



conservation et protection  
des eaux souterraines  
dans les pays développés

B. R. G. M.  
31. JAN. 1986  
BIBLIOTHEQUE



BRGM

conservation et protection  
des eaux souterraines  
dans les pays développés

J. Margat

Décembre 1985  
85 SGN 611 EAU

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES  
SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL  
Département Eau

B.P. 6009 - 45060 ORLÉANS CEDEX 2 - France - Tél.: (33) 38.64.34.34



## RESUME

---

Revue générale des problèmes posés par la gestion et la protection des eaux souterraines dans les pays développés et industrialisés, notamment en Europe, proposant aux hydrogéologues un cadre d'analyse et un schéma d'argumentation à l'adresse des autorités responsables de l'administration des eaux et de la politique de l'eau :

- rappel des particularités et des avantages des eaux souterraines comme ressource,
- estimations de leur importance actuelle et future comme source d'approvisionnement en eau , accompagnées de statistiques nationales,
- mise en relief de leur sensibilité en quantité et en qualités aux actions humaines, et répertoire des conséquences possibles des excès de leur exploitation et des détériorations de leur qualité, illustrées de quelques exemples,
- formulation synthétique des problèmes respectifs de connaissance, de choix des stratégies de développement et de conservation conciliés, de choix des voies et moyens d'actions, à résoudre en vue des objectifs de gestion et de protection des eaux souterraines.

Cet essai dérive pour l'essentiel de contributions (en partie inédites) aux travaux du Comité des problèmes de l'eau de la Commission économique pour l'Europe des Nations Unies, en 1983 et 1984.

Ce document est la version française originale de l'article "Groundwater conservation and protection in developed countries" publié en anglais dans le volume 1 ("Keynote Papers") des actes du 18e Congrès de l'AIH l'"hydrogéologie au service de l'homme", à Cambridge (Royaume Uni) en septembre 1985 (mémoires de l'AIH, vol. XVIII, pp. 270-301).



## PREAMBULE

La gestion et la protection des eaux souterraines ne sont pas l'affaire des seuls hydrogéologues. Il leur appartient bien, certes, d'analyser les potentialités offertes et les contraintes imposées par les conditions physiques du milieu naturel, de prévoir et de démontrer les conséquences de multiples actions humaines sur l'eau souterraine, de formuler et proposer les modalités techniques les plus capables d'atteindre les objectifs voulus en cette matière. Cependant, les finalités de la gestion et de la protection des eaux souterraines -comme de celles de toutes les eaux, ou plus généralement des ressources naturelles renouvelables et de l'environnement- ainsi que les voies et moyens appropriés à ces fins dépendent des points de vue et des objectifs de bien d'autres acteurs et décideurs. Autant les hydrogéologues peuvent contribuer à éclairer la compréhension des problèmes par ces nombreuses parties prenantes et les prises de décision à différents niveaux, autant ils doivent eux-mêmes comprendre les aspects non techniques qui entrent en jeu.

Le propos de cette revue d'ensemble des problèmes posés pour gérer et protéger les eaux souterraines, tout particulièrement dans les pays développés et industrialisés où ces problèmes sont le plus complexes, se situe délibérément en aval des aspects strictement scientifiques et techniques. Inspiré par les travaux d'analyse et de synthèse contemporains, notamment ceux élaborés par le Comité des problèmes de l'eau de la Commission économique pour l'Europe des Nations-Unies [32]\*, cet essai d'aide-mémoire voudrait proposer aux hydrogéologues un cadre général dans lequel s'ordonnent les analyses et les propositions qu'ils peuvent adresser aux autorités responsables de la politique de l'eau.

---

\* Renvoi à la liste de références.

On se propose ainsi, dans cet essai :

- de rappeler les avantages des eaux souterraines comme ressource pour répondre aux demandes humaines, aussi bien que leurs fonctions comme composante du cycle de l'eau naturel,
- d'évaluer leur importance actuelle et future, notamment comme source d'approvisionnement,
- d'attirer l'attention sur leur sensibilité en quantité et en qualité aux actions humaines,
- enfin de mettre en lumière les conséquences possibles des excès d'exploitation et des détériorations de qualités de l'eau souterraine, tant pour les utilisateurs humains, que pour l'environnement naturel, dans le présent et dans l'avenir à moyen et long terme.

## 1. INTRODUCTION

- 1 - Dans la plupart des pays de la zone tempérée de l'hémisphère nord, les eaux souterraines composent une partie notable, parfois prédominante, des ressources en eau. Leur exploitation contribue, de même, dans une grande mesure, aux approvisionnements en eau, surtout pour l'alimentation en eau potable des populations. Souvent faciles à exploiter par des agents économiques nombreux et recherchées pour leurs avantages, les eaux souterraines constituent néanmoins une ressource sensible aux risques d'exploitation excessive et de dégradation de leurs qualités que la croissance démographique et économique amplifie dans de nombreux pays industrialisés. Aussi les autorités responsables de l'administration des eaux et de la gestion des ressources en eau de ces pays attachent une importance accrue à la conservation et à la protection des eaux souterraines.

- 2 - S'il est vrai que, parmi les eaux du milieu naturel -notamment les eaux douces continentales-, les eaux souterraines sont dotées de caractères spécifiques, comme on les rappellera ci-après § 4, il convient de ne pas perdre de vue qu'elles constituent une composante du cycle naturel de l'eau : elles sont reliées, sous des formes variées, aux eaux superficielles, tant en amont qu'en aval de leur cursus propre. Les ressources en eau souterraine ne sont donc généralement pas indépendantes des ressources en eau de surface, tout en offrant des degrés divers d'autonomie relative et en permettant des opérations d'aménagement conjugué ou d'utilisation coordonnée : ceci a des conséquences sur la gestion des eaux souterraines, aussi bien sur le plan de la quantité que sur celui des qualités.
  
- 3 - Une stratégie de conservation et protection des eaux souterraines, conciliée avec les mises en valeur qui résultent de leur utilisation, ne peut donc être conçue, ni appliquée, indépendamment d'une stratégie d'aménagement et d'utilisation des eaux en général, ni indépendamment de stratégies d'occupation du sol et du sous-sol -y compris d'exploitation des autres "ressources du sous-sol"-.
  
- 4 - La spécificité des eaux souterraines, en tant que ressource en eau, résulte d'abord des caractères physiques de leur occurrence, de leur distribution et de leur régime dans le milieu naturel. Ces caractères sont bien connus des hydrogéologues et on rappelle ci-après, brièvement, ceux qu'il est le plus essentiel de faire comprendre aux responsables de l'administration et de la gestion des ressources en eau :
  - gamme très étendue de grandeurs des dimensions structurales (extension, épaisseur, profondeur) et des caractéristiques déterminant les propriétés hydrauliques (perméabilité, porosité) des "gisements" d'eau souterraine, les aquifères ;
  
  - extension spatiale relativement continue (nappes souterraines), du moins dans les aquifères poreux ou micro-fissurés, et structure non ou peu hiérarchisée des systèmes d'écoulement souterrain (contrastant avec les réseaux hydrographiques de surface) ;



- conjonction par les aquifères des deux fonctions de conducteur de flux et d'accumulateur (stockage), toutefois plus ou moins séparées dans le détail par les hétérogénéités géologiques ; d'où une autorégulation, variable mais en général forte, des nappes souterraines : un aquifère transforme des apports discontinus et irréguliers en écoulement continu et plus régulier ;
  - grande variété de régimes, de vitesses d'écoulement et de degrés d'inertie hydrodynamique -manière de réagir aux impulsions naturelles ou artificielles- ; une différence majeure, commandée par les structures géologiques, distingue sur ce plan les eaux souterraines à surface libre, à forte inertie et dont l'alimentation est surtout tributaire des conditions hydrométéorologiques (variables), et les eaux souterraines captives profondes, stocks renouvelés plus lentement et à faible inertie ;
  - interactions physico-chimiques variées entre eau et sols ou roches, favorisées par les grandes surfaces d'échanges et par les longues durées de séjour de l'eau dans les aquifères.
- 5 - Ces caractères physiques conditionnent les rôles des eaux souterraines dans le milieu et leur sensibilité, aussi bien que les démarches de leur connaissance, de leur mobilisation et de leur conservation. Toutefois, l'extrême variété de ces conditions dissuade de porter sur les eaux souterraines des appréciations générales et uniformes.

## 2. RESSOURCE EN EAU SOUTERRAINE : AVANTAGES ET CONTRAINTES

- 6 - Les conditions naturelles que l'on vient de rappeler dotent beaucoup d'eaux souterraines d'avantages reconnus et mis à profit depuis longtemps, qui en font une source d'approvisionnement en eau privilégiée pour satisfaire les demandes de nombreux utilisateurs. Ces avantages ont trait à la quantité et aux conditions pratiques d'exploitation comme aux qualités de l'eau. Toutefois, il ne sont pas universels et, en contrepartie, des contraintes particulières s'appliquent à la mobilisation et à la gestion des eaux souterraines.

- 7 - L'eau souterraine est souvent accessible et exploitable par des ouvrages assez productifs sans requérir un travail important, dans des territoires étendus. Des dispositifs d'exploitation très variés sont concevables et praticables. Leurs emprises au sol sont minimales. Les contraintes de localisation sont bien moindres que celles des prises d'eau de surface, sans être cependant négligeables : distribution hétérogène des productivités, discontinuité de certains aquifères. Les coûts énergétiques d'exploitation sont souvent nuls (captages gravitaires, puits jaillissants) ou minimales (pompages à faible profondeur).
  
- 8 - Les eaux souterraines, ressource permanente et extensive, ne nécessitent pas d'aménagement homologues des équipements de régularisation et de transfert d'eau de surface. Elles se prêtent généralement à la prise directe et elles sont à la portée de nombreux agents économiques individuels ou collectifs occupants du sol, qui peuvent l'exploiter soit pour leurs propres usages (ménages, entreprises agricoles ou industrielles), soit pour la distribuer comme produit de consommation, en général comme eau potable (y compris en bouteille). Les investissements que leur exploitation nécessite sont faciles à diviser et à étaler dans le temps, et les équipements installés atteignent rapidement leur plein emploi : avantages économiques supplémentaires.
  
- 9 - L'eau souterraine a encore l'avantage d'offrir souvent des caractéristiques de qualité naturelles conformes aux normes requises par de nombreux usages, notamment comme eau potable, et assez constantes dans le temps. En outre, les conditions de gisement de l'eau souterraine lui assurent assez généralement une protection naturelle contre les contaminations bactériennes (autoépuration par filtration), sinon contre certaines pollutions chimiques -comme on le soulignera plus loin (cf. 4, § 4.1 et suivants)-. De ce fait, la production d'eau potable à partir d'eau souterraine requiert, en général, des traitements sensiblement plus simples et moins coûteux, et aussi des contrôles moins fréquents, qu'à partir d'eau de surface.
  
- 10 - Accumulatrices et conductrices de chaleur -apportées par le flux géothermique naturel ou introduite- les eaux souterraines offrent aussi une ressource énergétique que la crise contemporaine de l'énergie met en actualité.

L'utilisation d'eaux chaudes profondes, dans certaines conditions techniques et économiques favorables -existence d'une demande appropriée, de "réseaux de chaleur"- peut être compétitive pour le chauffage de collectivités, et ces eaux n'ont généralement pas d'autre emploi possible. De plus, dans différents pays, le prélèvement d'eau souterraine à température normale (nappes phréatiques) comme "source froide" pour le fonctionnement des pompes à chaleur se développe.

En France, par exemple, on dénombrait en 1982 environ 25 000 pompes à chaleur (toutes puissances groupées) "eau/eau" en service, utilisant l'eau souterraine [33].

Le "stockage de calories" en aquifère, à l'échelle journalière ou saisonnière, comme régulation (héliogéothermie) ou pour récupérer des rejets thermiques fatals, commence aussi à être envisagé et pratiqué. Ces nouvelles utilités de l'eau souterraine peuvent entrer en compétition avec leurs utilisations classiques et compliquer la gestion de la ressource.

- 11 - Enfin, l'eau souterraine est un obstacle à l'occupation du sous-sol et à l'exploitation des ressources minérales, qu'il peut être utile d'éliminer : l'exhaure pratiquée par les industries extractives peut, elle aussi, interférer et rivaliser avec l'exploitation d'eau souterraine comme ressource et requérir arbitrage. Dans une certaine mesure seulement, l'eau extraite par l'industrie minière constitue un sous-produit utilisé, notamment pour l'alimentation en eau potable (exemple en France [24]) ; et cette utilisation ne peut être que temporaire.
- 12 - L'eau souterraine présente donc des utilités multiples, mais parfois non compatibles, ce qui met les utilisateurs -les exploitants- en compétition. L'importance actuelle des volumes d'eau souterraine prélevée et utilisée, dont les statistiques nationales d'exploitation donnent la mesure -cf. Tableau I-, indique bien -au plan quantitatif- la mise à profit de ses divers avantages pratiques.
- 13 - En même temps qu'elles déterminent les avantages que l'on vient de passer en revue, les conditions naturelles particulières des eaux souterraines soumettent leur gestion à des contraintes spécifiques.

Toute action locale sur l'eau souterraine influence, à des degrés divers et plus ou moins rapidement, l'ensemble de l'aquifère concerné et les effets des actions successives se cumulent. Les exploitations ponctuelles dans un même système aquifère sont solidarisées par les conditions physiques, sans priorité de l'amont sur l'aval (eu égard à l'écoulement des nappes souterraines) ni immunité assurée par l'antériorité contre les effets d'actions présentes ou futures.

- 14 - Les réserves de beaucoup d'aquifères offrent la faculté de prélever des volumes d'eau momentanés ou saisonniers supérieurs aux apports naturels synchroniques, ce qui affranchit généralement l'exploitation d'eau souterraine des aléas climatiques et permet de satisfaire des demandes de pointe ; mais en contrepartie, les eaux souterraines sont sans défense contre des prolongements de tels déséquilibres à plus long terme, conséquences du développement de "surexploitations" non délibérées. Par ailleurs, la protection naturelle des eaux souterraines n'est pas absolue ni surtout également répartie et elle ne met pas leurs qualités à l'abri de diverses agressions directes ou indirectes.
- 15 - La conservation et la protection de la ressource en eau souterraine, en quantité comme en qualité, sont moins spontanées que le développement de son exploitation et de son utilisation, parce qu'elles ne se conçoivent ni ne se décident à l'échelle locale de chaque exploitant, mais à l'échelle régionale des nappes souterraines. L'adaptation des champs de compétence des autorités de gestion à celui de ces nappes peut poser des problèmes, car les systèmes aquifères (unités de gestion naturelles des eaux souterraines) ne sont pas exactement homologues des bassins hydrographiques (unités de gestion des eaux de surface), ni ne coïncident avec eux. En corollaire, ces autorités ne peuvent intervenir que par des voies et moyens indirects sur les actes des exploitants ou d'autres agents économiques influençant le régime ou les qualités des eaux souterraines (cf. infra 6, § 66).
- 16 - Les dispositifs techniques appropriés pour obtenir les informations nécessaires aux décisions de gestion dépendent eux aussi des conditions spécifiques aux eaux souterraines.

Si l'observation des variables quantitatives -niveaux, débits de sources- est relativement facile, la surveillance des qualités est plus malaisée. La lenteur des déplacements et des mélanges des eaux souterraines restreint la représentativité spatiale des échantillons, tandis que l'extension et, parfois, l'épaisseur des nappes nécessitent des réseaux de prélèvement complexes. Enfin, les paramètres à contrôler sont multiples et croissent en nombre.

- 17 - Par ailleurs, considérer l'eau souterraine exclusivement comme une ressource à la disposition des hommes, c'est faire abstraction de ses rôles dans le milieu naturel, essentiellement comme composante du cycle de l'eau.

Si, dans la lithosphère, l'eau souterraine ne forme qu'exceptionnellement un biotope (cas en certains domaines karstiques), elle contribue dans beaucoup de zones à nappe libre peu profonde, à la régulation de l'humidité des sols utile à la végétation naturelle ou cultivée. Mais c'est surtout par ses liens avec les eaux de surface que son rôle naturel est important : les nappes souterraines sont les principaux régulateurs des écoulements de surface et -en dehors des bassins à neiges et glaciers permanents- elles entretiennent, pour l'essentiel, les débits d'étiage des cours d'eau pérennes et les niveaux de certains plans d'eau superficiels.

Par exemple, pour l'ensemble du continent européen (incluant la partie européenne de l'URSS), il a été estimé [7] que les eaux souterraines constituaient 99 % de la réserve totale d'eau douce, évaluée à  $1,4 \cdot 10^{14}$  m<sup>3</sup>, et que l'écoulement stable des cours d'eau, provenant pour l'essentiel des eaux souterraines, s'élevait à  $1\ 085 \cdot 10^9$  m<sup>3</sup>/an, soit 1/3 de l'écoulement total. Aux USA (avec Alaska), la réserve souterraine d'eau douce a été estimée de 1,2 à  $2,2 \cdot 10^{14}$  m<sup>3</sup>, et l'écoulement de base provenant des eaux souterraines à environ 30 % de l'écoulement moyen total, évalué à  $2\ 970 \cdot 10^9$  m<sup>3</sup>/an [13].

Les eaux souterraines sont, de ce fait, un facteur primordial de permanence de nombreux écosystèmes aquatiques d'eau douce dont elles conditionnent les volumes, les flux et les caractéristiques physiques et chimiques.

- 18 - Enfin, si l'on intègre dans l'"exigence écologique" la préservation de l'écosystème humain, indissociable de la biosphère et de l'hydrosphère, on revient à la fois aux avantages particuliers des eaux souterraines comme ressource et à leur interaction avec les autres composantes des ressources en eau globales dans le milieu naturel :
- D'une part l'eau souterraine forme de beaucoup la plus grande partie de la phase régulière de la ressource en eau totale "naturelle", y compris en surface. En de nombreux pays, elle demeure même la composante prédominante de l'ensemble des flux d'eau stables, tant naturels qu'artificiels, régularisés par les réservoirs d'accumulation. Les plus souvent en amont dans le circuit des eaux douces continentales, moins chargées du rôle d'évacuation que les eaux superficielles, les eaux souterraines ont le plus vocation à la préservation de qualités naturelles.
  - D'autre part, l'exploitation d'eau souterraine ou la modification de ses qualités par des rejets peuvent porter préjudice à des utilisateurs d'eau de surface ou à des occupants du sol avant même d'avoir des effets négatifs pour les exploitants eux-mêmes (coût de production trop élevé, détérioration de qualités induite, épuisement temporaire ou prolongé).
- 19 - La conservation et la protection des eaux souterraines doivent ainsi avoir pour but, non seulement la sauvegarde de leurs avantages, donc le maintien de leur reproductibilité (en quantité et qualités) en tant que ressource pour un ensemble d'utilisateurs directs présents et futurs, mais aussi la conservation de ressources en eau de surface subordonnées -captées ou utilisées in situ- par d'autres agents en partie concurrents, ainsi que le maintien de rôles naturels indirects des eaux souterraines vis-à-vis d'écosystèmes que l'on veut préserver ou d'équilibres géodynamiques dont la rupture serait indésirable. Ces différentes conservations, qui ne sont pas toujours compatibles, impliquent des arbitrages et s'exprimeront par un ensemble de contraintes auxquelles les exploitants ou d'autres acteurs influençant l'eau souterraine devront être assujettis : contraintes internes, propres au point de vue des exploitants eux-mêmes, contraintes externes traduisant les autres objectifs.

### 3. L'IMPORTANCE ACTUELLE ET FUTURE DES EAUX SOUTERRAINES DANS L'ECONOMIE DE L'EAU

- 20 - Une première mesure de cette importance est donnée par les estimations des volumes d'eau souterraine prélevés, en valeur absolue et en proportion des volumes d'eau prélevés totaux, ainsi que par celle des parts prises par les affectations des prélèvements d'eau souterraine aux différents secteurs économiques d'utilisation à leurs approvisionnements en eau respectifs.

Le tableau I réunit un certain nombre de données numériques à ce sujet sur différents pays industrialisés, provenant de sources gouvernementales ou régionales (intergouvernementales). Malgré quelques défauts d'homogénéité, ces données à l'échelle nationale font bien ressortir l'importance actuelle, absolue et relative, de l'eau souterraine comme source d'approvisionnement dans la plupart des pays développés.

Dans la majorité de ces pays, les prélèvements d'eau souterraine dépassent le cinquième et souvent le tiers des prélèvements en eau totaux pour toutes utilisations, y compris pour le refroidissement des centrales thermo-électriques. Ces prélèvements sont répartis en proportions variées entre les trois principaux secteurs d'utilisation (collectivités, industries non raccordées, agriculture) selon les pays. Si la part prédominante va souvent aux agglomération -production d'eau potable- le secteur industriel est en certains pays (Canada, République fédérale d'Allemagne, République démocratique allemande, Hongrie, URSS) le premier exploitant d'eau souterraine, tandis qu'en quelques pays, notamment méditerranéens (Grèce, Italie) et aux USA c'est le secteur agricole qui domine, de beaucoup : 59 % des prélèvements totaux d'eau souterraine aux USA (1980), 85 % en Grèce (1980).

- 21 - En proportion des approvisionnements en eau de chaque secteur, l'eau souterraine tient une place presque toujours notable et souvent dominante, tout particulièrement pour l'alimentation en eau des agglomérations (production et distribution d'eau potable). Dans la plupart des pays développés l'eau souterraine est la source d'approvisionnement en eau potable principale et parfois quasi exclusive.

La part de l'eau souterraine comme source d'approvisionnement en eau potable est, par exemple, de 97 % en Autriche et au Danemark, plus de 90 % en République fédérale d'Allemagne, 78 % en Hongrie, 70 à 75 % en Belgique, en République démocratique allemande, en Suisse, en URSS et en Yougoslavie.

Bien qu'en proportion moindre, l'eau souterraine concourt aussi notablement à couvrir les besoins en eau des industries non raccordées aux réseaux de distribution et ceux de l'agriculture -irrigation surtout- (25 % ou plus en plusieurs pays).

22 - La connaissance exacte des prélèvements d'eau souterraine et leur comptabilisation se heurtent toutefois à plusieurs sortes de difficultés : incertitudes inhérentes aux recensements des exploitations et aux déterminations des volumes réels annuels prélevés, prise en compte variable des débits de source captés, des volumes prélevés dans les aquifères alluviaux proches des rivières (et réalimentés par elles), des extractions d'eau pour dénoyer le sous-sol (mines, ouvrages souterrains). De même, la répartition comptable des volumes d'eau souterraine prélevés par grand secteur d'utilisation est rendue malaisée par l'hétérogénéité de certaines affectations (distribution d'eau potable aux agglomérations) et par des mélanges d'eaux de plusieurs origines. Des différences de définition, de précision, de pratique et de structure des comptes, de date de référence, selon les organismes opérateurs et les pays, affaiblissent la comparativité des statistiques établies. Un effort d'homogénéisation sur ce plan paraît opportun, tant au plan de l'économie de l'eau nationale, dans chaque pays, qu'au plan international.

23 - L'évolution passée est inégalement connue, et souvent sur des périodes trop courtes pour révéler des tendances assez significatives dans les différents pays considérés. Les données disponibles indiquent des tendances variées.

Par exemple : croissance de + 137 % en 25 ans (1950-1975) aux Etats-Unis [11], de + 54 % pour la même période au Royaume-Uni, de + 70 % en 7 ans (1970-1977) au Danemark, de + 12 % en 5 ans (1971-1976) aux Pays-Bas ; relative stabilité par contre, au cours des 5 à 10 dernières années en République fédérale d'Allemagne, en Belgique et en plusieurs régions de France [24, 33].



24 - La prospective d'évolution des prélèvements et des usages de l'eau souterraine peut s'appuyer en partie sur les projections de ces tendances. Toutefois, il est difficile de baser des prévisions sur la seule extrapolation de tendances connues inégalement et souvent sur des durées assez courtes, en supposant en outre que les conditions socio-économiques qui déterminent la demande en eau seraient invariantes et qu'il n'y aurait pas d'incidence de facteurs limitants ou d'interventions volontaires. Néanmoins, dans la plupart des pays développés une croissance de l'utilisation des eaux souterraines est prévue (par exemple : France, Grèce, Pologne, Portugal, Tchécoslovaquie, URSS), tandis qu'en d'autres pays, on prévoit une stabilité de cette utilisation jusqu'à l'an 2000 ou, au contraire, une certaine diminution (par exemple : Autriche, Belgique, Etats-Unis d'Amérique).

Quant à la proportion de l'eau souterraine comme source d'approvisionnement en eau potable, on prévoit sa diminution en plusieurs pays (par exemple : au Canada, en Grèce ; notamment une chute à 40-50 % en Belgique, en Pologne, au Portugal et en Tchécoslovaquie) ou son maintien en d'autres (par exemple : Autriche, Etats-Unis d'Amérique, France, URSS, Yougoslavie).

25 - L'exploitation d'eau souterraine constitue, par elle-même, un secteur économique de production primaire qui met en oeuvre un ensemble d'équipements dont il serait intéressant de chiffrer la valeur économique, de même que les coûts globaux de production, à comparer aux secteurs mieux connus, de ce point de vue, de l'aménagement et de la mobilisation des eaux de surface. Il serait aussi instructif de comparer les investissements et les dépenses de fonctionnement consacrés respectivement à l'exploitation d'eau souterraine, et à sa mise en état de servir (traitement avant usage), ainsi qu'à sa conservation et protection. Toutefois, ces sujets ont encore rarement fait l'objet d'analyses et d'estimations économiques : on entend par là non seulement des évaluations financières de coûts, mais aussi des évaluations du point de vue de l'utilité économique.

26 - On se préoccupe dans beaucoup de pays de mettre en regard l'exploitation d'eau souterraine et la ressource qu'elle offre, afin :

- soit d'apprécier le degré de son exploitation et de réduire ou prévenir d'éventuels excès préjudiciables aux exploitants eux-mêmes ou à des tiers (cf. infra 4, § 37 et suivants) ;

- soit encore parfois de stimuler une exploitation jugée trop parcimonieuse et qu'il serait profitable d'intensifier.

Cette comparaison prélèvements/ressource implique la référence à des unités de compte et de gestion adéquates, commandées par les structures naturelles : les aquifères. Elle pose aussi la question préalable de l'évaluation de la ressource en eau souterraine.

- 27 - La ressource en eau souterraine rapportée à un aquifère défini est une notion à la fois multidimensionnelle et relative :

- Multidimensionnelle, puisqu'elle doit s'exprimer en termes de flux et de volume, de qualités, de régime de renouvellement, de conditions d'accès et de coût, de sensibilités aux actes d'exploitation et aux impacts induits par d'autres activités.

- Relative, parce que son exploitabilité dépend des critères des exploitants -donc de leurs objectifs économiques- et aussi des critères d'arbitrage plus généraux d'autorités de gestion publiques. Le degré d'interdépendance entre eaux souterraines et eaux superficielles conditionne beaucoup de tels arbitrages : soit, en général, lorsque les volumes d'eau souterraine prélevés portent préjudice aux débits des rivières en réduisant leur composante d'"écoulement souterrain", soit dans le cas particulier où ces prélèvements soutirent directement l'eau de rivières. Dans ce dernier cas, réalisé souvent quand on exploite les aquifères alluviaux riverains de cours d'eau, il est malaisé de différencier la ressource en eau souterraine "autochtone" de celle détournée de l'eau de surface. En fait, le flux d'eau souterraine "exploitable" dépend alors en partie de l'exploitation elle-même.

En somme, la manière de définir et d'évaluer la ressource en eau souterraine dépend, à la fois du type d'aquifère et des utilisations de l'eau. Cette évaluation n'est donc pas réductible au chiffrage d'une grandeur simple et unique. Néanmoins, la dimension de flux de la ressource en eau souterraine est souvent privilégiée pour sa simplicité physique et la possibilité de la comparer à la fois aux écoulements d'eau de surface et aux prélèvements, à diverses échelles dans l'espace. Il ne s'agit cependant que d'un index partiel de la ressource physique, qui peut masquer de fortes différenciations.

- 28 - Même en s'en tenant à cette dimension de flux de la ressource en eau souterraine, son évaluation fait l'objet d'approches variées, selon les pays et les opérateurs, ce qui empêche des comparaisons et des sommations globales homogènes.

Parmi les approches pratiquées :

- L'une, majorante, assimile la ressource en eau souterraine au flux d'alimentation de l'aquifère ou de tous les aquifères du territoire considéré, ce qui comprend tout l'"écoulement souterrain" des cours d'eau entretenu par les sources et le drainage des eaux souterraines continentales, ainsi que les flux souterrains "occultes" sortant du territoire (affluent à la mer ou à des territoires voisins).
- L'autre, minorante, réduit cette ressource au seul flux d'eau souterraine non collecté par les sources et les rivières, donc aux débits souterrains affluant directement à la mer ou à des aires d'évaporation.

Une voie intermédiaire plus réaliste consiste à définir des contraintes de conservation des débits de sources et d'étiage de rivières drainantes -arbitrage relatif et révisable- donc à ne considérer comme ressource potentielle en eau souterraine -offerte à l'exploitation- qu'une partie du débit naturel qui transite par les aquifères.

- 29 - Une autre optique, plus restrictive et non exempte de confusion sémantique, consiste à assimiler la "ressource en eau souterraine" aux sources d'approvisionnement par eau souterraine utilisées, c'est-à-dire aux productions d'eau maximales permises par les installations de captage en service ("productibilités"), voire même aux productions réelles, à un stade donné. Cette pratique empêche évidemment de comparer l'exploitation et la ressource, puisqu'elle identifie l'une à l'autre.
- 30 - Malgré la diversité des conditions naturelles, des structures socio-économiques d'exploitation et des infrastructures d'administration des eaux dans les différents pays développés, il pourrait s'avérer utile de rechercher, sinon une unification des approches d'évaluation de la ressource en eau souterraine -problème sans unicité de solution-, du moins une communauté de concept et de langage facilitant les échanges scientifiques et techniques dans ce domaine, voire les négociations dans certains cas de ressource en eau souterraine transfrontière.

31 - Nonobstant la variété des bases et des méthodes d'évaluation pratiquées, la proportion des flux de ressource physique en eau souterraine estimés par rapport aux ressources en eau totales est encore un moyen de mesurer l'importance économique des eaux souterraines, après l'analyse de leur place dans les sources d'approvisionnement. Le tableau II réunit, sur ce sujet, quelques données numériques publiées chiffrant les ressources en eau souterraine théoriques, à l'échelle nationale, en différents pays industrialisés.

On observe que, si en de nombreux pays l'eau souterraine ne représente qu'une partie mineure des ressources en eau totales (moins de 2 % en Finlande, 8 % au Royaume-Uni, 10 % en Belgique, en République Socialiste Soviétique d'Ukraine, et en Tchécoslovaquie), elle s'élève à 15 % en Pologne, 16 % en Bulgarie, 22 % en Roumanie ; en quelques pays cette proportion atteint ou dépasse 40 % (République fédérale d'Allemagne, Autriche, République Socialiste Soviétique de Biélorussie) et elle s'élève à 60 % en Hongrie et en France.

La diversité des ordres de grandeur -qui n'est pas due seulement aux différences de superficie, de climat et de conditions géologiques des pays- rend évidente l'hétérogénéité de ces évaluations, dont l'analyse requiert donc des précautions. En particulier les flux de ressource en eau souterraine sont inégalement compris selon les cas dans les ressources en eau totales. De plus, en rapportant le flux d'eau souterraine à un écoulement total composé en grande partie par des eaux de ruissellement difficiles à maîtriser, on risque de minimiser un de ses avantages essentiels comme ressource : sa constance.

32 - L'importance des eaux souterraines comme ressource pourrait être mesurée en outre par d'autres indicateurs quantitatifs que leur débit global ou même réparti suivant les principaux aquifères. L'étendue dans un pays des domaines comportant de l'eau souterraine de bonne qualité, d'accès facile (profondeur et productivités), assez régulièrement renouvelée et peu exposée à des risques de pollution (ou facile à l'en protéger), serait un indicateur également utile.

- 33 - La description directe de la distribution spatiale de ces caractères, déduite de l'analyse des conditions hydrogéologiques et exprimée par des cartes thématiques spécifiques, à diverses échelles, est assez avancée dans la plupart des pays développés. Ces cartes pourraient être utilement comparées à celles qui représentent la distribution des populations et des principales activités dont émanent des demandes en eau spécifiées auxquelles l'eau souterraine est appropriée.
- 34 - Enfin, les volumes d'eau souterraine en réserve dans les principaux aquifères sont aussi un constituant de leur ressource : soit comme régulateur amortissant plus ou moins les effets des aléas climatiques (résistance aux sécheresses conjoncturelles), soit comme stock exploitable de manière "minière" à long terme -ressource non renouvelable- dans certaines conditions bien définies (c'est surtout le cas de grands aquifères profonds captifs [27, 28]).
- 35 - L'importance future des eaux souterraines dépendra moins de la part quantitative qu'elles prendront parmi les ressources en eau pour satisfaire les demandes en eau totales, que de leur place comme source d'approvisionnement prioritaire pour les usages les plus exigeants en qualité et en sécurité : en premier lieu l'alimentation en eau potable des populations, sans cependant exclure d'autres utilisations -y compris énergétiques ou indirectes pour occuper le sous-sol-. Les risques futurs de perturbation du régime ou de dégradation des qualités des eaux superficielles, aussi bien que leur transformation volontaire par divers aménagements accroissant leur caractère artificiel, donneront vraisemblablement une valeur accrue aux eaux souterraines, eaux douces continentales qui se prêtent le mieux à la conservation de leurs caractéristiques naturelles, pourvu que l'on y veille.
- 36 - Concilier la conservation et la protection des eaux souterraines, en quantité et qualités, à un niveau voulu, avec les mises en valeur que l'utilisation de leurs potentialités permet, mais qui entraîne nécessairement certaines modifications de leur régime, devrait être l'idée directrice orientant leur gestion future.

#### 4. LES IMPACTS DES ACTIVITES HUMAINES SUR LES EAUX SOUTERRAINES

- 37 - Les caractères spécifiques des eaux souterraines (cf. §4) leur attribuent différentes sensibilités à des changements de conditions internes ou externes, effets des exploitations ou impacts d'autres activités humaines : incidences sur leur régime ou leurs qualités et par conséquent sur leur potentialité comme ressource aussi bien que sur leur rôle dans le milieu naturel. Les influences dynamiques directes des exploitations -baisses de niveau et modifications des flux aux limites- sont inévitables et en grande partie nécessaires aux rééquilibres qui assurent la permanence des productions d'eau. Elles peuvent toutefois avoir des conséquences secondaires indésirables, effets externes similaires aux impacts d'autres activités.
- 38 - Les principaux éléments sensibles, variables d'état surtout et parfois variables de décision en interactions mutuelles, sont :
- Certains caractères structuraux, tant à l'échelle de la géométrie des aquifères qu'à celle des paramètres du milieu : position et permanence des limites (qui peuvent être déplacées, effacées ou créées), perméabilité des sols ou de limites particulières (colmatage de berges ou de lit de rivière, modifiant les flux échangés), conductivité et capacité de l'aquifère (localement réduites ou accrues par des travaux souterrains, formant des écrans ou des drains, ou par des changements de pression).
  - Les niveaux (potentiels hydrauliques), traduction de la dynamique des nappes, qui dépendent des conditions de flux aux limites (apports, débits écoulés, prélèvements) ou des niveaux extérieurs au voisinage de limite à condition de potentiel (plans d'eau superficiels) et qui sont parfois directement modifiables (drainage, écrans).
  - Les flux spontanés aux limites commandés par les niveaux internes : émergences, échanges avec le sol et l'atmosphère (infiltration, ascension et évaporation) -qui peuvent être accrues ou réduits, ou même interrompus- échanges avec les eaux superficielles, modifiables et réversibles.

- Les caractéristiques physiques et chimiques de l'eau, leur répartition et leur régime, sensibles aux flux de matières (ou de chaleur) portés par les flux d'eau entrant, notamment par les infiltrations ou les injections, ou associés aux déplacements d'eau internes induits par des changements hydrodynamiques.
- 39 - Ces sensibilités sont distribuées très différemment en fonction des conditions structurales et hydrodynamiques des aquifères. Aussi les vulnérabilités des eaux souterraines aux impacts d'activités humaines sont-elles elles-mêmes très variées :
- Les eaux des aquifères peu profonds, à surface libre (nappes phréatiques), sont les plus exposées aux effets des transformations des conditions de surface ou aux modifications des cours d'eau auxquels elles sont liées. Leur protection naturelle (au plan des qualités) par les terrains de couverture est très inégale, selon la nature et l'épaisseur.
  - L'interface qui sépare les eaux douces et les eaux salées est très sensible à une rupture de l'équilibre dynamique de la nappe (notamment dans les aquifères littoraux).
  - D'amples baisses de niveau peuvent déterminer des tassements et des dégradations irréversibles des propriétés hydrodynamiques de certains aquifères peu consolidés, donc des productivités des ouvrages d'exploitation.
  - Les altérations accidentelles de qualités ont une rémanence très variable, selon les vitesses d'écoulement de la nappe agressée, mais qui peut être de très longue durée.
- 40 - L'analyse des facteurs de vulnérabilité des eaux souterraines, notamment à des altérations de leurs qualités (pollution), leur inventaire et leur représentation cartographique combinée ont déjà été entreprises en plusieurs pays (République fédérale d'Allemagne, Espagne, France ; et récemment dans l'ensemble des pays de la Communauté européenne/CCE).

- 41 - De nombreuses activités humaines sont génératrices d'impact sur les eaux souterraines, sur telle ou telle de leurs caractéristiques sensibles, en quantité ou qualité.

En premier lieu, les actes d'exploitation eux-mêmes : outre leurs conséquences directes et nécessaires, qui sont parfois des résultats voulus, ils ont des effets secondaires.

Ensuite des actions directes sur l'eau souterraine pour d'autres finalités que son emploi comme eau : utilisation thermique, dénoyage du sous-sol, utilisation comme vecteur d'évacuation. Dans certains de ces cas, les résultats visés peuvent être identiques aux effets "secondaires" (du point de vue des acteurs), des exploitations d'eau classiques, et des conflits sont possibles : par exemple entre captage de l'eau et exhaure minière (exemples en Allemagne -RFA et RDA-, Pologne, Tchécoslovaquie, URSS).

Par ailleurs, la réutilisation d'anciens ouvrages d'exploitation pour évacuer des effluents -pratique encore trop répandue, malgré des réglementations qui l'interdisent- peut contribuer à altérer directement les qualités de l'eau souterraine, ce qui est fréquent dans beaucoup d'agglomérations.

- 42 - Diverses formes d'occupation du sous-sol (travaux souterrains, fondations, carrières et mines), permanentes ou temporaires, peuvent transformer la structure des aquifères et influencer la dynamique des nappes. C'est tout particulièrement le cas des extractions de matériaux dont les gisements constituent des aquifères (carrières de granulats en aquifère alluvial). Trop d'excavations, une fois l'exploitation arrêtée, offrent en outre un espace voué au dépôt de déchets, "valorisé" alors souvent aux dépens des qualités de l'eau souterraine environnante.

Le stockage souterrain de substances utiles mais indésirables dans l'environnement, soit en cavités, soit -lorsqu'il s'agit de fluides (hydrocarbures gazeux ou liquides notamment)- en aquifère, n'offre pas toujours, malgré les études de sûreté préalables et les précautions généralement prises, une garantie absolue contre des risques de pollution accidentelle.



- 43 - Enfin l'occupation du sol et divers aménagements hydrauliques de surface peuvent modifier les conditions aux limites des aquifères -niveaux ou flux- et induire des apports de matière :
- l'urbanisation qui imperméabilise le sol, mais provoque des apports artificiels par les pertes des réseaux de distribution ou parfois d'assainissement ;
  - l'agriculture qui diminue ou augmente (irrigation) l'infiltration, mais peut accroître les apports diffus de substances, les relèvements de niveau dus à l'irrigation pouvant de leur côté amplifier les flux soustraits par évaporation plus qu'ils n'accroissent les écoulements souterrains, notamment en zone aride ;
  - les aménagements de cours d'eau et de retenues qui déplacent des limites, relèvent ou abaissent des potentiels ;
  - les dépôts de déchets urbains ou industriels, contrôlés ou "sauvages", les accumulations de "stériles" des mines, exposés aux lessivages par les eaux météoriques sont souvent à l'origine d'entraînement de matières polluantes dans les nappes souterraines.
- 44 - Certaines actions peuvent avoir un impact très indirect : par exemple la pollution atmosphérique en changeant les caractéristiques de l'eau de pluie, notamment en la rendant plus acide, peut contribuer à altérer les qualités de l'eau souterraine de nappes libres. Une eau plus acide (surtout à  $\text{pH} < 4,5$ ) peut s'enrichir en ions métalliques, dans les aquifères ou, après prélèvements, par corrosion de conduites (Al, Cd, Cu, Pb, Zn). Le fait a été constaté en plusieurs pays où des eaux souterraines ont déjà une acidité naturelle appréciable (Canada, Suède, Etats-Unis) [29].
- 45 - Les correspondances analytiques entre les sensibilités des eaux souterraines et les activités humaines, causes potentielles d'incidence, peuvent s'exprimer par le tableau III qui présente une typologie des ces impacts et fait ressortir les filiations des causes et des effets.

Par exemple, des baisses de niveau moyen de nappe souterraine peuvent résulter aussi bien de prélèvements intensifs, de transformation de conditions de surface réduisant les apports ou d'abaissement du potentiel à certaines limites ; ces baisses peuvent à leur tour induire des changements de qualités de l'eau, ce que font aussi des apports directs de matière.

- 46 - Le recensement et la mesure des incidences effectives des activités humaines sur les eaux souterraines dans les pays développés sont inégalement avancés. Ils sont rendus malaisés par la difficulté de définir des "états 0" de référence dans des régions où des transformations du milieu naturel par l'homme sont séculaires, par le caractère mineur et extensif de beaucoup d'influences, par la pluralité des indicateurs, et parfois par le manque d'organisations permanentes d'inventaire et de centralisation des résultats homogénéisés d'analyse de situation. Les incidences visées portent principalement sur les niveaux de nappe et sur les paramètres de qualité de l'eau souterraine (parfois liés) dans certaines zones, et accessoirement sur leurs effets secondaires.
- 47 - Causées principalement par les prélèvements, d'amples baisses de niveaux de nappe souterraine, pouvant approcher ou dépasser une centaine de mètres, sont manifestes dans des champs d'exploitation intensive urbaine ou agricole de différents pays (République fédérale d'Allemagne, Espagne, France, Royaume-Uni, Etats-Unis d'Amérique, U.R.S.S., notamment).

Certaines, bien connues, résultent d'effets cumulés au cours d'une longue évolution (un siècle ou plus), par exemple en Californie (Etats-Unis), dans les régions de Lille et Paris (France), dans les bassins du Dniepr-Donetz et d'Azov-Kouban (U.R.S.S.).

D'autres, accentuées surtout depuis une ou plusieurs décennies, résultent de croissances urbaines ou agricoles rapides dans des zones localisées, et peuvent dépasser 1 à 2 m par an à l'époque actuelle. Exemples : en Espagne (200 m dans un aquifère calcaire, près d'Alicante, 1967-1982) [23], en Italie (jusqu'à 40 m dans l'aquifère alluvial à Milan) [14], aux Etats-Unis (20 m de 1949 à 1968 dans l'aquifère des Hautes Plaines du Texas) [6].

En plusieurs régions littorales les niveaux ont été abaissés plus bas que le niveau de la mer. (Exemples en République fédérale d'Allemagne, au Danemark, en Espagne, en Italie, aux Pays-Bas, au Royaume-Uni).

De fortes dépressions locales ou régionales des niveaux d'eau souterraine résultent aussi de l'exhaure pratiquée par des exploitations minières souvent depuis plusieurs décennies.

- 48 - Les évolutions actuelles des niveaux dans les zones influencées sont assez généralement suivies et enregistrées, mais les données sur les évolutions anciennes sont plus inégalement disponibles, selon les pays.
- 49 - Les hydrogéologues le savent bien, mais ce n'est pas toujours bien compris par les exploitants d'eau souterraine, ces baisses de niveau n'ont pas partout la même signification :

- selon qu'il s'agit de nappes libres ou de nappes captives profondes ;

(parmi les cas cités ci-dessus -§ 47-, les aquifères alluviaux de Californie et d'Arizona, aux Etats-Unis, les aquifères de la craie au Royaume-Uni ou dans le Nord de la France, sont des aquifères à nappe libre où les baisses de niveau sont dues à d'amples déstockages ; les aquifères profonds des bassins de Dniepr-Donetz, en URSS, ou de Paris, en France, sont au contraire captifs et les baisses de niveau y ont le sens de chute de pression de l'eau, sans dénoyage du réservoir).

- et aussi selon que les rééquilibres dynamiques ont été ou tendent à être instaurés ou non.

Il est bien connu, en particulier, que l'exploitation de nappes captives détermine nécessairement de fortes et durables dépressions et prélève longtemps sur la réserve de l'aquifère, avant et pour qu'un rééquilibre puisse s'établir.

- 50 - Le diagnostic de "surexploitation" ou d'"épuisement" d'une nappe souterraine requiert donc une analyse plus pertinente que le seul constat d'abaissement des niveaux [9, 28].

51 - L'extension des aires de surexploitation présumée des eaux souterraines est néanmoins appréciable dans plusieurs pays. Elle est estimée, par exemple, (vers 1976) à 16 % du territoire aux Pays-Bas, et à 4 % au Royaume-Uni [24]. Aux Etats-Unis, des exploitations d'eau souterraine en excédent sur les apports sont signalées dans 60 "subregions" sur 106 et jugées critiques en 8 ;  $29 \cdot 10^9$  m<sup>3</sup>, soit 25 % du volume total prélevé dans le pays, en 1975, proviendraient de ces surexploitations [13].

52 - Les baisses de niveau peuvent entraîner des effets secondaires, observés dans plusieurs pays :

- Invasion d'eau marine dans des aquifères littoraux (par exemple : République fédérale d'Allemagne, Malte, Pays-Bas, Etats-Unis d'Amérique, Royaume-Uni).

- Attirance d'eaux plus profondes, à salinité ou température plus élevées, modifiant la qualité de l'eau dans l'aquifère déprimé (Par exemple : Etats-Unis d'Amérique, Hongrie).

D'autres effets secondaires s'appliquent, non plus à l'eau souterraine elle-même, mais à l'environnement (eaux superficielles, sol), comme on le rappellera plus loin (§ 61,62).

53 - Des modifications de caractéristiques chimiques d'eau souterraine sont également manifestes dans différents pays, mais de nature et d'extension très variées. Certaines sont localisées et spécifiques, rémanences de faits polluants accidentels, ou effets permanents de défauts d'épuration d'effluents urbains, industriels ou d'élevage en partie infiltrés. D'autres sont extensives et chroniques, à évolution lente, résultant des pratiques agricoles (nitrates), d'effluents domestiques en habitat dispersé, ou d'effets secondaires de rejets industriels (pluies acides).

54 - La description de l'état actuel des qualités des eaux souterraines, définies par différents paramètres et critères, est assez avancée dans la plupart des pays, quoique suivant des procédures et des modes de présentation variés.

Elle peut s'exprimer :

- soit par des cartes paramétriques, décrivant la distribution de facteurs analytiques ou d'indicateurs plus ou moins agrégés de qualité ;
  - soit par des cartes de classification normative, relatives à un ou plusieurs usages, qui signalent parfois des zones de pollution d'eau souterraine et les types d'altération observée.
- 55 - Les données historiques permettant de quantifier les évolutions et d'établir des états de référence présumés naturels sont plus rares. Aussi, les degrés et les types de dégradation de qualité de l'eau souterraine, reliée ou non à des facteurs identifiés, ont-ils encore peu fait l'objet d'inventaires et de représentations méthodiques à l'échelle des territoires, pour permettre de se prononcer sur l'"état de santé" des eaux souterraines, selon les régions. Néanmoins, la plupart des cas patents sont répertoriés et des réseaux d'observation appropriés, locaux ou régionaux, d'alarme ou d'analyse de tendance, se développent en différents pays. On pratique souvent une double surveillance : à l'aval des sources de pollution potentielle connues (contrôle d'efficacité des mesures de sûreté) et à l'amont des points de prélèvement (protection rapprochée), et on s'oriente vers une diversification des paramètres contrôlés.
- 56 - Les incidences des activités humaines sur le régime et/ou les qualités des eaux souterraines, certaines et notables en différents cas, demeurent toutefois relativement localisées dans la plupart des pays, à l'exception d'impacts sur les qualités de l'eau de facteurs de pollution diffuse tels que les apports de nitrates - dus à des causes multiples, mais principalement à l'agriculture intensive- qui gagnent des aires assez étendues. Les états actuels, quoique déjà préoccupants dans quelques zones, importent cependant moins que les tendances d'évolution que l'on discerne et que l'on commence à mesurer en plusieurs pays. Il convient donc de suivre avec vigilance tous les signes de leur évolution, en s'attachant autant aux facteurs qu'aux résultats. Il est en effet de beaucoup préférable de promouvoir et prescrire les mesures préventives plutôt que les interventions curatives.

57 - Les lenteurs de réaction de beaucoup d'aquifères, qui retardent et perpétuent les impacts sur le régime ou les qualités de l'eau souterraine, retardent pareillement les effets des mesures curatives -et même parfois préventives- visant à restaurer des situations dégradées. Elles diffèrent donc leur efficacité mais aussi en prolongant longtemps les bénéfices.

## 5. LES CONSEQUENCES DES MODIFICATIONS DE REGIME ET DE QUALITES DES EAUX SOUTERRAINES

58 - Les conséquences les plus directes portent sur l'eau souterraine en tant que ressource, en quantité et qualités :

- Les baisses de niveau élèvent d'abord les coûts de production directs, coûts énergétiques et, au-delà de certains seuils de profondeur, coûts de transformation des équipements. Des baisses très amples peuvent entraver le renouvellement de la ressource et induire un régime de déséquilibre. Plus généralement, une surexploitation prolongée et non délibérée correspond à un suréquipement -donc à un surinvestissement- lorsque, pour restaurer un équilibre dynamique à un niveau acceptable, une réduction des prélèvements s'impose ou qu'une opération d'alimentation artificielle est conçue après coup et réalisée dans le seul but de conserver les productivités des équipements en place. Dans certains cas, toutefois, l'exploitation d'un aquifère ainsi stimulé peut être voulue et s'inscrire dans un plan d'aménagement conjugué des eaux souterraines et superficielles, en étant plus avantageuse que le simple recours à une ressource de substitution séparée.
- Les altérations de qualités entraînent aussi une élévation des coûts de traitement de l'eau à potabiliser ou encore le recours à d'autres sources d'approvisionnement, substitut pouvant être lui aussi plus coûteux. Plus généralement, elles peuvent engendrer un coût social par leurs effets diffus sur la santé et l'opportunité d'amplifier la prévention. Elles peuvent encore provoquer des pertes économiques à certains secteurs de production, soit en faisant diminuer des rendements (irrigation), soit en rendant nécessaire des traitements spécifiques supplémentaires.

- 59 - Il convient toutefois de distinguer les augmentations de coût qui sont des conséquences normales et inévitables de l'exploitation, inhérentes à l'intensification des demandes en eau et des utilisations des eaux du milieu naturel en général, de celles relevant d'"effets externes" d'autres activités, dommageables pour les utilisateurs de l'eau souterraine. Seules ces dernières et certains effets secondaires indésirables de l'exploitation d'eau souterraine ont le sens d'une détérioration de la ressource et de sa dépréciation.
- 60 - Ces conséquences sur la ressource ne sont pas seulement présentes, mais futures, et leur durée peut se prolonger bien après que leur cause aurait cessé, en raison de l'inertie dynamique des aquifères (surtout à nappe libre) et de la lenteur des déplacements de l'eau (surtout dans les nappes captives). Certaines sont irréversibles. Après une période de surexploitation d'une nappe, la durée de retour à un état d'équilibre dynamique jugé acceptable est au moins du même ordre de grandeur et peut être beaucoup plus longue. En particulier, l'exploitation intensive délibérée ou irréfléchie d'un stock d'eau souterraine peu renouvelé -seule ressource offerte par beaucoup d'aquifères captifs profonds- équivaut à la réserver au profit de la génération actuelle, au détriment des générations futures [27, 30].

De même la régénération spontanée de l'eau d'un aquifère par le renouvellement est un processus très lent et les dégradations de qualités ont une persistance très longue, souvent chiffrable en décennies.

Il a été calculé, par exemple, que la pollution par des saumures de la nappe phréatique de la plaine rhénane en France (Alsace), ne se résorberait que 50 à 100 ans après la suppression de sa cause [16].

- 61 - Des modifications de régime et/ou de qualités des eaux souterraines peuvent affecter aussi la ressource en eau de surface, en quantité et qualités :
- Diminution des débits d'étiage, qui réduit à la fois les disponibilités permanentes et les pouvoirs de dilution et d'autoépuration, en rendant parfois plus nécessaire la régularisation des cours d'eau par des ouvrages de retenue en compensation (coût externe).

- Altération de qualités d'eaux de source et de drainage, qui influence les qualités des rivières en basses eaux.
- L'une et l'autre peuvent en outre dégrader ou même détruire des écosystèmes aquatiques locaux.

Réciproquement, les inversions d'échange d'eau entre rivière et nappe déterminées par l'exploitation intensive d'aquifères alluviaux, peuvent conduire à étendre à des systèmes fluviaux des servitudes de conservation de quantité et de protection de qualités en faveur des exploitants d'eau souterraine subordonnés.

62 - D'autres conséquences sur l'environnement constituent des effets externes négatifs des exploitations d'eau souterraine :

- Affaissement du sol, surtout dans des agglomérations (exemples : en Allemagne, Berlin ; aux Etats-Unis d'Amérique, Denver, Houston, Las Vegas, San-Francisco, Tucson ; en Italie, Milan, Venise ; au Mexique, Mexico ; au Royaume-Uni, Londres), de l'ordre de quelques décimètres à 1 à 2 m, jusqu'à 2 à 9 m en plusieurs cités de Californie aux Etats-Unis d'Amérique ; 42 cas sont décrits dans le monde -dont 35 dans les pays industrialisés en Europe, aux Etats-Unis d'Amérique et au Japon- dans l'ouvrage élaboré par un groupe de travail ad hoc de l'UNESCO [34], cité en [32].

Ces affaissements ont des répercussions sur les constructions et la voirie urbaine, sur les réseaux de distribution d'eau et d'assainissement et sur les voies d'eau qu'ils endommagent ; ils affectent la stabilité du littoral et amplifient les risques d'inondation ; enfin, ils affaiblissent la constructibilité et déprécient la valeur foncière des terrains.

- Assèchement du sol consécutif à l'abaissement de nappe qui entrete-  
nait son humidité, et perte de production agricole ou endommagement  
de végétation résultants ; accroissement parfois de l'érodabilité du  
sol.



- 63 - Si, pour la plupart, les conséquences des modifications d'état des eaux souterraines sont négatives et se traduisent par des coûts supportés par les utilisateurs de l'eau ou par d'autres agents économiques (pertes monétaires ou pertes d'aménité), elles peuvent parfois présenter des avantages. Par exemple, les abaissements de nappes induits par leur exploitation peuvent être utiles pour l'occupation du sous-sol, en particulier dans les villes, au point que les "remontées de nappes" contemporaines, manifestes en plusieurs pays, conséquences des réductions de prélèvement -ou d'exhaure minière- qui atténuent ou suppriment ces "avantages externes" y sont perçues comme des nuisances.
- 64 - L'évaluation économique des impacts, de natures variées, des activités humaines sur l'eau souterraine est encore peu développée en général. Elle se réduit souvent à l'estimation financière des sur-coûts directs supportés par les divers agents économiques utilisateurs, à celle des dévalorisations résultant du respect de contraintes préventives de conservation et de protection de l'eau souterraine par d'autres agents, ou encore à celle des mesures de restauration (reconstitution de niveau, dépollution...). Le coût social de l'endommagement de cet élément du patrimoine naturel qu'est l'eau souterraine est peu pris en considération : des recherches et des progrès méthodologiques paraissent opportuns à ce sujet.

## 6. CONCLUSIONS

La protection des eaux souterraines pose trois sortes de problèmes : des problèmes de connaissance, des problèmes de choix de stratégie de développement et de conservation conciliés, et des problèmes de choix des voies et moyens d'action.

### 65 - Problèmes de connaissance :

- Connaissance des conditions naturelles, facteurs physiques de la ressource, de ses potentialités comme de ses sensibilités. Compréhension des phénomènes qui régissent le comportement des eaux souterraines et leurs réactions aux actes qui les influencent, y compris à long terme, donc réciproquement leur réactions aux contre-mesures

prises pour les protéger, pour restaurer leur régime perturbé ou leurs qualités dégradées, moyen par conséquent d'apprécier et de prévoir l'efficacité de ces mesures.

Une attention particulière, sur ce plan, est à porter à la connaissance des processus de migration de micro-organismes ou d'éléments toxiques ou indésirables dans les eaux souterraines et à celle des processus d'auto-épuration spontanée ou stimulée éventuels, à l'identification des paramètres déterminants et à la modélisation opérationnelle de ces processus, notamment pour perfectionner les bases scientifiques des spécifications des périmètres de protection sanitaire mentionnés plus haut.

- Connaissance des actions entreprises et des acteurs : recensement des prélèvements et des usages, inventaire des actions et des transformations du milieu génératrices d'impacts sur l'eau souterraine ; identification des objectifs des activités utilisatrices de l'eau ou génératrices d'influence indirecte.
- Connaissance des situations passées (rétrospective, états de référence), présentes (suivi) et futures (prévision), notamment dans les zones où les eaux souterraines sont exploitées et/ou influencées, en quantité et en qualité. Observer l'évolution de la quantité (niveaux, débits) pose moins de problèmes techniques que surveiller les variations des facteurs et des indicateurs de qualités. Mais le bien fondé des moyens nécessaires doit être plaidé aussi régulièrement dans les deux cas.

Dans tous les cas, il paraît opportun de développer l'**économie de la connaissance**, tout particulièrement de la connaissance entretenue des situations évolutives, en vue :

- d'ajuster consciemment les coûts d'acquisition de données (réseaux d'observation de variables...), de stockage et d'élaboration d'informations, aux utilités de ces informations -et à l'intérêt de leur disponibilité à l'avance- pour des preneurs de décision à différents niveaux, à court ou long terme : décision d'intervention ou d'opération, de mesure de sécurité, d'investissement, d'instauration ou d'extension de règlement, d'application de règlement (attribution de permis, dérogation).

- d'éclairer les choix de répartition de ces coûts (collectivité, bénéficiaires).

Enfin, s'y ajoute le problème de l'information et de la sensibilisation : voies et moyens appropriés pour diffuser ces connaissances et vulgariser la compréhension de la nature de cette "ressource cachée".

66 - Problèmes de choix de stratégie de développement et de conservation conciliés, indissociable des choix de politique de l'eau, de politique d'aménagement du territoire, d'occupation et d'utilisation du sol et de l'espace souterrain, et de politique de l'environnement :

- Allocation de ressource (partage entre secteurs d'utilisation actuels), tant en quantité qu'en tenant compte des qualités d'eau requises par les usagers face à celles offertes par l'eau souterraine, sans exclure les usages énergétiques ni les utilisations indirectes résultant du dénoyage du sous-sol.
- Limitation d'exploitation dans un souci de réservation "patrimoniale" de ressource pour l'avenir, c'est-à-dire de conservation de certaines conditions d'exploitations.
- Rôle attribué aux aquifères dans l'aménagement et le mode d'exploitation des eaux en général -notamment en accroissant artificiellement la phase souterraine du cycle de l'eau- : recharge artificielle, stockage d'eau souterrain.
- Servitudes à imposer pour conserver la quantité et protéger les qualités de l'eau souterraine -y compris à long terme- et arbitrages entre les objectifs des activités que ces servitudes visent à sécuriser et ceux des activités qu'elles peuvent restreindre.
- Contraintes d'assujettissement de l'exploitation de l'eau souterraine à édicter pour conserver l'eau de surface (ressource permanente et écosystème aquatique) ou prévenir des effets externes indésirables sur la stabilité ou l'humidité du sol.

- Choix des éventuelles différenciations de ces stratégies et des objectifs prioritaires qu'elles impliquent, selon les conditions particulières à chaque espace socio-économique individualisé dans un pays ; définition en corollaire des espaces appropriés à des politiques de protection des eaux souterraines spécifiques.

La meilleure manière de faire prendre en considération les objectifs propres à la gestion des eaux souterraines et plus particulièrement ceux de leur protection est de ne pas les définir dans l'absolu, mais de les intégrer dans les objectifs de la politique de l'eau en général, sans pour autant les dissocier des finalités de la gestion de l'espace. Il est nécessaire d'assurer une cohérence de ces objectifs et d'établir une hiérarchie des priorités assignant à la protection de l'eau souterraine -en quantité et qualité- et tout particulièrement à la sécurité des approvisionnements en eau potable qui la motive spécialement, une place délibérée et accordée aux autres objectifs économiques et sociaux : autrement dit, il s'agit de relativiser ces objectifs propres à l'eau souterraine à une échelle de valeur plus générale.

- 67 - Problèmes de choix des voies et moyens d'action pour rendre effective la stratégie voulue : instruments législatifs, juridiques et réglementaires, financiers, techniques, informationnels, qui sont pour la plupart des moyens indirects d'intervention sur les agents.

- Mise en cohérence de ces instruments et de leurs modes d'emploi, harmonisation des interventions de natures différentes, notamment réglementaires et financières.

. En premier lieu, accorder le statut juridique de l'eau souterraine à l'unité du cycle de l'eau dans le milieu naturel -donc de ne pas le disjoindre du statut des eaux superficielles-, aussi bien qu'à la variété de ses conditions d'occurrence, de gisement et de circulation, pourrait faciliter cette cohérence ainsi que l'unification des responsabilités de la protection et l'efficacité des interventions.

. Une cohérence est encore opportune entre les réglementations respectives de l'exploitation d'eau souterraine, de l'aménagement des eaux superficielles, de l'occupation du sol et du sous-sol, du transport et du stockage de matières dangereuses.

. Il est généralement reconnu que les instruments d'intervention "économique" peuvent compléter efficacement les instruments réglementaires pour peser sur les attitudes des agents intéressés. Les incitations financières, par le biais de politique tarifaire, de taxations ou de subventions qui opèrent des transferts de charges, visent à corriger les éventuelles distorsions qu'entraînent les écarts entre les mobiles microéconomiques des agents individuels et les objectifs d'intérêt collectif et général visés par l'autorité de gestion.

Les transferts financiers déterminés peuvent correspondre à l'internalisation de coûts externes lorsque les fonds prélevés concourent à l'entretien ou à la reconstitution de la ressource, ce qui peut être le cas lorsqu'un aménagement hydraulique s'avère nécessaire pour compenser les effets de prélèvements intensifs d'eau souterraine sur le débit d'une rivière. L'application du principe pollueur-payeur aux agents générateurs d'altération des qualités d'eaux souterraines, même de manière diffuse, -lorsque les dommages résultants (pour des agents usagers) sont identifiables et réparables et lorsque le coût de réparation est facile à évaluer (traitement de l'eau complémentaire, par exemple)- irait dans le même sens.

Identifier clairement les bénéficiaires de la protection de l'eau souterraine d'une part, les responsables des dégradations du régime ou des qualités de l'eau souterraine d'autre part, pourrait s'avérer utile pour définir une éventuelle répartition des charges occasionnées par les mesures prises en vue de cette protection ou par la réparation des dommages causés, et régler les transferts financiers entre les agents des deux catégories -lorsqu'ils sont distincts- pouvant en résulter. Les avantages et inconvénients respectifs possibles de l'indemnisation des dommages et/ou des pertes économiques des agents assujettis à des servitudes motivées par la protection des eaux souterraines, restent à apprécier.

- Répartition et coordination des pouvoirs disposant de ces moyens, organisation en fonction des compétences territoriales ou sectorielles des autorités intervenantes.

Les champs de compétences des autorités administratives en charge de la gestion des eaux souterraines peuvent être différemment adaptés à une prise en compte complète des problèmes à résoudre, tant au plan territorial, qu'au plan sectoriel des activités économiques administrées concurremment et au plan de la détention des moyens d'intervention souvent répartis entre les organes distincts.

Par exemple, l'attribution partielle de la gestion des eaux souterraines en tant qu'élément de l'espace rural à une administration chargée de l'agriculture, ou en tant qu'élément du sous-sol à une administration chargée des mines et de l'industrie, peut compliquer la tâche de ces intervenants, au service de finalités en partie divergentes, et faire passer la protection des eaux souterraines au second plan.

La pluralité et la hiérarchie des objectifs, comme les écarts entre les horizons visés et les disparités des portées des interventions pourraient entraîner des difficultés d'application de la politique voulue.

- Association autant que possible des différents acteurs parties prenantes, par des procédures de concertation ou contractuelles, aux choix des objectifs de conservation des eaux souterraines, pour faciliter l'acceptation des disciplines et des charges impliquées.

68 - A ces trois niveaux de problèmes correspondent trois fonctions dévolues à des organes plus ou moins différenciés et reliés, et aussi inégalement répartis entre le secteur public et le secteur privé, selon les pays : fonctions (1) d'acquisition et de distribution des connaissances, (2) d'étude et de prévision (aide aux décisions) et (3) d'intervention et de contrôle des résultats. Certains instruments techniques servent communément à ces trois fonctions (réseaux de mesure, banques de données, modèles de simulation). Ceux de ces organes, qui relèvent de la puissance publique, sont eux-mêmes plus ou moins joints à ceux chargés des fonctions homologues relatives aux eaux de surface.

Selon les pays, ces organes sont tantôt intégrés aux organismes géologiques et aux administrations du sous-sol, tantôt intégrés aux structures hydrologiques et aux administrations des eaux, les deux appartenances coexistant parfois ; en outre, ils interfèrent ou se conjuguent souvent avec des organes à finalité plus sectorielle (agriculture, industrie, santé, etc...) ou plus générale (recherche scientifique, environnement).

- 69 - La variété des conditions naturelles, la multiplicité des agents qui exploitent et utilisent ou influencent les eaux souterraines, la diversité des modes d'exploitation ou d'action comme celle des moyens d'intervention sur le comportement des agents, rendent généralement opportun d'analyser les situations cas par cas, de différencier les objectifs et de mettre en application avec souplesse les instruments d'intervention. Une gestion prudente et prévoyante des eaux souterraines doit s'efforcer ainsi de concilier leur conservation comme ressource et élément de l'environnement avec les "mises en valeur" concourant au développement socio-économique que leur utilisation permet, à un niveau d'arbitrage adapté à chaque situation.

\* \*

\*

**REFERENCES** (ordre chronologique)

- (1) **SNEL M. W. (1967)** - LA MISE EN VALEUR ET LA GESTION DES EAUX SOUTERRAINES EN EUROPE. QUESTIONS DE POLITIQUE GENERALE. (NU - CEE, WATER, doc. trav. |n° 2, mai, Genève).
- (2) LES TENDANCES EN MATIERE D'UTILISATION ET DE MISE EN VALEUR DES RESSOURCES HYDRAULIQUES DANS LA REGION DE LA CEE (NU - CEE, ST/ECE/WATER/1, 1970, New-York).
- (3) **KALLERGIS G. (1971)** - RESSOURCES EN EAUX SOUTERRAINES, LEUR MISE EN VALEUR, LEUR PROTECTION ET LEUR REALIMENTATION. (CEE/Com. probl.eau., Sémin. sur certains problèmes de l'eau en Europe méridionale, Zagreb - Rapport limin., thème D, Wat/SE.Sem/D 1, juin, Genève).
- (4) **L'VOVICH M. I. (1974)** - WORLD WATER RESOURCES AND THEIR FUTURE. (Mysl'P.H. Moscow, Engl. transl. A.G.U., Washington).
- (5) STATISTIQUES DES UTILISATIONS DE L'EAU DANS LES PAYS MEMBRES DE LA CEE. (NU - CEE, 6ème Sess. Com. Prob. Eau, Water/R.19, 1974, Genève).
- (6) THE TEXAS WATER PLAN. (The Texas Water Development Board, 1st ed. 1968 ; 6ème ed. 1975, p. II.6, Austin, USA).
- (7) WORLD WATER BALANCE AND WATER RESOURCES OF THE EARTH. (Comm. URSS/PHI, 1974, UNESCO, 1978, Paris).
- (8) UN WATER CONFERENCE, Mar-del-Plata, Argentina, 1977.
  - (8.1) ECE REGIONAL REPORT (Conf. 70/6).
  - (8.2) THE LONG-TERM NATIONAL PROGRAMME FOR RIVER BASIN DEVELOPMENT. BASIS OF THE WATER MANAGEMENT POLICY IN ROMANIA (Conf. 70/TP 45).
  - (8.3) WATER RESOURCES, NEEDS AND WATER MANAGEMENT PLANNING IN YUGOSLAVIA (Conf. 70/TP 58).
  - (8.4) RATIONAL USE OF GROUND WATER RESOURCES IN THE GERMAN DEMOCRATIC REPUBLIC. (Instit. Wat. Manag., Berlin, Conf. 70/TP 60).



- (8.5) WATER RESOURCES OF THE USSR - STATE INVENTORY OF WATERS AND THEIR UTILIZATION AS A BASIS FOR THEIR RATIONAL DEVELOPMENT AND PROTECTION (Conf. 70/TP 130).
- (8.6) MONOGRAPH ON THE WATER SUPPLY IN DENMARK / HYDROGEOLOGICAL SURVEYING AND PLANNING (Conf. 70/TP 207 & 208).
- (9) **MARGAT J. (1977)** - DE LA SUREXPLOITATION DES NAPPES SOUTERRAINES (Colloq. nat. eaux sout. approvis. eau France, Nice, Oct. T II, pp. 393-408. Ed. BRGM. Orléans).
- (10) AVAILABILITY OF WATER RESOURCES IN THE EUROPEAN COMMUNITY. (CEE, 1977, Bruxelles).
- (11) ESTIMATED USE OF WATER IN THE UNITED STATES IN 1975 (US. Géol. Surv. Circul. 765, 1977, Washington).
- (12) SEMIN. SELECTED WATER PROBLEMS IN ISLANDS AND COASTAL AREAS. (Govern. Malta / NU - ECE, Malta 1978, Genève).
- (13) THE NATION WATER RESOURCES, 1975-2000. (US. Wat. Res. Council. 2nd National Wat. Assess., 1978, Washington).
- (14) **BORTOLAMI C. & al. (1978)** - HYDROGEOLOGICAL FEATURES OF THE PO VALLEY (Northern Italy). (Mém. Assoc. intern. hydrogéol., T. XI, Conf. Budapest, 1976, pp. 304 - 321, Ed. 1978, Budapest).
- (15) **MANDEL S. (1979)** - PROBLEMS OF LARGE-SCALE GROUNDWATER DEVELOPMENT (Journ. of Hydrology, 43, pp. 439-443, Elsevier, Amsterdam).
- (16) **DUPRAT A., SIMLER L., VALENTIN J. (1979)** - LA NAPPE PHREATIQUE DE LA PLAINE DU RHIN EN ALSACE (thèse doct. Univers. L. Pasteur, 266 p., Strasbourg).
- (17) DOMESTIC AND INDUSTRIAL WATER SUPPLY IN THE NETHERLANDS. (NU / CEE, Sémin. Leipzig, Sept. 1979, Genève).
- (18) L'ÉTAT DE L'ENVIRONNEMENT. RAPPORT ANNUEL 1980. (France, Minist. Environnement et Cadre de vie, 1980, Paris).

- (19) **WRIGHT C. E., ed. (1980)** - SURFACE WATER AND GROUNDWATER INTERACTION (UNESCO, Stud. & rep. in hydrology, 29, 123 p., Paris).
- (20) **JACKSON R. E., ed. (1980)** - AQUIFER CONTAMINATION AND PROTECTION (UNESCO, IHP Work Group 8.3, Stud. & rep. in hydrology, 30. Paris).
- (21) EL AGUA EN ESPANA (1980) (Minist. Obras Publicas, Centro Estud. Hidrogr. 58 p., septembre, Madrid).
- (22) PERSPECTIVES A LONG TERME DE L'UTILISATION DES RESSOURCES EN EAU ET DE L'APPROVISIONNEMENT EN EAU DE LA REGION DE LA CEE. (NU / CEE, ECE/Water/26, 1981, New-York).
- (23) **PULIDO-BOSCH A., FERNANDEZ-RUBIO R., GARRIDO-TORRES A. (1982)** - EXPLOITATION DES RESERVES D'EAU DANS UN AQUIFERE KARSTIQUE DU SUD-EST ESPAGNOL (Province d'Alicante). (Comm. europ. méditer. planific. des eaux / CEMPE, 4ème Conf. intern. sur la planific. et la gestion des eaux, Marseille, 10-12 mai 1982, Actes Vol. I, pp. 735-742, Ed. CEFIGRE & BRGM, Orléans).
- (24) GROUNDWATER RESOURCES OF THE EUROPEAN COMMUNITY. (CCE, 10 vol., 1982, Bruxelles - Luxembourg).
- (25) TURKEY-in GROUND WATER IN THE EASTERN MEDITERRANEAN AND WESTERN ASIA (U.N., Nat. Res./Wat. Ser. n° 9, 1982, New-York).
- (26) **EMSELLEM Y., ENNABLI M. (1982)** - L'EAU EN MEDITERRANEE. RESSOURCES EN EAU. UTILISATIONS CONCURRENTIELLES ET PRIORITES HUMAINES. (NU / PNUE, "Plan Bleu", 2 rapp. fin expertise n° 2. Centre Médéas, Sophia-Antipolis).
- (27) **MARGAT J. SAAD K. F. (1982)** - UTILISATION DES RESSOURCES FOSSILES (Proc. 4ème Conf. intern. Planific. gestion eaux, CEMPE, Marseille, Mai. pp. 289-304, Publ. CEFIGRE & BRGM, Orléans).
- (28) **MARGAT J. (1982)** - EXPLOITATION OU SUREXPLOITATION DES RESERVES D'EAU SOUTERRAINE ? / DEVELOPMENT OR OVERDEVELOPMENT OF GROUNDWATER RESERVES ? (UNESCO - Com. nat. Bulg., PHI, Colloq. intern. Calcul bilan eaux sout., Varna, Bulgarie, Sept.-Oct., 11 p.).

- (29) RAPPORT SUR LES EFFETS DES COMPOSES DU SOUFRE SUR LES SOLS, LES EAUX SOUTERRAINES ET LA VEGETATION (CEE, 3ème Sess. organe exéc. interim. Conv. pollution atmoph. transfront. à longue distance, février 1983. ENV/IEB/R.18, Genève).
- (30) **MARGAT J. SAAD K. F. (1983)** - CONCEPTS FOR THE UTILIZATION OF NON-RENEWABLE GROUNDWATER RESOURCES IN REGIONAL DEVELOPMENT (Natural Resources Forum, Vol. 7, n° 4, pp. 377-383, U.N., New-York).
- (31) GROUNDWATER IN WATER RESOURCES PLANNING (UNESCO, IAH, IAHS, Nat. Com. Fed. Rep. Germany, Proceed. Internat. Symposium, Coblenz, Août-Sept. 1983, 3 vol.).
- (32) GROUNDWATER PROTECTION STRATEGIES AND PRACTICES (NU/CEE, Sémin. Athènes, Oct. 1983, Proceed. Publ. Minist. énergie et ressources naturelles, Grèce, 501 p., Athènes).
- (33) **MARGAT J. et al. (1984)** - EAU SOUTERRAINE ET POMPES A CHALEUR (Rapp. 64ème Congrès Assoc. gén. hygièn. tec. municip., Clermont Ferrand, Juin. Publ. Techniques et sciences municipales n° 10, Oct., pp. 451-466, Paris).
- (34) GUIDEBOOK TO STUDIES OF LAND SUBSIDENCE DUE TO GROUNDWATER WITHDRAWAL (UNESCO, Stud. & Rep. in Hydrology, 40, sous-presse 1984, Paris).

TABLEAU I - PRELEVEMENT ET UTILISATION D'EAU SOUTERRAINE

Pays	Date de valeur	Prélèvements d'eau souterraine		Affectation des eaux d'origine souterraine par secteur économique d'utilisation (10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup> /an)			Proportion d'origine souterraine des volumes d'eau utilisés par les principaux secteurs économiques			Références
		total en 10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup> /an	% des prélèvements totaux (a)*	domestique et public (eau potable) (b)	industriel non raccordé (a) (d)	Agricole (e)	domestique et public (eau potable) (b) - %	industriel non raccordé (a) (d) - %	Agricole (e) - %	
AUTRICHE	1975	1,18	47	0,62	0,50	0,06	97	28	67	22
	1980	1,17	37	0,61	0,50	0,06	97	21	60	
BELGIQUE	1975	0,67	8	0,41 (c)	0,17	0,03	72 (c)	2,3	30	22
	1980	0,68	-	0,43	0,17	-	64	-	-	
CANADA	1975	1,89	7	0,53	0,91	0,45	14	4,5	16,3	22
	1980	2,19	5,7	0,58	1,11	0,50	12,7	3,6	16,7	
CHYPRE	1972	0,4	73	0,03	0,01	0,36	100	100	70	26
TCHECOSLOVAQUIE	1975	1,13	22	0,53	0,40	0,13	68	10,3	32,5	22
	1980	1,22	21	0,60	0,40	0,14	61	9,7	28	
DANEMARK	1970	0,72	96	0,34	0,20	0,18	98	67	95	8,6 24
	1977	1,32	-	0,53	0,29	0,50	98	-	-	
FINLANDE	1975	0,30	10,6	0,18	0,04 (c)	0,09	49	14,3	3,0	22
	1980	-	-	0,24	-	0,09	52	14,3	-	
FRANCE	1975	4,5	19,5	2,0	1,5	1	50	10,7	20	22
	1976 - 1977	5,45 (f)	23,7	3,12 (c)	1,86	0,46	50/79 (c)	13,3	9,1	
ALLEMAGNE (R.F.A.)	1975	8,74	26,3	4,35	4,39	ε	91	15,4	-	22 24
	1976	7,34	-	3,56	3,57	0,14	71	-	-	
ALLEMAGNE (R.D.A.)	1975	1,78	21,4	0,59	0,96	0,23	75	15	21	8,4
GRECE	1975	1,68	30	0,19	0,05	1,44	32	55	29,3	22
	1980	1,87	28,3	0,24	0,05	1,58	32	50	27,5	
HONGRIE	1972	1,6	18,5	0,56	0,76	0,28	78	31,5	11,2	5
IRLANDE	1972	0,126	7,3	0,009	0,06	0,015	4,7	24,1	13,5	10 24
	1977	0,095	23,3	0,061 (c)	0,034	-	15	-	-	
ITALIE	1971	9,95	27,6	2,51	0,44	7	36	10	27	10 26 24,26
	1970 - 1975	12	33	4,76	0,66	6,47	91	14	25	
	1979	12,16	-	6,4 (c)	1,6	4,06	93	-	-	
LUXEMBOURG	1970	0,03	50	0,02	0,01	-	67	33	-	22 24
	1976	0,026	45	0,013	0,013	-	71/56	38	-	
MALTE	1978	0,023	100	0,023	ε	ε	100	-	-	12
PAYS-BAS	1972	1,14	42 (g)	0,46	0,68 (c)	-	67	67	ε	5 17 24
	1976	1,04	70	0,70	0,29	-	100	44	-	
	1976	1,35	-	0,88	0,40	0,07	64	-	-	
NORVEGE	1972	0,055	5	0,01	0,07	-	5	6	-	8,1
POLOGNE	1975	1,7	13,3	1,1	0,6	-	52	6,7	-	22
	1980	2,0	11,9	1,4	0,6	-	50	5,7	-	
PORTUGAL	1975	1,8	20	0,70	0,40	0,70	50	12,7	15,2	22
	1980	2,0	19	0,78	0,46 (c)	0,78	49	11,4	15,7	
ROUMANIE	1975	1,18	8	0,72	0,45	0,01	50	8	16,5	8,1,8,2
ESPAGNE	1976	6,2	21	-	-	3,64	-	-	15,4	26 21
	1975	4,75	29	1,1 (c)	-	3,64	30 (c)	-	22	
SUEDE	1975	0,47	11,5	0,43	0,04	-	39	1,3	-	22
SUISSE	1975	0,98	32,5	0,72	0,38 (c)	-	70	19,7	-	22
TURQUIE	1970	2,0	17	-	-	-	-	-	-	3 25
	1975	-	-	0,73	-	-	=50	-	-	
U.R.S.S.	1975	25	9,3	10	12	3	71	14,6	1,7	22
	1980	36	10,2	14	17	5	70	15,7	2,2	
ROYAUME-UNI (Engl. + Wales) -	1975	2,38	23,3	1,22	1,11 (c)	0,05	28	10,2	36	22 24
	1977	2,37	17	1,74 (c)	0,50	0,04	31	-	-	
ETATS-UNIS D'AMERIQUE	1975	114,1	25	17,6	33,5 (c)	66,7	45	16,5	30	22
	1980	115,3	25,3	18,6	30,7 (c)	68,4	45	16,2	30	
YOUUGOSLAVIE	1975	0,63	10	0,42	0,35	0,06	75	5	8	22
	1980	1,1	8,7	0,54	0,46	0,10	75	4,3	7,7	

\* Renvoi aux notes des tableaux in fine

**TABLEAU II - FLUX DE RESSOURCE EN EAU SOUTERRAINE (totaux par pays)**

Pays	Écoulement naturel total (a)*	Flux moyen de ressource en eau souterraine	Notes	Références	Pays	Écoulement naturel total (a)	Flux moyen de ressource en eau souterraine	Notes	Références
	en 10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup> /an	en 10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup> /an				en 10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup> /an	en 10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup> /an		
BELGIQUE	12,5	0,9 0,86	(b)	22 24	LUXEMBOURG	5	0,08	(b)	22,24
BULGARIE	205	3		22	MALTE	0,03	0,03	(b)	12
CANADA	2 901	369,6		22	PAYS-BAS	90	4,5/1,9	(d)	10,22
CHYPRE	0,8	0,35	(b)	24	NORVEGE	376	116	(c)	4
TCHECOSLOVAQUIE	90	2,7		22	POLOGNE	56,2	36		22
DANEMARK	12,9	4,3/2,2	(d)	10	PORTUGAL	65,6	5,1		22
FINLANDE	113	1,9		22	ROUMANIE	208	8,3/4,5	(d)	8.2,22
FRANCE	165	100-110	(c)	24	ESPAGNE	110	20,6	(e)	26
ALLEMAGNE (R.F.A.)	174	37		22	SUEDE	194	63	(c)	4
ALLEMAGNE (R.D.A.)	17,4	8,7	(c)	8.4	SUISSE	50	2,7		22
GRECE	62,9	2,5		22	TURQUIE	173	9,6 + 9	(g)	22,25
		10	(f)	26	U.R.S.S.	4 714	340	(h)	22
		12	(c)	3			1 040/320	(d)	8.5
HONGRIE	113,8	4,2		22	ROYAUME-UNI	120	9,8 38/37	(d)	22 10
ISLANDE	66	24	(c)	4	ETATS-UNIS	1 909	106		22
IRLANDE	50	10,9/7,9	(d)	10		2 345	660	(c)	4
		3,46	(b)	24	YOUgosLAVIE	244	5 47	(f) (c)	8.3,22 4
ITALIE	187	23,3 20,2/12,7 12	(b) (d) (f)	22,24 10 24					

\* Renvoi aux notes des tableaux in fine



NOTES DES TABLEAUX

TABLEAU I

- (a) Prélèvements pour refroidissement des centrales thermo-électriques inclus ou non selon les pays, sans indication explicite.
- (b) Ménages et services publics. Prise sur le réseau par les industries exclues, sauf indication contraire (c). Prélèvements individuels en zone rurale inclus.
- (c) Prises sur réseau public par les industries incluses.
- (d) Prises sur réseau public exclues, sauf indication contraire (c).
- (e) Irrigation, abreuvement du bétail et pisciculture.
- (f) Exhaure minière exclue.
- (g) Prélèvements d'eau de surface pour les chasses de refoulement d'eau salée ("flushing") -Pays-bas- exclus.

TABLEAU II

- (a) Somme des écoulements naturels sortant du pays, affluent à la mer ou à des pays limitrophes (= somme des écoulements engendrés dans le pays et éventuellement importés).
- (b) Somme des flux d'alimentation des aquifères.
- (c) Somme des flux d'écoulement souterrain (composante de l'écoulement de surface total formé dans le pays).
- (d) Somme des flux d'écoulement souterrain et part "exploitable".
- (e) Somme des flux d'écoulement souterrain collectés par les cours d'eau et de ceux affluent directement à la mer.
- (f) Flux d'eau souterraine affluent directement à la mer.
- (g) "Safe Yield" (= 60 à 70 % de l'alimentation des aquifères de plaines) + débit moyen des sources karstiques.
- (h) Volume effectivement exploité.

TABLEAU III

- (a) Dont déboisement, boisement.
- (b) Défense contre l'érosion.
- (c) Façonnement du sol, apports d'engrais, pesticides, herbicides ; intensification biochimique.
- (d) Matières utiles polluantes ou déchets.
- (e) Par voie propre (conduite) ou par véhicule.
- (f) D'eau usées ou résiduaires industrielles, marais-salants.
- (g) Carrières, mines, urbanisme souterrain, tunnels.
- (h) Etanchement, consolidation, fondations.
- (i) Hydrocarbures, saumures.
- (j) Y compris surface du sol.
- (k) Abaissement

- |     |               |
|-----|---------------|
| (k) | Abaissement   |
| (l) | Relèvement    |
| (m) | Colmatage     |
| (n) | Accroissement |
| (o) | Diminution    |

