointement par l'U.S. Army Corps of Engineers et l'U.S. Department of Energy, Washington, D.C., octobre 1979.
- DAILY, J. *Hydropower: A mirror of self reliance. Mechanical engineering*, mai 1975.
- NICKUM, J. *Hydraulic engineering and water resources in the People's Republic of China*. Stanford University, 1977. (U.S. China Relations Programme, Report no. 2.)
- NRECA. *Small hydroelectric powerplants*. Actes d'un groupe de travail à Quito (Équateur). Washington, D.C., National Rural Electric Cooperative Association, août 1980.
- ROUSE, HUNTER & SIMON Inc. *History of hydraulics*. Iowa City, Iowa, Iowa Institute of Hydraulic Research, 1957.
- EL-HINNAWI, E. *China study tour on energy and environment-small hydropower schemes*. PNUE, août 1977.

---

**Saviez-vous que**

**les éducateurs, les chercheurs et les étudiants  
peuvent utiliser les bons Unesco pour acheter**

**livres, périodiques, films  
œuvres d'art, partitions musicales  
récepteurs de radio et de télévision**

**machines à écrire  
matériel scientifique  
machines-outils**

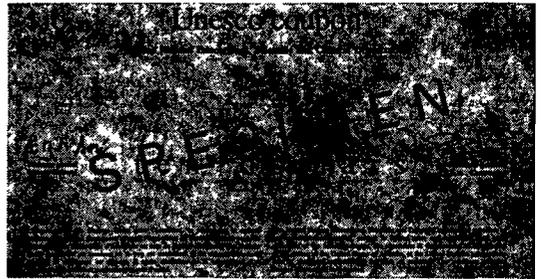
**bandes magnétiques  
instruments de musique  
appareils de mesure**

**Les bons Unesco peuvent également être utilisés pour payer des  
souscriptions à des publications de caractère éducatif, scientifique ou  
culturel et pour acquitter des droits d'inscription universitaire ou  
des droits d'auteur**

**Les bons Unesco existent  
dans les valeurs suivantes :**

***Dollars des États-Unis  
d'Amérique***

**1 000  
100  
30  
10  
1**



**(Des coupons sans valeur nominale peuvent être valorisés pour  
des sommes de 1 à 99 cents.)**

## **Comment cela fonctionne-t-il ?**

**Dans chaque pays utilisateur, un organisme — le plus souvent la commission  
nationale pour l'Unesco — est responsable de la vente des bons.**

**Écrire au Service des bons de l'Unesco, 7, place de Fontenoy,  
75700 Paris (France) pour obtenir une liste des principaux fournisseurs  
ayant adhéré au programme ainsi que le nom et l'adresse du Service  
de vente des bons Unesco dans votre pays.**

**Vous payez les bons *en monnaie nationale* et vous les joignez à la commande que  
vous envoyez au fournisseur des marchandises que vous désirez acquérir.**

---

# PLEINS FEUX SUR L'UNESCO

---

Le Programme hydrologique international (PHI) de l'Unesco aborde d'une manière nouvelle, interdisciplinaire, le problème de la préservation de notre bien le plus précieux : l'eau.

Le PHI a pour objectif principal d'établir les bases scientifiques et technologiques d'une gestion rationnelle des ressources en eau, tant en ce qui concerne la quantité que la qualité de celles-ci.

Le Programme hydrologique international a été lancé par l'Unesco en 1975 et sa préparation a été en grande partie fondée sur l'expérience acquise pendant la Décennie hydrologique internationale (DHI) (1965-1974). Le PHI est un programme intergouvernemental à long terme axé sur les aspects scientifiques et éducatifs de l'hydrologie et de la gestion des ressources en eau et fondé sur une approche interdisciplinaire et intersectorielle de ces aspects.

La première phase du PHI a été exécutée de 1975 à 1980, la seconde phase de 1981 à 1983 et la troisième s'étendra sur les années 1984 à 1989. L'esquisse de cette troisième phase (PHI-III) vise à réaliser les objectifs définis dans le Plan d'action de Mar del Plata et, dans un contexte plus général, contribue à atteindre les buts fixés par la Conférence des Nations Unies sur la science et la technique au service du développement (1979). Le titre général de cette troisième phase est le suivant : « Hydrologie et bases scientifiques de la gestion rationnelle des ressources en eau pour le développement économique et social ».

Le programme de la troisième phase du PHI présente une orientation nouvelle par rapport aux activités entreprises antérieurement dans le cadre de la DHI et du PHI. Alors que le programme continuera à être centré sur les sciences hydrologiques traditionnelles, son champ d'action sera étendu au problème d'importance croissante de la gestion rationnelle des ressources en eau. Cette conception de la troisième phase du PHI conduit à prendre davantage en considération les applications pratiques des résultats. Elle demande aussi que le programme englobe des régions et s'adresse à un public qui, jusqu'ici, n'avaient pas été concernés par le programme d'hydrologie.

L'approche intégrée de la gestion des ressources en eau nécessite que non seulement les techniciens, mais aussi les planificateurs, les responsables politiques, les décideurs et le grand public soient avertis des limites possibles des activités de l'homme sur les ressources en eau. Ils doivent avoir une compréhension de l'hydrologie, dans son sens le plus large, pour user rationnellement de leur influence sur le processus de planification. Afin de savoir ce qui peut être fait, l'homme doit comprendre comment ses activités antérieures ont affecté les ressources en eau. Tirant un enseignement du passé, l'homme devrait être capable d'exploiter les systèmes hydrauliques de façon à éviter ou, du moins, à réduire les effets négatifs secondaires.

Les activités prévues ne s'arrêteront pas à la production de rapports. Durant la troisième phase du PHI on insistera sur l'importance de la mise des

informations à la disposition de l'utilisateur. Un plus grand usage sera fait des séminaires régionaux, ateliers et colloques. Mais parler d'un résultat n'est pas aussi efficace que de le montrer. Aussi, partout où cela sera possible, l'accent sera mis sur l'utilisation de projets pilotes et de démonstration. L'utilisation pratique immédiate des résultats sera encouragée et les projets existants seront utilisés comme moyen de formation en cours d'emploi de ceux qui, de retour plus tard dans leur propre pays, pourront appliquer la méthodologie.

Indépendamment des séminaires spécialisés et des ateliers qui résulteront des études techniques, le programme habituel d'éducation du PHI sera poursuivi. La formation au niveau de technicien recevra toutefois une attention toute particulière.

Et, finalement, l'élaboration de documents techniques constituera une composante supplémentaire. Comme, dans sa troisième phase, le PHI est destiné à avoir une plus grande audience qu'auparavant, l'accent sera mis sur la production de brochures de vulgarisation. De courtes publications, bien illustrées et non techniques, seront élaborées si l'on estime qu'elles peuvent avoir une portée pratique.

En résumé, le programme de la troisième phase du PHI continuera à mettre l'accent sur les aspects scientifiques et éducatifs de l'hydrologie et des sciences de l'eau, mais il encouragera une approche interdisciplinaire de la planification et de la gestion des ressources en eau regroupant les apports des sciences sociales et écologiques, des programmes généraux d'éducation et des systèmes d'information scientifique. De ce fait, il élargira son audience et il aura un impact pratique considérablement plus grand grâce à son action pour aider à résoudre les problèmes des ressources en eau du monde.



*Le meilleur moyen d'assurer une répartition équitable des avantages qui résultent de l'aménagement d'un réservoir d'eau est d'adopter un processus rationnel de gestion. Dans le présent article, l'auteur décrit les caractéristiques d'un système hydrographique polyvalent à réservoir : l'aménagement du barrage d'Hirakud dans l'État d'Orissa, en Inde. Il montre ensuite comment une politique de gestion dynamique permet de satisfaire les demandes des utilisateurs tout en tenant compte des capacités du réseau. Le grand intérêt de ce mode de gestion réside dans la technique d'apport de l'information adoptée, qui fait intervenir la rétro-information, l'information « anticipative » et l'information d'origine interne.*

---

## Gestion d'un réservoir polyvalent

R. P. Mohanty

---

*R. P. Mohanty est titulaire d'une maîtrise en organisation industrielle et en recherche opérationnelle et a obtenu le grade de docteur avec une thèse portant sur l'établissement de modèles de gestion des systèmes hydrographiques à réservoir dans un pays en développement. Il donne depuis quatorze ans des cours de deuxième et de troisième cycle à l'université où il mène aussi une activité de recherche ; il a publié un certain nombre d'articles qui traitent de la gestion. Il occupe à l'heure actuelle un rang élevé dans le personnel enseignant du National Institute for Training in Industrial Engineering [Institut national de formation en organisation industrielle] de Bombay. Son adresse est la suivante : National Institute for Training in Industrial Engineering, Vihar Lake, P.O. Nitie, Bombay 400 087 (Inde).*

## Introduction

Que l'eau joue un rôle dans le développement et dans la transformation économique et sociale d'une région géographique n'est pas un mystère. Lorsqu'une région est dotée de toutes les autres ressources (sols, main-d'œuvre, minéraux, sites appropriés, etc.) nécessaires à une productivité économique élevée, il ne fait pas de doute que, si elle dispose d'eau, son développement s'en trouvera stimulé. L'aménagement d'un réservoir d'eau profitera à tous les éléments de la collectivité, mais ceux-ci n'en ressentiront pas également les avantages. Pour parvenir à une égale répartition de ces avantages, il faut d'abord une politique de gestion du réservoir qui tienne compte de la composition économique et sociale du groupe des utilisateurs ; c'est seulement ensuite qu'on mettra au point les mécanismes nécessaires pour atteindre les grands objectifs sociaux recherchés : encourager davantage les éléments les moins favorisés de la communauté à participer au développement et les faire mieux profiter de ses fruits.

La gestion des systèmes hydrographiques polyvalents à réservoir fait l'objet de travaux et d'analyses détaillés depuis de nombreuses années. On a même essayé, par de réels efforts de recherche, d'appliquer à ce domaine les techniques de l'analyse systémique, mais le champ d'étude retenu était trop vaste et les objectifs trop ambitieux. Le propos du présent article est d'étudier la question de la gestion des réservoirs dans le cas d'un grand système polyvalent à réservoir et déversoir de crues, alimenté par la mousson, mais qui est un réseau isolé qu'il s'agit d'exploiter dans un environnement très insuffisamment développé du point de vue économique, mais démocratique du point de vue de la prise des décisions. Partant de certains traits essentiels de la configuration du système, des structures socio-économiques et politiques et des rôles revenant aux responsables de la gestion, l'auteur s'efforce de définir un processus rationnel de gestion pour l'ensemble du système. Il s'écarte ici des approches habituelles en matière d'analyse systémique, qui ne voient dans la gestion qu'une collection de techniques. Pour l'auteur, au contraire, la gestion est un ensemble complexe permettant de reconnaître, d'identifier, d'atténuer, puis de résoudre, les conflits tenant aux structures et aux comportements et, enfin, de dresser des plans d'action stratégiques pour parer aux incertitudes.

## Description de la configuration d'un système hydrographique à réservoir

Avant d'aborder l'examen du processus de gestion, nous décrirons, du point de vue physique, un système polyvalent à réservoir existant. Il s'agit de l'aménagement hydraulique dont l'élément essentiel est le barrage à déversoir de crues d'Hirakud, construit sur le fleuve Mahanadi, dans l'État d'Orissa, en Inde. Destiné à desservir l'État extrêmement peu développé d'Orissa, ce barrage a été mis en eau en 1956.

On trouvera, à la figure 1, une carte du bassin versant du fleuve et à la figure 2 un schéma extrêmement simplifié du fonctionnement du système. La bassin s'étend sur une très importante fraction de la région industrielle de l'État, qui se caractérise par une forte densité de population et une grande variété de terrains et de sols. Plusieurs affluents se jettent dans le fleuve en divers points de son cours et viennent en grossir sensiblement les eaux pendant la mousson (de juin à septembre), créant ainsi des risques de crues

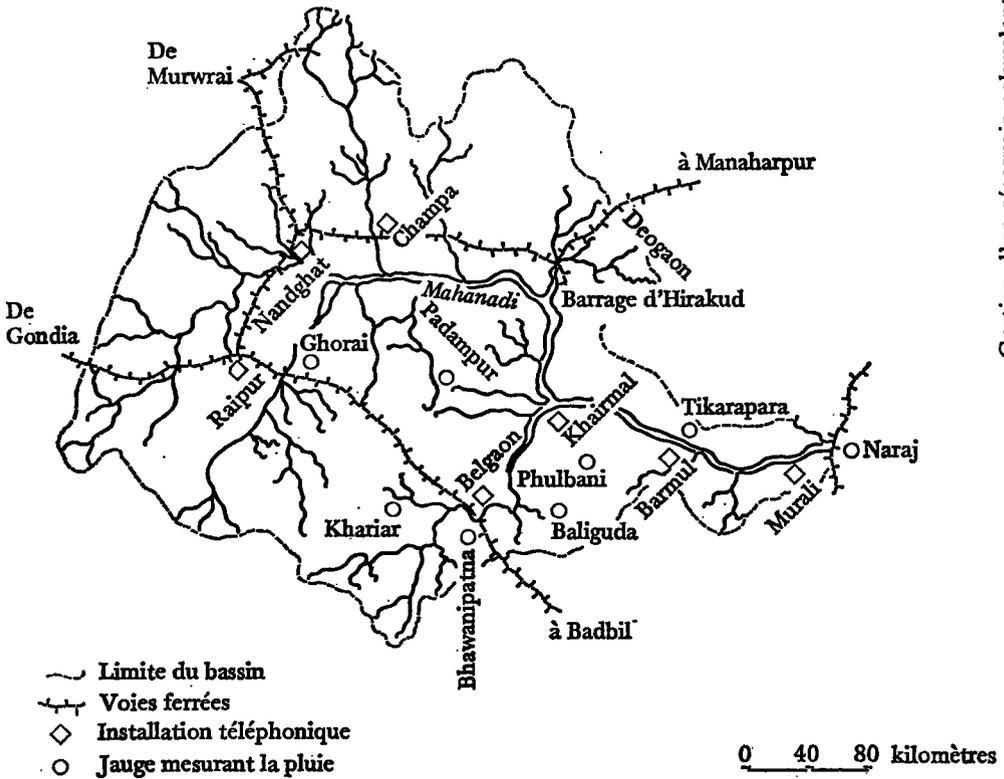


FIG. 1. Carte du bassin versant.

inopinées. Tout le bassin est alimenté par la mousson et présente des débits entrants abondants et imprévisibles pendant la mousson, mais très faibles pendant le reste de l'année. Dans l'ensemble du bassin, l'été est très chaud, ce qui entraîne d'importantes pertes par évaporation des eaux du réservoir.

La superficie du réservoir est de 74 500 hectares, sa capacité maximale d'emmagasinement, à un niveau de remplissage de 185,22 mètres, est de 8 143,2 millions de mètres cubes et sa capacité d'emmagasinement d'eau morte, à un niveau de remplissage de 173,46 mètres, est de 2 317,4 millions de mètres cubes.

Ce système n'est relié à aucun autre réseau fluvial. Des deux rives du réservoir part un premier ensemble de canaux (au nombre de deux) qui irriguent une zone agricole située en amont. De l'énergie électrique est produite dans deux centrales, l'une située au pied du barrage en béton de la rive droite et l'autre, qui utilise l'eau d'aval de la première centrale, située 10 kilomètres en aval. Les eaux d'aval des deux centrales sont rejetées dans le fleuve. Dans la région côtière située en aval, un barrage-déversoir (bassin de mise en charge) a été construit en travers du fleuve ; il retient un volume d'eau suffisant pour alimenter en eau, grâce à deux autres grands réseaux de canaux, une zone d'agriculture irriguée à forte densité de population.

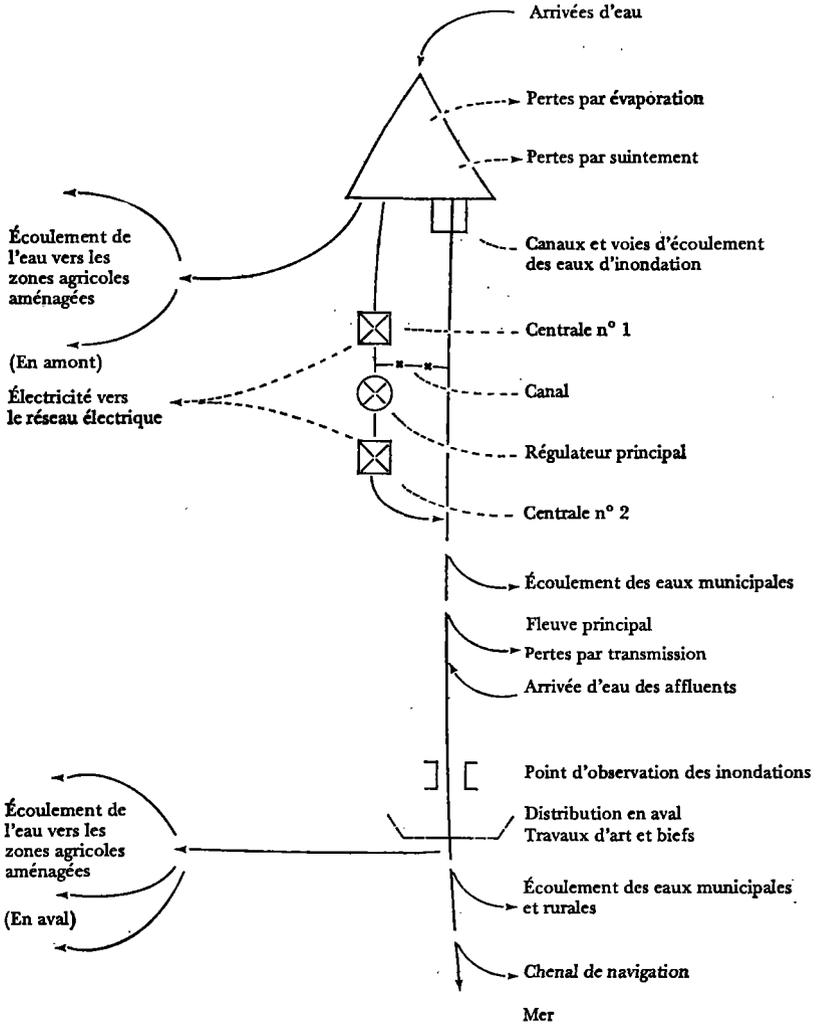


FIG. 2. Diagramme simplifié du système.

### L'aménagement hydraulique au service de la population

Les principaux services rendus à la communauté desservie par l'aménagement sont les suivants.

1. Fourniture, toute l'année, d'eau d'irrigation aux régions agricoles alimentées par lui.
2. Production d'électricité et alimentation en courant des établissements industriels et commerciaux, des habitations, des services de traction ferroviaire et des installations d'élévation de l'eau d'irrigation.
3. Fourniture d'eau aux villes et agglomérations rurales situées en bordure du fleuve et des canaux.
4. Navigabilité de quelques portions, assez limitées, du fleuve principal et de certains canaux, dans la ceinture côtière.
5. Régularisation des crues en aval.

6. Fourniture d'eau pour l'exécution de plans de mise en valeur des terres, à la fois en amont et en aval, directement par les canaux, ou par amenée d'eau souterraine de bonne qualité, et création de petits bassins aux fins d'irrigation avec élévation d'eau.

En domestiquant le cours du fleuve, grâce à la construction de cet unique réservoir, on a accessoirement rendu possibles la pisciculture et la lutte contre la salinité dans la bande côtière. En revanche, les utilisations des plans d'eau à des fins d'agrément et de loisir sont encore inconnues.

### **Les régions agricoles comprises dans la zone d'aménagement**

La région géographique et politique desservie par le barrage est assez vaste. Les deux régions agricoles irriguées grâce au nouvel aménagement présentent toutefois des caractéristiques économiques tout à fait différentes. La région agricole située en aval se trouve sur une bande côtière fertile, où le niveau de vie est élevé pour des raisons historiques (contacts plus anciens avec la colonisation britannique et, partant, adoption plus précoce d'une culture nouvelle, différant de la culture féodale traditionnelle). Dans cette région, les méthodes agricoles modernes sont mieux connues (l'université agricole, située dans la région, possède en effet des programmes de vulgarisation), les incitations au développement sont plus vives (la capitale de l'État, Bhubaneswar, étant située dans la région) et les injections de capitaux dans des programmes, agricoles notamment, beaucoup plus importantes (un certain nombre de banques nationalisées et de sociétés coopératives de crédit ont en effet leur siège dans la région). En revanche, la forte densité de population est un inconvénient, de même que la dimension des exploitations agricoles remembrées, inférieure à celle des exploitations de l'autre zone.

La zone agricole irriguée d'amont se trouve dans une région de collines, faiblement peuplée, mais les exploitations y sont quelquefois vastes et susceptibles d'être encore agrandies par remembrement. La terre y est fertile, mais les populations sont moins évoluées ; la majeure partie de la région est habitée par des populations tribales et des populations de collines et rien ne vient provoquer la rapide amélioration des niveaux de vie qui serait pourtant possible. Cette région géographique, toutefois, pourrait beaucoup mieux que l'autre supporter une forte densité industrielle et ses agglomérations urbaines et industrielles tendent à s'ouvrir de plus en plus aux influences extérieures. Les traditions sociales et culturelles enracinées y sont, elles aussi, nettement différentes de celles de l'autre zone. Dans les deux zones, le riz paddy est la principale récolte de juin à octobre. Dans les deux zones aussi, les récoltes de saison sèche (de novembre à mai) sont le blé, les graines oléagineuses, les céréales et les légumineuses, auxquelles il faut ajouter une deuxième récolte de paddy.

#### *Identification des groupes d'utilisateurs*

Le tissu socio-économique ainsi formé par l'ensemble de la population de l'État d'Orissa, qui est pauvre et peu évoluée, se compose donc de deux groupes d'utilisateurs nettement différents, l'un pauvre, peu évolué, assez isolé mais disposant d'un potentiel de développement élevé, l'autre relativement plus avancé, moderne et informé, mais habitant une région surpeuplée, dans laquelle le potentiel de croissance agricole est moindre. Dans

les deux régions, il existe un besoin d'électricité à des fins d'expansion industrielle, l'État tout entier étant richement doté en ressources minérales et forestières. En revanche, l'utilisation de l'électricité à des fins domestiques (appareils servant à alléger les tâches ménagères) ou en vue de services publics bénéficiant aux populations rurales, notamment, est faible. Récemment, on a davantage utilisé le courant électrique pour permettre l'irrigation par des méthodes secondaires.

On peut dire, pour résumer, que les répercussions économiques de l'opération d'aménagement sont plus ou moins orientées par les interventions du gouvernement, à ces deux niveaux que sont la planification et l'administration. Les répercussions dépendent, quant à elles, des traditions, des croyances, des attitudes et des systèmes de valeurs, eux-mêmes en pleine évolution, et sont influencées par certains paramètres liés à l'essor de la culture et à l'impact de la science et de la technologie. Vu cette mosaïque de structures et d'éléments socio-économiques, il apparaît que le gouvernement et la société créent des conditions particulières d'environnement. Les influences, dans le temps et dans l'espace, de cet environnement sur la gestion du réseau ne doivent pas être négligées.

**Le gouvernement doit formuler des politiques**

Le processus socio-économique d'exploitation du réseau est, dans l'ensemble, celui schématiquement exposé à la figure 3. Ce schéma montre que, dans un régime politique démocratique, il appartient aux pouvoirs publics d'identifier les besoins de la société ou des groupes d'utilisateurs et de formuler un certain nombre d'orientations. Ce sont elles qui détermineront la manière dont les différents apports seront retransmis aux secteurs économiques (production et consommation). On comprend généralement parmi ces apports les capitaux, les informations (savoir-faire scientifique et technique), les services, les règlements, etc. Les produits de l'environnement social sont les besoins et exigences, les impôts, etc. L'utilisateur individuel

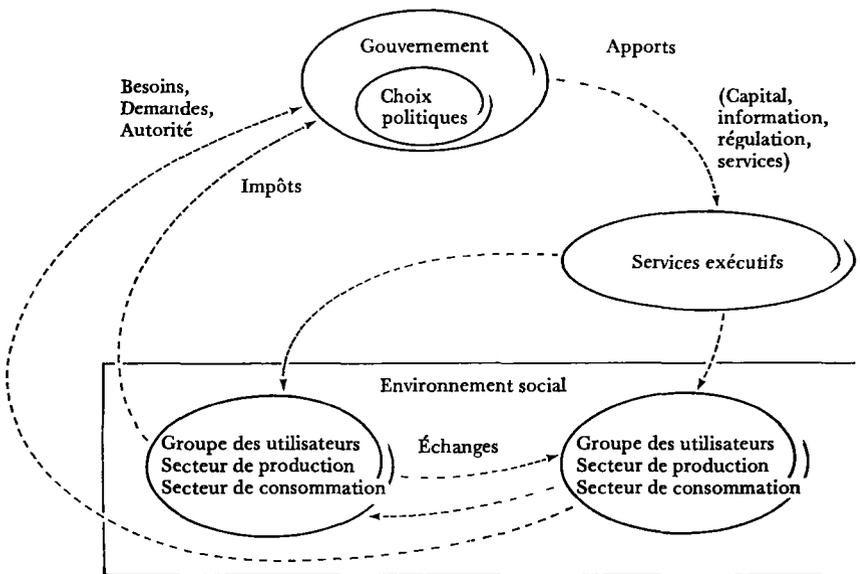


FIG. 3. Le processus socio-économique.

devrait avoir la possibilité de choisir de consacrer ses apports à telle ou telle fin de production et de consommation, compte tenu des indications qui sont données par les services chargés d'appliquer les politiques officielles et des interactions sociales (processus d'échange) qui se produisent à l'intérieur du groupe des utilisateurs.

#### *Départements ministériels intéressés*

Il est admis, depuis des milliers d'années, que c'est aux pouvoirs publics qu'il appartient de gérer les ressources en eau. En effet, l'ampleur des investissements nécessaires, la durabilité des aménagements, l'absence de coïncidence entre l'hydrographie ou l'hydrogéologie et la géographie politique, la nécessité d'assurer une répartition équitable des coûts sont autant de facteurs qui plaident en faveur du financement public des opérations d'aménagement des systèmes hydrographiques à réservoir. L'aménagement dont il est ici question a été réalisé par le gouvernement de l'État d'Orissa, qui en assure aussi l'exploitation et la gestion. Les départements ministériels qui participent à son exploitation et à sa gestion sont le Ministère de l'irrigation (pour la régularisation des crues, la conception, la construction et l'entretien des canaux et l'exploitation du réservoir), le Ministère de l'électricité (pour la production, le transport et la distribution du courant électrique), le Ministère de l'agriculture (pour la fourniture de moyens de production agricole aux zones irriguées et pour la conservation des sols), le Ministère de l'urbanisme et du développement rural (pour l'approvisionnement en eau potable) et le Ministère de l'industrie (pour la création de zones industrielles, là où les ressources en eau et en électricité fournies par l'aménagement le permettent).

#### *L'Assemblée législative fixe les tarifs*

L'organe politique ayant autorité réglementaire sur l'aménagement est l'Assemblée législative de l'État d'Orissa. C'est à elle qu'il appartient, par exemple, de fixer les tarifs de l'eau et de l'électricité distribuées aux usagers privés, ainsi que ceux de l'eau d'adduction publique. En période de sécheresse ou de crue, c'est elle qui indique à quels usages l'eau doit être réservée en priorité, ce qui, naturellement, infléchit quelque peu la gestion de l'aménagement. Bien que cet organe soit en théorie tenu de consulter les administrations intéressées, ses décisions ne sont pas toujours scientifiquement ou économiquement fondées. Les groupes de députés des deux zones agricoles irriguées ont naturellement tendance à se comporter en groupes de pression défendant leurs intérêts régionaux, et il arrive que l'exploitation de l'aménagement se ressente de leurs influences. Il n'existe, au niveau de l'État, aucun organe doté des pouvoirs de nature aussi bien politique qu'économique et administrative nécessaires pour faire une évaluation d'ensemble de l'exploitation du système, en minimiser les coûts et en maximiser les avantages et arbitrer entre les différents types d'utilisateurs et d'utilisations présents et futurs. On peut dire, pour résumer, qu'un organe de décision rationnel et objectif manque à la structure d'organisation du système. On en trouvera le schéma politico-administratif à la figure 4.

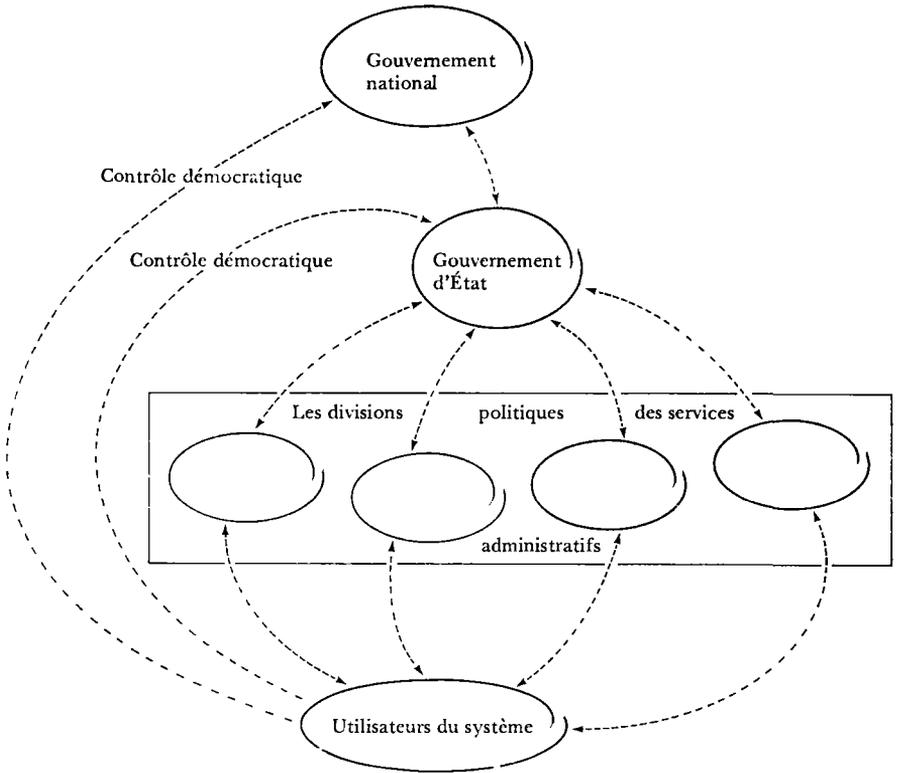


FIG. 4. L'organisation politico-administrative du système.

### Les groupes jouent des rôles antagonistes

Dans un système où les décisions reviennent aux pouvoirs publics, tel que celui qui nous occupe, on peut observer quelques conflits de comportement. Trois parties différentes sont en effet en présence, qui jouent un rôle différent dans la gestion du système. Tout d'abord, il y a les groupes d'utilisateurs qui sont, en définitive, ceux qui bénéficient des avantages apportés par le nouvel aménagement. Ensuite, il y a le gouvernement, auquel il appartient constitutionnellement de défendre l'intérêt général. Enfin, il y a les hauts fonctionnaires relevant des différentes administrations, qui sont chargés de formuler les principes directeurs et d'appliquer les programmes. Chacun de ces trois groupes obéit à des motivations différentes.

Pour les utilisateurs, ce qui importe, c'est d'obtenir le plus grand volume de services de la meilleure qualité possible, c'est aussi de pouvoir compter sur ces services et d'en disposer en temps utile ou, encore, c'est d'obtenir le plus possible de bien-être grâce à des avantages accrus. Les organes politiques, pour leur part, veulent conserver le pouvoir et, pour cela, tiennent à satisfaire l'intérêt général. Enfin, les gestionnaires veulent disposer d'un maximum d'autonomie, être autant que possible à l'abri des ingérences des milieux politiques et sociaux et bénéficier d'un apport continu de ressources leur occasionnant le moins de risques possible. De plus, le groupe des utilisateurs subit des pressions internes de la part des secteurs de la consomma-

tion et de la production. Quant au gouvernement, il peut être sensible aux exigences qu'expriment les utilisateurs soit par l'intermédiaire des *lobbies*, soit par d'autres formes de pression, soit aussi par le moyen des élections.

### *Le jeu des influences*

L'influence qu'un groupe exerce sur un autre groupe peut être plus ou moins considérable selon les époques. Ainsi, en période de crue ou de sécheresse, le jeu des influences tend à s'exacerber. Par ailleurs, l'équipe de gestion dont le rôle est d'appliquer la politique des pouvoirs publics ou d'assurer une coordination entre les deux autres groupes cherche à arracher au gouvernement plus d'autonomie et de liberté de décision, et tend donc tout naturellement à établir sa légitimité et son autorité par rapport au groupe des utilisateurs. Ces conflits de rôle ne doivent pas être ignorés : ils ont une incidence très réelle sur les comportements et il faut donc en tenir compte pour la gestion du système.

Il est bien naturel, par ailleurs, que, dans le cas d'un aménagement hydraulique polyvalent à réservoir, des demandes antagoniques d'affectation des ressources en eau à différents usages se fassent jour. Il est en effet très souvent impossible de chiffrer directement — en argent ou en se servant de toute autre unité de mesure — les avantages à attendre de telle ou telle utilisation. Par exemple, dans l'aménagement dont nous parlons, les avantages retirés de la production d'électricité n'ont presque aucun rapport avec les recettes tirées de la vente de courant électrique. Dans de nombreuses régions, fournir l'électricité à des tarifs subventionnés est une nécessité si l'on veut que des utilisateurs encore peu évolués prennent conscience des possibilités de croissance et d'amélioration du niveau de vie que l'électricité apporte avec elle. On peut citer, à titre d'exemple, la vente d'électricité aux collectivités rurales pour la consommation domestique, l'emploi de l'électricité pour l'irrigation secondaire dans des régions extrêmement attardées et chroniquement victimes de la sécheresse, les utilisations publiques de l'électricité dans des collectivités non urbaines, etc. En pareils cas, le rapport financier est certes fort maigre, mais les acquis sur d'autres plans — on s'accorde à le dire — sont considérables. Cela dit, il n'en reste pas moins difficile de trouver des méthodes requises pour mesurer de tels acquis par rapport à ceux qui résultent d'autres usages de l'électricité, pour la production industrielle par exemple.

### *Encourager l'irrigation*

Le même raisonnement s'applique à l'irrigation : la population de la zone située en amont du réservoir doit être vivement encouragée à pratiquer l'agriculture irriguée, à réensemencer ses champs en vue d'une seconde récolte annuelle et à acquérir les biens d'équipement accessoires nécessaires pour un emploi rationnel de l'irrigation. Dans la zone située en aval, au contraire, les mesures actives d'encouragement ne sont plus nécessaires. Le conflit fondamental qui oppose les deux zones en matière d'affectation de ressources est donc accentué par l'hétérogénéité des conditions socio-économiques et l'imprécision des renseignements qu'on possède en l'absence de tout dispositif de mesure des services offerts.

## Conflits nés de la géographie

La disposition géographique de l'aménagement introduit, par ailleurs, certains éléments de conflit dans son exploitation matérielle. En effet, ainsi que le montre la figure 2, si l'irrigation et la production d'électricité sont des activités complémentaires en aval du réservoir, elles sont concurrentes en amont. Ainsi, dans la zone située en aval, un petit réservoir retient l'eau déjà utilisée pour la production d'électricité par les deux centrales et l'envoi dans les canaux d'irrigation, tandis qu'en amont, l'eau d'irrigation est directement tirée du réservoir et ne peut donc servir à aucune autre activité profitable.

Un autre conflit entre irrigation et production d'électricité tient à la structure saisonnière de la demande d'eau d'irrigation. On peut constater que, de juillet à octobre, il n'y a pas lieu de tenir compte, pour la production d'électricité, des récoltes de mousson (*khariff*). En revanche, les prélèvements d'eau effectués dans le réservoir principal pour permettre, en amont, l'irrigation des récoltes d'hiver de novembre à mai et celle des récoltes de mousson en juin diminuent les hauteurs de chute aux turbines et la quantité d'eau utilisable pour la production d'électricité et l'irrigation dans la zone située en aval du réservoir.

Il y a, par ailleurs, généralement conflit entre les besoins de l'irrigation dans les zones agricoles irriguées et ceux de la navigation et de l'adduction urbaine dans les communautés situées le long du cours d'eau principal. Il y a enfin, bien naturellement, quelques conflits d'intérêt entre les utilisateurs cultivant les terres déjà irriguées et les utilisateurs qui veulent mettre de nouvelles terres en valeur.

## Difficultés de gestion découlant de ces conflits

Ces conflits, dont on pourrait dire qu'ils tiennent, d'une part, aux structures et, d'autre part, aux comportements, sont à l'origine d'un certain nombre de difficultés dans le processus de gestion. Par exemple, dans le cadre de ce processus, les pouvoirs publics émettent en direction des utilisateurs des orientations et des décisions et reçoivent des informations. Or les pressions qu'exercent les utilisateurs sur les pouvoirs publics en formulant des demandes reviennent en fait à leur fournir une sorte d'information incontrôlée, laquelle, étant à l'origine d'incertitudes, rend la prise de décision difficile.

La principale source d'incertitudes concerne le fonctionnement du système : elle tient au caractère totalement imprévisible du débit entrant dans le réservoir, dans les affluents situés en aval et dans le canal principal pendant les mois de la mousson. On a bien essayé, en appliquant de nombreuses méthodes, soit de prévoir ces débits entrants de façon déterministe, soit de les ramener à un schéma probabiliste. On s'est aussi efforcé de définir des débits par synthèse, en simulant des données statistiquement semblables aux relevés de débit passés. On ne peut pas dire qu'aucune de ces méthodes ait vraiment permis de prévoir correctement ce que seraient les débits entrants de l'année suivante. Aussi, pendant la saison de remplissage (de juin à septembre), est-il toujours aussi difficile, pour le directeur du réservoir, de connaître le volume d'eau attendu, de décider combien il doit en retenir et combien il peut en libérer sans provoquer de crue.

### *Nécessité absolue de la régularisation des crues*

En règle générale, et s'il est vrai qu'il importe d'éviter complètement les inondations pendant toute la durée de la mousson, deux impératifs contradictoires s'opposent : la nécessité de maximiser le volume d'eau emmagasinée et celle de prévoir une revanche aussi haute que possible dans l'éventualité de débits entrants plus importants que prévu. Tout serait plus simple si l'on pouvait laisser, en aval, les eaux monter jusqu'à un certain niveau, quitte à évaluer les dommages provoqués par l'inondation au moyen de quelque unité de mesure appropriée. On pourrait alors faire figurer les avantages résultant de la maîtrise des crues parmi l'ensemble des avantages à attendre du système. Dans le cas qui nous occupe, toutefois, la région située en aval a une densité de population si forte qu'il faut empêcher les inondations à tout prix. A l'origine, d'ailleurs, cet aménagement avait précisément pour objet la défense contre les crues. Ainsi, le très haut degré d'incertitude affectant les débits entrants en période de mousson et la nécessité absolue de prévenir les crues se conjuguent pour garder toute son acuité au conflit entre les impératifs de retenue et les impératifs de revanche, et c'est là un conflit majeur qui doit être résolu.

### **Les entraves à la planification**

Lorsqu'on veut planifier la gestion d'un aménagement à réservoir, on se heurte généralement à des contraintes institutionnelles, environnementales et juridiques. Dans les pays en développement, il s'y ajoute des contraintes financières qui peuvent être rédhitoires. De tels obstacles ne sont cependant pas insurmontables et il est possible de trouver une politique d'exploitation et de gestion du système qui lui permette de répondre à la fois aux besoins à long terme et aux besoins à court terme — qui ne sont pas identiques en tous temps — de la zone desservie.

Il ressort de nos observations que, dans une économie en développement, un aménagement hydraulique à réservoir de caractère public doit passer par trois phases différentes. Pendant la première phase, les services fournis devront inévitablement être subventionnés, du moins en partie, ce qui constituera une incitation à la croissance pour la région. Pendant une deuxième phase, l'exploitation commencera à devenir rentable. Enfin, à un troisième stade, auquel on parviendra plus ou moins rapidement selon l'état de développement de la région, les installations commenceront à procurer des bénéfices, qui pourront être affectés au lancement d'autres projets.

### *Nécessité d'une politique de gestion dynamique*

Ce qui précède montre que, dans un pays en développement, le soutien financier et humain qu'une opération d'aménagement hydraulique polyvalent à réservoir peut recueillir dans la région est, au départ, assez faible. Après la mise en route, les apports de capitaux et les modes d'utilisation tendront à s'améliorer progressivement. En pareil cas, les méthodes classiques empruntées aux sciences de la gestion ne seront pas appropriées. La gestion devra, au contraire, obéir à une politique dynamique et suffisamment souple pour pouvoir évoluer au même rythme que le milieu environnant.

*Une tâche difficile : résoudre les conflits*

Résoudre les conflits et dissiper les incertitudes sont des tâches malaisées. Qui plus est, le but d'une politique de gestion doit toujours, une fois déterminées les modalités d'allocation de ressources, compte tenu des contraintes identifiées, être de rechercher le rendement maximal. Par ailleurs, il se pose, dans un pays en développement, des problèmes d'ordre méthodologique du fait que les concepts empruntés aux théories économiques classiques de la prise de décisions tels que « la capacité contributive », le « consentement à payer » ou « la productivité en valeur » y sont difficiles à appréhender ou à traduire dans les faits. Les choses se compliquent encore lorsque des catastrophes naturelles surviennent et que la région touchée exige du pouvoir politique une redistribution arbitraire des ressources sans se soucier aucunement des besoins de l'économie générale, ni inscrire ses revendications dans une quelconque perspective à long terme. Ce qu'il faut donc, c'est une structure de décision capable d'assurer un minimum d'approvisionnement en eau et un certain progrès dans la voie de développement en procédant aux arbitrages nécessaires entre les différentes utilisations dont la valeur et les avantages respectifs sont variables dans le temps.

*Nécessité d'interventions délibérées*

Dans le cas d'un système d'aménagement hydraulique tel que celui dont nous parlons, la politique de gestion la plus rationnelle est, à notre avis, une politique qui tendrait à parvenir — non sans à-coups passagers, certes — à un état, défini comme « cible », de quasi-équilibre entre le système et la réalité environnante ; des interventions correctives délibérées et continues seront nécessaires pour l'assurer, comme pour éviter l'épuisement des ressources en eau. Une telle politique garantirait, par voie d'obligation contractuelle et pour chaque utilisation, un approvisionnement minimal sur une courte période ; elle veillerait à ce que l'évolution de la configuration des ressources et celle des utilisations permettent une amélioration progressive des minimums garantis ; elle serait enfin assez souple pour que l'état défini comme « cible » puisse être modifié lorsque l'environnement l'exige.

**La gestion s'appuie sur l'information**

Dans le cas qui nous occupe, le travail de gestion consiste, nous l'avons vu, à formuler une politique, c'est-à-dire à prendre tout simplement un ensemble de décisions. On s'appuie, pour ce faire, sur l'information recueillie auprès de différentes sources. Une partie, par exemple, est fournie par le processus même de gestion ; les demandes des utilisateurs en étalent une autre partie aux yeux des pouvoirs publics et des gestionnaires. Les informations qui ont leur origine dans le processus même de gestion sont des informations contrôlées, correspondant à certaines contraintes d'organisation ; en revanche, l'information qu'apportent les demandes est une forme d'information incontrôlée. Dans des situations de conflit et d'incertitude, il peut se révéler nécessaire de structurer les processus d'acquisition de l'information par des recherches et des études et en mettant en place des dispositifs de participation et de coordination. Les recherches et les études indiqueront les voies à suivre pour identifier les problèmes et aideront à prévoir l'avenir, au moins approximativement. Quant à la participation et à la coordination, elles

devraient permettre de structurer les contacts entre le grand public et l'équipe de gestion du réservoir. On peut donc avancer qu'un modèle de gestion concernant un aménagement hydraulique polyvalent à réservoir doit être une représentation des flux d'information se rapportant au comportement, aux phénomènes et aux valeurs, ainsi qu'à leurs interrelations dans le contexte opérationnel dans lequel cette gestion doit être assurée.

### *Structurer le processus d'information*

Une gestion ne saurait être rationnelle sans un processus d'acquisition des informations structuré. A cet effet, on distinguera trois catégories différentes d'information : la rétro-information (*feed-back*), l'information « anticipative » (*feed-forward*) et l'information interne fournie par le système lui-même (*feed-within*). C'est de la première que relèvent les informations les plus courantes, qui concernent les résultats obtenus, les niveaux de service, l'usage qui en est fait par le public et l'efficacité du système.

La deuxième catégorie regroupe des informations fondées sur la finalité du système. Bertalanffy<sup>1</sup> a décrit cette finalité ou adéquation à un objectif comme étant le comportement déterminé par la prescience de l'objectif, tandis que Goody<sup>2</sup> parle à ce sujet d'une sorte de « mémoire anticipative » qui comporte l'aptitude à se représenter des situations escomptées. Le sémanticien I. A. Richards<sup>3</sup> voit dans cette information anticipative la réciproque de la rétro-information. A son avis, la première donne lieu à une attente que la rétro-information vient confirmer ou infirmer. L'information anticipative pourra être très utile à l'équipe de gestion lorsqu'elle voudra établir une planification prospective et/ou tactique. Ce mécanisme d'information anticipative peut être mis en place grâce à des études et à des recherches et peut être considéré comme un dispositif de prévision permettant de déterminer à l'avance le volume des éléments injectés dans le système.

### **Importance capitale de l'information interne**

Du point de vue de la prise des décisions, toutefois, ce sont les informations d'origine interne — et leur traduction en termes de gestion — qui ont le plus d'importance. Dans le cas d'un aménagement à réservoir, la gestion des caractéristiques opérationnelles internes est chose très complexe. D'ailleurs, l'aménagement que nous avons pris pour exemple se heurte, à l'heure actuelle, en raison de sa polyvalence, à de nombreuses difficultés opérationnelles d'ordre interne, qui tiennent à l'insuffisance des données disponibles et à l'absence de connaissance explicite du rapport, pour ses différents composants, entre les éléments injectés et les résultats obtenus.

Pour rationaliser le processus opérationnel interne de la gestion, il faut faire appel ici à un autre type d'acquisition de l'information que nous appellerons « l'acquisition d'information interne ». L'idée en repose sur l'observation de Weiner<sup>4</sup> selon laquelle l'homme et l'animal ont un sens kinesthésique par lequel ils enregistrent la position et la tension de leurs différents muscles. Les aménagements hydrauliques à réservoir étant avant tout des systèmes susceptibles d'adaptation, il nous semble qu'on peut évoquer, à leur propos, un tel sens kinesthésique. Dans l'acception que nous lui donnons, ce sens kinesthésique ne concerne pas les résultats obtenus grâce à l'aménagement, mais la régulation interne de celui-ci. Nous nous fondons pour dire cela sur les constatations de Brown<sup>5</sup> qui affirme que l'information

technique ou opérationnelle est principalement recueillie à des fins de contrôle organisationnel et constitue donc la rétro-information indispensable au fonctionnement des petits sous-systèmes en boucle fermée à l'intérieur du système général. S'il était possible de donner aux activités d'information une présentation nouvelle, programmable, le processus interne de prise de décision se trouverait facilité. Il faudrait pour cela programmer et régulariser le flux des ressources entre les différents sous-systèmes composant l'ensemble. Il serait tenu compte dans le cadre du processus d'information interne des interrelations existant entre les apports, les moyens de production intermédiaires et les résultats, ce qui contribuerait à la résolution des conflits de comportement. De plus, le flux d'information interne entraînerait une réduction du déséquilibre entre les différentes composantes de l'ensemble, en permettant des échanges par l'intermédiaire des flux d'information.

### Conclusions

Nous avons constaté que la gestion d'un réservoir posait, à plusieurs niveaux, des problèmes qui tiennent principalement aux risques, aux conflits et à la pluralité des intérêts qu'il fait apparaître. Dans un système aussi complexe, la prise de décision semble devoir être un processus interactif, par où les décisions viennent résoudre les conflits et dissiper les incertitudes tant que la situation l'impose. Les décideurs, de surcroît, n'ont guère d'autre appui que leur propre appréhension des problèmes et leur expérience pour trouver des solutions de compromis. A notre avis, le meilleur moyen de parvenir à résoudre des problèmes aux dimensions et aux aspects si divers est d'adopter un processus rationnel de gestion.

Nous vivons dans une société rationaliste dans laquelle le comportement rationnel est prisé. Toutefois, dans un État pluraliste authentiquement démocratique, la rationalité ne doit pas être seulement le fait du gouvernement ou des gestionnaires ; elle doit être le fait aussi des entreprises, des communautés visées et de la société. Être rationnel, pour un système hydrographique, implique la recherche du passage d'un état pas très satisfaisant à un état plus satisfaisant. Il faut donc voir dans la rationalité le tissu de mécanismes de synthèse qui réunit en un tout les unités du système et non pas seulement le critère auquel les gestionnaires ou le gouvernement obéissent pour en déterminer l'orientation. Il est intéressant de comparer le processus rationnel à un tissu de mécanismes qui permet d'apprendre à tous les niveaux et d'avoir, en différents points du système et grâce aux dispositifs d'acquisition de l'information, communication de l'expérience accumulée, le but recherché étant de formuler des options et des alternatives, de passer au crible de l'analyse les différentes possibilités offertes et d'élaborer et appliquer des politiques.

Le directeur d'exploitation d'un réservoir ne doit intervenir qu'à titre de coordonnateur dans le jeu des mécanismes assurant la rationalité de l'aménagement, de manière à exercer une influence décisive sur le processus de gestion rationnelle. L'évaluation d'un tel processus est, en elle-même, une technique qui exige un énorme volume de connaissances quant aux méthodes de gestion, à la mission à accomplir et à l'environnement dans lequel ce processus se situera. Ainsi ne peut-on pas, lorsqu'on formule la politique de gestion à appliquer dans le cas d'un service public fonctionnant dans une économie en développement, construire des modèles d'analyse plus globaux : les obstacles auxquels on se heurte sur bien des plans l'interdisent. Mais il

faut bien, à un moment donné, trouver un compromis entre ce qu'on sait et la nécessité d'agir. Quoi qu'il en soit, une utilisation correcte des dispositifs d'information et une systématisation de l'environnement structurel dans lequel l'aménagement fonctionnera devraient permettre d'en améliorer la rationalité.

Les points de vue peu orthodoxes concernant la gestion des réservoirs que nous venons d'exposer ne sont ni des méthodes ni des solutions ; ce sont des principes sur lesquels on peut se guider pour envisager les questions les plus épineuses que soulève la gestion des aménagements hydrauliques polyvalents à réservoir dans une économie sous-développée. En pratique, évidemment, il n'est pas possible de réduire la gestion de tels aménagements à un ensemble de calculs simples, puisqu'il s'agit, par définition, d'un ensemble d'activités différentes et complexes qui échappe à une explication totalement logique. La gestion, entendue au sens large, fait intervenir de nombreux éléments tels que la créativité, la persuasion, la conviction, l'accord, l'autorité, les croyances et les désirs, etc., qui ont une influence importante sur les décisions effectivement prises. Tant que les hommes auront, en définitive, la haute main sur les systèmes, la gestion restera, elle aussi, essentiellement humaine. Elle le sera, à notre avis, s'agissant d'un système d'aménagement hydraulique.

De même qu'une carte de géographie peut donner une idée des relations existant entre différents lieux et guider un voyageur, de même, une copie du système nous paraît indispensable pour la gestion du réservoir ; elle expliquerait en effet les problèmes en jeu et aiderait ceux qui ont pour tâche de les résoudre à réfléchir aux différentes voies qui s'offrent à eux. On pourrait dire que la politique de gestion décrite dans le présent article, qui tend vers un quasi-équilibre et s'appuie sur les processus d'information qu'on sait, constitue une telle carte. Elle fait apparaître clairement tous les traits du système et présente en détail les interrelations et conflits entre ses différents éléments. ■

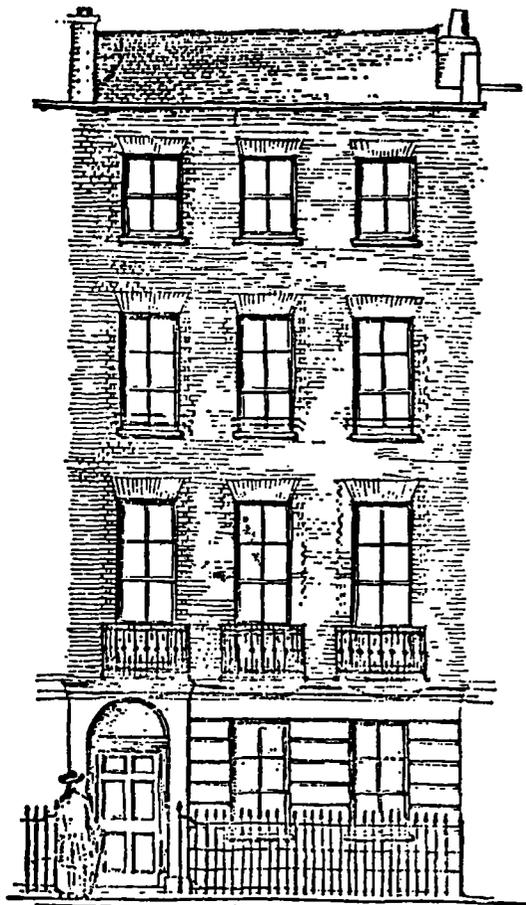
#### Notes

1. L. Bertalanffy, *General systems theory*, New York, George Bazeller, 1968.
2. W. Goody, « Two directions of memory », *Journal of individual psychology*, vol. 15, 1959.
3. I. A. Richards, « The secret of "feed forward" », *Saturday review*, 1968.
4. N. Weiner, « The human use of human beings », *Cybernetics and society*, New York, Anchor, 1954.
5. W. B. Brown, « Systems, boundaries and information flow », *Academy of management journal*, vol. 9, 1966.

---

# Science & Public & Policy

THE JOURNAL OF THE  
SCIENCE POLICY FOUNDATION



## SCIENCE & PUBLIC POLICY

- provides information on national policies for science and technology and their effects
- analyzes the social and political environments
- examines the role of science and technology in government, and industry
- explores various types of public participation and their influences on national and international policies

SCIENCE & PUBLIC POLICY brings together research relevant to policy making on development, agriculture, energy, public administration, health service, and R and D management.

For further information contact  
Jan Holloway

IPC Science and Technology Press  
Limited, P.O. Box 63, Westbury House,  
Bury Street, Guildford, Surrey,  
England GU2 5BH

Telephone: 0483-31261  
Telex 859556 SCITEC G

---

*La construction de barrages destinés à arrêter l'écoulement des eaux des fleuves ou autres cours d'eau en vue de créer des bassins de retenue est une pratique vieille de cinq mille ans. Cette retenue des eaux modifie de fond en comble l'écologie fluviale, de sorte qu'une bonne gestion des bassins de retenue exige une connaissance approfondie aussi bien des cours d'eau que des lacs. La création de ces réservoirs artificiels offre des avantages, mais a aussi parfois des effets défavorables, liés notamment à la réinstallation de populations humaines.*

---

## Réservoirs artificiels

Letitia E. Obeng

---

*Letitia E. Obeng (de nationalité ghanéenne) a obtenu, en 1964, un doctorat à la Faculté de médecine tropicale de l'Université de Liverpool, après avoir été diplômée de la Achimota School (Ghana). Après avoir enseigné durant plusieurs années à la Faculté des sciences et de biologie de l'Université de Kumasi (Ghana), l'auteur a été chercheur à temps complet à l'Institut de biologie aquatique du Ghana, dont elle est devenue directeur. Depuis 1974, elle est membre du Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE). Son adresse actuelle est la suivante : Directeur et représentant régional, Bureau régional pour l'Afrique, Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE), P.O. Box 30552, Nairobi (Kenya).*

En plusieurs millions d'années, l'homme n'a jamais vraiment rompu ses liens ancestraux avec l'eau. De nos jours encore, pour assurer dans de bonnes conditions de sécurité la reproduction de l'espèce, l'embryon humain est incubé par la femelle dans une poche aqueuse ingénieusement aménagée et bien protégée. D'autre part, c'est en milieu aqueux que les processus physiologiques qui maintiennent l'être humain en vie fonctionnent au mieux et l'homme doit consommer de l'eau en abondance.

L'eau est absolument indispensable à la vie humaine et rien ne peut la remplacer.

Lorsque l'homme, il y a des millénaires, cessa d'être un chasseur nomade pour se fixer et cultiver la terre, le choix qu'il fit de certains lieux dut être fortement influencé par les possibilités d'un approvisionnement en eau suffisant et aisément accessible pour lui-même, ses animaux domestiques et ses cultures. Et, en prévision de ses besoins, l'homme s'est toujours efforcé de mettre en réserve une certaine quantité de cette eau, source de vie.

### **Grandes retenues**

Barrer le cours des fleuves et rivières pour retenir d'importantes quantités d'eau a toujours paru le moyen le plus évident de constituer des réserves sûres. Il y a quelque cinq mille ans, le premier barrage en enrochement, de 12 mètres de haut, fut construit à Sadd el Kafara en Égypte. Depuis lors, on a construit des barrages dans le monde entier et retenu l'eau dans des bassins de toutes dimensions. Ces réservoirs artificiels sont de très utiles outils de développement qui offrent de multiples avantages ; mais ils peuvent aussi avoir certains effets indésirables et préjudiciables au développement en général.

Lorsqu'on étudie les avantages de ces réservoirs artificiels, il convient d'avoir présentes à l'esprit trois considérations importantes.

Premièrement, les masses d'eau, que ce soit celles des cours d'eau ou celles des lacs et des étangs, sont des systèmes vivants, formés de plantes et d'animaux vivant en association étroite et complexe dans un habitat d'une constitution chimique et physique spécifique leur permettant de subsister.

Deuxièmement, les fleuves, rivières et autres eaux courantes ont des caractéristiques écologiques propres qui les distinguent nettement, à certains égards, des masses d'eau stagnantes telles que lacs et étangs.

Troisièmement, lorsqu'un obstacle est placé en travers du lit d'un cours d'eau en vue d'en ralentir ou d'en arrêter l'écoulement et d'en retenir ainsi les eaux, l'écologie du cours d'eau s'en trouve violemment perturbée. Les conditions tant physiques que chimiques sont bouleversées et les facteurs biologiques gravement affectés. Au milieu « lotique » (eau en mouvement actif) qui existait jusque-là ne viennent pas immédiatement se substituer les caractéristiques typiques des lacs, étangs et autres masses d'eau immobiles. Les bouleversements physiques et écologiques sont d'une telle ampleur et d'une telle complexité qu'ils ont de profondes répercussions non seulement au sein même de la nouvelle masse d'eau, mais bien au-delà de ses limites.

Cet impact complexe des barrages sur l'environnement est quelque chose de prévisible. Mais la façon dont il est anticipé, prévenu et géré détermine la valeur globale du barrage et les avantages qui en résulteront sur le plan du développement. En matière de construction de barrages, il importe avant tout d'avoir une bonne compréhension des cours d'eau et des lacs.

## Distinction entre cours d'eau et lacs

On peut distinguer les cours d'eau des lacs simplement par les caractéristiques de leur écoulement (notamment la vitesse du courant), qui présentent de nettes différences. Dans les cours d'eau, la turbulence du mouvement de l'eau et le contact qui en résulte avec l'atmosphère font que les eaux sont bien aérées ; là où l'eau est peu profonde l'oxygène peut se trouver présent sur toute la hauteur de la colonne d'eau. L'eau courante érode non seulement son lit, mais aussi les autres couches sous-jacentes avec lesquelles elle entre en contact, ce qui modifie ses propriétés chimiques, en particulier son pH. Pour la même raison, l'eau des cours d'eau tend à être plus trouble que l'eau des lacs, notamment quand le cours d'eau est en crue (certaines portions du cours de fleuves africains, notamment de la Volta et du Nil, ont été nommées d'après la couleur de leurs eaux troubles) ; or l'effet de la turbidité sur la pénétration de la lumière solaire détermine dans une large mesure l'abondance et la répartition des plantes aquatiques dans l'eau courante. La vitesse du courant influe sur le profil du lit de la rivière, ainsi que sur les dépôts de limon et d'autres matières organiques. Les caractéristiques de l'écoulement exercent également une influence sur la nature et l'étendue des micro-habitats et, indirectement, sur le type et la répartition de la faune. Les espèces animales qui peuvent vivre dans les eaux libres sont diverses, selon qu'elles nagent avec ou contre le courant, se fixent solidement sur des objets compacts, en général là où le courant leur apporte des particules d'aliments, se nourrissent de la végétation tapissant les roches, protégées par divers systèmes de fixation, ou restent dans les micro-habitats tranquilles éloignés du courant, sur le lit de la rivière parmi les plantes ou dans les régions paisibles de rives en pente douce. Parmi la grande variété d'animaux aquatiques peuplant les cours d'eau, on trouve des poissons, des mollusques, des invertébrés et, plus particulièrement, des insectes et des vers terrestres vivant soit à l'état libre, soit sous diverses formes larvaires. Ces animaux ont élaboré divers mécanismes de nutrition, de respiration et de reproduction adaptés au régime des eaux courantes.

La flore, dans les cours d'eau, est assez limitée, le plancton étant pratiquement absent des eaux libres. Des algues et des mousses s'accrochent aux roches et aux objets durs, mais les plantes aquatiques doivent, pour résister au courant, être solidement enracinées ou fixées. Certaines flottent avec le courant, ou choisissent des habitats où le courant est très faible.

Les cours d'eau existent depuis des temps très anciens et sont parties intégrantes du profil de la surface terrestre. Les plantes et les animaux qui y vivent se sont depuis longtemps adaptés aux conditions qui y règnent.

## Les lacs offrent un habitat à la flore et à la faune

Du point de vue géologique, les lacs sont des masses d'eau de caractère transitoire et finissent par se combler et disparaître. Un lac peut être oligotrophe au début de son existence, selon son emplacement, l'importance des eaux affluentes et des précipitations et d'autres facteurs analogues. A mesure qu'il reçoit des éléments nutritifs et des matières organiques et qu'il devient progressivement eutrophe, son volume se réduit du fait de l'invasion successive de toute sorte de plantes.

L'absence de courants ou de mouvement rapide de l'eau se révèle avoir une influence sur la quantité de gaz et de sels dissous. La concentration de

ces derniers varie le plus souvent en fonction de la profondeur. La température est généralement plus élevée et la pénétration de la lumière plus grande dans l'épilimnion supérieur, l'une comme l'autre diminuant fortement dans les eaux profondes. Ces tendances distributives contribuent à la stratification, qui est une caractéristique commune des lacs, et expliquent aussi, d'une manière générale, que, dans le cas du lac Tanganyika, par exemple, les substances nutritives soient bloquées dans les grands fonds obscurs. La distribution de la microflore comme de la microfaune des lacs est concentrée pour l'essentiel dans l'épilimnion (la couche d'eau du lac qui est soumise à l'action du vent), l'une et l'autre étant toutefois capables de migration. Dans les eaux stationnaires des lacs, la présence d'invertébrés est liée à celle d'objets solides sur lesquels ils puissent se fixer et se limite aux zones littorales peu profondes où l'on trouve beaucoup de larves d'insectes terrestres à diverses phases de leur développement. Parmi les vertébrés, les poissons, étant capables de nager, peuvent se déplacer dans les eaux libres, mais c'est le plus souvent dans les zones littorales qu'ils trouvent leur nourriture et viennent frayer.

Les lacs offrent un habitat stable aux plantes qui, compte tenu de conditions diverses, notamment de l'état d'eutrophisation du lac, peuvent être abondantes en nombre et en variété. La végétation flottante ou immergée est aussi vivace que la végétation émergente. Comme dans le cas de la faune et de la flore des eaux courantes, ces plantes et animaux lacustres se sont adaptés à leur milieu particulier, en l'occurrence le milieu « lentique » d'eaux stationnaires.

### **Le barrage crée une nouvelle masse d'eau**

Lorsqu'un barrage est construit en travers d'un fleuve dont il immobilise le cours, retenant ainsi d'importants volumes d'eau, l'opération bouleverse non seulement les caractéristiques physiques et chimiques du milieu aquatique, mais aussi les données biologiques et la vie des habitants tant à l'intérieur qu'à l'extérieur du bassin fluvial.

La nouvelle masse d'eau formée acquiert un caractère nettement différent de celui du cours d'eau d'origine. Pendant un certain temps le ralentissement de l'écoulement, l'accroissement de la profondeur des eaux et le pourrissement de la végétation submergée viennent contrecarrer l'action de l'oxygène et des autres gaz dissous, produisant des effets immédiatement perceptibles sur une partie de la faune. Ces remarques s'appuient sur des observations faites lors de la construction de grands barrages africains<sup>1</sup>. C'est ainsi que si les roches auxquelles elles étaient fixées où d'autres habitats se trouvent submergés à de grandes profondeurs, et qu'aucun courant rapide ne leur fournisse de particules de nourriture et de l'oxygène en quantité suffisante, les larves de *Simulium damnosum* périssent généralement et disparaissent des bassins de retenue. De même, les chironomidés vivant dans les fonds et les espèces proprement fluviales d'éphéméroptères, de coléoptères, d'odonates et d'autres invertébrés analogues sont détruits, encore qu'ils puissent réapparaître ultérieurement dans les zones littorales. Quant aux poissons, seuls survivent ceux qui peuvent gagner les affluents de la rivière sur laquelle est construit le barrage ou s'adapter à la vie en eaux calmes.

### Les eaux affluentes apportent des éléments nutritifs

D'autre part, les eaux affluentes apportent d'abondants éléments nutritifs dissous, fait qui, venant s'ajouter à la forte augmentation de la masse d'eau, favorise la croissance explosive de certaines espèces animales et végétales. Pendant la période initiale de confusion, l'accroissement de la turbidité a des effets défavorables pour la microflore et la microfaune. Mais, à mesure que le limon et les matières en suspension se déposent, la pénétration de la lumière s'améliore et atteint souvent le fond des zones peu profondes, de sorte que la microfaune se remet à prospérer. De leur côté, les algues, aussi bien que les plantes aquatiques supérieures, qui ne s'adaptent jamais vraiment à l'environnement lotique des cours d'eau croissent en abondance dans les lacs de barrage.

On a observé, dans plusieurs de ces lacs, une prolifération d'algues bleu-vert, en général des *Microcystis*, ainsi que de *Pistia stratiotes* (laitue d'eau), d'*Eichhornia crassipes* (jacinthe d'eau), de *Salvinia auriculata* (fougère d'eau), de plantes de la famille du *Ceratophyllum* et de nombreuses autres plantes aquatiques qui sont adaptées à la vie en eaux calmes. De nombreux invertébrés aquatiques, notamment des mollusques et des formes larvaires d'insectes terrestres, ont trouvé un habitat favorable parmi ces plantes, qui offrent aussi un refuge aux jeunes poissons.

En revanche, l'accroissement de la masse d'eau chasse souvent certains poissons de leur micro-habitat et peut causer la mort de ceux dont l'appareil respiratoire s'est détérioré. Avec le temps, néanmoins, les poissons herbivores et ceux qui se nourrissent de détritus en particulier (par exemple, la famille des *Tilapia* et les clupéidés) croissent en taille et en nombre. Plus tard, les poissons carnivores, notamment le *Lates niloticus*, s'adaptent au milieu et, pendant un certain temps, la production globale de poisson dépasse de loin ce qu'avait pu fournir la rivière mère dans le passé.

Le caractère indéterminé du barrage persiste pendant un laps de temps considérable, ce délai étant nécessaire pour qu'un tri s'opère entre les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques et que des rapports et des équilibres nouveaux s'établissent. Et, cependant, à bien des égards, le bassin de retenue reste différent d'un lac naturel. Par exemple, la stratification permanente, typique des lacs naturels, n'est pas encore vraiment réalisée dans les lacs des grands barrages tropicaux africains, encore que, selon des rapports récents, le lac Tanganyika en soit arrivé à ce stade<sup>2</sup>. Là où l'on a pu observer une stratification, celle-ci s'est révélée être assez éphémère, sans doute sous l'effet des vagues et du vent qui tendent à mélanger les eaux.

Les changements écologiques que nous venons de décrire se produisent chaque fois que des écosystèmes d'eau courante sont modifiés, quelle que soit la dimension du réservoir construit. Partout dans le monde, pays en développement compris, des millions de fleuves et de petites rivières ont été barrés pour fournir de l'eau à des fins diverses. Les changements résultant de petites retenues ne sauraient bien entendu se comparer, quant à leur complexité et leur impact, avec ceux causés par les grands barrages ; il convient néanmoins de s'y préparer. Selon le mode d'association que la population établit avec un petit barrage, celui-ci peut aisément devenir un lieu de transmission active de la schistosomiase et d'autres maladies liées à l'eau s'il est situé dans une zone d'endémie.

## Avantages... et inconvénients

La construction d'un barrage peut avoir des avantages directs pour la population. Elle assure, notamment, l'abondance de l'approvisionnement en eau pour les usages domestiques, l'industrie et l'agriculture, améliore généralement la pêche, permet une production satisfaisante d'électricité et offre la possibilité d'aménager des installations de loisirs et des transports par voie d'eau.

L'essor de la pêche découle directement des modifications écologiques et, si l'accroissement de la production de poisson est bien géré, des avantages économiques peuvent en résulter. Au maximum de la production du lac Volta, le nombre des pêcheurs a atteint, estime-t-on, 12 500 et les prises 60 000 tonnes. En réalité, cependant, les populations réinstallées se composent généralement d'agriculteurs à qui il faut donner une formation intensive pour leur permettre de soutenir avec succès la concurrence des pêcheurs migrants.

Du côté négatif, on peut mentionner l'accroissement éventuel de l'activité sismique dans la zone contiguë à un vaste bassin, en raison de la pression d'une forte masse d'eau. D'autre part, il est prouvé que l'hydrologie de la région se trouve modifiée, mais l'incidence directe de l'accumulation d'eau sur le climat local et régional n'a pas été établie de façon concluante. Les répercussions majeures, qui soulèvent les problèmes de loin les plus graves, ont trait au sort des populations chassées de leurs foyers par la montée des eaux et aux destructions de biens.

### *Menaces pour la santé publique*

La réinstallation de personnes déplacées dans une zone nouvelle présente toujours des dangers pour la santé publique, car ces personnes peuvent ne pas offrir une résistance suffisante à certaines souches d'agents pathogènes. C'est ainsi que la dysenterie bacillaire a causé la mort d'environ 80 personnes dans le Lusitu au cours de la réinstallation des populations déplacées par la construction du barrage de Kariba. De même, on doit considérer désormais la schistosomiase urinaire comme une conséquence prévisible de la construction d'un barrage dans une zone où cette maladie est endémique ; en effet, la prolifération rapide des herbes aquatiques, habitat favorable à une vaste gamme d'invertébrés, parmi lesquels les hôtes intermédiaires de parasites humains, favorise la propagation de la schistosomiase dans la zone du barrage, ainsi que de maladies diverses.

Force est malheureusement de constater que, dans la plupart des lieux de réinstallation, l'approvisionnement en eau à usage domestique et l'évacuation des déchets laissent généralement à désirer. Dans ces conditions, l'arrivée de personnes contaminées dans la zone du barrage, où les contacts avec l'eau contenant des escargots vecteurs sont constants, entraîne une propagation de la schistosomiase, dont l'incidence arrive à dépasser en gravité celles de l'onchocerciasis et du paludisme. Sur le site de Kariba, la trypanosomiase a atteint des proportions épidémiques parmi les populations qui avaient été réinstallées dans une zone jusque-là inhabitée de la rive sud. Ces problèmes de santé sont parmi les problèmes les plus graves affectant directement les personnes vivant dans la zone des barrages.

En dernière analyse, il ne faut jamais oublier que les changements écologiques et l'impact environnemental associés à la construction de barrages

tiennent aux différences fondamentales qui séparent les eaux vives des eaux stationnaires. Aucune réponse simple ne peut être apportée à la question de savoir si la construction d'un barrage sera ou non bénéfique. Les barrages, petits ou grands, sont nécessaires au développement. Quant à savoir s'ils auront des effets positifs ou indésirables, cela dépend entièrement de la façon dont ils seront conçus, construits et gérés.

### **La création de lacs artificiels déplace les populations**

L'aménagement du lac Kariba (Zambie), du lac Volta (Ghana) et du lac Kainji (Nigéria) a déplacé au total 168 000 personnes, et celui du lac Nasser en Égypte et du lac Nubie au Soudan environ 100 000. Aux États-Unis d'Amérique, la Tennessee Valley Authority a construit vingt barrages qui ont nécessité la réinstallation de quelque 60 000 personnes.

L'évacuation forcée de gens de leurs foyers et leur réinstallation dans un cadre inhabituel provoquent immédiatement des effets graves et traumatisants. L'expérience montre que ces transferts de population se font souvent à la hâte et de façon maladroite, généralement par manque de ressources. La réinstallation impose d'énormes tensions aux individus, disloque des systèmes sociaux entiers et détruit des pratiques culturelles en projetant brutalement les gens dans un cadre et des conditions totalement nouveaux.

On observe couramment aussi que les habitations fournies aux intéressés, même si elles sont supérieures à celles qu'ils avaient précédemment, ne les satisfont jamais ; elles ne sauraient compenser le foyer qu'ils ont laissé derrière eux. C'est ce qui s'est passé dans le cas du lac Volta. Les maisons à pièce unique qui étaient prévues à l'origine furent jugées tout à fait inadéquates. Un chef traditionnel, gardien d'objets et de fétiches ancestraux pour le compte de son peuple, déclara qu'avant de pouvoir construire un abri temporaire, il avait dû passer plusieurs nuits à la belle étoile parce que la coutume, la tradition et la culture de son peuple lui interdisaient de dormir dans la pièce où se trouvaient les objets confiés à sa garde.

#### *Création de tensions sociales*

Une autre source de tensions sociales peut aussi apparaître lorsque des personnes déplacées se trouvent regroupées avec d'autres dans des établissements plus importants que ceux d'où elles viennent. Dans le cas du lac Volta, la population de 739 villages dont la taille allait de simples hameaux à de gros bourgs fut réinstallée dans 52 villes nouvelles. La totalité des 100 000 Nubiens déplacés par le barrage d'Assouan fut réinstallée dans une zone administrative unique, le Kom Omba. A la suite de la construction du barrage de Kariba, les 6 000 personnes réinstallées dans le Lusitu virent leur espace vital fortement réduit, avec des densités allant de 100 à 300 habitants au mile carré<sup>3\*</sup>.

La réalisation de l'autosuffisance économique est fortement ralentie, dans ces colonies nouvelles, par le problème de l'acquisition des terres et par l'insuffisance des programmes agricoles. Les personnes déplacées par la construction des grands barrages africains (sauf dans le cas du barrage de

\* Un mile carré = 2,59 km<sup>2</sup>.

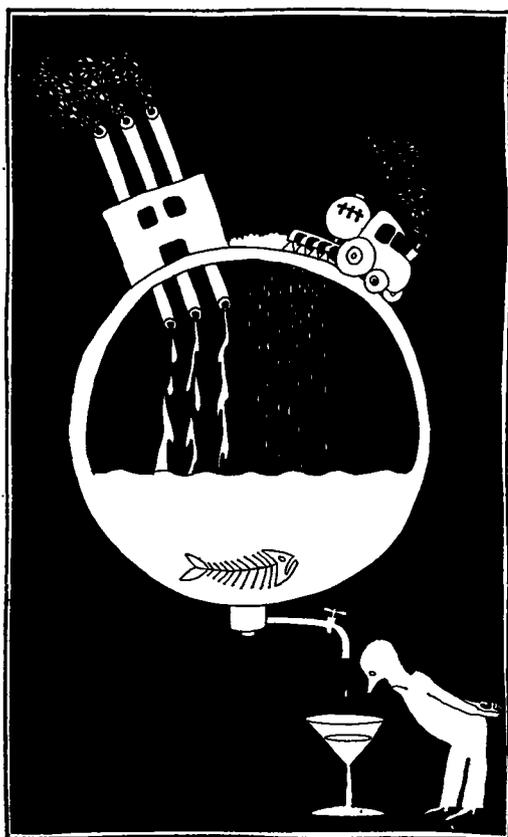
Kainji) durent faire l'expérience humiliante d'avoir à dépendre, pour leur subsistance, des programmes de secours alimentaire.

La gestion des lacs artificiels s'améliorera peu à peu à mesure que nos études sur les barrages et l'analyse des informations disponibles permettront de dégager les principes directeurs réalistes et concrets qui sont indispensables. ■

---

Notes

1. R. H. Lowe McConnell (dir. publ.), *Man-made lakes*, New York, Academic Press, 1966 ; L. E. Obeng (dir. publ.), *Man-made lakes*, Accra, Ghana Universities Press, 1969 ; International Council of Scientific Unions (ICSU), Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE), *Report*, n° 2, 1972 ; W. Ackerman *et al.* (dir. publ.), *Man-made lakes, their problems and environmental effects*, American Geophysical Union, 1973 ; E. K. Balon et A. G. Coche, *Lake Kariba, a man-made tropical ecosystem in Central Africa*, D. W. Junk Book Publishers, 1974.
2. R. S. A. Beauchamp, dans L. E. Obeng, *op. cit.*
3. T. Scudder, dans N. F. Stanley et M. P. Alpers (dir. publ.), *Man-made lakes and human health*, New York, Academic Press, 1975.



Collage à l'encre  
de Chine de Jens Hage

## De l'eau, de l'eau... partout ?

Alors que l'eau, condition *sine qua non* de la vie, était judicieusement utilisée sur notre planète depuis des centaines de millions d'années, il aura suffi d'une centaine d'années à l'*homo scientificus*, dont la population s'accroît toujours davantage, pour la polluer dangereusement en la surchargeant presque partout de déchets qui ne se décomposent que très lentement ou pas du tout.

Le cycle hydrologique se caractérise par un mouvement incessant, mais c'est toujours la même masse finie d'eau qui est réutilisée et recyclée indéfiniment : le temps de séjour varie de quelques jours ou quelques semaines (c'est généralement le cas pour l'eau atmosphérique et certains types d'eaux souterraines) à des milliers ou des dizaines de milliers d'années (c'est le cas de l'eau gelée qui forme les glaciers alpins et les calottes glaciaires, de l'eau des océans et de certains types de nappes souterraines). La pluie n'est pas de l'eau nouvelle tombant du ciel ; par conséquent, même si la plupart des usages que l'homme fait de l'eau l'obligent à la salir, il doit ne le faire qu'avec une extrême prudence, en se souvenant que l'eau est une ressource non renouvelable, c'est-à-dire qu'elle risque, s'il n'est plus possible de la nettoyer suffisamment, de devenir inapte à servir de support à la vie humaine.

Extrait de *Det Tøvende Menneske* [L'homme imprévoyant], par Tom Mikkelsen (Copenhague, Forlaget Rhodos, 1981). L'illustration est empruntée au même ouvrage avec l'autorisation de l'auteur.

# découverte

vous intéresse !



- La chronique de **Fernand LOT**,
- Le texte intégral de **conférences** prononcées au Palais de la Découverte, par exemple : Les services de télécommunications, possibilités actuelles et perspectives, par J.-M. Chaduc ; Vaincre le cancer, prévention et traitement, par Raymond Daudel ; Etat actuel de la prévision des séismes, par G. Jobert ; Quelques concepts de Claude Bernard, leur intérêt actuel, par J.-L. Parrot ; Y a-t-il des risques d'avitaminose en France ?, par B. Wattier.
- L'annonce des cycles de **conférences d'initiation** aux sciences et techniques modernes.
- Le commentaire détaillé des **expositions temporaires** qui permet de bénéficier pleinement de l'intérêt de l'exposition. Un bon nombre de celles-ci circulent ensuite dans les diverses régions de France : « **LE QUARTZ ET LE MONDE DES MINERAUX** » ; « **AUJOURD'HUI LA DENT** » ; « **VISIBLE-INVISIBLE, ASPECTS DE LA PHOTOGRAPHIE SCIENTIFIQUE** » ; « **EINSTEIN, SA VIE, SON ŒUVRE** ».
- Des rubriques sur les **expériences** présentées au Palais de la Découverte.
- Le programme détaillé de **toutes les activités** du Palais de la Découverte.

----- ✂ -----

**BULLETIN D'ABONNEMENT**

ESP. 81

## REVUE DU PALAIS DE LA DECOUVERTE

NOM \_\_\_\_\_ PRENOM \_\_\_\_\_  
(Lettres capitales)

ADRESSE \_\_\_\_\_

PROFESSION \_\_\_\_\_

*GEMS/EAU est une action internationale parrainée par l'Organisation des Nations Unies et qui assure à l'échelon mondial la surveillance continue de la qualité de l'eau des rivières, des lacs et des aquifères. Actuellement, plus de 300 stations de surveillance situées dans 50 pays transmettent des données au centre mondial établi au Canada. Ces données comprennent une cinquantaine de paramètres fondamentaux concernant la qualité de l'eau.*

---

## **GEMS/EAU. Surveillance de la qualité de l'eau**

Silvio Barabas

---

*Silvio Barabas est directeur du Collaborating Centre on Surface and Ground Water Quality de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) depuis sa création en 1974. Il est également fondateur et directeur de la publication trimestrielle Water quality bulletin. Il a contribué, en tant que directeur du centre de l'OMS, à la mise en œuvre et au développement du programme GEMS/EAU. Il a publié plus de cent articles et est détenteur de plusieurs brevets. Son adresse au centre de l'OMS est la suivante : National Water Research Institute, Canada Centre for Inland Waters, 867 Lakeshore Road, Burlington, Ontario L7R 4A6 (Canada).*

## Introduction

Au moment où j'écris cet article (à la fin du premier semestre de 1982) près de 330 stations de surveillance, situées auprès des principaux cours d'eau, lacs et aquifères de 50 pays, transmettent régulièrement des données sur la qualité de l'eau à un centre mondial pour la qualité des eaux, établi au Canada. Selon l'emplacement de la station, l'information fournie peut concerner de 10 à plus de 50 paramètres physiques et chimiques connus comme influant le plus sur la qualité de l'eau. Le but de cette surveillance est de déceler assez tôt tout risque de grave détérioration et de donner rapidement l'alerte pour que des mesures propres à y remédier efficacement puissent être prises à temps.

Cette action internationale concertée s'inscrit dans le cadre du Système mondial de surveillance continue de l'environnement, ou, plus brièvement, GEMS, vaste projet qui est parrainé par l'Organisation des Nations Unies et qui englobe à la fois la surveillance continue de la pollution (de l'eau, de l'air, des denrées alimentaires ou de l'océan, qu'elle soit liée à l'homme ou au climat) et une surveillance écologique (notamment du sol et de la végétation). Après un bref rappel de l'histoire du GEMS, nous nous proposons essentiellement de décrire en détail le projet, les objectifs, les caractéristiques principales et les modalités de mise en œuvre de celui de ses éléments qui concerne l'eau (le projet GEMS/EAU).

## L'eau, ressource épuisable

Les réserves de notre planète en eau douce n'ont guère varié depuis des millions d'années. Les ressources globales sont déterminées par le cycle hydrologique et la quantité d'eau douce disponible par habitant est fonction de la population du globe, de sa répartition géographique et du niveau d'industrialisation et d'urbanisation.

Les ressources mondiales d'eau douce dont nous disposons se chiffrent à quelque 40 000 km<sup>3</sup> par an et se maintiennent à ce niveau grâce au cycle hydrologique (voir figure ci-contre). Elles nous sont fournies en totalité par le processus naturel de dessalement de l'eau de mer, l'énergie nécessaire étant apportée par le soleil. On peut donc représenter l'ensemble que forment le soleil, l'océan et l'atmosphère comme une gigantesque usine de distillation doublée d'un vaste système de distribution d'eau.

On évalue à quelque 450 000 km<sup>3</sup> la quantité d'eau qui s'évapore chaque année au-dessus de l'océan. Mais plus de 90 % de cette eau, soit environ 410 000 km<sup>3</sup>, reste inutilisable, puisqu'elle retourne à l'océan sous forme de précipitations. Seules les précipitations qui parviennent jusqu'au sol, soit 40 000 km<sup>3</sup>, c'est-à-dire à peine 10 %, sont à notre disposition pour de multiples usages (domestiques, agricoles et industriels). Pourtant, le volume global des précipitations annuelles qui parviennent au sol est en réalité bien supérieur puisqu'il est de l'ordre de 114 000 km<sup>3</sup>, dont 74 000 km<sup>3</sup> proviennent de l'eau qui est retenue en permanence, sous forme d'humidité, dans l'atmosphère, le sol et la végétation et qui est soumise à un cycle sans fin, dans lequel interviennent l'évaporation au-dessus du sol et des masses d'eau, l'évapotranspiration végétale et les précipitations. Les 40 000 km<sup>3</sup> excédentaires provenant de l'évaporation au-dessus de l'océan viennent alimenter l'écoulement fluvial et celui des eaux souterraines, pour retourner finalement à l'océan, ce qui clôt le cycle.

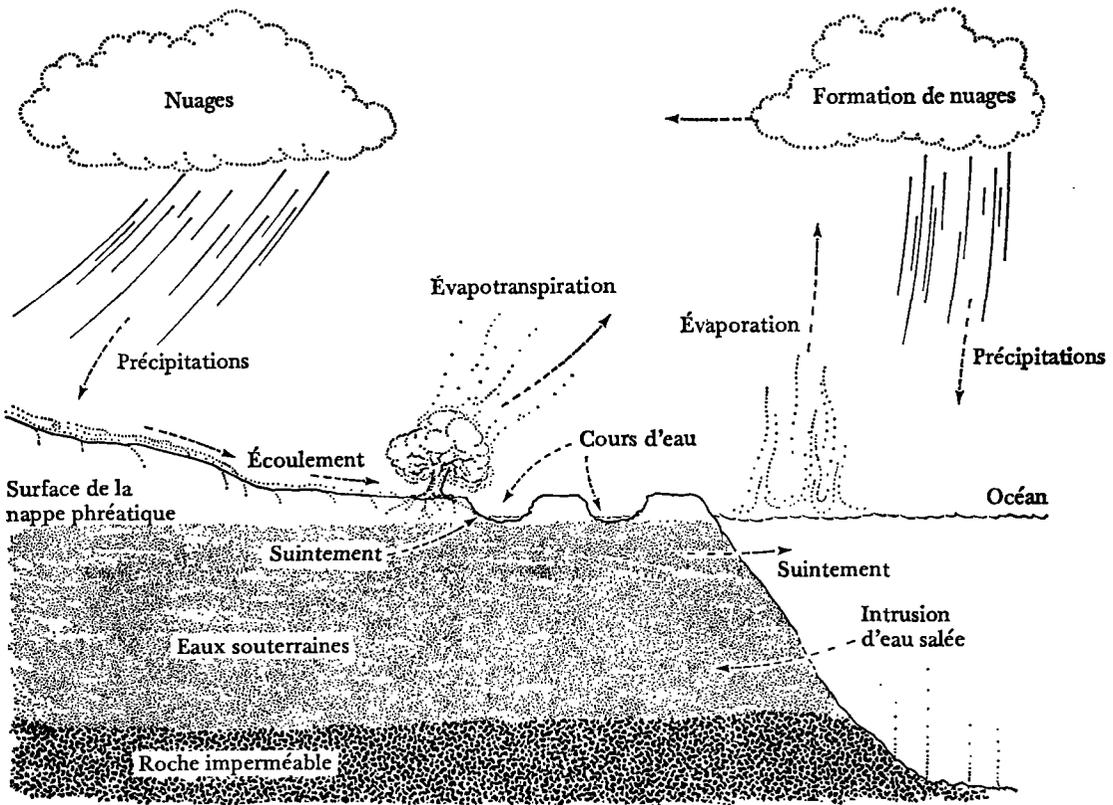


FIG. 1. Le cycle de l'eau.

### L'augmentation de la demande d'eau est spectaculaire

Nous l'avons vu, la quantité d'eau douce dont nous disposons aujourd'hui n'a guère varié pendant des millions d'années. Quant à la demande, elle n'a augmenté, jusqu'à une date relativement récente, que de façon très progressive, en fonction du lent accroissement de la population. En revanche, elle s'est gonflée spectaculairement depuis que nous sommes entrés dans l'ère industrielle, par suite d'une croissance démographique sans précédent et d'une élévation du niveau de vie dans de nombreux pays. Étant donné qu'il a fallu un million d'années au moins pour que, vers 1820, la population du globe atteigne le milliard, puis 110 ans seulement, de 1820 à 1930, pour doubler ce chiffre, 30 ans pour atteindre les 3 milliards vers 1960 et 15 ans à peine pour arriver à 4 milliards vers 1975, la croissance démographique est un phénomène littéralement stupéfiant. Même avec le ralentissement actuel, nous serons au moins 6 milliards en l'an 2000. Mais la croissance démographique n'explique pas, à elle seule, l'augmentation de la demande d'eau, qui s'est multipliée encore beaucoup plus vite du fait de l'industrialisation, de l'accroissement spectaculaire du PNB que celle-ci a suscité et des répercussions considérables qu'ont eues ces phénomènes sur le volume d'eau consommé par habitant. La situation est encore aggravée par deux autres corollaires de l'industrialisation : l'urbanisation et l'évacuation incontrôlée des déchets industriels et domestiques. Nous sommes donc de plus en plus nombreux à réclamer notre part de ressources en eau dont le

volume total demeure invariable et dont la qualité ne cesse de se dégrader, et les choses ne feront qu'empirer si nous ne prenons pas immédiatement des mesures visant à redresser la situation.

### **La conscience humaine en éveil**

Le processus de sensibilisation de l'opinion publique aux graves dangers que font courir à l'homme les atteintes massives qu'il porte à son environnement a été graduel et plus rapide dans certains pays que dans d'autres et dans les zones urbaines que dans les zones rurales. Un seuil a été franchi au début des années soixante quand l'état de notre environnement et l'écologie ont commencé à faire l'objet de débats publics et internationaux qui ont abouti à une conférence des Nations Unies tenue en juin 1972 à Stockholm. Les représentants de 113 pays adoptèrent d'un commun accord un large plan d'action pour combattre tous les types de pollution ; ils rédigèrent une déclaration de principes et établirent une série de recommandations concrètes à prendre.

La Recommandation 74, qui mentionne expressément la nécessité de mettre sur pied un programme mondial de surveillance continue de l'environnement, mérite tout particulièrement de retenir l'attention dans le contexte du présent article. Elle demande notamment que le Secrétaire général :

« ... en faisant appel aux ressources de l'ensemble des organismes des Nations Unies et avec le concours actif des gouvernements et des organismes internationaux appropriés à vocation scientifique ou autre... »

» Développe les moyens dont disposent les organismes des Nations Unies pour faire connaître et signaler à l'avance les effets nocifs sur la santé et le bien-être de l'homme des polluants résultant de l'activité humaine ;

» Fournisse ces informations sous une forme exploitable par ceux qui arrêtent les politiques au niveau national ;

» Aide les gouvernements qui désirent tenir compte de ces données et d'autres facteurs mésologiques dans l'élaboration de leurs plans nationaux ;

» S'attache à faire accepter plus largement, au niveau international, les tests auxquels polluants et contaminants doivent être soumis ;

...

» [Élabore et mette en œuvre] un programme international d'intercalibration des techniques d'échantillonnage et d'analyse en vue de permettre des comparaisons plus valables entre les données nationales... »

Dans la Recommandation 77, la conférence invite l'Organisation mondiale de la santé et d'autres « institutions compétentes » à aider les gouvernements, en particulier ceux des pays en développement, « ... à entreprendre des programmes coordonnés de surveillance de l'air et de l'eau... ».

### **Définition des objectifs du GEMS**

Dès 1971, c'est-à-dire avant même la conférence de Stockholm, un groupe de travail interinstitutions de la surveillance continue s'était réuni pour définir les objectifs d'un programme de surveillance continue, ainsi que les modalités et les aspects prioritaires de sa mise en œuvre.

En 1974, une réunion intergouvernementale sur la surveillance continue a défini les sept objectifs de programme ci-après.

1. Évaluer la pollution atmosphérique dans le monde et ses conséquences sur le climat.
2. Évaluer les problèmes graves d'environnement intéressant l'agriculture et l'utilisation des sols et de l'eau.
3. Évaluer l'état de la pollution des océans et ses conséquences sur les écosystèmes marins.
4. Évaluer l'importance et la répartition des polluants dans les systèmes biologiques, en particulier les chaînes alimentaires.
5. Évaluer la réaction des écosystèmes terrestres aux pressions exercées sur l'environnement.
6. Assurer la surveillance continue des facteurs nécessaires à la connaissance et à la prévision des catastrophes.
7. Mettre en place un système élargi d'alerte concernant la santé de l'homme (maladies liées à l'environnement).

Certains de ces objectifs, notamment le premier (surveillance continue des polluants de l'atmosphère) et le quatrième (surveillance continue de la répartition des polluants dans les systèmes biologiques et les chaînes alimentaires), relèvent clairement de la « surveillance de la pollution », puisqu'il s'agit de surveiller les polluants, leurs effets et leurs tendances d'évolution à long terme. D'autres relèvent entièrement, comme l'objectif n° 5, ou partiellement, comme l'objectif n° 3, d'une « surveillance écologique » puisque la surveillance porte ici sur les effets écologiques des pressions exercées sur l'environnement. Le tableau 1 ci-après contient la liste des activités de surveillance entrant dans chacune de ces deux catégories.

TABLEAU 1. Activités de surveillance

Surveillance de la pollution	Surveillance écologique
Surveillance motivée par des pré-occupations sanitaires	Surveillance des sols et du couvert végétal (par exemple, forêts, désertification)
Air	Surveillance de l'eau et des ressources qui y sont liées (organismes vivants, organismes indicateurs de pollution, par exemple la « surveillance des moules »)
Eau	
Alimentation	
Effets des polluants sur la santé	Surveillance de la biosphère (effet des rayons ultraviolets ; variables pouvant servir d'indicateurs de la productivité biologique, par exemple pour les forêts et les terrains de parcours)
Surveillance motivée par des pré-occupations météorologiques	
Effets des polluants sur le climat	
Surveillance de l'océan	
Mers régionales (y compris l'embouchure des cours d'eau)	
Océans	

### Les institutions des Nations Unies participent au projet GEMS/EAU

Le projet GEMS/EAU est coordonné par quatre institutions des Nations Unies : le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE), l'Organisation mondiale de la santé (OMS), l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et l'Unesco. Ses objectifs spécifiques peuvent se résumer comme suit : a) surveiller en permanence les effets et l'évolution des polluants de l'eau ; b) prévenir suffisamment à l'avance les autorités responsables de

toute grave détérioration ; c) encourager les gouvernements à prendre, individuellement et/ou collectivement, des mesures correctives pour assurer la protection, la remise en état et l'amélioration de l'environnement.

Le programme élaboré pour l'exécution du projet GEMS/EAU comporte les sept grands éléments suivants.

1. Mise en place d'un réseau mondial de stations de surveillance installées sur des sites appropriés auprès de cours d'eau, de lacs et d'aquifères.
2. Adoption de méthodes uniformes pour le prélèvement et l'analyse d'échantillons d'eau.
3. Mise en œuvre d'un programme continu de contrôle de la qualité des données.
4. Élaboration et utilisation d'un système global de stockage et de restitution des données.
5. Organisation de cours de formation pour le personnel chargé des divers aspects de la surveillance de la qualité de l'eau à l'échelon mondial.
6. Rédaction de manuels à l'intention des utilisateurs du matériel.
7. Fourniture d'équipement dans un nombre limité de cas.

On trouvera ci-après un aperçu des activités prévues pour chaque élément du projet GEMS/EAU.

#### *Surveillance continue des échantillons d'eau*

Dans ce contexte, la notion de « surveillance continue » implique des mesures quantitatives périodiques de certains paramètres physiques et chimiques dans des échantillons d'eau prélevés à des endroits déterminés sur les lacs, les cours d'eau et les aquifères. Mis à part un petit nombre de paramètres physiques et chimiques dont la mesure ne soulève aucune difficulté et peut être faite sur place (température, pH, conductivité, oxygène dissous, chlorures, etc.), tous les autres paramètres doivent être mesurés dans des laboratoires désignés à cet effet et à partir d'échantillons qui doivent être suffisamment bien préservés pour éviter toute modification ultérieure en ce qui concerne le paramètre en question.

Le programme initial, d'une durée de trois ans (1977-1979), prévoyait l'établissement, dans un nombre limité de pays, de quelque 300 stations de surveillance au bord de cours d'eau, de lacs et d'aquifères. Ce réseau devait être porté par la suite à environ 800 à 1 200 stations, soit une station pour 4 à 5 millions d'habitants.

Eu égard au nombre relativement restreint de stations de surveillance prévues, le choix des sites à retenir est effectué en appliquant les critères suivants : a) principales ressources en eau utilisées pour l'approvisionnement de grandes agglomérations aux fins suivantes : eau de boisson, irrigation, élevage, pêches, industries alimentaires et relatives à la santé, sports nautiques ; b) principaux cours d'eau et lacs proches des frontières ; c) principaux cours d'eau qui se jettent dans la mer ou l'océan ; d) principaux cours d'eau et lacs situés dans des zones reculées, pour connaître les « valeurs de base » et leurs modifications éventuelles dans des délais relativement longs (un an ou même quelques années).

Autant que faire se peut, on a recours aux stations et laboratoires existants, quitte à leur fournir une assistance internationale, pour les aider, dans la limite des ressources disponibles, à remplir leurs fonctions « mondiales ». Il est aussi prévu de créer, conformément à des critères préalablement fixés, des stations de surveillance dans les régions qui en sont actuellement

dépourvues et qui contiennent des cours d'eau, lacs ou aquifères importants où aucun contrôle de la qualité de l'eau n'est encore effectué. Dans tous les cas, la désignation de stations ou de laboratoires pour l'exécution du projet GEMS/EAU et la création de stations nouvelles s'effectuent en pleine concertation avec les autorités nationales compétentes et avec leur accord.

### *Le programme est réalisé à trois niveaux*

Comme tous les autres éléments du GEMS, le programme GEMS/EAU est réalisé à trois niveaux : national, régional et mondial. En règle générale, chaque pays participant désigne un « centre national » chargé de donner des avis sur le choix des sites où sont opérés les prélèvements et mises en place les stations de jaugeage et des paramètres à surveiller et de transmettre au « centre régional » les données recueillies à l'échelon national.

Les centres régionaux doivent coordonner les activités des centres nationaux, notamment pour le choix définitif, en ce qui concerne l'ensemble de la région, des sites où sont opérés les prélèvements, compte tenu de l'importance régionale des sites proposés et de la capacité globale du système. Ils doivent aussi transcrire sur des supports informatisés (cartes perforées ou bandes magnétiques), pour transmission au centre mondial, les données reçues des centres nationaux sur des formulaires remplis à la main. Enfin, les centres régionaux ont des responsabilités spécifiques en ce qui concerne la mise en œuvre de programmes régionaux de contrôle de la qualité des données et l'organisation périodique de stages de formation.

Quant au centre mondial, il doit remplir les fonctions suivantes : coordonner l'élaboration d'un système approprié de stockage et de restitution des données et d'un programme de contrôle de leur qualité ; préparer et diffuser la documentation nécessaire, y compris les manuels destinés aux utilisateurs du matériel ; traiter et mettre en mémoire les données provenant des centres régionaux ; publier des rapports annuels d'ensemble contenant des données en provenance de toutes les stations de surveillance et faisant apparaître les résultats des analyses, l'écoulement et l'écoulement de masse. Il publie aussi, sur demande, des rapports périodiques qui fournissent les profils de certains paramètres dans des zones géographiques déterminées. Le Centre canadien pour la surveillance des eaux intérieures, établi à Burlington (Ontario), a accepté d'assumer, dans un premier temps, les fonctions de centre mondial.

### *Indices de la qualité de l'eau à évaluer*

Les indices de la qualité de l'eau qui doivent être mesurés peuvent être classés en trois catégories.

La première est un ensemble d'indices de qualité de base qui englobe treize paramètres considérés comme importants pour une évaluation générale de la qualité de l'eau. Ils doivent donc être mesurés sur tous les sites retenus. Leur surveillance est relativement simple à assurer et n'exige aucun instrument coûteux. Parmi ces paramètres figurent la température, le pH, la demande biochimique d'oxygène (DBO), la conductivité, l'oxygène dissous, les chlorures, les solides en suspension et les coliformes fécaux.

La seconde catégorie est formée de déterminants d'importance mondiale comprenant des polluants durables et toxiques tels que le cadmium, le mercure, le plomb et les composés organohalogénés qui peuvent être transportés sur de grandes distances et s'accumulent dans les organismes.

La troisième catégorie est composée de déterminants dont l'étude est facultative. Trente-sept paramètres sont actuellement classés dans cette catégorie ; ils revêtent tous un intérêt local. On peut citer, entre autres, le carbone organique total, la demande chimique d'oxygène, les tensio-actifs anioniques, les tensio-actifs non ioniques, le chrome (total et hexavalent), l'arsenic, le bore, le sélénium, les cyanures, les phénols et les streptocoques fécaux.

Le programme ne prévoit pas que tous ces paramètres doivent être mesurés dans chacun des trois milieux considérés, à savoir les cours d'eau, les lacs et les aquifères. Ainsi, la chlorophylle-*a* doit être uniquement mesurée dans les lacs, les matériaux en suspension dans les cours d'eau et les fluorures dans les aquifères. Quant aux paramètres de la deuxième catégorie (paramètres d'importance mondiale), les mesures effectuées doivent porter sur leur concentration totale dans l'eau, en solution dans l'eau, dans les sédiments des fonds et dans les biotes.

Il faut cependant noter que les laboratoires qui participent au programme ne disposent pas tous des installations et des instruments nécessaires pour l'analyse de tous les paramètres retenus. Ils ne peuvent donc s'associer que progressivement au programme GEMS/EAU en commençant par l'analyse de quelques paramètres nécessitant des instruments peu coûteux, mais des efforts sont déployés pour les aider à se doter de moyens accrus.

### **On doit assurer l'exactitude des résultats**

Pour que cette action collective et coûteuse de surveillance continue à l'échelle mondiale soit fructueuse, il faut veiller à ce que les données recueillies par l'ensemble du réseau mondial soient exactes et comparables. L'idéal serait, pour atteindre partout les normes souhaitables à ces points de vue, que tous les laboratoires utilisent les mêmes instruments et les mêmes méthodes d'analyse et que leur personnel reçoive au préalable une formation appropriée et identique. Quand bien même ces conditions seraient remplies, il faudrait de toute façon entreprendre parallèlement un programme de contrôle de qualité. L'expérience montre que, même au sein d'une organisation publique ou privée dont tout le personnel applique des méthodes semblables et utilise des instruments de même marque, des problèmes imprévus surgissent : il suffit pour cela que le dysfonctionnement mineur d'un appareil ou une négligence dans l'application d'une procédure se répercutent d'un opérateur à un autre. Ce risque est bien évidemment beaucoup plus grand quand de nombreux laboratoires coopèrent à un programme en employant des instruments et des méthodes dont les caractéristiques de performance sont différentes et, qui plus est, un personnel ayant suivi des filières de formation théorique et pratique très dissemblables.

C'est pourquoi il a été décidé d'incorporer au projet GEMS/EAU un programme de contrôle du niveau de qualité atteint par les divers laboratoires et par les différents services d'un même laboratoire. Ce programme prévoit, essentiellement, l'analyse périodique d'une solution type de concentration connue ; de deux parts identiques du même échantillon ; de deux parts d'un échantillon auquel on a ajouté une quantité donnée d'un « déterminant ». Si les résultats obtenus ne correspondent pas aux normes souhaitées de précision et d'exactitude, il faut en rechercher les causes et les éliminer.

Pour le projet GEMS/EAU, il a été convenu de retenir comme critère d'exactitude et de comparabilité 20 % de la concentration, ou, si elle est

plus élevée, de la valeur du déterminant. Par ailleurs, l'erreur maximale admissible devrait être répartie également entre la précision (erreur aléatoire) et la distorsion en utilisant, pour évaluer l'erreur aléatoire, un coefficient de confiance statistique de 95 %. C'est le Laboratoire de contrôle et de surveillance de l'environnement de l'Environmental Protection Agency des États-Unis qui se charge de coordonner à l'échelle mondiale cet élément (contrôle de la qualité) du GEMS/EAU.

### **Création d'un centre d'informatique pour le traitement des données**

A raison d'un prélèvement par quinzaine et d'une moyenne de 20 paramètres analysés par échantillon, 400 stations de surveillance du programme fourniront, lorsqu'elles seront pleinement opérationnelles, environ 200 000 données ponctuelles par an ; ultérieurement, quand le réseau se sera élargi à quelque 800 stations, plus de 400 000 données ponctuelles seront recueillies chaque année. Le centre chargé de collaborer avec l'OMS pour les questions relatives à la qualité des eaux de surface et des eaux souterraines, qui est établi à Burlington (Canada) et assume les fonctions de centre mondial de données pour le projet GEMS/EAU, a mis au point, pour le traitement de cette énorme quantité de données, un système informatisé dénommé GLOWDAT. L'analyse terminée, les données complétées par les autres éléments d'information hydrographique pertinents sont envoyées au centre régional (ou directement au centre mondial si la région considérée n'est pas encore dotée d'un centre régional). Les données sont traitées au centre mondial qui renvoie aux centres régionaux les imprimés correspondants établis sur ordinateur.

Les 400 à 800 stations de surveillance établies sur des sites soigneusement choisis du monde entier sont destinées à nous fournir des informations statistiques sur les tendances d'évolution à long terme de la pollution de l'eau à l'échelle mondiale.

Cette approche statistique est aussi valable que celle des organismes de sondage politique. Ainsi, le projet GEMS/EAU a été conçu pour surveiller les ressources en eau douce de l'ensemble de notre planète en utilisant des méthodes de prélèvement et de mesure comparables pour obtenir des résultats dont le degré d'exactitude soit comparable. La station unique dont les pays de 5 à 10 millions d'habitants disposeront dans ce cadre ne les dispensera pas de mettre en place, pour répondre à leurs besoins propres, un réseau plus étoffé.

### **Résumé des réalisations du projet GEMS/EAU**

#### *Stations de surveillance*

Comme l'indique le tableau 2 ci-après, on comptait au total, à la fin de juin 1982, 323 stations réparties dans 50 pays, qui transmettent des données sur la qualité de l'eau au centre mondial (Canada). De ces stations, 203 surveillent des cours d'eau, 49 des lacs et réservoirs et 71 des aquifères. Malheureusement, 7 de ces stations seulement sont en Afrique.

Environ 60 % de ces stations sont classées dans la catégorie des « stations de mesure d'impact », et 20 %, dans celle des « stations de mesure de base ». Les autres ne sont pas encore classées. Les stations de mesure d'im-

TABLEAU 2. Répartition géographique des stations de surveillance du projet GEMS/EAU

Région	Nombre de stations			Total
	Cours d'eau	Lacs et réservoirs	Aquifères	
Afrique	3	3	1	7
Amérique	60	9	6	75
Méditerranée orientale	28	12	29	69
Europe	38	13	11	62
Asie du Sud-Est	40	3	20	63
Pacifique occidental	34	9	4	47
<b>TOTAL</b>	<b>203</b>	<b>49</b>	<b>71</b>	<b>323</b>

fact sont situées près de cours d'eau, de lacs ou d'aquifères dans lesquels sont déversés des déchets industriels et/ou urbains et/ou des eaux ayant servi à l'agriculture. Les stations de mesure de base sont établies dans des bassins hydrographiques où aucun polluant résultant d'activités agricoles, industrielles ou urbaines n'est déversé en amont.

#### *Cours de formation*

A la fin de 1981, sept cours régionaux de formation à tous les aspects du programme GEMS/EAU avaient été organisés dans les villes suivantes : Manille (Philippines) pour les pays de la région du Pacifique occidental ; Lima (Pérou) pour les pays d'Amérique latine ; Nagpur (Inde) pour les pays de la région de l'Asie du Sud-Est ; Alexandrie (Égypte) pour les pays de la région de la Méditerranée orientale ; Dakar (Sénégal) pour les pays francophones d'Afrique ; Nairobi (Kenya) pour les pays anglophones d'Afrique ; Beijing (Chine) à l'intention exclusive des organisations participantes de la République populaire de Chine.

Une réunion de travail sur l'analyse des sédiments a eu lieu en novembre 1978 à Budapest (Hongrie) ; un projet pilote de cours portant sur le contrôle de qualité dans le cadre du programme GEMS/EAU a été organisé à Mexico en décembre 1979 et répété à Nagpur (Inde) en novembre 1981. D'autres cours relatifs à cette question sont prévus dans les autres régions. Un guide complet des opérations GEMS/EAU a été élaboré pour assurer l'uniformité de la formation dispensée dans les différentes régions du monde. Il contient des chapitres sur l'implantation des stations de surveillance, le prélèvement d'échantillons, l'analyse, le contrôle de qualité, les mesures hydrologiques, le stockage et la restitution des données, le prélèvement et l'analyse de sédiments. Il s'agit là de l'ouvrage de référence le plus important pour la mise en œuvre du programme GEMS/EAU et il a été distribué à la totalité des laboratoires et organisations qui y participent.

#### **Conclusions**

Il a souvent été dit que les rouages du système des Nations Unies fonctionnent très lentement. En dépit de cela, on peut tirer une légitime fierté des progrès accomplis à ce jour dans la mise en œuvre du programme GEMS/

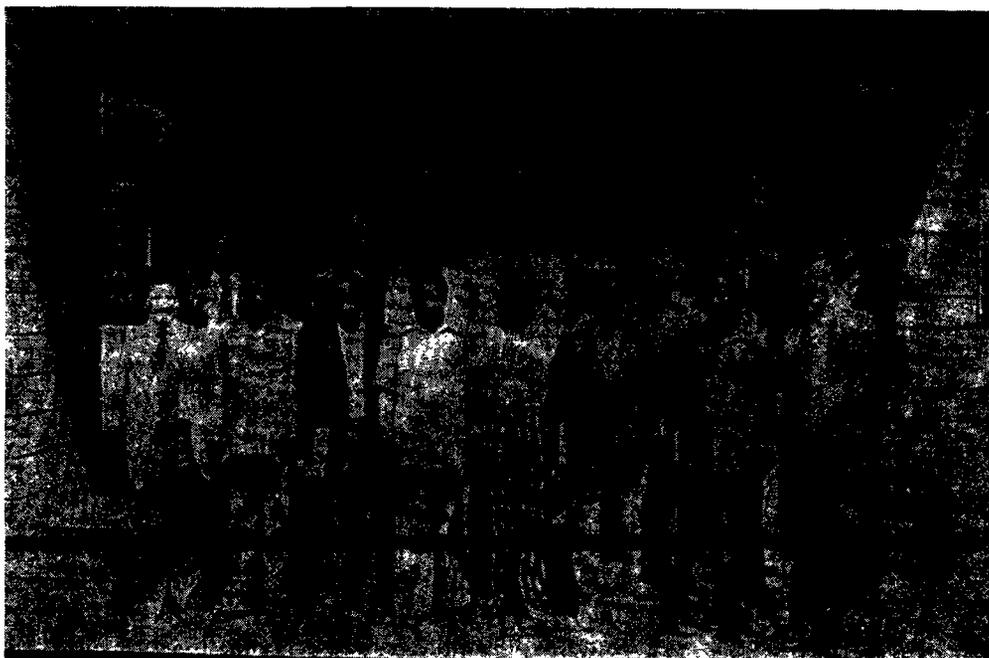


FIG. 2. Le septième cours de formation régional GEMS/EAU, destiné aux pays anglophones d'Afrique, a eu lieu à Nairobi, Kenya, du 9 au 20 novembre 1981. Ci-dessus, on peut voir un groupe de participants devant l'East African Institute for Meteorological Training and Research, où s'est tenu le cours.

EAU. En cinq ans seulement, de décembre 1976, date de la première réunion interrégionale sur le GEMS/EAU, qui s'est tenue à Genève, à novembre 1981, date du dernier des dix cours régionaux de formation, qui s'est tenu à Nairobi (Kenya), ces progrès ont en effet été considérables.

Il est assez remarquable qu'une cinquantaine de pays culturellement, politiquement, socialement et économiquement différents aient accepté de participer à un programme complexe et exigeant et d'utiliser des méthodes uniformes ou compatibles. Rien que pour surmonter les différences de langue, il a fallu faire preuve d'une certaine détermination. Les cours de formation ont dû être organisés en quatre langues (anglais, français, espagnol et chinois). Tous les manuels utilisés ont dû être traduits dans ces langues. Le plus significatif, toutefois, n'est pas qu'on ait surmonté les difficultés techniques et les problèmes d'organisation, mais qu'on ait commencé à faire fonctionner un système de surveillance continue de la qualité de l'eau et de son maintien à long terme, dont dépend notre existence même. Dans un monde où, aujourd'hui encore, environ 1,6 milliard de personnes sont exposées à tout moment à diverses maladies transmises par l'eau, la portée de cette entreprise ne devrait pas être méconnue. ■

# IF YOU'RE IN CONSERVATION THE *IUCN BULLETIN* IS A MUST FOR YOU



The **Bulletin** is the journal of the International Union for Conservation of Nature and Natural Resources which provides:

- original and authoritative information on conservation, environment and development issues.
- regular update on activities related to the World Conservation Strategy.
- details of IUCN activities, projects and publications.
- a quarterly mixture of news and comments from eminent scientists, articles, features and book reviews.

Recent issues include:

Desertification — Towards a Solution.

*James Walls*

Neglect of Environmental Planning Costs.

*Peter Jacobs*

UNEP Looks at a Decade of Environmental Concern.

*Mostafa Tolba*

Mt. Kulal — Reconciling Conservation with Local Population Needs.

*Walter Lusigi*

The IUCN **Bulletin** is published in English and French.

Annual subscription: US\$ 30.00. To Order: Fill in and send the form below with your remittance.



Name \_\_\_\_\_

Address \_\_\_\_\_

City \_\_\_\_\_ State, province \_\_\_\_\_

Postal code \_\_\_\_\_ Country \_\_\_\_\_

Preferred Language: English \_\_\_\_\_ French \_\_\_\_\_

Payment Enclosed \_\_\_\_\_

Send to:

International Union for Conservation of Nature and Natural Resources,  
Publications Services,

World Conservation Centre, Avenue du Mont-Blanc, 1196 Gland, Switzerland.

(Payment may be made by cheque to IUCN Bulletin in US\$ or any other fully convertible currency).

*Cette étude concrète d'une situation rencontrée au Texas montre comment de vastes opérations de prélèvement d'eau souterraine entreprises pour faire face aux besoins d'une population en accroissement rapide ont provoqué des phénomènes de subsidence qui font courir des risques aux biens et aux personnes. Lorsqu'elle a été suffisamment sensibilisée à ce problème, la collectivité a commencé à rechercher les moyens d'y remédier en prenant les mesures qui s'imposent sur les plans institutionnel, juridique et technique.*

---

## **Les répercussions des phénomènes de subsidence**

R. K. Gabrysch

---

*R. K. Gabrysch est hydrogéologue à la Division des ressources en eau du Geological Survey des États-Unis d'Amérique, où il est entré en 1956 en tant qu'hydraulicien après avoir terminé ses études à l'Université du Texas. Il a consacré presque toute sa carrière à l'étude des eaux souterraines et poursuit, depuis 1962, des recherches sur les phénomènes de subsidence dans la région de Houston. Il a écrit plusieurs articles et rapports sur cette question. Son adresse est la suivante : United States Geological Survey, 2320 La Branch, Houston, Texas 77004 (États-Unis d'Amérique).*

## Introduction

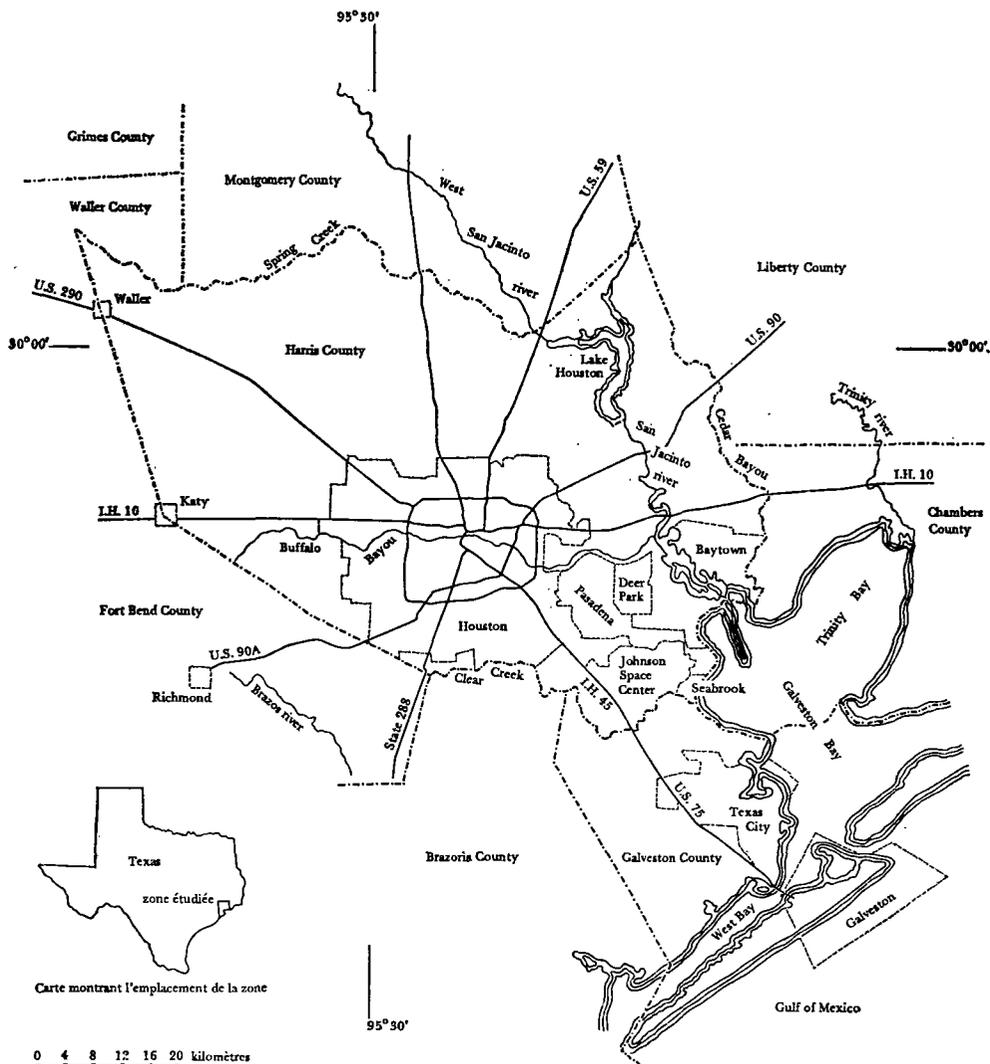
Le sous-sol de la zone où se trouve Houston (Texas) est constitué de couches alternées de sable et d'argile contenant d'énormes quantités d'eau douce. Les ressources en eau de la région sont suffisantes si l'on considère le rendement théorique du système d'eaux souterraines. Mais les prélèvements possibles sont limités par leurs conséquences et, en particulier, les phénomènes de subsidence qu'ils provoquent. Le prélèvement de volumes importants d'eau souterraine sur les couches sablonneuses du système artésien a induit des baisses de pression, qu'atteste la diminution du niveau d'eau dans les puits. Jusqu'aux années quarante, l'eau des puits les plus profonds (plus de 150 mètres) de la partie centrale de la zone s'écoulait à la surface. En 1976, il fallait aller chercher l'eau d'un de ces puits à 110 mètres de profondeur, soit une baisse de niveau supérieure à ce chiffre. La diminution de la pression artésienne dans les sables est égale à la force qui chasse l'eau des pores des couches argileuses associées. A mesure que l'argile perd ainsi de l'eau, les pores rétrécissent et la couche se comprime. Cela a provoqué des affaissements de terrain pouvant atteindre 3 mètres.

## Description de la zone de Houston

La zone de Houston (voir la carte ci-contre) est située en bordure du golfe du Mexique et son littoral est découpé en une série de baies : Galveston, Trinity, West, etc. Le climat est subtropical avec des températures variant entre 7,2 °C (moyenne des minima de janvier) et 33,9 °C (moyenne des maxima de juillet). La moyenne des précipitations annuelles est de l'ordre de 120 cm par an. Du point de vue topographique, il s'agit d'une plaine virtuellement ininterrompue qui descend en pente très douce vers la mer (déclivité d'environ 0,3 mètre par kilomètre). Un quart de cette zone environ s'élève à moins de 7,6 mètres au-dessus du niveau de la mer.

Avec 1 594 000 habitants, la ville de Houston est, d'après le recensement de 1980, la cinquième des États-Unis d'Amérique pour l'importance de la population. Bien qu'éloigné du littoral d'environ 80 kilomètres, le centre de Houston n'est qu'à 15 mètres au-dessus du niveau de la mer. L'économie de la région repose sur l'agriculture (riz et soja notamment), l'élevage et l'industrie (pétrochimie, raffinage, papeterie, traitement de l'acier et constructions navales). La zone abrite en particulier le Centre spatial Johnson, d'où s'effectue le contrôle des vols spatiaux habités, et le troisième port des États-Unis d'Amérique. Les principales villes de la zone en dehors de Houston sont Pasadena (113 000 habitants), Galveston (62 000 habitants), Baytown (57 000 habitants), Texas City (42 000 habitants) et Deer Park (23 000 habitants). Au total, la zone compte plus de 3 millions d'habitants.

Pour faire face à leurs besoins en eau et en matière de transports, les hommes se sont toujours établis à proximité de cours ou de nappes d'eau. La technologie moderne rend cette nécessité moins impérieuse. C'est surtout pour des raisons esthétiques qu'on recherche aujourd'hui un logement au bord de l'eau. Plusieurs petites villes de la zone sont situées sur le littoral des baies. Galveston est construite sur une île bordée par le golfe du Mexique, la baie de Galveston et la West Bay.



Carte générale de la zone de Houston.

## Les eaux souterraines demeurent la principale source d'eau douce

Avant 1940, le sous-sol fournissait la totalité de l'eau douce utilisée dans la zone. Il reste aujourd'hui, pour tous les usages, la principale source d'eau douce. Sur une consommation globale de 40,1 m<sup>3</sup>/s en 1980, 17,9 m<sup>3</sup>/s provenaient de réservoirs et de cours d'eau situés dans la zone ou à proximité et 22,2 m<sup>3</sup>/s d'aquifères, contre 11,7 m<sup>3</sup>/s et 22,5 m<sup>3</sup>/s, respectivement, en 1976. Le tableau ci-après donne des indications très générales sur l'utilisation de l'eau dans cette zone.

Si le volume d'eau souterraine prélevé restait en 1980 presque identique au volume prélevé en 1976, les points où sont opérés les prélèvements se sont déplacés vers les parties ouest et nord de la zone, qui sont plus hautes.

Utilisation de l'eau dans la zone de Houston (en m<sup>3</sup>/s)

Utilisation	Eaux souterraines		Eaux de surface	
	1976	1980	1976	1980
Domestique	11,1	14,9	4,4	7,7
Industrie	6,6	2,9	7,3	10,2
Irrigation	4,8	4,4	—	—
TOTAL	22,5	22,2	11,7	17,9

Toutes les grandes entreprises industrielles de sa partie est et les villes de Pasadena, Galveston, Baytown et Texas City ont renoncé aux eaux souterraines et utilisent maintenant des eaux de surface.

Houston, principale agglomération et premier consommateur d'eau de la zone, comptait environ 25 000 habitants en 1887, lorsque la municipalité décida d'acquérir, pour l'exploiter elle-même en tant que service public, un réseau privé de distribution d'eau. Au cours de la première année les prélèvements d'eau souterraine furent inférieurs à 0,1 m<sup>3</sup>/s. Mais, en 1980, la consommation totale d'eau était de l'ordre de 16 m<sup>3</sup>/s dont 6,4 m<sup>3</sup> venaient de la surface et 9,6 m<sup>3</sup> du sous-sol.

### Le pompage des eaux souterraines provoque un phénomène de subsidence

La zone de Houston est l'un des nombreux endroits du monde où le pompage de liquides souterrains a provoqué un phénomène de subsidence. Mais, en raison de divers facteurs — très faible altitude, proximité de baies et du golfe du Mexique, population dense, importance des équipements — cette zone est, aux États-Unis d'Amérique, une des plus gravement touchées. Il était déjà fréquent que les propriétés situées sur les basses terres soient inondées par de fortes marées, mais les superficies affectées se sont accrues à mesure que se poursuit le processus de subsidence induit par l'intervention humaine.

Le champ pétrolifère de Goose Creek, à Baytown, a fourni le premier exemple de subsidence induite par des prélèvements de liquides qui ait été décrit. Les premiers forages furent effectués en 1917 et, dès 1925, on pouvait constater des affaissements de terrain pouvant aller jusqu'à 1 mètre. Une grande partie du champ pétrolifère fut, de ce fait, recouverte par l'eau de la baie de Galveston, et l'État du Texas, auquel les terres immergées appartiennent, en revendiqua la propriété. Convaincus par les preuves présentées que les prélèvements de pétrole, de gaz, d'eau et de sable avaient causé la subsidence, les tribunaux donnèrent raison à la défense. Certains des documents soumis par celle-ci montraient que la subsidence était localisée et circonscrite au périmètre d'exploitation. Il était donc clair que les prélèvements de liquides pouvaient entraîner une subsidence dans une zone côtière au sous-sol très compressible. Jusqu'aux années soixante, cette question n'intéressa quelque peu qu'une poignée de scientifiques, pour des raisons d'ordre purement technique, et laissa le grand public indifférent.

A la fin des années trente et au début des années quarante, plusieurs entreprises privées ont mesuré, aux alentours de Texas City, des affaissements localisés consécutifs aux prélèvements d'eau souterraine. Dès 1943, une

dépression d'environ 8 kilomètres de long sur 5 kilomètres de large s'était formée ; sa profondeur maximale était d'environ 50 cm et, comme d'autres affaissements qui s'étaient produits dans la région, elle n'était pas immédiatement repérable. Un levé effectué en 1954 a permis de constater une subsidence d'au moins 30 cm dans une zone de 906 km<sup>2</sup>. Les levés ultérieurs (1959, 1963/64, 1973 et 1978) ont montré la progression du phénomène. En 1979, la subsidence maximale atteignait environ 3 mètres et la zone affaissée d'au moins 30 cm s'étendait sur 8 310 km<sup>2</sup>.

### **La subsidence menace les biens et les personnes**

Les affaissements de terrain ont déjà causé des dégâts matériels et pourraient entraîner la perte de vies humaines. Des millions de dollars ont déjà été dépensés pour remettre en état des terres submergées par les marées, surélever des bâtiments, des quais, des routes, etc., et construire des digues. Certaines routes qui devraient faciliter l'évacuation en cas de cyclone risquent maintenant d'être elles-mêmes inondées par les vagues que déchaînent ces cyclones. La ville de Galveston, qui se trouve sur une île, est particulièrement vulnérable. Elle ne peut être évacuée qu'en empruntant une autoroute dont certains points sont situés à moins de 2 mètres du niveau de la mer. Cette autoroute serait inondée de nombreuses heures avant qu'un cyclone atteigne le continent. D'autres agglomérations qui bordent la baie de Galveston courent le même risque.

Dans la zone de Houston, la subsidence a un autre effet préjudiciable : la réactivation de failles inactives et l'accélération de l'accroissement de failles actives. Au-dessous des constructions humaines et des zones où l'on se propose de construire, des failles actives et inactives s'étendent sur des centaines de kilomètres. Il est difficile de les repérer parce que leur mouvement est continu, mais lent — il est généralement inférieur à 2 cm par an — et parce que les escarpements qu'elles forment sont en partie nivelés par des précipitations annuelles qui atteignent environ 120 cm. Ces mouvements de failles n'en sont pas moins une cause importante de détérioration des édifices et du réseau routier. Des millions de dollars sont dépensés pour réparer des dégâts qui auraient pu être évités si les promoteurs et les acheteurs avaient disposé de cartes des failles actives et potentielles. Pour établir de telles cartes, une des meilleures méthodes possibles est fondée sur le recours à des techniques de télédétection pour localiser les lignes de faille et sur une évaluation de ces lignes à la surface. Mais ce travail n'a été effectué que pour une petite partie de la zone et la poursuite de cet effort n'est pas envisagée pour le moment.

### **La fréquence des inondations alerte la communauté**

Les habitants des basses terres ont pris conscience du problème posé par la subsidence en constatant que les inondations devenaient de plus en plus fréquentes. La cause du phénomène était généralement connue des milieux scientifiques, mais elle n'a été comprise et admise par le grand public qu'à la fin des années soixante et au début des années soixante-dix. Des groupes de citoyens ont alors commencé à militer en faveur d'une réduction de la consommation d'eau souterraine. Les parlementaires de l'État ont été saisis du problème et une loi, votée en 1975, a créé l'Autorité du district de Harris-Galveston pour la maîtrise de la subsidence du littoral.

Unique en son genre, du moins aux États-Unis d'Amérique, cet organisme a pour mission d'arrêter le processus de subsidence, lorsqu'il est la cause d'inondations par les marées et les cours d'eau. Il exerce un contrôle juridique sur les prélèvements d'eaux souterraines en délivrant ou en refusant un permis annuel obligatoire pour tous les puits d'un diamètre égal ou supérieur à 13 cm. Ce faisant, il doit tenir compte aussi bien des difficultés économiques que de la possibilité d'utiliser d'autres sources d'eau. Il peut également tarifier l'eau en fonction de l'importance de la consommation, étant entendu que ces recettes destinées à couvrir ses frais de fonctionnement ne sauraient en aucune façon constituer une amende. Il n'est pas habilité à acquérir un réseau de distribution d'eau, ce qui limite un peu ses possibilités de maîtriser à temps les phénomènes de subsidence. Une accélération de ces phénomènes dans la partie occidentale des comtés de Harris et de Galveston pourrait, par exemple, se répercuter sur les systèmes de drainage et provoquer ainsi des inondations en cas de fortes pluies. Or, rien n'est encore prévu à l'heure actuelle (1982) pour réduire le pompage des eaux souterraines en important des eaux de surface. La conception, le financement et la construction des infrastructures nécessaires prendraient probablement une dizaine d'années au moins. Dépourvu de tout moyen de contrôle juridique sur la distribution de l'eau, l'autorité en est réduite à faire appel à son pouvoir de persuasion pour obtenir que les travaux indispensables soient planifiés et entrepris.

### **Les mesures prises portent leurs fruits**

Heureusement, la municipalité de Houston, ville qui est le principal consommateur d'eau de la zone, a commencé dès le début des années soixante à établir les plans d'un important réservoir d'eau de surface situé à une centaine de kilomètres de distance. De l'eau provenant de ce réservoir a commencé à être distribuée à la fin de 1976, surtout aux principales industries consommatrices d'eau situées au centre de la zone où se produit le phénomène de subsidence. Un an plus tard, les prélèvements d'eau souterraine avaient diminué de 3,94 m<sup>3</sup>/s et l'eau commençait à remonter dans les puits. En février 1980, la hausse maximale enregistrée atteignait 46,6 mètres. Les répercussions sur le système des eaux souterraines n'ont pas tardé à se faire sentir. Le processus de subsidence s'est ralenti et l'on a même constaté une faible remontée (3 cm) dans un site témoin au centre de la cuvette déprimée de 13 000 km<sup>2</sup>. Dans ce site, aucune perte nette d'altitude n'était enregistrée le 1<sup>er</sup> juin 1982 par rapport au 1<sup>er</sup> juillet 1978, ce qui montre l'efficacité de la réduction des prélèvements.

Plusieurs procès entamés au cours des années soixante-dix ont amené la Cour suprême de l'État du Texas à prendre un certain nombre de décisions importantes. Au Texas, le droit de propriété et d'usage des eaux souterraines est lié à la possession du sol, alors que les eaux navigables appartiennent à l'État. Les décisions de la Cour suprême ont établi en droit que les prélèvements d'eau souterraine peuvent entraîner des phénomènes de subsidence, qu'une ou plusieurs personnes peuvent être tenues juridiquement responsables des dommages ainsi causés du fait de ces prélèvements d'eaux souterraines et que les terres inondées par suite d'une subsidence imputable à l'homme continuent à appartenir à leur propriétaire initial et restent donc en dehors du domaine public.

## La communauté subit les effets de la subsidence

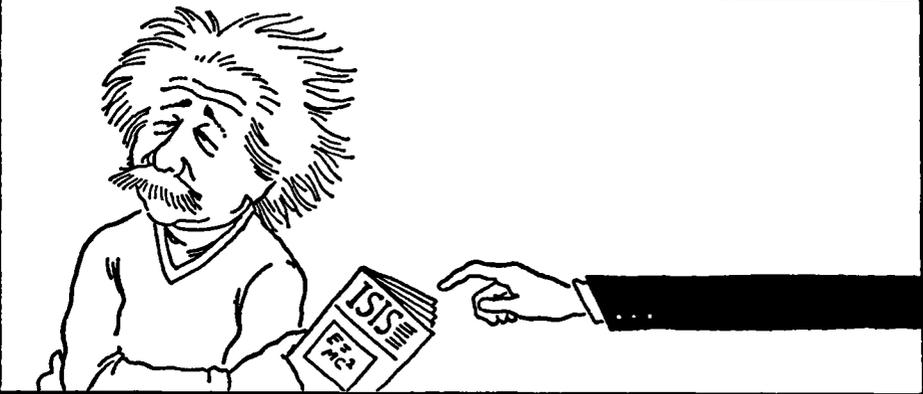
Dans la partie ouest de la ville de Baytown, le sol d'une langue de terre bordée par trois baies, où se trouvent environ 500 maisons individuelles, s'est affaissé d'environ 2,5 mètres depuis 1915. Une voie périphérique surélevée a été construite en 1974 pour assurer l'accès à ce quartier à marée haute normale (40 cm environ) et un certain degré de protection contre les marées exceptionnelles. Par ailleurs, un système de pompage a été mis en place pour évacuer les eaux de pluies résiduelles de la zone ainsi circonscrite. Mais, comme les terrains ont continué à s'affaisser depuis, une marée d'environ 1,20 mètre suffira à inonder la voie périphérique.

Les officiers du génie de l'armée de terre ont étudié divers moyens de protéger le quartier contre le risque d'inondation grâce à un système de digues dont le coût a été évalué à environ 70 millions de dollars. En 1974, ces officiers ont estimé qu'il faudrait environ 16 millions de dollars pour racheter 442 pavillons, reloger 1 550 personnes et transformer en parc les 303 hectares de la péninsule. Le Congrès des États-Unis d'Amérique a approuvé cette proposition et voté les crédits nécessaires, sous réserve que la municipalité de Baytown donne son accord, participe aux frais à concurrence de 20 % (soit 3 millions de dollars) et se charge de l'entretien du futur parc. Lorsqu'on mit pour la première fois aux voix le 23 juillet 1979 la proposition de lancer un emprunt pour financer le projet, le budget prévisionnel avait plus que doublé et atteignait 37,6 millions de dollars, ce qui portait à 7,6 millions de dollars la participation de la municipalité. La proposition fut rejetée. Deux jours plus tard des pluies torrentielles (30 cm d'eau) tombaient sur Brownwood, inondant 187 maisons. La proposition de lancer un emprunt fut remise aux voix le 9 janvier 1980 et rejetée une deuxième fois. S'inclinant devant la décision des résidents, la municipalité de Baytown mit à l'étude le lancement d'un emprunt de 3,5 millions de dollars pour financer la première tranche d'un programme de réaménagement du quartier, évalué à 6,5 millions de dollars et échelonné sur quinze ans. Les résidences menacées ont généralement été achetées à crédit ; les propriétaires, qui n'ont pas achevé de les payer, n'ont pas les moyens d'acquérir un autre logement. Ils restent donc sur place et nombre d'entre eux doivent évacuer leur maison trois fois par an en moyenne en attendant que les travaux destinés à les protéger soient menés à bien.

## Conclusion

Les phénomènes de subsidence provoqués par les prélèvements d'eaux souterraines sont prévisibles. Mais il est en général difficile d'agir efficacement, faute d'institutions qui soient à même de coordonner les différentes initiatives qui peuvent être prises et en raison du coût élevé des solutions de rechange pour l'approvisionnement en eau et du délai nécessaire pour leur mise en œuvre, compte tenu de l'ampleur des travaux à exécuter et des problèmes juridiques et financiers à régler. Dans la zone de Houston où une institution a été créée pour maîtriser les processus de subsidence dont le coût à long terme est plus élevé que celui du recours à d'autres sources d'eau, l'action envisagée ne portera ses fruits qu'à partir du moment où les difficultés juridiques et financières auront été aplanies et les travaux indispensables achevés. ■

# ARE YOU STILL READING SOMEONE ELSE'S COPY OF ISIS?



IF SO, now is the time to enter your own subscription. *Isis*, the official journal of the History of Science Society, is the leading journal in the field.

*Isis* keeps over 3300 subscribers in nearly fifty countries up to date on all developments in the history of science with articles, critiques, documents and translations. Along with these, its notes and correspondence and news of the profession provide useful information to professionals, educators, scholars and graduate students.

Lively essay reviews and over 200 book reviews a year cover every specialty in the history of science, technology and medicine.

In addition to your four quarterly issues of *Isis* you will also receive:

- Membership in the History of Science Society.
- The annual *Critical Bibliography* listing over 3500 publications in the history of science, technology and medicine from the preceding year.
- The *Triennial Guide* containing directories of members and scholarly programs and information on 90 journals in the field.
- The quarterly *Newsletter* providing current news of the profession, including employment opportunities and approaching meetings.

**ISIS**  
AN INTERNATIONAL  
JOURNAL  
DEVOTED TO  
THE HISTORY  
OF SCIENCE  
AND  
TECHNOLOGY

**Isis Publication Office**  
**University of Pennsylvania**  
**215 South 34th St. / D6**  
**Philadelphia, Pa. 19104**

**YES! Please send me *Isis* for the calendar year(s) \_\_\_\_\_ and \_\_\_\_\_**  
**\$22 for one year (\$13 for students). \$42 for two years (\$24 for students).**

\_\_\_\_\_ **Check enclosed**      \_\_\_\_\_ **Bill me.**

**(Issues sent on receipt of payment.)**

**NAME** \_\_\_\_\_

**ADDRESS** \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

# Tribune des lecteurs

Nous serons heureux de publier des lettres contenant des avis motivés — favorables ou non — sur tout article publié dans *impact* ou présentant les vues des signataires sur les sujets traités dans notre revue. Prière d'adresser toute correspondance à : Rédacteur, *impact : science et société*, Unesco, 7, place de Fontenoy, 75700 Paris (France).

---

## Commentaires de M. Gu Gongxu à propos de l'interview qu'il a accordée au professeur T. Rikitake

L'article que le professeur T. Rikitake m'a récemment consacré me paraît tout à fait exact, si ce n'est qu'il est beaucoup trop élogieux à mon égard. Je note que la dernière phrase du deuxième alinéa de la page 43 mentionne des faits qui ne correspondent pas entièrement à la réalité, sans pour autant remettre en cause le contenu de l'article. En 1947, je suis revenu de Kunming à Beijing (à l'époque Peiping) et j'ai travaillé à l'Institut de physique de l'Académie des sciences de Peiping jusqu'à la libération, en 1949, date à laquelle a été créé l'Institut de géophysique de l'Académie chinoise des sciences. Depuis lors, j'ai consacré presque tout mon temps à des travaux de prospection géophysique en matière de ressources minérales au Ministère de la géologie qui a été créé par le gouvernement de la République populaire de Chine. Or, j'occupais en même temps le poste de vice-directeur de l'Institut de géophysique de l'Académie chinoise des sciences, ce qui peut expliquer une certaine confusion de la part du professeur T. Rikitake. Avec mes remerciements.

GU GONGXU  
Directeur,  
Institut de géophysique,  
Bureau d'État de séismologie,  
Peking,  
République populaire de Chine.

# Mazingira

The International Journal for  
ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT

Editor: Asit K. Biswas

Editorial Board:

Asit K. Biswas (Canada); W.K. Chagula (Tanzania); J.M. Gvishiani (USSR); Mohamed Kasas (Egypt); B.D. Nag Chaudhuri (India); Enrique Poñalosa (Colombia); Ignacy Sachs (France); Maurice F. Strong (Canada); Shigeto Tsuru (Japan).

## Mazingira

provides original and authoritative information on the protection and management of the environment at global, regional and national levels;

publishes thought-provoking views and analyses, exploring the relationship between environment and development processes in both the industrial, and the developing worlds;

facilitates communication between scientists, planners, policy- and decision-makers and concerned individuals who are interested or involved in environment and development problems.

### MAZINGIRA HAS ALREADY PUBLISHED ISSUES ON:

#### Vol. 1

Is the climate changing?  
Man the creator of deserts  
The growth-environment dilemma  
Technology for whom?

#### Vol. 2

The village: a last resort  
Basic needs  
Science and technology  
The environment of the child

#### Vol. 3

Environment and lifestyles  
Agriculture, development and environment  
Habitat for the poor

### SOME IMPORTANT CURRENT TOPICS

New international development strategy  
Energy

#### Subscription information:

Annual subscription	US \$10	Subscribers in developing countries	US \$6
Two year rate	US \$19		
Single copies	US \$3		

Free specimen copies available on request to:

Mazingira, 76 Woodstock Close, Oxford OX2 8DD, England

Mazingira is published quarterly in English, French and Spanish with the support of the United Nations Environment Programme

---

## A venir...

Le prochain numéro d'**impact** : **science et société** aura pour thème

## L'année prochaine : 1984

Parmi les auteurs : E. Ayensu, *Ghana* : La technologie dans les pays en développement ; D. Leroux, *France* : Les robots industriels ; S. Papert, *États-Unis d'Amérique* : Les ordinateurs et le bien-être de l'homme ; J. Royce, *Canada* : L'individualité et l'image de l'homme ; E. Humo, *Yougoslavie* : Systèmes de contrôle et comportement.

---

1983, n° 3

**Perspectives de la recherche sur les océans**

---

1983, n° 4

**Comprendre la toxicomanie**

---

1984, n° 1

**La chimie des produits naturels**

---

1984, n° 2

**Créativité dans le domaine de la science**

---

1984, n° 3

**Phénomènes sonores**

---

A l'agent de vente pour mon pays

(ou à l'Unesco, PUB-Ventes, 7, place de Fontenoy, 75700 Paris, France)

Je désire souscrire un abonnement à **impact** (4 numéros par an)

Édition anglaise  arabe  espagnole\*  française

Ci-joint, en paiement, la somme de \_\_\_\_\_

(Prix, frais de port inclus : un an, 68 francs. Pour connaître le tarif de l'abonnement en monnaie locale, consultez l'agent de vente pour votre pays.)

Nom \_\_\_\_\_

Adresse \_\_\_\_\_

---

(Prière d'écrire à la machine ou en majuscules d'imprimerie)

Signature \_\_\_\_\_

Nouvel abonnement  Réabonnement

---

\* Pour s'abonner à l'édition espagnole, prière de s'adresser à Oficina de Educación Iberoamericana, Ciudad Universitaria, Madrid-3 (Espagne).

**impact**  
science et société

## PUBLICATIONS DE L'UNESCO : AGENTS DE VENTE

- AFRIQUE DU SUD** : Van Schaik's Bookstore (Pty.) Ltd., Libri Building, Church Street, P.O. Box 724, PRITORIA.
- ALBANIE** : N. Sh. Botimeve Naim Frasheri, TIRANA.
- ALGÉRIE** : Institut pédagogique national, 11, rue Ali-Haddad (ex-rue Zaatcha), ALGER. Société nationale d'édition et de diffusion (SNED), 3, boulevard Zirout-Youcef, ALGER. Office des publications universitaires (OPU), 29, rue Abou Nouas, Hydra, ALGER.
- ALLEMAGNE (RÉP. FÉD.)** : S. Karger GmbH, Karger Buchhandlung, Angerhofstr. 9, Postfach 2, D-8034, GERMERING/MÜNCHEN ; « *Le Courrier de l'Unesco* » (éditions allemande, anglaise, espagnole et française) : M. Herbert Baum, Deutscher Unesco-Kurier Vertrieb, Besaltstrasse 57, 5300 BONN 3 ; *Pour les cartes scientifiques seulement* : Geo Center, Postfach 80030, 7000 STUTTGART 80.
- ANGOLA** : Distribuidora Livros e Publicações, Caixa Postal 2848, LUANDA.
- ANTILLES FRANÇAISES** : Librairie « Au Boul' Mich' », 1, rue Perrinon et 66, avenue du Parquet, 97200 FORT-DE-FRANCE (Martinique). Librairie Carnot, 59, rue Barbès, 97100 POINTE-A-PITRE (Guadeloupe).
- ANTILLES NÉERLANDAISES** : G.C.T. Van Dorp-Eddine N.V., P.O. Box 200, WILLEMSTAD (Curaçao N.A.).
- ARGENTINE** : Librería El Correo de la Unesco, EDILYR S.R.L., Tucumán 1685, 1050 BUENOS AIRES.
- AUSTRALIE** : Publications : Educational Supplies Pty Ltd., P.O. Box 33, BROOKVALE 2100, N.S.W. *Périodiques* : Dominic Pty Ltd., P.O. Box 33, BROOKVALE 2100, N.S.W. *Sous-agent* : UNAA, P.O. Box 175, 5th Floor, Ana House, 28 Elizabeth Street, MELBOURNE 3000. Hunter Publications, 58A Gipps Street, COLLINGWOOD VICTORIA 3006.
- AUTRICHE** : Buchhandlung Gerold and Co., Graben 31, A-1011 WIEN.
- BANGLADESH** : Bangladesh Books International Ltd., Ittefaq Building, 1 R. K. Mission Road, Hathkola, DACCA 3.
- BELGIQUE** : Jean De Lannoy, 202, avenue du Roi, 1060 BRUXELLES. CCP 000-0070823-13.
- BÉNIN** : Librairie nationale, B.P. 294, PORTO NOVO.
- BIRMANIE** : Trade Corporation no. (9), 550-552 Merchant Street, RANGOON.
- BOLIVIE** : Los Amigos del Libro : casilla postal 4415, LA PAZ ; avenida de las Heroínas 3712, casilla 450, COCHABAMBA.
- BRESIL** : Fundação Getúlio Vargas, Serviço de Publicações, caixa postal 9.052-ZC-02, Praia de Botafogo 188, RIO DE JANEIRO (GB).
- BULGARIE** : Hemus, Kantora Literatura, bd. Rousky 6, SOFIA.
- CANADA** : Éditions Renouf Limitée, 2182, rue Sainte-Catherine Ouest, MONTRÉAL, Qué. H3H 1M7.
- CHILI** : Bibliocentro Ltda., Constitución n.º 7, casilla 13731, SANTIAGO (21). Librería La Biblioteca, Alejandro I 867, casilla 5602, SANTIAGO 2.
- CHINE** : China National Publications Import and Export Corporation, P.O. Box 88, BEIJING.
- CHYPRE** : « MAM » Archbishop Makarios, 3rd Avenue, P.O. Box 1722, NICOSIA.
- COLOMBIE** : Instituto Colombiano de Cultura, carrera 3A, n.º 18/24, BOGOTÁ.
- CONGO** : Librairie populaire, B.P. 577, BRAZZAVILLE. Librairies populaires à POINTE-NOIRE, LOUBOUA, NKAYI, MAKABANA, OWENDO, OUESSO et IMPFONDO. Commission nationale congolaise pour l'Unesco, B.P. 493, BRAZZAVILLE.
- COSTA RICA** : Librería Trejos S.A., apartada 1313, SAN JOSÉ. Téléphones : 2285 y 3200.
- CÔTE-D'IVOIRE** : Librairie des Presses de l'Unesco, Commission nationale ivoirienne pour l'Unesco, B.P. 2871, ABIDJAN.
- CUBA** : Ediciones Cubanas, O'Reilly n.º 407, LA HABANA. « *Le Courrier* » seulement : Empresa COPREFIL, Dragones n.º 456 e/Lealtad y Campanario, LA HABANA 2.
- DANEMARK** : Munksgaard Export and Subscription Service, 35 Nørre Søgade, DK 1370, KØBENHAVN K.
- ÉGYPTE** : Unesco Publications Centre, I Tallat Harb Street, CAIRO.
- EL SALVADOR** : Librería Cultural Salvadoreña S.A., calle Delgado, n.º 117, apartado postal 2296, SAN SALVADOR.
- ÉQUATEUR** : *Périodiques seulement* : DINACUR Cia. Ltda, Pasaje San Luis 325 y Matovelle (Santa Prisca), Edificio Checa Ofc. 101, QUITO. *Pour les publications seulement* : Librería Pomaire, Amazonas 863, QUITO. *Périodiques et publications* : Casa de la Cultura Ecuatoriana. Nucleo del Guayas, Pedro Moncayo y 9 de Octubre, casilla de correo 3542, GUAYAQUIL.
- ESPAGNE** : Mundi-Pressa Libros S.A., apartado 1223, Castelló 37, MADRID 1. Ediciones Liber, apartado 17, Magdalena 8, OÑARROA (Vizcaya). DONAIRE, Ronda de Outeiro 20, apartado de correos 341, LA CORUÑA. Librería Al-Andalus, Roldana 1 y 3, SEVILLA 4. Librería Castells, Ronda Universidad 13, BARCELONA 7.
- ÉTATS-UNIS D'AMÉRIQUE** : Unipub, 345 Park Avenue South, NEW YORK, N.Y. 10010.
- ÉTHIOPIE** : Ethiopian National Agency for Unesco, P.O., Box 2996, ADDIS ABABA.
- FINLANDE** : Akateeminen Kirjakauppa, Keskuskatu 1, 00100 HELSINKI 10. Suomalainen Kirjakauppa OY, Koivuvuorankuja 2, 01640 VANTAA 64.
- FRANCE** : Librairie de l'Unesco, 7, place de Fontenoy, 75700 PARIS ; CCP Paris 12598-48.
- GABON** : Librairies Sogalivre à LIBREVILLE, PORT-GENTIL et FRANCEVILLE.
- GHANA** : Presbyterian Bookshop Depot Ltd. P.O. Box, 195 ACCRA. Ghana Book Suppliers Ltd., P.O. Box 7869, ACCRA. The University Bookshop of Cape Coast. The University Bookshop of Legon, P.O. Box 1, LEGON.
- GRÈCE** : Grandes librairies d'Athènes (Eleftheroudakis, Kauffman, etc.).
- GUATEMALA** : Comisión Guatemalteca de Cooperación con la Unesco, 3.ª avenida 13-30, zona 1, apartado postal 244, GUATEMALA.
- GUINÉE** : Commission nationale guinéenne pour l'Unesco, B.P. 964, CONAKRY.
- HAÏTI** : Librairie « A la Caravelle », 26, rue Roux, B.P. 111, PORT-AU-PRINCE.
- HAUTE-VOLTA** : Librairie Attie, B.P. 64, OUAGADOUGOU. Librairie catholique « Jeunesse d'Afrique », OUAGADOUGOU.
- HONDURAS** : Librería Navarro, 2.ª avenida, n.º 201, COMAYAGUELA, TEGUCIGALPA.
- HONG-KONG** : Federal Publications (HK) Ltd., 2D Freder Centre, 68 Sung Wong Toi Road, Tokwawan, KOWLOON. Swindon Book Co., 13-15 Lock Road, KOWLOON. Government Information Services, Publication Section, Baskerville House, 22 Ice House Street, HONG KONG.
- HONGRIE** : Akadémiai Könyvesbolt, Váci u. 22, BUDAPEST V. A.K.V. Könyvtárosok Boltja, Népköztársaság utja 16, BUDAPEST VI.
- INDE** : Orient Longman Ltd. : Kamani Marg, Ballard Estate, BOMBAY 400038 ; 17 Chittaranjan Avenue, CALCUTTA 13 ; 36A Anna Salai, Mount Road, MADRAS 2 ; 5-9-41/1 Bashir Bagh, HYDERABAD-500001 (A.P.) ; 80/1 Mahatma Gandhi Road, BANGALORE-560001 ; 3-5-820 Hyderguda, HYDERABAD-500001. *Sous-dépôt* : Oxford Book and Stationery Co., 17 Park Street, CALCUTTA 700016 ; Scindia House, New DELHI 110001. Publication Unit, Ministry of Education and Culture, Ex. AFO Hutments, Dr. Rajendra Prasad Road, New DELHI 110001.
- INDONÉSIE** : Bhratarata Publishers and Booksellers, 29 Jl. Oto Iskandandinata III, JAKARTA. Gramedia Bookshop, Jl. Gadjah Mada 109, JAKARTA. Indira P.T., Jl. Dr. Sam Ratulangi 37, JAKARTA PUSAT.
- IRAK** : McKenzie's Bookshop, Al-Rashid Street, BAGHDAD.
- IRAN** : Commission nationale iranienne pour l'Unesco, avenue Iranchahr Chomali n.º 300, B.P. 1533, TÉHÉRAN. Kharazmie Publishing and Distribution Co., 28 Vessal Shirazi Street, Enghéhab Avenue, P.O.B. 314/1486, TÉHÉRAN.
- IRLANDE** : The Educational Company of Ireland Ltd., Ballymount Road, Walkinstown, DUBLIN 12.
- ISLANDE** : Snaebjörn Jonsson & Co., H.F., Hafnarstræti 9, REYKJAVIK.
- ISRAËL** : A.B.C. Bookstore Ltd., P.O. Box 1283, 71 Al-lenby Road, TEL AVIV 61000.
- ITALIE** : LICOSA (Libreria Commissionaria Sansoni S.p.A.), Via Lamarmora 45, casella postale 552, 50121 FIRENZE.
- JAMAÏRIYA ARABE LIBYENNE** : Agency for Development of Publication and Distribution, P.O. Box 34-35, TRIPOLI.
- JAMAÏQUE** : Sangster's Book Stores Ltd., P.O. Box 366, 101 Water Lane, KINGSTON.
- JAPON** : Eastern Book Service Inc., Shuhwa Toranomon 3-Bldg, 23-6 Toranomon 3-chome Minato-ku, TOKYO 105.
- JORDANIE** : Jordan Distribution Agency, P.O.B. 375, AMMAN.
- KENYA** : East African Publishing House, P.O. Box 30571, NAIROBI.
- KOWEÏT** : The Kuwait Bookshop, Co. Ltd., P.O. Box 2942, KUWAIT.
- LESOTHO** : Mazenod Book Centre, P.O. MAZENOD.
- LIBAN** : Librairies Antoine A. Naoufal et Frères, B.P. 656, BEYROUTH.
- LIBÉRIA** : Cole & Yancy Bookshops Ltd., P.O. Box 286, MONROVIA.
- LIECHTENSTEIN** : Eurocan Trust Reg., P.O. Box 5, SCHAAN.
- LUXEMBOURG** : Librairie Paul Bruck, 22, Grand-Rue, LUXEMBOURG.
- MADAGASCAR** : Commission nationale de la République démocratique de Madagascar pour l'Unesco, B.P. 331, ANTANANARIVO.

- MALAISIE** : Federal Publications Sdn. Bhd., Lot 8238 Jalan 222, Petaling Jaya, SELANGOR. University of Malaya Co-operative Bookshop, KUALA LUMPUR 22-11.
- MALI** : Librairie populaire du Mali, B.P. 28, BAMAKO.
- MALTE** : Sapienza's Library, 26 Republic Street, VALLETTA.
- MAROC** : *Toutes les publications* : Librairie « Aux belles images », 282, avenue Mohammed-V, RABAT (CCP 68-74). Librairie des Écoles, 12, avenue Hassan-II, CASABLANCA. « Le Courrier » seulement (pour les enseignants) : Commission nationale marocaine pour l'Unesco, 19, rue Oqba, B.P. 420, AGDAL-RABAT (CCP 324-45).
- MAURICE** : Nalanda Co. Ltd., 30 Bourbon Street, PORT-LOUIS.
- MAURITANIE** : GRA.LI.CO.MA., 1, rue du Souk X, avenue Kennedy, NOUAKCHOTT.
- MEXIQUE** : SABSA, Insurgentes Sur n.º 1032-401, México 12 D.F. Librería « El Correo de la Unesco », Actipán 66, Colonia del Valle, México 12 D.F.
- MONACO** : British Library, 30, boulevard des Moulins, MONTÉ-CARLO.
- MOZAMBIQUE** : Instituto Nacional do Livro e do Disco (INLD), avenida 24 de Julho 1921, 1/c e 1.º andar, MAPUTO.
- NICARAGUA** : Librería Cultural Nicaragüense, calle 15 de Septiembre y avenida Bolívar, apartado 807, MANAGUA.
- NIGER** : Librairie Mauciert, B.P. 868, NIAMEY.
- NIGÉRIA** : The University Bookshop of Ife. The University Bookshop of Ibadan, P.O. Box 286, IBADAN. The University Bookshop of Lagos. The Ahmadu Bello University Bookshop of Zaria.
- NORVÈGE** : *Toutes les publications* : Johan Grundt Tanum, Karl Johans gate 41/43, OSLO 1. Universitets Bokhandelen, Universitetstret, P.O. Box 307, BLINDERN OSLO 3.
- NOUVELLE-CALÉDONIE** : Replex SARL, B.P. 1572, NOUMÉA.
- NOUVELLE-ZÉLANDE** : Government Printing Office Bookshops : Retail Bookshop, 25 Rutland Street, Mail Orders, 85 Beach Road, Private Bag C.P.O., AUCKLAND ; Retail Ward Street, Mail Orders, P.O. Box 857, HAMILTON ; Retail Cubacade World Trade Centre, Mulgrave Street (Head Office), Mail Orders Private Bag, WELLINGTON ; Retail, 159 Hereford Street, Mail Orders Private Bag, CHRISTCHURCH ; Retail Princes Street, Mail Orders, P.O. Box 1104, DUNEDIN.
- OUGANDA** : Uganda Bookshop, P.O. Box 7145, KAMPALA.
- PAKISTAN** : Mirza Book Agency, 65 Shahrah Quaid-i-Azam, P.O. Box 729, LAHORE 3.
- PANAMA** : Distribuidora Cultura Internacional, Apartado 7571, Zona 5, PANAMÁ.
- PARAGUAY** : Agencia de Diarios y Revistas, Sra. Nelly A. de García Astillero, Pte. Franco n.º 580, ASUNCIÓN.
- PAYS-BAS** : *Pour les publications seulement* : Keesing Boeken B. V., Postbus 1118, 1000 BC AMSTERDAM. Dekker and Nordemann NV, P.O. Box 197, 1000 AD AMSTERDAM.
- PÉROU** : Librería Studium, Plaza Francia 1164, Apartado 2139, LIMA.
- PHILIPPINES** : The Modern Book Co., Inc., 922 Rizal Avenue, P.O. Box 632, MANILA 2800.
- POLOGNE** : Ars Polona - Ruch, KrakowskiePrzedmiescie 7, 00-068 WARSZAWA. ORPAN-Import, Palac Kultury, 00-901 WARSZAWA.
- PORTO RICO** : Librería « Alma Mater », Cabrera 867, Río Piedras, PUERTO RICO 00925.
- PORTUGAL** : Dias & Andrade Ltda., Livraria Portugal, rua do Carmo 70, LISBOA.
- RÉPUBLIQUE ARABE SYRIENNE** : Librairie Sayegh, Immeuble Diab, rue du Parlement, B.P. 704, DAMAS.
- RÉPUBLIQUE DE CORÉE** : Korean National Commission for Unesco, P.O. Box Central 64, SÉOUL.
- RÉPUBLIQUE DÉMOCRATIQUE ALLEMANDE** : Librairies internationales ou Buchhaus Leipzig, Postfach 140, 701 LEIPZIG.
- RÉPUBLIQUE DOMINICAINE** : Librería Blasco, avenida Bolívar n.º 402, esq. Harmanos Deligne, SANTO DOMINGO.
- RÉPUBLIQUE-UNIE DE TANZANIE** : Dar es Salaam Bookshop, P.O. Box 9030, DAR ES SALAAM.
- RÉPUBLIQUE-UNIE DU CAMEROUN** : Le secrétaire général de la Commission nationale de la République-Union du Cameroun pour l'Unesco, B.P. 1600, YAOUNDÉ. Librairie des Éditions Clé, B.P. 1501, YAOUNDÉ. Librairie Saint-Paul, B.P. 763, YAOUNDÉ. Librairie Aux Messageries, avenue de la Liberté, B.P. 5921, DOUALA. Librairie Aux Frères Réunis, B.P. 5346, DOUALA.
- RHODÉSIE DU SUD** : Textbook Sales (PVT) Ltd. 67 Union Avenue, SALISBURY.
- ROUMANIE** : ILEKIM, Import-Export, 3 Calea 13 Decembrie, P.O. Box 1-136/1-137, BUCURESTI.
- ROYAUME-UNI** : H. M. Stationery Office, P.O. Box 569, LONDON SE1 9NH. Government bookshops : London, Belfast, Birmingham, Bristol, Edinburgh, Manchester. *Pour les cartes scientifiques seulement* : McCarta Ltd, 122 Kings Cross Road, LONDON WC1X 9DS.
- SÉNÉGAL** : Librairie ClairAfrique, B.P. 2005, DAKAR. Librairie des Quatre-Vents, 91, rue Blanchot, B.P. 1820, DAKAR.
- SEYCHELLES** : New Service Ltd., Kingstote House P.O. Box 131, MAHÉ. National Bookshop, P.O. Box 48, MAHÉ.
- SIERRA LEONE** : Fourah Bay, Njala University and Sierra Leone Diocesan Bookshops, FREETOWN.
- SINGAPOUR** : Federal Publications (S) Pre Ltd., No. 1 New Industrial Road, off Upper Fava Lebar Road, SINGAPORE 19.
- SOMALIE** : Modern Book Shop and General, P.O. Box 951, MOGADISCIO.
- SOU DAN** : Al Bashir Bookshop, P.O. Box 1118, KHARTOUM.
- SRI LANKA** : Lake House Bookshop, Sir Chittampalam Gardiner Mawata, P.O. Box 244, COLOMBO 2.
- SUEDE** : *Toutes les publications* : A/B.C.E. Fritzes Kungl. Hovbokhandel, Regeringsgatan 12, Box 16356, S-103 27 STOCKHOLM. « Le Courrier » seulement : Svenska FN-Förbundet, Skolgränd 2, Box 15050, S-104 65 STOCKHOLM. *Pour les périodiques seulement* : Wennergren-Williams AB Box 30004, S 104 25 STOCKHOLM.
- SUISSE** : Europa Verlag, Rämistrasse 5, 8024 ZÜRICH. Librairie Payot, 6, rue Grenus, 1211 GENÈVE 11.
- SURINAME** : Suriname National Commission for Unesco, P.O. Box 2943, PARAMARIBO.
- TCHÉCOSLOVAQUIE** : SNTL Spalena 51, PRAHA 1 (*Exposition permanente*). Zahraniční literatura, 11 Soukenníka, PRAHA 1. *Pour la Slovaquie seulement* : Alfa Verlag, Publishers, Hurbanovo nám. 6, 893 31 BRATISLAVA.
- THAÏLANDE** : Nibondh and Co. Ltd., 40-42 Charoen Krung Road, Siyaeg Phaya Sri, P.O. Box 402, BANGKOK. Sukssan Panit, Mansion 9, Rajdamnern Avenue, BANGKOK. Suktit Siam Company, 1715 Rama IV Road, BANGKOK.
- TOGO** : Librairie évangélique, B.P. 378, LOMÉ. Librairie du Bon Pasteur, B.P. 1164, LOMÉ. Librairie universitaire, B.P. 3481, LOMÉ.
- TRINITÉ-ET-TOBAGO** : National Commission for Unesco, 18 Alexandra Street, St. Clair, TRINIDAD W.I.
- TUNISIE** : Société tunisienne de diffusion, 5, avenue de Carthage, TUNIS.
- TURQUIE** : Haset Kitapevi A.S., Istiklal Caddesi n.º 469, Posta Kutusu 219, Beyoğlu, İSTANBUL.
- URSS** : Mezhdunarodnaja Kniga, MOSKVA G-200.
- URUGUAY** : Edilyr Uruguay, S.A., Maldonado 1092, MONTEVIDEO.
- VENEZUELA** : Librería del Este, avenida Francisco de Miranda 52, Edificio Galipán, apartado 60337, CARACAS. La Murallal Distribuciones S.A., 4.º avenida entre 3.º y 4.º transversal, Quinta « IRENALIS », Los Palos Grandes, CARACAS 106.
- YOUgosLAVIE** : Jugoslovenska Knjiga, Trg Republike 5/8 P.O.B. 36, 11-001 BEOGRAD. Drzavna Založba Slovenije, Titova C. 25, P.O.B. 50-1, 61-000 LJUBLJANA.
- ZAÏRE** : Librairie du CIDEP, B.P. 2307, KINSHASA 1. Commission nationale zaïroise pour l'Unesco, Commissariat d'État chargé de l'éducation nationale, B.P. 32, KINSHASA.

## BONS DE LIVRES DE L'UNESCO

Utilisez les bons de livres de l'Unesco pour acheter des ouvrages et des périodiques de caractère éducatif, scientifique ou culturel. Pour tout renseignement complémentaire, veuillez vous adresser au Service des bons de l'Unesco, 7, place de Fontenoy, 75700 Paris.

# Dans les numéros précédents

Vol. 32 (1982), n° 2

## Les microbes : amis et ennemis

Présentation, par Bernard Dixon.

Le monde des microbes,  
par Edgar J. DaSilva.

L'information en microbiologie — Un moyen  
d'éviter les mauvais usages,  
par Carl-Gorän Hedén.

*Escherichia coli* — Clé de la génétique  
moderne, par François Brégégère.

La promesse de la technologie microbienne,  
par Amin S. El Nawawy.

Production de combustibles par la technique  
microbienne, par Faustino Sñeriz.

Les bactéries et l'économie de l'azote,  
par A. Ayanaba.

La lixiviation bactérienne des métaux,  
par G. I. Karavaiko.

Les fléaux d'origine microbienne et leur impact  
sur la santé, par Dennis G. Howell  
et Marian A. Soltys.

Une énigme du Paléozoïque pour la science du  
Cénozoïque, par Tom Mikkelsen.

Vol. 32 (1982), n° 3

## Le climat

### Physique et chimie de l'atmosphère

Présentation.

Chaleur ou froid pour les générations  
futures ?, par Lioudmila V. Maksimova.

L'avenir du climat, par F. Kenneth Hare.

Physique et chimie de l'atmosphère,  
par Kirill Ya. Kondratyev.

L'évolution de la composition chimique de  
l'atmosphère, par James C. G. Walker.

Les océans et le climat,  
par Roger Revelle et Bertrand Thompson.

L'atmosphère terrestre vue de l'Antarctique,  
par Joseph C. Farman et W. R. Piggott.

Le confort thermique : le climat et le corps  
humain, par Peter Th. Vastardis.

Étudier le climat pour préserver les œuvres  
d'art, par Michel Biezunski.

Gaz carbonique et agriculture des pays en  
développement, par Suresh K. Sinha.

Les famines : des causes climatiques et des  
causes économiques, par Albert Sasson.

L'avenir de la chimie atmosphérique en  
Afrique, par Shem O. Wandiga.

Pourquoi un programme d'études de  
l'atmosphère moyenne ?, par A. P. Mitra.

La modification intentionnelle des  
phénomènes atmosphériques, par S. Panchev.

Changements climatiques et droit  
international, par Ved P. Nanda.

L'âme et le climat, par Jacques Bril.

Vol. 32 (1982), n° 4

## La science et les jeux : apprendre en s'amusant

Présentation : Apprendre en s'amusant.

George Marx s'entretient avec Ernö Rubik.

Les jeux, le jeu et la technologie,  
par Elliott M. Avedon.

Quelques origines énigmatiques du jeu  
d'invention, par Dharamjit Singh.

Les jeux électroniques, pour le meilleur ou  
pour le pire, par Jon Bing.

Un bruit qui fait le tour du monde.

Les jeux vidéo apprennent à résoudre les  
problèmes, par James Clayson.

Apprendre avec l'aide de l'ordinateur. Un  
environnement scolaire efficace et agréable,  
par Mike Lally et Iain Macleod.

Le Nehru Science Centre : la participation  
du public à la science, par R. M. Chakraborti.

Des jouets scientifiques pour l'enseignement  
des sciences, par Isaias Raw.

Associer les sciences et le théâtre à l'école,  
par John Beetlestone et Charles Taylor.

Des jeux et des simulations pour faire  
comprendre l'importance de la science dans  
la société, par Henry Ellington, Eric Addinall  
et Fred Percival.

---

On trouvera un index ou des extraits  
d'articles de ce périodique dans  
*Current contents, Current literature of  
science of science, Ebsco, Environmental  
periodicals bibliography, RSJ,  
Sociological abstracts, Ulrich's et  
Universal reference system.*

---

## *les dossiers*

*Guillermo J. Cano* nous parle des institutions du secteur de l'eau

*György Kovács* fait une étude sur les ressources en eaux souterraines

*Letitia E. Obeng* nous entretient des réservoirs artificiels

*Silvio Barabas* nous parle de la surveillance de la qualité de l'eau

et d'autres articles de Gunther Garbrecht, Arie Issar, K. K. Framji, Slaheddine El Amami, Maurice L. Albertson, R. P. Mohanty, R. K. Gabrysch

... *sur le thème de ce numéro :*

## la gestion de nos ressources en eau douce

1983 n°1 **impact**  
science et société

