



LES EAUX SOUTERRAINES DANS LE MONDE

J. Margat

décembre 1990
R 31 780

BRGM
SERVICES SOL ET SOUS-SOL
Département Eau
B.P. 6009 - 45060 ORLÉANS CEDEX 2 - France - Tél. : (33) 38.64.34.34

RÉSUMÉ

Géographie macrohydrologique et macroéconomique de la place des eaux souterraines dans le cycle de l'eau global, dans les ressources en eau et dans les utilisations d'eau de la plupart des pays du monde, basée sur des données quantitatives de sources bibliographiques répertoriées en annexe.

Les eaux souterraines constituent la quasi-totalité des stocks d'eau continentale et une part appréciable de leurs flux, majeure en zones arides et composante essentielle des écoulements réguliers partout. Elles sont aussi le principal vecteur des transports de matières dissoutes.

Les eaux souterraines offrent des ressources avantageuses pour de nombreux utilisateurs, prédominantes en certains pays, mais de natures variées, incorporées aux ressources en eau de surface. Elles sont largement utilisées dans un grand nombre de pays, forment souvent la principale source d'approvisionnement en eau potable, contribuent dans une proportion appréciable aux approvisionnements en eau industrielle dans les pays développés et constituent la ressource locale quasi exclusive pour l'irrigation et l'élevage en zones arides.

Ce rapport dérive de la "conférence invitée" exposée aux XXII^es journées de l'Hydraulique de la Société hydrotechnique de France, à Sophia-Antipolis les 29-31 janvier 1991, sur "Les eaux souterraines et la gestion des eaux. Progrès, qualité, quantité", question IV "Les eaux souterraines en prospective", assez largement complétée, notamment au plan des illustrations, des tables de données et des références.



Figure 1- La circulation des eaux souterraines vue par Athanasius KIRCHER. Illustration in "Mundus Subterraneus", 1665, I, p. 175, Amsterdam.

INTRODUCTION

Brosser un panorama mondial de la place des eaux souterraines dans le cycle de l'eau, dans les ressources en eau et dans les eaux utilisées par l'humanité, donc dans l'économie de l'eau, peut paraître une gageure : il s'agit en effet de la phase cachée et la plus méconnue des eaux continentales, la plus complexe et celle qui se prête le moins aux approches globales de connaissance et d'évaluation, la plus communément vouée aux analyses et aux actions locales voire ponctuelles ...

On s'y efforcera cependant en s'en tenant à des ordres de grandeurs sommaires et en tentant de dégager les traits communs aussi bien que les contrastes du tableau.

1. L'EAU SOUTERRAINE DANS LE CYCLE DE L'EAU

L'un des "chainons manquants" qui ont retardé l'émergence de la conception du cycle de l'eau a été longtemps dû à l'incompréhension de la circulation des eaux souterraines, vouées à l'imagination, voire à la mythologie, plus qu'à l'observation et à la science. On sait que l'idée dominante jusqu'au 17^{ème} siècle faisait curieusement circuler les eaux souterraines du fond des mers aux montagnes d'où jaillissaient les sources, comme le pensait encore Descartes et le représentait le Père Kircher (Fig. 1) ...

Dans les temps modernes, la compréhension du parcours souterrain des eaux terrestres a été remise dans le bon sens et s'est pleinement intégrée dans les images synthétiques et popularisées du cycle de l'eau (Fig. 2). La connaissance de l'origine et des aboutissements des eaux souterraines a été l'un des fondements de l'hydrogéologie naissante. Mais c'est seulement au cours des dernières décennies qu'on s'est soucié et qu'on a tenté de quantifier la place des eaux souterraines dans le cycle de l'eau global.

On sait aujourd'hui que les eaux souterraines constituent la quasi-totalité des stocks (à l'état liquide) et une partie notable des flux d'eaux continentales : des eaux présentes et circulantes dans les terres émergées.

Différents chercheurs, allemands, américains et soviétiques, ont tenté de chiffrer les ordres de grandeur des uns et des autres, par des approches très macroscopiques et malgré les difficultés et les incertitudes que l'on imagine. L'estimation des stocks est relative aux hypothèses d'emmagasinement moyen adoptées, au choix de zones de profondeur et elle implique une distinction entre eaux douces et saumâtres ou salées. L'estimation des flux repose surtout sur l'analyse des phases stables des écoulements de surface, soutenues pour l'essentiel par les eaux souterraines émergentes ; mais cette approche convient mal en zones arides ou semi-arides où les cours d'eau alimentent les eaux souterraines par leurs pertes, plus qu'ils ne les drainent, donc où l'on cherche plutôt à calculer les flux de "recharge" des aquifères, avec beaucoup d'approximation surtout lorsqu'on se place à l'échelle régionale.

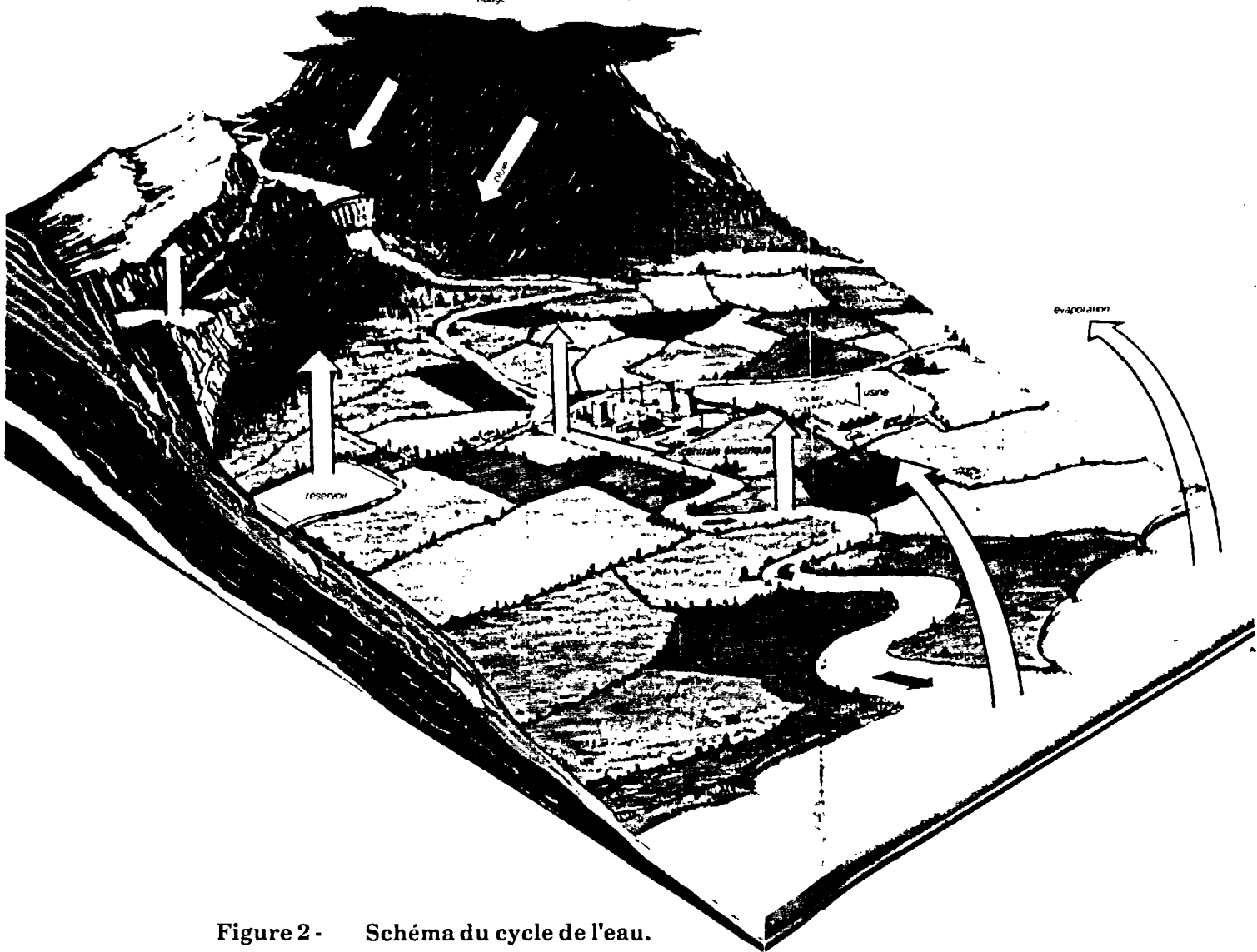
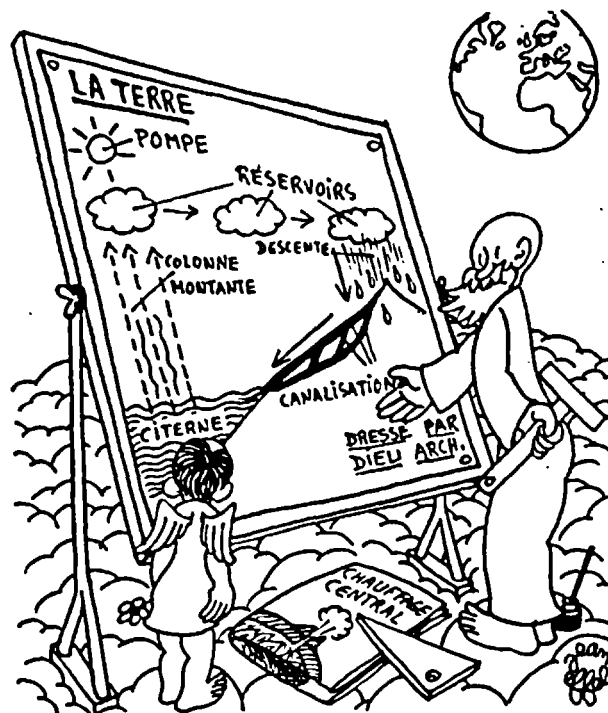


Figure 2 - Schéma du cycle de l'eau.



— Le schéma de l'installation d'eau courante...

JEAN EFFEL, 1953

A l'attention des amateurs de statistiques globales, indiquons que les estimations des stocks planétaires d'eau souterraine douce s'échelonnent entre 8 et 11 millions de milliards de m³, les volumes d'eau souterraine incluant les eaux salées variant de l'ordre de 23 à 60 millions de milliards de m³ selon les auteurs (tableau 1). Cela représenterait 98 à 99 % des masses d'eau continentales (en excluant les glaces) mais moins de 1 % du volume global de l'hydrosphère. Ces stocks se répartiraient assez également dans tous les continents si on les rapporte à leurs étendues respectives : le comité IHD d'URSS les a chiffrés en 1974 comme suit, en millions de milliards de m³ (10¹⁵ m³) :

	Zones d'échange actif ou assez actif, nappes libres ou captives, eau douce pour l'essentiel	Zone d'échange peu actif entre les altitudes 0 et - 2 000 m eau salée prédominante	Total
Europe	1,4	0,2	1,6
Asie	3,4	4,4	7,8
Afrique	2,5	3,0	5,5
Amérique du Nord	1,9	2,4	4,3
Amérique du Sud	1,2	1,8	3,0
Australasie	0,3	0,9	1,2
Total	10,7	12,7	23,4

En comparaison le volume global des lacs d'eau douce est estimé de l'ordre de 100 000 milliards de m³, soit moins d'1 % des stocks d'eau souterraine douce. L'énormité de ces volumes ne doit cependant pas faire illusion : une faible partie seulement est "active", assez mobile et variable pour jouer un rôle de régulateur spontané, quelques centièmes probablement, ce qui est encore considérable : ce sont pour l'essentiel les réservoirs aquifères à nappe libre dont les variations de volume saisonnières ou pluriannuelles doivent être globalement de l'ordre de 10 000 milliards de m³ au plus.

Quant aux flux, les estimations globales s'accordent autour de 12 000 milliards de m³/an. La ventilation par continents est un peu plus contrastée que celle des stocks, comme le montrent les deux estimations - de sources soviétiques - présentées au tableau 2. On y observe que les écoulements souterrains, à cette échelle encore très macroscopique, sont toujours de l'ordre du quart au tiers de l'écoulement moyen total. Plus significative et très contrastée est la répartition par grandes zones climatiques (tableau 3) : on voit que l'ensemble des zones arides et semi-arides ne dispose que d'à peine 2 % des flux souterrains mondiaux, le reste étant partagé à peu près également entre les zones tempérées et les zones tropicales humides ou équatoriales.

Que signifient ces chiffres malgré leur très forte approximation ? D'abord que les flux d'eau souterraine forment bien une part notable de l'écoulement global des eaux continentales mais que ces flux ne sont pas indépendants des écoulements superficiels et qu'ils ne leur sont pas additifs pour l'essentiel : près du tiers de l'écoulement global est souterrain dans son étape initiale pendant plus ou moins longtemps et suivant des parcours diversement étendus, puis rejoint pour l'essentiel les cours d'eau.

L'autre fait majeur à retenir de cette comptabilité globale est l'opposition entre :

- les zones humides, tempérées et intertropicales, qui monopolisent la plus grande part des flux d'eau souterraine du globe et où ces flux constituent en même temps pour l'essentiel la composante stable des écoulements superficiels,
- et les zones arides et semi-arides où les maigres flux d'eau souterraine sont au contraire en grande partie subordonnés aux cours d'eau irréguliers ou temporaires - ou parfois à des cours d'eau permanents issus de zone humide et "importateurs" - qui les alimentent, mais dont les conditions d'émergence sont par contre plus indépendantes de ceux-ci et déterminées davantage par l'évapotranspiration directe, notamment dans les dépressions de bassins fermés.

Les eaux souterraines jouent encore un rôle prépondérant dans les échanges géochimiques entre les eaux continentales et la lithosphère, du fait de la longueur de leur temps de séjour et des très grandes surfaces d'échange. Pour tout le territoire de l'URSS, par exemple, F.A. MAKARENKO et V.P. ZVEREV ont estimé à environ 280 M tonnes les flux annuels de matière dissoute transportés par les eaux souterraines, contre 160 M tonnes en moyenne par les eaux de surface. Globalement on peut présumer qu'une part majeure des quelques 2 500 millions de tonnes transportées annuellement par les eaux continentales (UNESCO, 1978) est le fait des écoulements souterrains.

Pour I.S. ZEKTSER et R.G. DZHAMALOV (1988) les seuls flux d'eau souterraine affluant directement aux océans (nappes littorales non drainées par les cours d'eau), chiffrés globalement à $2\,382.10^9$ m³/an –mais sans doute surestimés– transporteraient à la mer 1 293 millions de tonnes/an de matières dissoutes (on appréciera la précision...).

Tableau 1 - Stock et flux des eaux souterraines terrestres
Quelques estimations globales.

Référence	Stock en 10^{12} m ³			Flux Ecoulement souterrain en 10^9 m ³ /an
	Eau douce	Eau saumâtre ou salée	Total	
R. NACE (USA) 1964, 1968 USGS 1967 M.I. L'VOVICH 1967, 1974 (trad. USA 1979)	8 336 (1) 8 350 4 000 (2)		60 000(3)	12 000 11 885
Com. IHD-URSS 1974 (UNESCO 1978) et I.A. SHIKLOMANOV, UNESCO 1990	10 530(4)	12 870	23 400(5)	13 320 (6) 13 200
A. BAUMGARTNER & E. REICHEL (RFA) 1975 MATHER 1984 UNESCO 1988	8 062 (7) 8 800 8 500			

Notes :

- (1) conversion de 2.10^6 mi³, dont 50 % à moins de 800 m de profondeur et 50 % au-delà.
- (2) "Ground water in zone of active water exchange", plus 85 d'humidité du sol.
- (3) d'après VERNADSKIY et MAKARENKO.
- (4) Plus : humidité du sol $16,5.10^{12}$ m³ et glace souterraine du permafrost 300.10^{12} m³.
- (5) Antarctide exclue : $\sim 2\,000.10^{12}$ m³ de glace d'eau douce.
- (6) "Ground Water Runoff into River" = "Natural Ground Water Ressource renewed annually".
- (7) Incluant l'humidité du sol $61,3.10^{12}$ m³ ; dont 3 550 jusqu'à 800 m de profondeur.

Tableau 2 - Répartition des flux globaux d'écoulement souterrain continentaux selon les estimations de M.I. L'VOVICH (1974) et du comité d'URSS de la Décennie hydrologique internationale (1974).

Continent	Ecoulement souterrain moyen				
	Source : M.I. L'VOVICH (1974)			Source : IHD-URSS (1974) UNESCO (1978)	
	Hauteur en mm/an ($\equiv 1\,000\text{ m}^3/\text{an.km}^2$)	Flux en $10^9\text{ m}^3/\text{an}$	en % de l'écoulement total	Flux en $10^9\text{ m}^3/\text{an}$	en % de l'écoulement total
Europe	109	1 065	34	1 120	35
Asie	76	3 410	26	3 750	26
Afrique	48	1 465	35	1 600	35
Amérique du N	84	1 740	32	2 160	29
Amérique du S	210	3 740	36	4 120	35
Australasie	54	465	24	575	24
Terre entière	90	11 885	31	13 200	30

Tableau 3 - Différenciation de l'écoulement souterrain moyen suivant les zones climatiques, selon les estimations de M.I. L'VOVICH (1974).

Zone climatique	Ecoulement souterrain moyen		
	Hauteur moyenne en mm/an ($\equiv 1\,000\text{ m}^3/\text{an.km}^2$)	en % de l'écoulement total	Flux global déduit (arrondi) en $10^9\text{ m}^3/\text{an}$
Subarctique	40	35	} ~ 6 000
Tempérée humide	30 à 150	20 à 50	
Aride	0 à 10	0 à 20	} ~ 200
Tropicale sèche (semi-aride)	20 à 30	20 à 25	
Tropicale humide	200 à 320	~ 40	} ~ 5 800
Equatoriale	600	50	
Equatoriale et montagneuse	700	40	

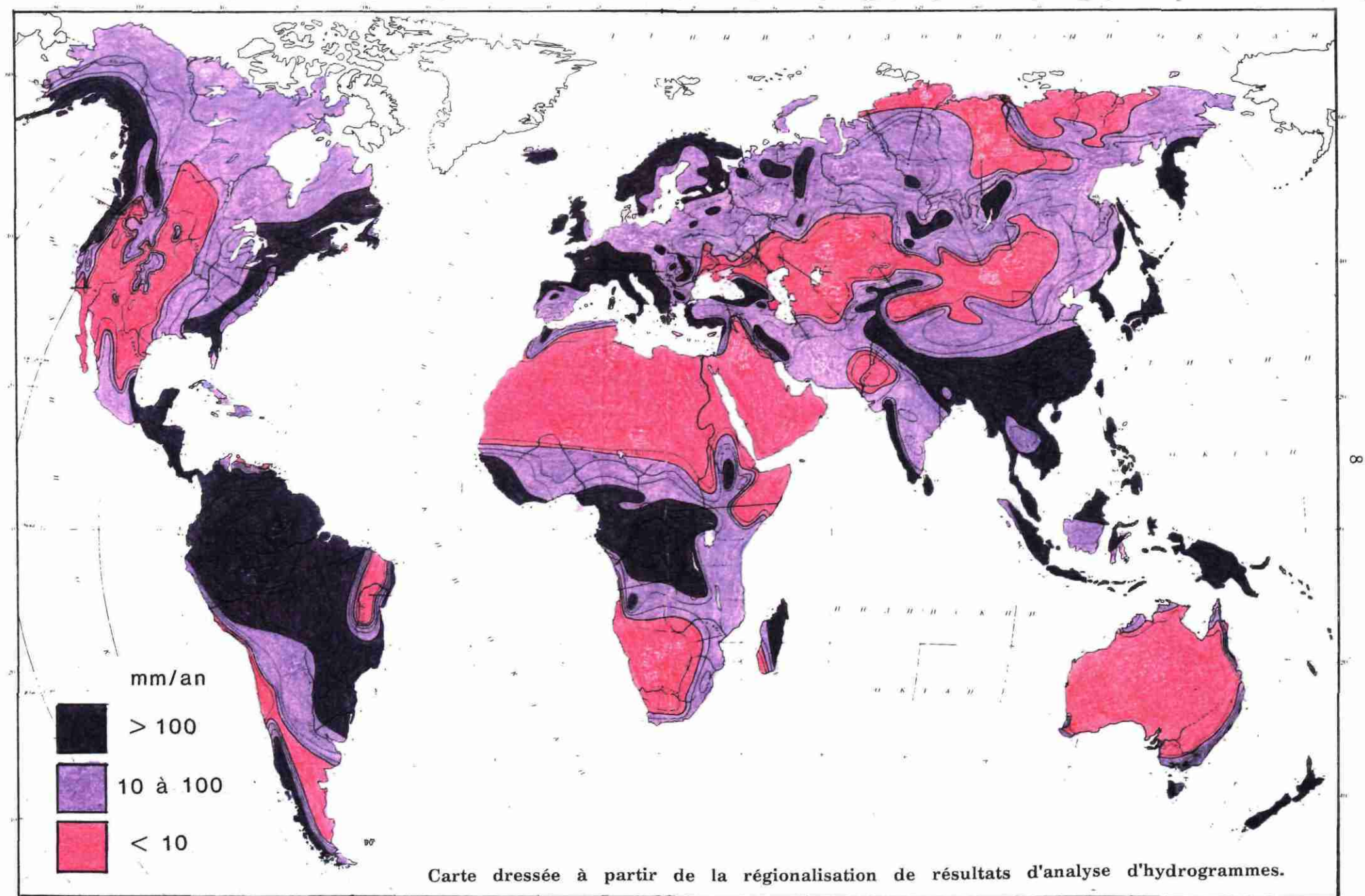


Figure 3- Répartition mondiale de l'écoulement souterrain moyen, en mm/an (M.I. L'VOVICH 1974).

Naturellement cette vision macroscopique ne doit pas niveler d'énormes disparités régionales et locales. Les apports locaux - principalement météoriques - qui engendrent les écoulements souterrains varient dans le monde, en année moyenne, de quasi 0 à plus de 1 000 mm (0 à 1 M m³/an. km²) ; leur répartition a été cartographiée, grossièrement et à petite échelle pour l'ensemble des continents (Fig. 3), plus finement et à plus grande échelle en quelques régions ou pays (Fig. 4). Ces contrastes s'accroissent encore entre années sèches et humides. Les chiffres globaux des écoulements souterrains, considérés comme "ressources naturelles renouvelables" en eau souterraine, tentés pour chaque territoire national dans la plupart des pays (tableaux de l'annexe I) traduisent ces inégalités, à la fois en grandeur absolue et relative - rapportée à l'écoulement total interne de chaque pays (Fig. 5) -, bien que la comparaison entre ces estimations soit pénalisée par des approches non cohérentes (cf. la remarque de l'annexe I). Mais cette gamme est presque aussi étendue à l'intérieur de beaucoup de pays (France : 50 à 1 000 mm/an).

Quant aux réservoirs aquifères, la diversité de leurs tailles, de leurs extensions en profondeur, de complexité de leurs structures, des formes et degrés de leurs connexions avec les cours d'eau, est extrême. A côté de quelques très grands aquifères de taille continentale et le plus souvent transfrontières (tableau 4), d'innombrables aquifères de faible ou moyenne étendue sont entièrement enchâssés dans des bassins fluviaux de quelques milliers ou dizaines de milliers de km². S'y ajoute une grande variété d'échanges physico-chimiques entre eau et sols ou roches, d'où résultent des qualités d'eau naturelles diversifiées, y compris bien souvent au sein d'un même aquifère..

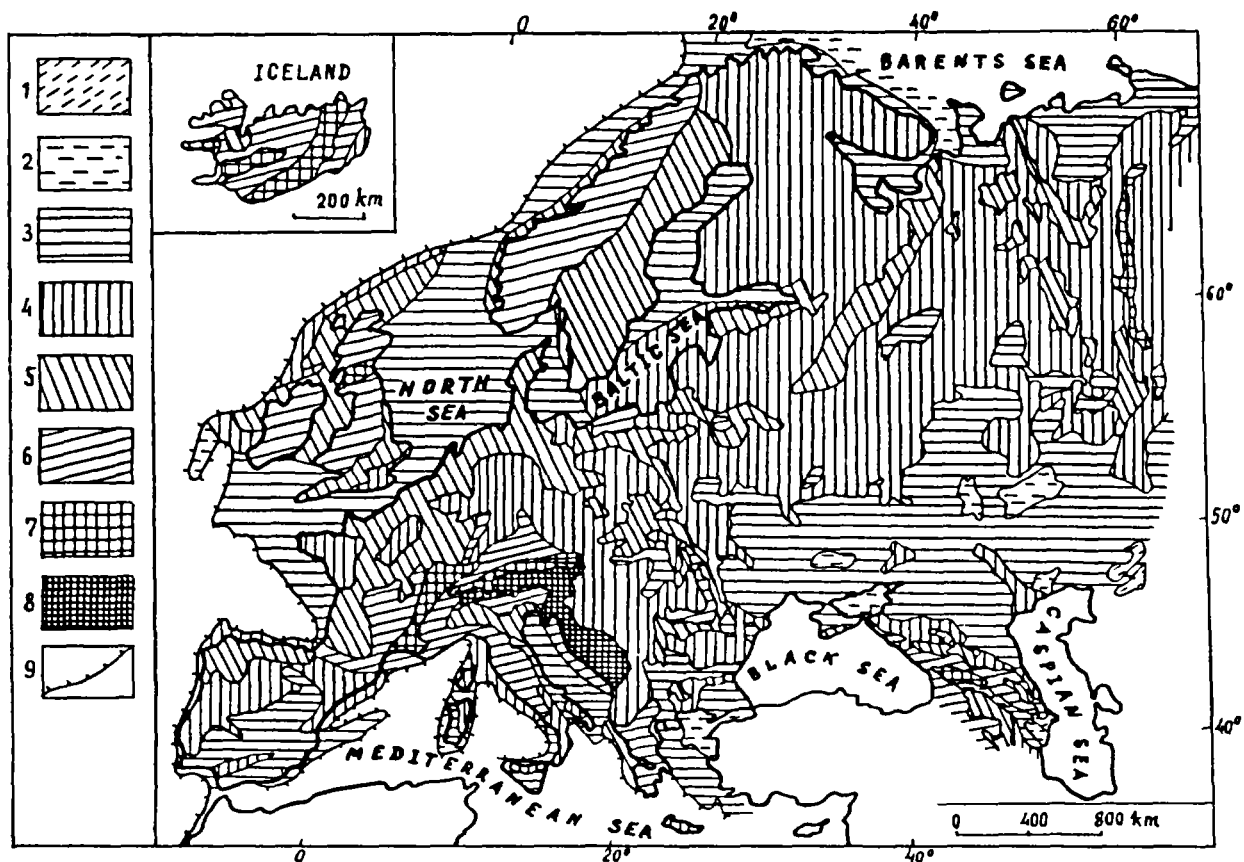


Figure 4 - L'écoulement souterrain en Europe (I.S. ZECTSER, R.G. DZHAMALOV, I.V. DIORDIEV, 1989).

Écoulement souterrain spécifique moyen en l/s. km² :

1 : 0 - 2 : > 0,1 - 3 : 0,1 à 1 - 4 : 1 à 3 - 5 : 3 à 5 - 6 : 5 à 10 - 7 : 10 à 20 - 8 : > 20 -
9 : Limite du plateau continental.

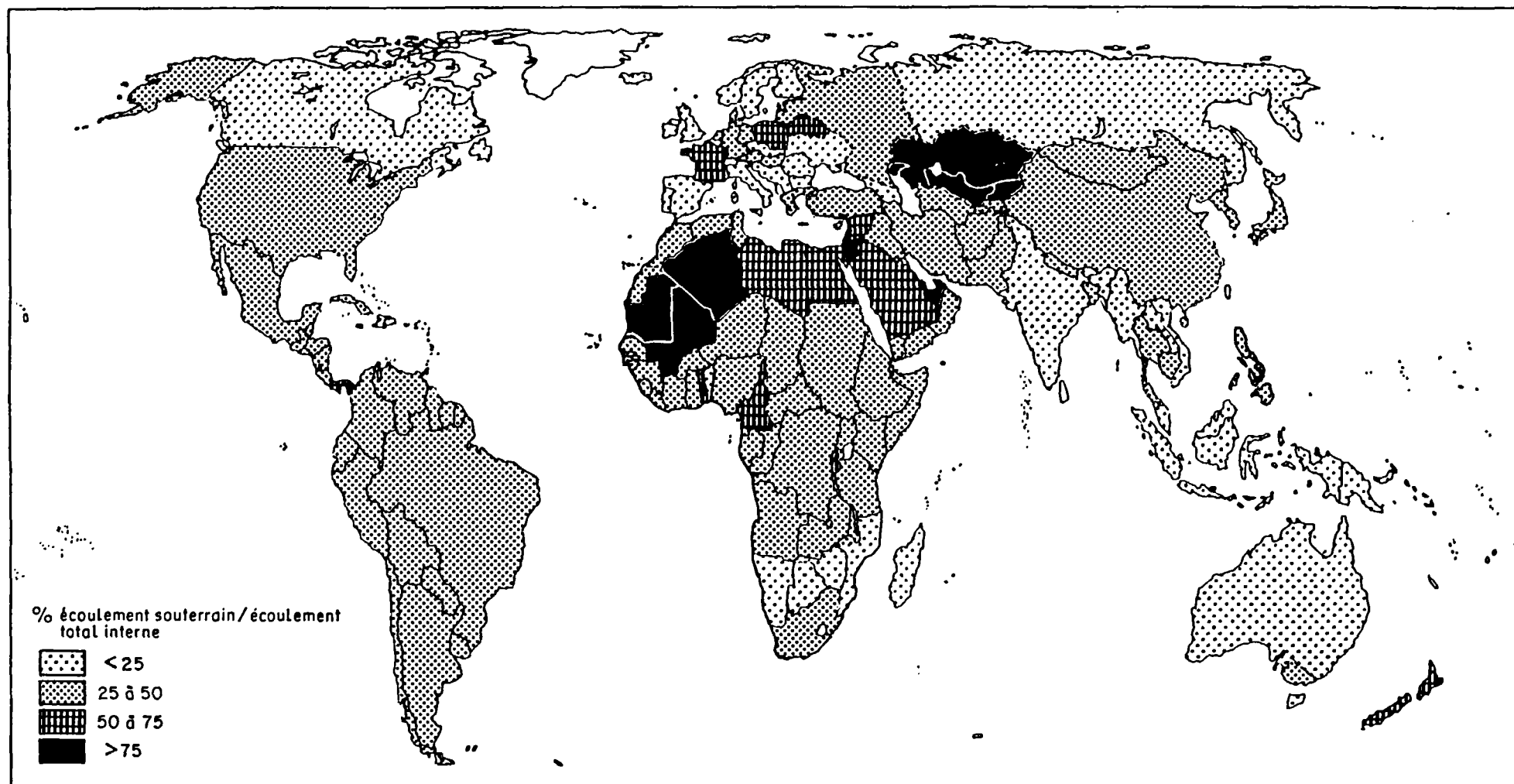


Figure 5 - Proportion souterraine de l'écoulement total moyen interne estimé dans chaque pays (d'après les données de l'annexe I).

Tableau 4 - Quelques très grands systèmes aquifères du monde

Pays	Dénomination	Etendue km ²	Volume en réserve 10 ⁹ m ³	Flux moyen (alimentation) 10 ⁶ m ³ /an	Durée de renouvellement (moyenne théorique) années
Australie	Great Artesian Basin	1 700 000	20 000	1 100	~20000
Egypte, Libye, Soudan, Tchad	Grès de Nubie	2 000 000	75 000	~1000	75 000
Arabie Saoudite	Ensemble des aquifères du bassin sédimentaire (système multi- couche)	~1 000 000	35 000	~1050	~33000
Algérie, Tunisie	Continental intercalaire et terminal du Sahara septentrional	780 000	60 000	850	70 000
Niger, Mali, Nigéria,	Continental intercalaire	~500 000	10 000 à 15 000	~800	10 000 à 20 000
USA	Ogallala Aquifer (High Plains)	450 000	~15000	6 à 8 000	~2000
USA	Central Valley (Californie)	80 000	1 130	~7000	~100
Brésil	Bassin sédim. de Maranhão (système multi- couche)	700 000	80 000 (dont 3 000 en nappes libres)	4 000	20 000
Chine	Plaine du Ho Pei (système multi- couche)	136 000	5 000 à 10 000	35 000	150 à 300
URSS	Bassin artésien du Dniepr- Donetz (système multi- couche)	> 250 000	175 000	5 000	35 000
France	Sables verts du bassin de Paris	50 000	425	20	21 000

2. QUELLES RESSOURCES OFFRENT LES EAUX SOUTERRAINES ?

Toute l'eau de la nature n'est pas ressource. Le concept de ressource en eau en général ne se réduit pas aux occurrences d'eau renouvelée ou accumulée dans le milieu naturel, sur lesquelles l'humanité s'arrogerait un pouvoir et un droit d'appropriation sans limite : c'est une notion plus complexe, socio-économique autant que physique. Ce qui est vrai pour le tout l'est aussi pour la partie eau souterraine, d'autant plus que s'ajoute alors un problème de partition. Que sont les ressources en eau souterraine : par rapport aux flux et aux stocks d'eau du sous-sol que l'on vient de voir ? par rapport aux ressources en eau de surface (sont-elles complémentaires et additives) ?

Rappelons quelques truismes :

- Les eaux souterraines n'offrent des ressources en eau que dans la mesure où elles sont accessibles et exploitables du double point de vue des possibilités technico-économiques et de l'intérêt des agents exploitants d'une part, des latitudes permises par les contraintes de conservation des eaux de surface régulières, voire de la stabilité du sol d'autre part.

Les flux et stocks naturels d'eau souterraine mentionnés plus haut ne constituent donc pas en totalité ipso facto des ressources. D'une certaine manière les ressources en eau souterraine sont la part des ressources en eau globales qu'il est plus avantageux de capter dans le sous-sol que par dérivation des sources ou des rivières. Mais avantageux pour qui ? L'appréciation de ces avantages peut dépendre de divers points de vue et de juges variés, individuels ou collectifs, d'où une pluralité de regards évaluateurs et d'évaluations des ressources en eau souterraine (J. MARGAT, 1987).

- Les eaux souterraines offrent à la fois des ressources renouvelables (flux à capter) et des ressources non renouvelables (stocks à épuiser), ces stocks ou réserves offrant d'abord par leur fonction régulatrice un certain degré de liberté au régime d'exploitation par rapport au régime naturel des apports.
- Dans la plupart des pays les ressources en eau souterraine sont d'origine interne. Plus rarement que les eaux de surface elles peuvent aussi néanmoins être d'origine externe pour une part significative en quelques pays, dans le cas d'aquifères transfrontières (Exemples : en Egypte, à Bahraïn et au Qatar, en Tunisie...). Des conflits d'exploitation peuvent s'en suivre et une gestion commune peut alors nécessiter des accords entre états.
- A la diversité des tailles, des structures, des flux et des réserves des aquifères, de leurs liens avec les eaux météoriques comme avec les cours d'eau, des qualités de leurs eaux, correspond une immense variété de ressources offertes, d'accessibilité et d'exploitabilité, de compétitivité par rapport aux ressources superficielles, de sensibilité aux impacts sur le régime ou les qualités, et finalement de vocations d'emploi comme de conditions et de contraintes de gestion.

Les ressources en eau souterraine ne se définissent donc pas seulement dans l'absolu et avec unicité par des variables physiques (hydrogéologiques) quantitatives et qualitatives. Leur évaluation est relative aux critères de leur utilisation et à des contraintes externes, sans unicité. En outre elle n'est généralement pas indépendante de l'évaluation des ressources en eau superficielle, tant du fait des continuités physiques entre les phases souterraines et superficielles des eaux terrestres, que des interactions entre les aménagements et exploitations des unes et des autres et de leur compétitivité dans la sphère économique des utilisations d'eau.

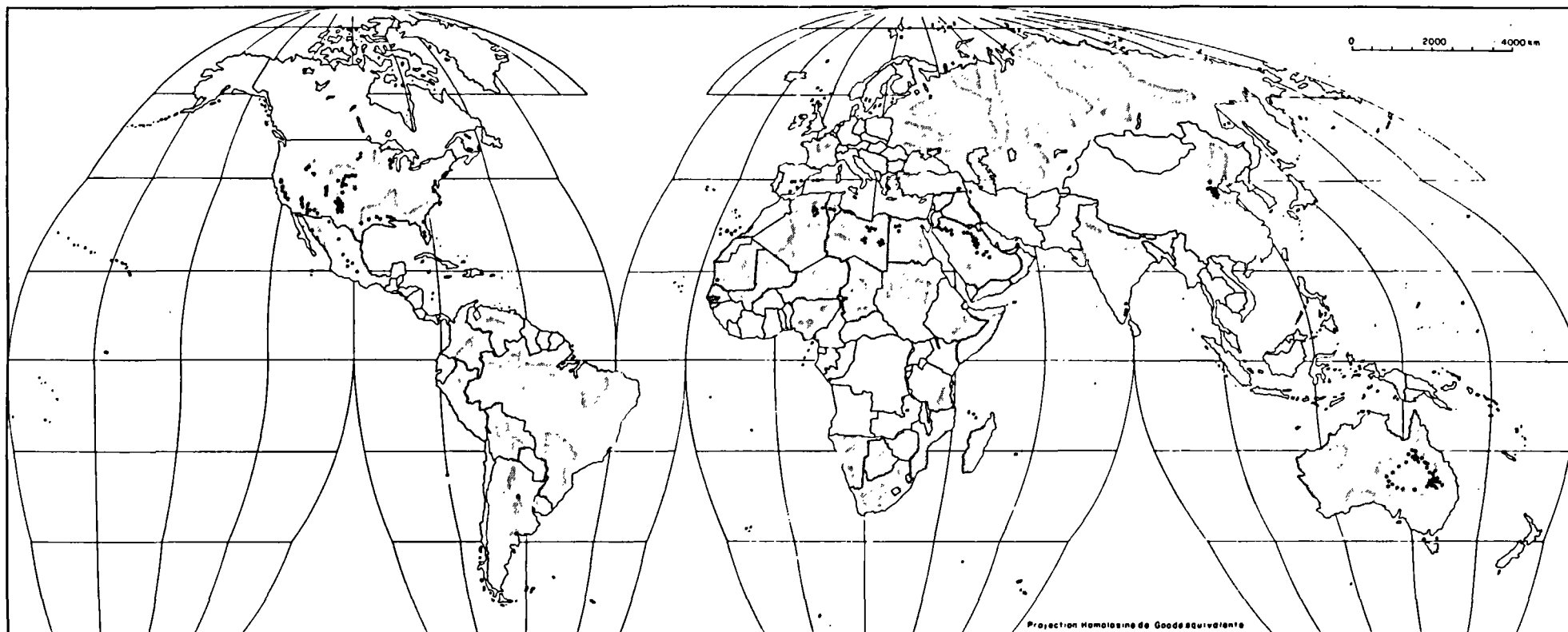
Les ressources en eau souterraine à évaluer sont alors fortement dépendantes des stratégies d'exploitation possibles et choisies, en somme de leur gestion. En gros trois sortes de stratégie d'exploitation des eaux souterraines sont concevables, qui se différencient par les importances relatives prises par les gestions respectives du flux et du stock, en particulier par le rôle que l'on fait jouer aux réserves des aquifères, donc qui sont appropriées chacune à des types d'aquifère différents :

- a) Captage du flux en régime d'équilibre dynamique à court ou moyen terme, plus ou moins intensif –c'est-à-dire en proportion plus ou moins forte du flux moyen naturel– suivant les contraintes de conservation des niveaux et/ou des débits aux limites, et aussi suivant la capacité de l'aquifère (dans certains cas celle-ci peut être assez faible pour contraindre à adapter l'exploitation à la variabilité des apports). C'est la "récolte du revenu". La gestion de la réserve est analogue à celle d'une trésorerie comme "fond de roulement". Cette stratégie convient à la plupart des nappes libres ou captives de faible à moyenne capacité.
- b) Captage du flux en régime d'équilibre différé à long terme mais de déséquilibre contrôlé à court ou moyen terme, intensif ou modulé suivant les besoins. C'est "l'emprunt" à la réserve, suivi ou non d'un "remboursement" selon qu'on laisse le stock se reconstituer au moins en partie au détriment du flux écoulé –voire en augmentant artificiellement les apports–, ou bien qu'on stabilise la réserve en moyenne dans son nouvel état, en réglant les prélèvements à la hauteur du flux moyen d'apport ; dans les deux cas une réduction éventuellement drastique de l'exploitation est nécessaire pour restaurer l'équilibre en deuxième phase.

C'est en somme une stratégie mixte, analogue temporairement à la stratégie (c) en première phase, puis revenant à la stratégie précédente (a) en phase finale. Ce peut être une stratégie délibérée, mais dans le passé ce fut surtout une "stratégie de fait" involontaire du moins en première phase, le rééquilibrage opéré en deuxième phase visant alors à corriger et réparer les excès de la première. Volontaire ou non, elle est praticable dans les cas de nappes libres ou semi-captives de forte capacité modérément et irrégulièrement renouvelées, et à faibles contraintes conservatoires.

- c) Epuisement progressif du stock exploité en régime de déséquilibre même à long terme comme un "gisement d'eau", en déterminant un tarissement plus ou moins rapide du flux sortant naturel. C'est la "surexploitation" volontaire ou "exploitation minière" des ressources non renouvelables, qui équivaut à la consommation d'un "actif". Cette stratégie convient à des nappes libres ou captives faiblement alimentées et de grande capacité, indépendantes des eaux de surface, notamment en zones aride et semi-aride.

Chaque pays, suivant son étendue, sa constitution géologique et sa diversité climatique, va ainsi se trouver doté de ressources en eau souterraine non seulement inégales en quantité et variées en qualité, mais aussi se prêtant à des stratégies d'exploitation et de gestion plus ou moins différenciées et inégalement concurrentielles par rapport aux ressources en eau de surface aussi bien que par rapport à des ressources en eau non conventionnelles. Les ressources en eau souterraines peuvent être prédominantes, sinon exclusives, ou accessoires, ou encore complémentaires, à utiliser de manière conjuguée et à gérer conjointement avec les ressources en eau de surface.



- 1- Principaux réservoirs aquifères étendus offrant des ressources en eau non renouvelables : grands bassins sédimentaires comportant un ou plusieurs aquifères profonds à nappe captive et aquifères étendus à nappe libre de grande capacité en zone aride.
- 2- Principales "mines d'eau" : champs d'exploitation intensive d'eau souterraine en régime d'épuisement de réserve ("surexploitation") plus ou moins accentué.

Figure 6- Gisements et mines d'eau dans le monde.

Géographie très simplifiée des ressources en eau souterraine

- En zone tempérée les ressources en eau souterraine, principalement renouvelables, sont très répandues, souvent abondantes et accessibles, compétitives avec les eaux superficielles pour une large gamme d'utilisations. Elles sont fortement liées aux ressources en eau de surface permanentes, ce qui impose une gestion au moins coordonnée sinon intégrée de l'ensemble des ressources en eau. Les aquifères d'assez grande capacité, régulateurs pluri-annuels efficaces, offrent aussi des possibilités appréciables de pallier aux défaillances conjoncturelles des ressources pluviales et superficielles (sécheresse), concurremment avec les retenues d'eau de surface et sans nécessiter autant d'aménagement. Les nappes profondes captives des bassins sédimentaires offrent des ressources plus accessoires et moins durables, mais plus indépendantes des eaux de surface et attractives en quelques régions par des productivités élevées et un artésianisme initial qui facilitent l'exploitation.
- En zone aride et semi-aride les ressources en eau souterraine renouvelables, d'extension plus lâche et d'abondance très inégale et généralement limitée quant à leurs flux naturels, sont les seules ressources permanentes, hors des cas de ressources "importées" par des fleuves allogènes (Euphrates, Nil...). Elles sont donc exclusives pour beaucoup d'utilisations, malgré des défauts de qualité plus répandus (salinité). Elles sont aussi différemment dépendantes des ressources en eau de surface dans la mesure où elles sont plus souvent leur "sous-produit" que leur régulateur –y compris dans le cas des "nappes d'accompagnement" des fleuves allogènes– et où les exutoires naturels des eaux souterraines et des eaux superficielles sont dissociés. C'est aussi dans ces zones que les réservoirs aquifères peuvent le plus contribuer, par des aménagements appropriés, à mieux maîtriser des ressources en eau superficielle irrégulières et clairsemées. D'où, là encore, l'intérêt d'une gestion intégrée des ressources en eau.

C'est encore en zones arides et semi-arides que les ressources non renouvelables offertes par les grands réservoirs aquifères, considérables en quelques pays (fig. 6), prennent une importance capitale tout en y posant des problèmes de gestion spécifiques (stratégie d'exploitation minière évoquée plus haut)

- En zone tropicale humide et équatoriale les ressources en eau souterraine bien que souvent abondantes, plus inégalement toutefois du fait de l'extension des terrains "anciens" peu aquifères, ne sont compétitives par rapport aux eaux superficielles, surtout grâce à leur qualité généralement meilleure, que pour les demandes dispersées (hydraulique rurale) ou parfois plus agglomérée, en étant peu assujetties à des contraintes de conservation d'eaux de surface surabondantes.

3. LES EAUX SOUTERRAINES DANS L'ECONOMIE DE L'EAU

La mesure de l'importante actuelle des eaux souterraines dans l'économie de l'eau est donnée d'abord par les estimations des quantités d'eau souterraine prélevées, en valeur absolue et en proportion des prélèvements en eau totaux, ainsi que par les estimations des parts prises par l'eau souterraine comme source d'approvisionnement en eau pour les principaux secteurs économiques d'utilisation. Bien que des statistiques nationales à ces sujets ne soient pas disponibles dans tous les pays du monde, des données numériques provenant surtout de sources gouvernementales ou régionales (intergouvernementales) publiées ont pu être rassemblées : présentées dans les tableaux de l'annexe II, elles se rapportent à presque tous les pays industrialisés et à un échantillon assez représentatif de pays en développement. Malgré quelques défauts d'homogénéité et des différences d'actualité et de validité, ces données à l'échelle nationale font bien ressortir l'importance présente, absolue et relative, des eaux souterraines comme source d'approvisionnement (figures 7 et 8).

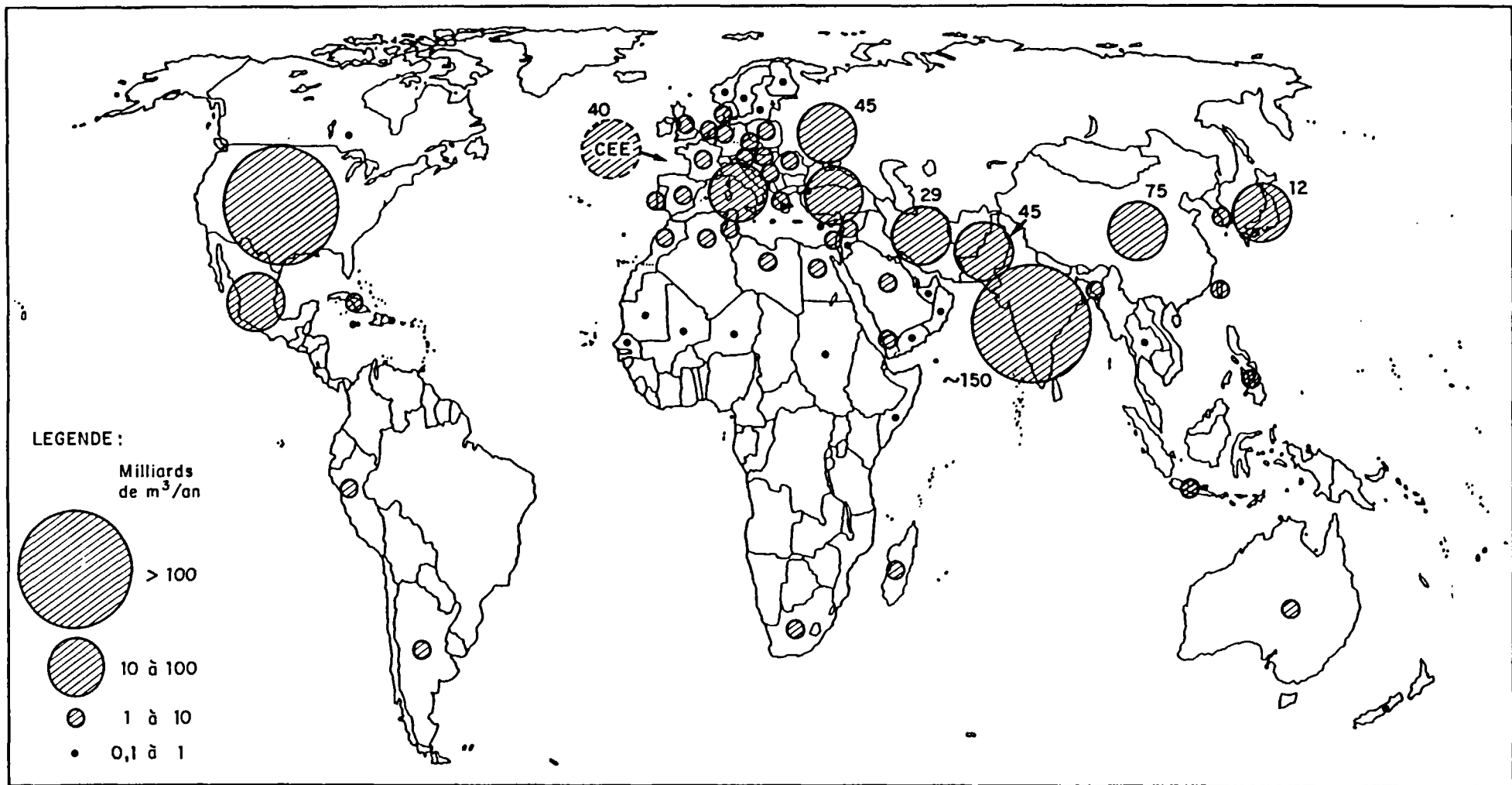


Figure 7 - Prélèvements totaux d'eau souterraine estimés par pays (années 70 à 80).

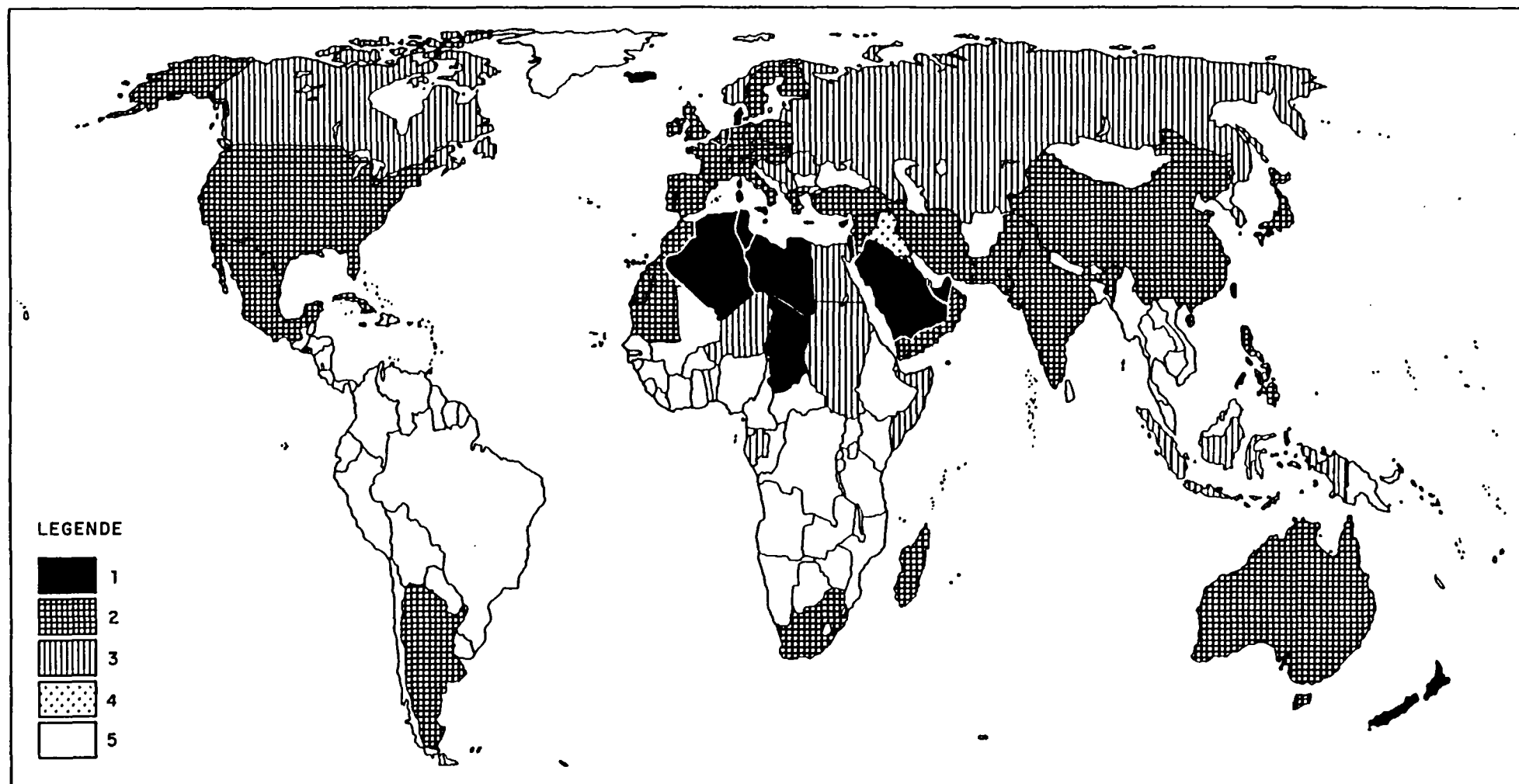


Figure 8 - Parts des eaux souterraines comme source d'approvisionnement pour toutes utilisations d'eau confondues.

1 : majeure, > 50 % - 2 : Significative, 10 à 50 % - 3 = Faible, 1 à 10 % -
4 : négligeable, < 1 % - 5 : inconnue.

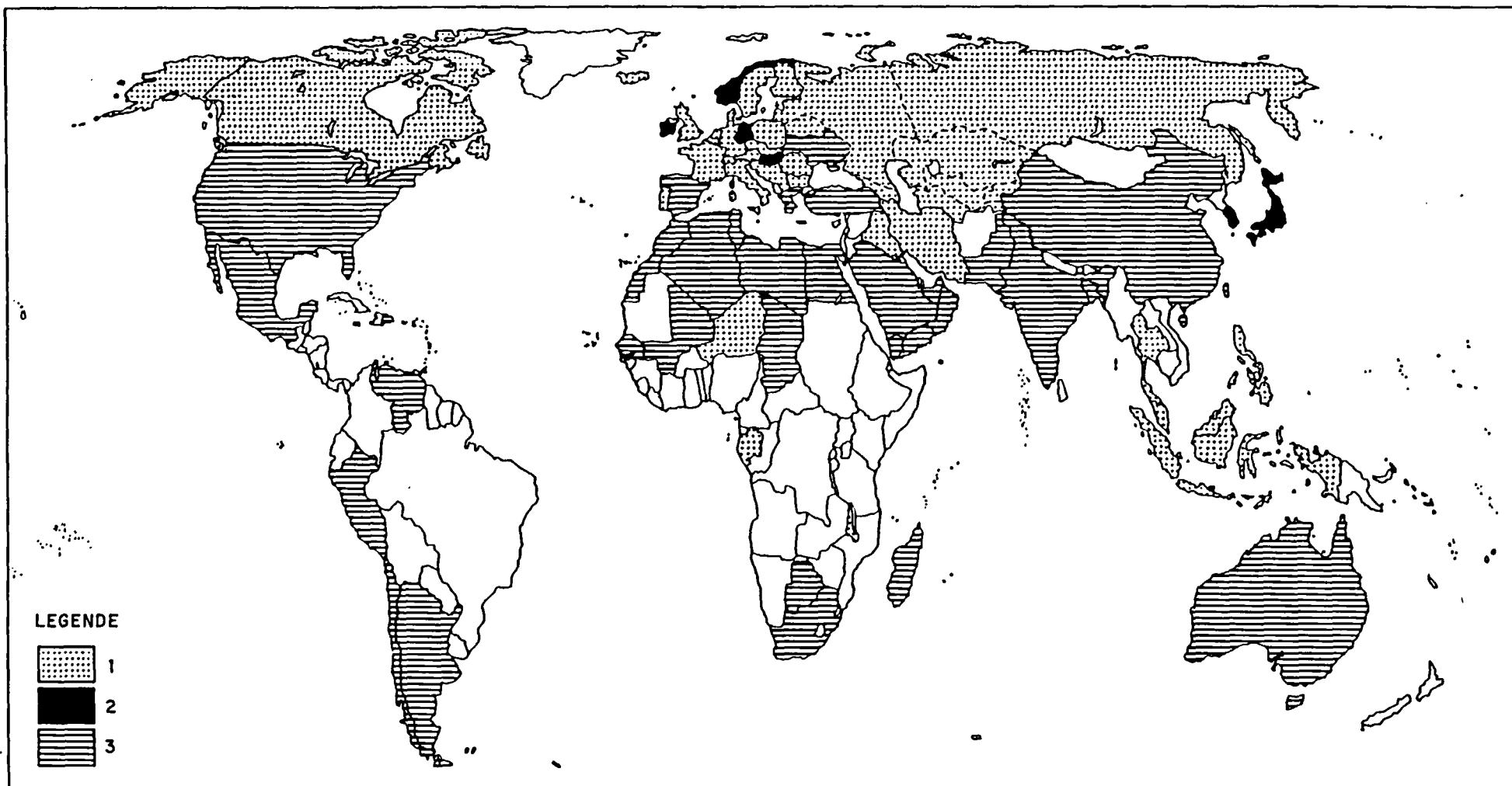


Figure 9 - Secteurs économiques premiers utilisateurs d'eau souterraine suivant les pays :

1. Collectivités (approvisionnement en eau potable),
2. Industries non desservies,
3. Agriculture (irrigation, élevage).

Dans la majorité des pays les prélèvements d'eau souterraine dépassent le cinquième et souvent le tiers des prélèvements en eau totaux pour toutes utilisations (y compris le refroidissement des centrales thermo-électriques). Suivant les pays, ces prélèvements sont répartis en proportions variées entre les trois principaux secteurs d'utilisation : collectivités (alimentation en eau potable), industries non desservies, agriculture. Si la part prédominante va le plus souvent aux collectivités dans les pays développés d'Europe (URSS comprise), le secteur industriel est le premier exploitant d'eau souterraine en quelques pays industrialisés (Allemagne-Est (ex DDR), Corée du Sud, Japon, Pays-Bas, Norvège, URSS jusqu'en 1980), et il est le second en d'autres (Allemagne/RFA, Belgique, France, Royaume Uni, Tchécoslovaquie, Yougoslavie) ; tandis que dans les pays développés où l'agriculture irriguée est le secteur d'utilisation d'eau prédominant (certains pays méditerranéens –Espagne, Grèce–, Australie et USA) et dans presque tous les pays en développement (hors de la zone intertropicale humide), le secteur agricole est, souvent de beaucoup, le principal preneur et utilisateur d'eau souterraine : 85 % en Grèce, 62 % aux USA ; 84 % en Afrique du Sud, 85 % en Tunisie, 96 % en Inde, 90 % en Chine, 80 % en Arabie Saoudite, 79 % en Argentine, 64 % au Mexique... (figure 9).

En proportion des sources d'approvisionnement de chaque secteur, l'eau souterraine tient des places variées mais rarement négligeables et souvent dominantes, tout particulièrement pour l'alimentation en eau potable des collectivités urbaines et rurales :

- Dans la plupart des pays développés et dans beaucoup de pays en développement l'eau souterraine est la source d'approvisionnement en eau potable principale et parfois quasi exclusive. Cette part s'élève, par exemple, à 97 % en Autriche et au Danemark, plus de 90 % en Italie, 78 % en Hongrie, 70 à 75 % en Allemagne, Belgique, Suisse, URSS et Yougoslavie, plus de 60 % en France et aux Pays-Bas.
- Dans beaucoup de pays industrialisés l'eau souterraine couvre une part souvent notable des besoins des industries non desservies : 41 % au Japon, 40 % en France, 26 % en Allemagne, 18 % aux USA, 15 % en URSS...
- En proportion moindre, mais souvent significative, l'eau souterraine concourt aussi à couvrir les besoins en eau d'irrigation de l'agriculture : en majeure partie naturellement en quelques pays situés en zone aride (Arabie Saoudite 80 %, Libye 100 %, Argentine 70 %) et notablement en d'autres (40 % en Inde, 33 % aux USA, 1/4 ou plus au Pakistan et en plusieurs pays méditerranéens : Espagne, France, Grèce, Italie). L'eau souterraine est aussi le plus souvent, notamment en zones aride et semi-aride, la ressource en eau essentielle pour l'élevage extensif.

L'évolution passée des prélèvements et des utilisations d'eau souterraine est trop rarement et inégalement connue, et de plus sur des durées trop courtes pour la plupart, pour que l'on puisse en dégager des tendances assez significatives et généralisables. Le peu qu'on puisse en dire est que les quelques données disponibles indiquent des tendances variées. Dans les pays développés, à des croissances caractérisées en certains pays (+ 144 % en 30 ans aux USA entre 1950 et 1980 (Fig. 10), + 54 % en 25 ans (1950-1975) au Royaume Uni, de 70 % en 7 ans (1970-1977) au Danemark, de 12 % en 5 ans (1971-1976) aux Pays-Bas, de 15 % en 10 ans en Espagne et en URSS), s'opposent une relative stabilité contemporaine en Allemagne, Belgique, France et Suède, et une décroissance au Canada, ainsi qu'aux USA depuis 1980 (-12 % entre 1980 et 1985, ce renversement de tendance affectant d'ailleurs l'ensemble des prélèvements en eau dans ce pays). Des croissances notables sont par contre à présumer en divers pays en développement gros préleveurs : Chine, Inde, Iran, Mexique, Pakistan... Les croissances les plus fortes se situent sans surprise dans des pays en développement et en expansion démographique sous climat aride ou semi-aride : plus de 300 % entre 1975 et 1985 en Arabie Saoudite, 44 % entre 1977 et 1985 en Libye, près de 100 % entre 1977 et 1985 en Tunisie ; les prélèvements auraient triplé en Egypte entre 1976 et 1985...

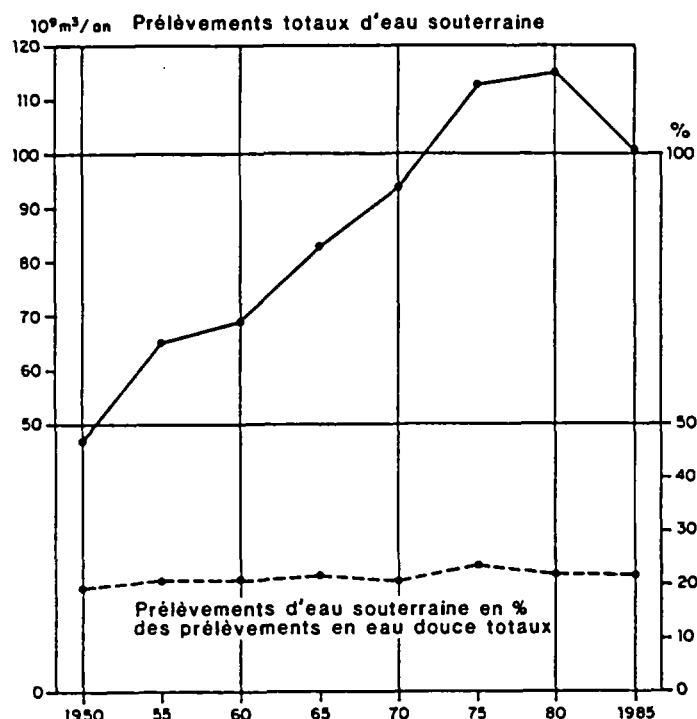


Figure 10 - Evolution des prélèvements totaux d'eau souterraine douce aux Etats-Unis de 1950 à 1985.

Source : USGS, Estimated Use of Water in the United States in 1985.

USGS Circular 1004, 1988, Washington.

Il reste à comparer ces prélèvements aux ressources, en sachant qu'à la différence des cours d'eau principaux récepteurs des retours d'eau après usages, les eaux souterraines sont sujettes surtout à des prélèvements sans restitution* (avantage au plan des qualités mais inconvénient au plan quantitatif) et en se limitant aux ressources "naturelles" renouvelables (les flux souterrains), puisque les ressources "exploitables" sont évaluées suivant des critères variés - au risque de résultats trop optimistes -.

Si l'on fait ces comparaisons à l'échelle pertinente de chaque système aquifère, de chaque unité de gestion des eaux souterraines, on trouve encore une immense variété de situations, bien souvent au sein d'un même pays, allant du stade de la "cueillette" extensive de l'eau souterraine à celui de la "production industrielle" et de l'extraction minière avec épuisement des réserves :

- L'exploitation des eaux souterraines reste extensive et sans effet perceptible dans une grande partie du monde, notamment partout où les ressources en eau superficielles sont abondantes et disséminées et où les productivités ou l'accessibilité des aquifères handicapent le développement des prélèvements. C'est le cas en zone intertropicale humide et dans beaucoup de régions tempérées humides en milieu rural et en particulier en domaine montagneux.

* Du moins sans restitution volontaire : par contre les fuites de transport, les pertes en cours d'usage d'eau d'origine souterraine ou superficielle, dans les structures d'utilisation (agglomérations, périmètres irrigués) retournent souvent en majeure partie aux nappes souterraines, non sans effets négatifs (surcharge et pollution)...

- Des exploitations intensives à divers degrés, qui mobilisent des fractions appréciables (un à plusieurs dixièmes) du flux naturel des aquifères, sont relativement concentrées dans certaines régions à aquifères productifs des pays déjà cités pour l'ampleur de leurs prélèvements globaux : pays industrialisés et pays développés ou non à forte irrigation pour une part notable par eau souterraine (figure 7). En France, par exemple, près de 50 % des prélèvements totaux d'eau souterraine (ordre de 7.10^9 m³/an actuellement) sont concentrés dans une quinzaine d'aquifères régionaux (sur plus de 200 inventoriés) et sur moins de 10 % du territoire. Aux USA (1985) 50 % de tous les prélèvements d'eau souterraine (un peu plus de 100 milliards de m³/an) sont concentrés dans 5 états seulement, et 20 % dans la seule Californie :

USA Etat	Prélèvements d'eau souterraine douce pour toutes utilisations en 1985 (en 10^9 m ³ /an)	%
Californie	20,4	20,1
Texas	9,9	9,8
Nebraska	7,7	7,6
Idaho	6,6	6,5
Kansas	6,6	6,5
ensemble	51,2	50,5
Σ USA	101,3	100

Source : USGS 1988

La concentration des prélèvements dans ce pays est encore plus forte si on les compte par "County" : sur 3225 Counties les prélèvements d'eau souterraine douce dépassent $1,5.10^9$ m³/an seulement dans 5, et $0,47.10^9$ m³/an dans 23 (Fig. 11).

Autre exemple : en Inde, pays où les prélèvements d'eau souterraine atteignent aussi 100 milliards de m³/an (suivant un inventaire de 1983-84, d'après le Ministère des Ressources en eau, 1988), 27 % du total est prélevé dans un seul état (Uttar Pradesh) et 54 % au total dans les 4 états les plus exploitants –sur 22–.

Cette concentration, sous le double effet des répartitions des demandes et des ressources offertes, est assez générale. Elle vaut aussi pour les prélèvements sectoriels, comme le montre encore l'exemple des Etats-Unis (Fig. 12).

Ces exploitations ont déjà eu des incidences locales parfois préjudiciables aux exploitants eux-mêmes (forts abaissements de niveaux, dégradation de qualité ...) ou des effets sur les écoulements de surface. Elles sont souvent en déséquilibre du fait de la croissance continue des prélèvements, donc au détriment des réserves et des débits aux émergences. Toutefois dans certains pays en développement la prépondérance des modes d'exploitation traditionnels gravitaires par galeries drainantes –tels que les kanats d'Iran, les karez de Syrie ou les foggaras du Sahara– impose par construction un régime d'équilibre, même lorsque l'exploitation est intensive. Par exemple en Iran, foyer de cette technique pratiquée depuis trois millénaires, 28 000 kanats actifs –sur près de 50 000 construits au cours des siècles, totalisant environ 400 000 km– produisent 18 milliards de m³/an, soit plus de 60 % du volume d'eau souterraine capté dans ce pays (réf. 39).

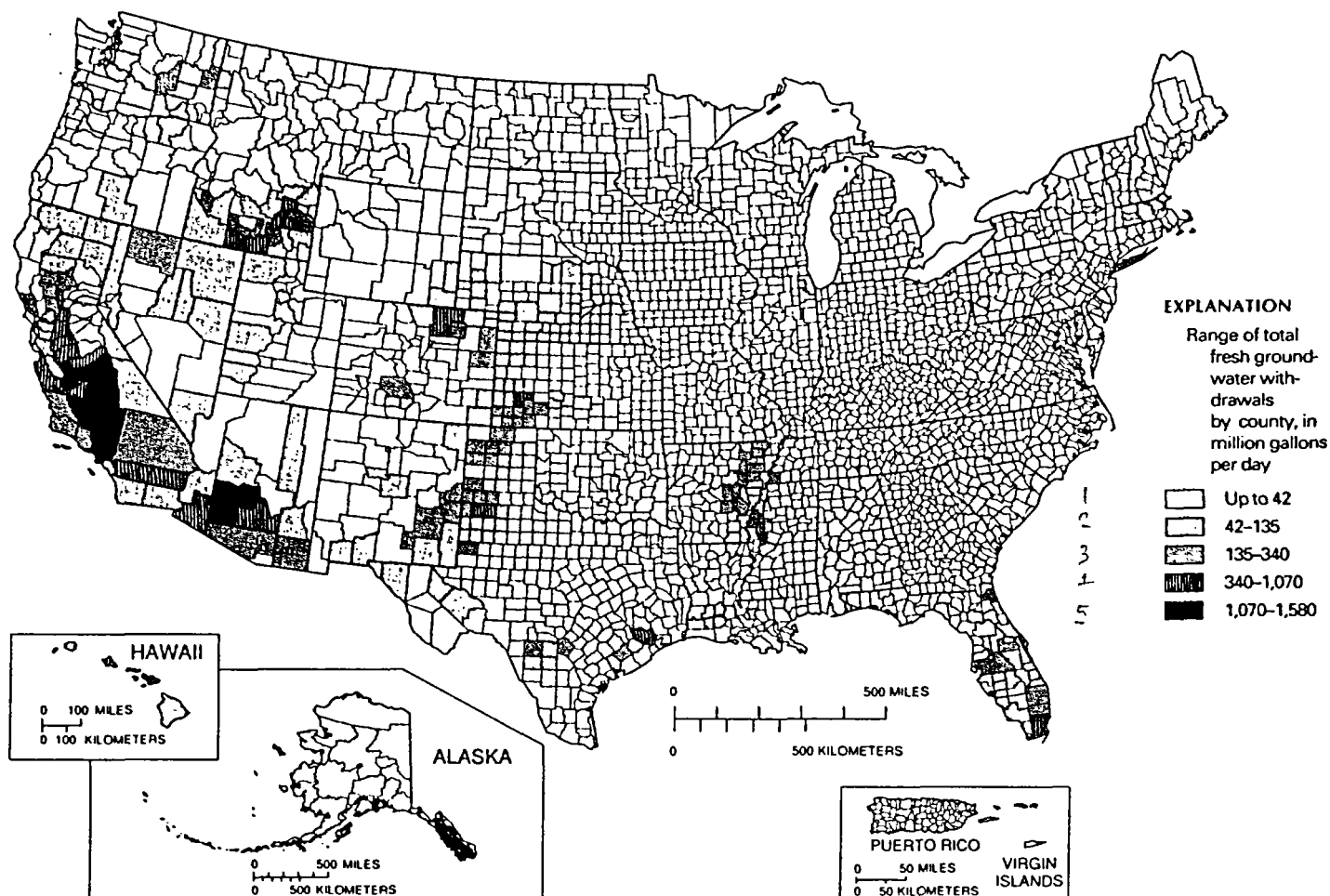
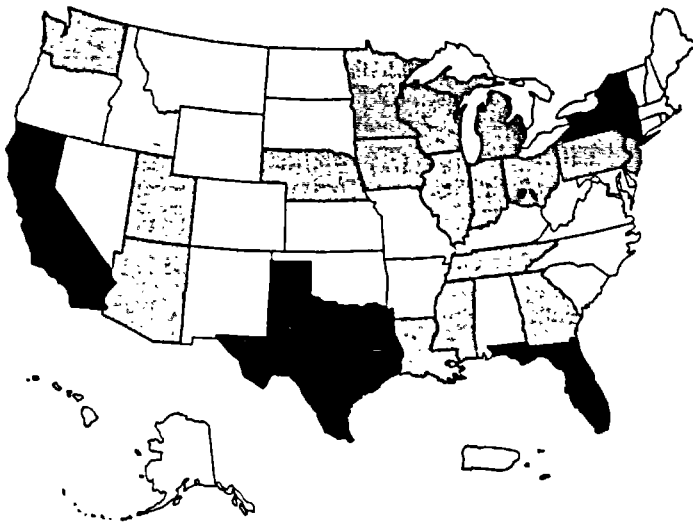


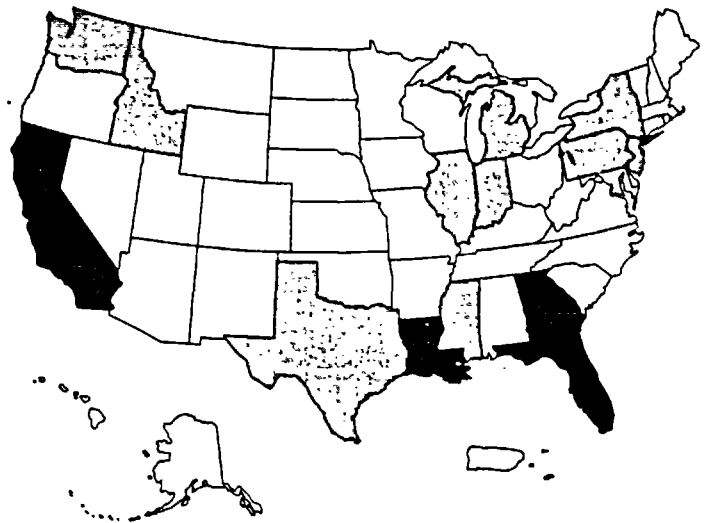
Figure 11 - Prélèvements d'eau souterraine douce aux Etats-Unis, pour toutes utilisations, répartis par County, en 1985.
Source : USGS National Water Data Storage and Retrieval System, in National Water Summary 1987, USGS Water Supply Paper 2350, 1989, Washington).
En Mm³/an :
1 : < 58 - 2 : 58 à 186 - 3 : 186 à 470 - 4 : 470 à 1478 - 5 : 1478 à 2183.

COLLECTIVITES (Production d'eau potable)



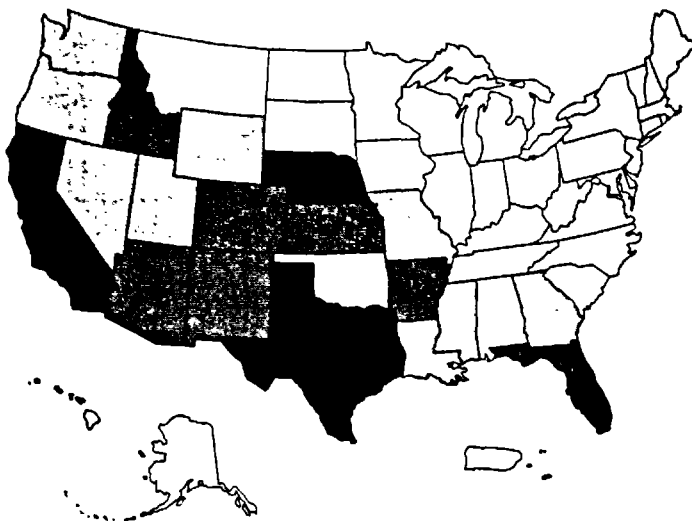
Range in million gallons per day	Mm³/an
0 - 200	< 276
200 - 500	276 - 690
500 - 1000	690 - 1380
1000 - 2000	1380 - 2763
2000 - 5400	2763 - 7460

INDUSTRIES



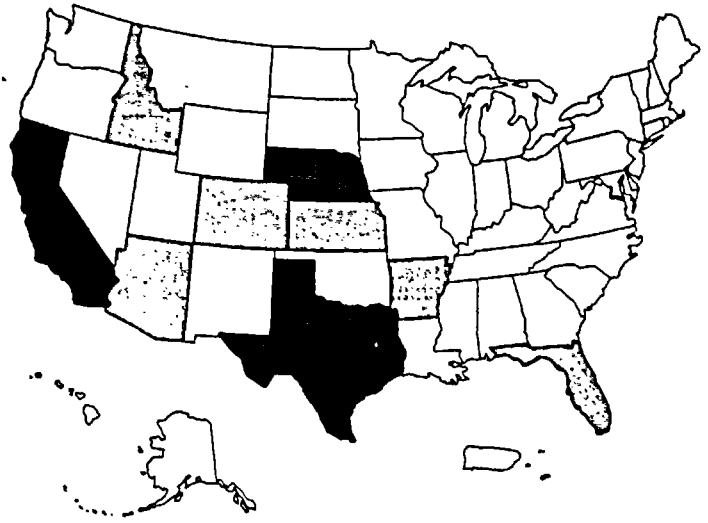
Range in million gallons per day	Mm³/an
0 - 100	< 138
100 - 300	132 - 415
300 - 600	415 - 830

IRRIGATION



Range in million gallons per day	Mm³/an
0 - 200	< 276
200 - 1000	276 - 1380
1000 - 5000	1380 - 6900
5000 - 15000	6900 - 20720

TOTAL



Range in million gallons per day	Mm³/an
0 - 2000	< 2763
2000 - 5000	2763 - 6900
5000 - 10000	6900 - 13815
10000 - 20000	13815 - 27630

Figure 12- Prélèvements d'eau souterraine douce aux Etats-Unis en 1985, répartis par état et par secteur d'utilisation.

Source : USGS, Estimated Use of Water in the United States in 1985.
USGS Circular 1004, 1988, Washington.

- A l'extrême des "surexploitations" involontaires ou délibérées qui mobilisent pour l'essentiel des ressources non renouvelables, lorsque la plus grande partie des volumes d'eau extraits correspond à une ponction sur les réserves même sans croissance des prélèvements (ce qui peut survenir avant même que les prélèvements excèdent globalement le flux naturel de l'aquifère), sont pratiquées en quelques secteurs des mêmes pays, mais plus particulièrement dans ceux des zones arides et semi-arides qui disposent de "gisements" exploitables : de l'Australie aux USA, en passant par la péninsule d'Arabie et le Sahara (Algérie, Libye, Egypte), (Fig. 6). Ces exploitations minières d'eau souterraine ont commencé au XIXe siècle en quelques pays et se sont développées au XXe siècle. Elles ont déjà produit des milliards de m³ d'eau : 25 en Australie en 90 ans, 200 en Arizona en 60 ans, près de 200 dans les High Plains du Middle West des USA (Ogallala Aquifer) en 40 ans, 20 en Californie en 30 ans, 15 à 20 dans la plaine du Ho Peï du Nord de la Chine en 20 ans, une dizaine au Sahara (Algérie, Tunisie), en provoquant d'amples chutes de niveau, supérieures parfois à 100 mètres. Elles sont actuellement de l'ordre de 7 milliards de m³/an en Arabie Saoudite, 2 en Libye, 2 dans la plaine du Ho Peï en Chine, 4 au Mexique, 0,6 en Espagne.

On peut estimer à quelques mille milliards de m³ le volume global qui aura été extrait définitivement des réserves souterraines, au cours du XXe siècle et des premières décennies du XXIe, avant que l'épuisement dynamique des réservoirs mette un terme à ces exploitations.

Remarque : en phase de croissance des prélèvements la distinction entre une exploitation intensive mais non "excessive", c'est-à-dire sans impacts indésirables, et n'excluant pas la possibilité d'un rééquilibrage dynamique final, et une "surexploitation" en régime de déséquilibre définitif (épuisement du stock) peut être malaisée. Les exploitants comme les gestionnaires peuvent aussi bien analyser les situations avec trop de pessimisme (appréciation prématurée de surexploitation, dans une optique conservationniste) ou avec trop d'optimisme (méconnaissance d'un état de surexploitation réel).

Une autre mesure de la place des eaux souterraines dans l'économie de l'eau de beaucoup de pays peut être donnée par l'importance des efforts d'équipement et des investissements comme des charges de fonctionnement que leur production requiert. Même si en moyenne cette production est moins coûteuse par unité de volume que la mobilisation d'eau de surface –qui exige en outre plus de traitement et de transport–, elle correspond globalement à des efforts considérables et à une part appréciable des coûts d'aménagement, de maîtrise et d'exploitation des eaux. Les statistiques macroéconomiques sont malheureusement encore rares à ce sujet, mais on sait que les forages d'exploitation se chiffrent en centaines de milliers voire en millions dans certains pays.

En Inde, par exemple, en 1985 le nombre de forages privés et publics atteignait 3 426 000, dont 1 228 000 réalisés entre 1980 et 1985 correspondant, avec les pompes et les moteurs, à un investissement de 19 milliards de roupies 1987 (réf. E. CUSTODIO ed. & al. 1989). En Chine, dans la seule plaine du Ho Peï, environ 600 000 forages étaient en service en 1980 pour l'irrigation. On sait aussi que le coût énergétique unitaire direct de l'exploitation des eaux souterraines est généralement supérieur à celui de la mobilisation des eaux de surface. Ces aspects de l'économie de l'utilisation des eaux souterraines dans le monde appelleraient des développements sortant du cadre de ce bref essai...

La grande diversité de pratiques et de places des eaux souterraines dans l'économie de l'eau ne doit pas occulter les caractères distinctifs communs de l'utilisation et de la gestion des eaux souterraines par rapport à celles des eaux superficielles. Trois sont à mettre principalement en relief :

- D'abord le grand nombre d'agents économiques qui exploitent, utilisent ou influencent (le plus souvent sans le vouloir mais par nécessité) les eaux souterraines, qui en ont les moyens, le droit et qui y trouvent avantage –parceque c'est la source d'approvisionnement la moins coûteuse, la plus commode et la plus individuelle : la moins assujettie à des équipements collectifs–. En corollaire, les investissements et les frais de fonctionnement de la production d'eau par exploitation des nappes souterraines sont très généralement pris en charge directement par les usagers ou les intermédiaires distributeurs, donc surtout par le secteur privé, à la différence des aménagements hydrauliques et de la maîtrise des eaux de surface beaucoup plus pris en charge par le secteur public.
- Ensuite le fait que ces acteurs sont en général peu ou non conscients de la communauté de bien, de "patrimoine", constituée par une nappe souterraine dont ils sont partie prenante, à l'instar des riverains d'une rivière. Ils n'ont pas d'objectif individuel de gestion d'une ressource en eau souterraine dont ils n'ont au mieux qu'une perception parcellaire, même lorsqu'ils entrent en conflit d'usage.
- Enfin, et en conséquence, le fait que la gestion des eaux souterraines - lorsqu'elle est opportune - dans le cadre pertinent des systèmes aquifères identifiés, par une autorité collective *ad hoc*, est nécessairement indirecte : elle ne dispose pas d'instruments techniques analogues aux ouvrages structurants des aménagements hydrauliques de surface et elle peut seulement intervenir sur le comportement et les décisions des acteurs, au moyen d'instruments réglementaires, financiers ou informatifs.

QUE RETENIR LE PLUS DE CE RAPIDE PANORAMA MONDIAL ?

Deux enseignements principaux :

1) En premier lieu la **nécessité d'efforts pour réduire les inégalités de connaissance** des ressources aussi bien que de l'état des exploitations d'eau souterraine et de leurs conséquences (effets sur le développement socio-économique et impacts sur le milieu naturel) entre les pays : efforts d'inventaires et d'études, d'enquêtes et de statistiques, en priorité dans les pays les moins avancés sur ce plan (ce ne sont pas forcément les pays les moins développés...). Mais il importe tout autant d'améliorer la cohérence des approches tant d'évaluation des ressources que d'estimation et de classification des exploitations et des utilisations, afin de renforcer la comparativité des tableaux de données sur les unes et les autres en différents pays (encore médiocre) et surtout la validité et l'homogénéité internationale des comparaisons macroscopiques entre ressources et utilisations..

2) Ensuite c'est la **diversité des problèmes** qui ont chacun leur propre géographie :

- Défense contre les pollutions, problème prioritaire dans la plupart des pays industrialisés et à agriculture intensive, mais qui n'épargne pas les pays en développement, notamment dans les régions à densité de population forte et croissante.
- Modération des exploitations pour stopper ou prévenir des "surexploitations" indésirables et parfois pour conserver la reproductibilité de ressources renouvelables, principalement dans des régions à développement intensif de l'irrigation par eau souterraine.
- Au contraire opportunité de développer l'exploitation et l'utilisation d'eau souterraine là où elle est possible et avantageuse mais négligée au profit d'aménagements hydrauliques de surface dominants, sous l'effet de comportements "hydroschizophréniques" (R. LLAMAS 1974). A ce propos, il convient de ne pas tirer argument des excès effectifs en certains cas pour justifier un malthusianisme ailleurs ...
- Intégration plus poussée de l'utilisation et de la gestion des eaux souterraines et superficielles tenant compte à la fois de leurs différents degrés d'interdépendance physique et de leur compétition dans la sphère économique. En particulier des possibilités d'amplifier le rôle des aquifères dans la maîtrise des eaux de surface irrégulières sont à mettre à profit dans certains pays en zone semi-aride où cela pourrait contribuer au relais des barrages réservoirs à mesure de la dégradation des retenues par envasement. Dans une vision prospective des transformations futures du cycle de l'eau par l'humanité, M.I. L'VOVICH estimait déjà en 1974 que le flux global des eaux souterraines continentales pourrait ainsi croître de 5 000 milliards de m³/an, en passant de 12 000 à 17 000, augmentant d'autant la phase régularisée des écoulements, ce qui est considérable au regard des quelques 2 000 milliards de m³/an régularisés globalement par tous les barrages réservoirs actuels et des 3 500 milliards supplémentaires jugés régularisables par de nouveaux ouvrages.
- Enfin le problème déjà mentionné de la gestion des ressources non renouvelables, majeur pour l'économie de l'eau de quelques pays de la zone aride : choix de la durée et du niveau de la "rente minière" et choix de l'emploi plus ou moins valorisant de l'eau, notamment de la contribution des avantages momentanés que l'on en tire à la préparation des relais inéluctables à terme, par d'autres sources d'approvisionnement et/ou par des transformations et des aménagements des demandes et des utilisations d'eau.

BIBLIOGRAPHIE SYNTHETIQUE

BAUMGARTNER A., REICHEL E. (1975). The World Water Balance. (R. Oldenburg Verlag, 180 p., München. Wien).

CUSTODIO E., GURGUI A. eds. (1989). Groundwater Economics (UN International Symposium and Workshop, Barcelona, oct. 1987. Elsevier, 625 p.).

LLAMAS MADURGA M.L. (1974, 1975). Motivaciones extraeconomicas en la utilizacion de las aguas subterraneas : la hidroesquizofrenia. (Agua, Janv. Feb. 1974, n° 82, pp. 29-36, Madrid), Hacia una politica hidraulica sin hidroesquizofrenia (Conf. Nacion. sobre Hidrologia general y aplicada. Zaragoza, 1975).

L'VOVICH M.I. (1974). World Water Resources and their future. (Mysl' P.H. Moscow, Engl. transl. A.G.U. 1979, 415 p., Washington).

MANDEL S. (1979). Problems of large-scale groundwater development. (Journ. of Hydrology, 43, pp. 439-443, Elsevier, Amsterdam).

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.)

MARGAT J. (1987). La ressource en eau souterraine revisitée. De sa définition à son évaluation et à sa gestion (Doc. BRGM 87 SGN 524 EAU, 32 p., Orléans).

MARGAT J. (1989). Défense et illustration des eaux souterraines en Europe. (Hydrogéologie, n° 2, pp. 75-91, Orléans).

MARGAT J. (1990). Les gisements d'eau souterraine. (La Recherche Spécial "L'eau", n° 221, mai, pp. 590-596, Paris.)

MARGAT J. (1990). L'économie de l'eau dans le monde : ressources, besoins, problèmes. A chacun ses problèmes d'eau in "Le grand livre de l'eau", pp. 277-288. (La manufacture & Cité des Sciences et de l'Industrie, Paris.)

NACE R.L. (1964, 1968). Water of the world. (Natural History, LXXIII, 1/ U.S. Depart. of the Interior, Geological Survey, juil. 1968, Washington).

SHIKLOMANOV I.A. (1990). The World Water Resources: How much do we really know about them ? (UNESCO, IHD/IHP 25-year Commemorative Symposium, Paris 15-17 mars.)

VAN DER LEEDEN F. & al. (1990). The Water Encyclopedia (Lewis Publ. 808 p.).

ZEKTSER I.S., DZHAMALOV R.G. (1988). Role of Groundwater in the Hydrological Cycle and in Continental Water Balance. (UNESCO/ Intern. Hydrological Program, IHP III Project 2.3, Tech. Doc. in Hydrology, 133 p., Paris.)

ZEKTSER I.S., DZHAMALOV R.G., DIORDIEV I.V. (1989). Groundwater runoff of Europe. (Hydrogéologie, n° 2, pp. 93-100, Ed. BRGM).

COLLECTIF (1974, 1978). World Water Balance and Water Resources of the Earth. (Com. URSS/PHI, 1974, UNESCO, 1978, Paris.)

COLLECTIF (1983). Groundwater in Water Resources Planning. (UNESCO, IAH, IAHS, Nat. Com. Fed. Rep. Germany, Proceed. Internat. Symposium, Coblenz août-sept. 3 vol.)

COLLECTIF (1983). Groundwater Protection Strategies and Practices. (NU/CEE, Sémin. Athènes, oct., Proceed. Publ. Minist. énergie et ressources naturelles, Grèce, 501 p., Athènes.)

ANONYME/UN (1976-1990). Groundwater in the Western hemisphere/in the Eastern Mediterranean and Western Asia/in the Pacific Region/in Continental Asia/in Africa/in Europa. (UN-DTCD, Natural Resources/Water Séries n° 4, 9, 12, 15, 18, 19, New-York.)

ANNEXE I

**Flux moyens globaux d'eau souterraines par pays
comparés aux flux moyens d'écoulement total d'origine interne**

Pays	Écoulement total interne à flux moyen 10 ⁹ m ³ /an	Flux moyen d'eau souterraine 10 ⁹ m ³ /an	Références
<u>EUROPE</u>			
ALBANIE	44,5	7	58
ALLEMAGNE (RFA)	79 } 96	37 } 45,7 c	56/40
ALLEMAGNE (DDR)	17 } 56,3	8,7 } 22,3 c	29,4,40
AUTRICHE			56/14
BELGIQUE	8,4	0,9/0,86 b	30,56
BULGARIE	18	3,1	56
DANEMARK	11	4,3/2,2 d	40/39
ESPAGNE	111,3	20,7 e	46
FINLANDE	100	2,2 b	56
FRANCE	170	~100 c	16
GRÈCE	45,15	12/2,5 d	52/56
HONGRIE	10,2	6,8 b	40,56
IRLANDE	50	10,9/7,9 d	40/30
	40	3,46 b	30,56
ISLANDE	170	24 c	40,56
ITALIE	185	~30 c	40,56
LUXEMBOURG	1	0,08 b	30,40,56
NORVÈGE	383/375	96 c/~40 b	56/39
PAYS-BAS	10	4,5/1,9 d	29/40,56
POLOGNE	49,4/51,1	36	40,56
PORTUGAL	34	5,1/4 b	40/56
ROUMANIE	37	8,3/4,5 d	29,2,56/40
ROYAUME UNI	117,8/120	9,8	40,56
SUÈDE	176	~20 b	39,40,56
SUISSE	42,5	2,7	40,56
TCHÉCOSLOVAQUIE	28	2,7	40,56
URSS en Europe	1029	291 c	14
dont :			
RUSSIE	896	~250 c	14,56
BIELORUSSIE	21,9	19,1 c	56
UKRAINE	160,3	21,1 c	56
URSS entière	4410/4384	1040/378 d	56, 14/56
YUGOSLAVIE	129	20	32

Notes :

- (a) Somme des écoulements naturels formés dans le pays (affluences de pays voisins exclues).
- (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.

ANNEXE I (suite 1)

Pays	Écoulement total interne à flux moyen 10 ⁹ m ³ /an	Flux moyen d'eau souterraine 10 ⁹ m ³ /an	Références
AFRIQUE			
AFRIQUE du SUD	50	17 c	14,49
ALGÉRIE	18,9	6,7 b	16,20
ANGOLA	158	72 c	14
BENIN	15/26	3 c	14/54
BOTSWANA	9/1	1,8 c	14/54
BURKINA-FASO	28	7 b,c	14,36
CAMEROUN	208	~100 c	14
CENTRE-AFRIQUE	140/190	56 c	14/*
CONGO	180	68 c	14
COTE D'IVOIRE	133	40 b,c	5,14
EGYPTE	1,8	1,3 b	1,16
ETHIOPIE	115	44 c	14
GABON	164	62 c	14
GHANA	53,70	25 b	5/14
GUINÉE	226	72 c	14
KENYA	37/14,8	14 c	14/54
LIBERIA	232/100	60 c	14/50
LIBYE	0,7	0,5 b	19
MADAGASCAR	227/337	55 c	14/39
MALI	62	13/66 b	36/61
MAROC	30	10 b	7,50
MAURITANIE	1/1,9	0,3/0,9 b	36/22
MOZAMBIQUE	58/97	17 c	14/**
NAMIBIE	9/8	1,6/1 c	14/55
NIGER	14	4 b,c	14,36
NIGÉRIA	260/305	87 c	14/39
UGANDA	66/50	29 c	14/29
SÉNÉGAL	23	7,6 c/9 c	14/36
SOMALIE	12/8	3,3 c/0,3 b	14/22
SOUDAN	63/27/23	20,1/1,4 b	14/3/22
TANZANIE	76	23 c	14
TCHAD	38,4/15	11,5 c/20,6 b	14/36,50,21
TOGO	8,4/11,5	1,4 c/5,7 b	14/5
TUNISIE	3,75	1,6 b	27
ZAÏRE	1019	421 c	14
ZAMBIE	96	35 c	14
ZIMBABWE	23	5 c	14

* CIEH 1987

** AIH, Hannover 1989

ANNEXE I (suite 2)

Pays	Écoulement total interne à flux moyen 10 ⁹ m ³ /an	Flux moyen d'eau souterraine 10 ⁹ m ³ /an	Références
ASIE			
AFGHANISTAN	75/40	29 c	14/39
ARABIE SAOUDITE	1,85	0,95 b	18
BANGLADESH	129	34 c	14
BIRMANIE	680	156 c	14
CHINE	2700	621/700/870 c	26/10/9,24
CHYPRE	0,9	0,3 b	15
CORÉE N.	67	21 c	14
CORÉE S.	60	18 c	14
EMIR. ARABES UNIS	0,5	0,4 b	22,31
INDE	1586	350 c	14
INDONÉSIE	2530	455 b/226 c	29,43/14
IRAK	35	13 b	31
IRAN	145	42 b	41
ISRAËL	1,2	1,1 b	17
JAPON	396/520	185 c	14/*
JORDANIE	0,63	0,58 b	38
KAMPUCHEA	117/88	30 c	14/29
LAOS	228	50 c	14
LIBAN	4,9	3,2 c	34
MALAISIE	456	71 c	14/29
MONGOLIE	47/25	23 c	14/29
OMAN	1,93	0,56 b	22,31
PAKISTAN	73	24 c	14
PHILIPPINES	390/323	180 c	14/29
SRI LANKA	59/43,2	17 c	14/29
SYRIE	7,4	3,8 b	41
THAÏLANDE	171/110	43 c	14/29
TURQUIE	196	60/9 à 20 d	14/11
VIET-NAM	376	84 c	14
YEMEN	5,2	1,4 b	22,31
URSS en Asie	3325	700 c	14

* Doc. Japon 1985

ANNEXE I (suite 3)

Pays	Écoulement total interne à flux moyen 10 ⁹ m ³ /an	Flux moyen d'eau souterraine 10 ⁹ m ³ /an	Références
AMÉRIQUES			
CANADA	2850	370 c	56
ETATS-UNIS			
- S.S. (48 états)	1735/1890	482/130 d	14/40
- Σ (avec Alaska, Hawaï, Porto-Rico)	2345/2460	660/- c	14/57
MEXIQUE	330/357	139 c	14/29
COSTA-RICA	70/95	21 c	14/*
CUBA	26/34,5	8/6,5 c	14/35
DOMINICAINE	12/20	3 c	14/35
GUATEMALA	77/116	31 c	14/29
HAÏTI	11	2,5 à 3 c	62
HONDURAS	98/102	39 c	14/*
NICARAGUA	142/175	59 c	14/29
PANAMA	80/144	42 c	14/29
ARGENTINE	289	128 c	14
BOLIVIE	300	130 c	14
BRESIL	5668/5190	1874 c	14/29
CHILI	468	140 c	14
COLOMBIE	1112/1070	510 c	14/29
EQUATEUR	318	134 c	14
GUYANA	241	103 c	14
GUYANE Fr.	120	47 c	14
PARAGUAY	94	41 c	14
PEROU	750/2060	303 c	14/**
SURINAME	200	80 c	14
URUGUAY	59	23 c	14
VENEZUELA	761/856	227 c	14/***
AUSTRALASIE			
AUSTRALIE	440	72 b	12
NOUVELLE-ZELANDE	397	198 c	14,29

* CEPAL 1972

** ARMAS 1979

*** COPLANARH 1972

Remarques et commentaires sur l'Annexe I

Comme on l'a indiqué par les notes auxquelles renvoient, pour la plupart, les estimations de flux d'eau souterraine inscrites dans les tableaux, présentées le plus souvent par leurs auteurs comme "ressources naturelles renouvelables" en eau souterraine de chaque pays, les méthodes de chiffrage ne sont pas homogènes, ce qui affaiblit la validité des comparaisons et des sommations.

Le plus souvent le flux moyen des eaux souterraines du territoire est assimilé à la somme des "écoulements souterrains" de tous les cours d'eau entretenus par les sources et le drainage des aquifères, auxquels on ajoute les flux souterrains "occultes" sortant du territoire (affluent à la mer ou à des territoires voisins). Ce flux souterrain est tantôt déduit de l'analyse des hydrogrammes des cours d'eau, extrapolé à l'ensemble du territoire, et du calcul des débits de nappes littorales, tantôt chiffré par estimation de l'alimentation ("recharge") des nappes : les flux moyens entrant et sortant des aquifères sont certes équivalents en zones humides, mais non en zones arides et semi-arides où seule une fraction faible, parfois minime, des flux des aquifères est collectée par des cours d'eau permanents ; dans ces dernières l'alimentation des nappes est bien supérieure au débit de base des rares cours d'eau pérennes. De toute façon ces démarches d'estimation ont chacune leur propre lot d'incertitude, qui tiennent à des causes en partie distinctes, aussi peuvent-elles aboutir à des résultats assez écartés, en toutes zones climatiques. D'où des divergences entre les estimations publiées en quelques pays par des auteurs différents qui n'ont pas appliqué la même approche. En particulier, en zone semi-aride ou tropicale humide, les estimations basées sur le calcul de l'alimentation des aquifères sont souvent supérieures, parfois de beaucoup, à celles déduites des données hydrologiques. Quelques exemples :

Pays	Flux d'eau souterraine naturel calculé d'après le débit de base des cours d'eau (Référence) en 10 ⁹ m ³ /an	Flux d'eau souterraine naturel estimé par calcul de l'alimentation des aquifères (Référence) en 10 ⁹ m ³ /an
<u>AFRIQUE</u>		
Cameroun	93 (14)	147 (6)
Congo	68 (14)	192 (42)
Gabon	62 (14)	223 (42)
Ghana	10 (14)	26,3 (5)
Mali	16 (14)	66 (61)
Sénégal	7,6 (14)	9,3 (36)
Tchad	11,5 (14)	20,6 (36)
Togo	1,4 (14)	5,7 (5)
Indonésie	226 (14)	455 (43)
Australie	38 (14)	72 (12)

Par ailleurs dans certains pays, dans une optique d'évaluation de ressource plus pertinente, on s'efforce d'estimer les quantités d'eau souterraine mobilisables suivant divers critères, plutôt que les flux souterrains naturels. Mais les résultats peuvent alors différer beaucoup dans un même pays comme d'un pays à l'autre, en raison de la variété des critères, et ils sont toujours bien inférieurs aux flux souterrains naturels estimés. Exemples :

Pays	Flux souterrain naturel total (Référence) en 10^9 m ³ /an		Ressources en eau souterraine estimées "exploitables" (Référence) en 10^9 m ³ /an	
Etats-Unis (48 états)	482	(14)	130	(40)
URSS	1040	(14)	378	(56)
Turquie	60	(14)	9	(11)
Mauritanie	2	(14)	0,88	(22)
Somalie	3,3	(14)	0,3	(22)
Soudan	20,1	(14)	0,3-1,4	(22-3)

A l'inverse, dans certains pays à ressources en eau souterraine non renouvelables considérables, voire prédominantes, et exploitées, la prise en compte des flux d'eau "productibles" –dans l'état présent des équipements– additionnées abusivement aux ressources renouvelables conduit à estimer les "potentialités" en eau souterraine totales du pays supérieures aux flux souterrains naturels. Exemples :

- Algérie, où les potentialités en eau souterraine estimées ($6,7.10^9$ m³/an) comprennent 5.10^9 m³/an "productibles" à partir des aquifères sahariens à ressource non renouvelables pour l'essentiel.
- Egypte, où le flux souterrain naturel interne est estimé à $1,3.10^9$ m³/an et où les "ressources" en eau souterraine ont été évaluées à $3,42.10^9$ m³/an par M. SHAHIN (22), en prenant aussi en compte probablement des ressources en eau souterraine "secondaires", sous-produits des irrigations par eau de surface, et des affluences souterraines de pays voisin).

L'exploitation des sources bibliographiques nationales ou internationales, pour rassembler des données sur les "ressources" en eau souterraine, naturelles ou exploitables, globalisées par pays exige donc une analyse critique sérieuse.

Un tableau de données qui entremêlerait indistinctement des estimations de flux naturel –résultant elles-mêmes d'approches différentes et parfois discordantes– et de ressources ou "potentialités" en eau souterraine évaluées suivant des critères hétérogènes, serait dépourvu de comparativité. Aussi doit-il expliciter la signification des données présentées pour permettre la sélection des données comparables. En règle générale on a retenu de préférence les estimations des flux d'eau souterraine déduites des "écoulements souterrains", en zones tempérées et tropicales humides, et celles déduites des calculs d'alimentation des aquifères en zone aride et semi-aride. Quelques "potentialités" en eau souterraine exploitables évaluées en certains pays ont été mentionnées en sus, en l'indiquant expressément et en citant la référence.

Nonobstant les défauts d'homogénéité inévitables et les lacunes, en certains continents, des données rassemblées, on a vérifié que leur somme est bien de l'ordre de grandeur des estimations globales et continentales présentées au tableau 2.

La collection de données réunie fait surtout ressortir une grande variété des poids relatifs des flux souterrains par rapport aux écoulements totaux chiffrés par pays.

On retiendra que la part présumée souterraine des écoulements totaux internes est rarement négligeable : elle n'est presque jamais inférieure à 15 % et dépasse le plus souvent 1/3 ; elle est majeure en divers pays, tout particulièrement en zone aride ou semi-aride, comme l'a montré la carte de la fig. 5.

Il serait toutefois imprudent, répétons-le, de transposer tels quels ces ratios macro-hydrologiques, en index des proportions des "ressources en eau souterraine" rapportées aux ressources en eau globales – même en se limitant à celles d'origine interne-. Ils en donnent seulement une certaine idée, en zone tempérée ou en zones aride et semi-aride du moins ; c'est probablement en zones tropicales humides que l'écart doit être le plus accentué entre les flux d'écoulement souterrain calculés par les hydrologues et les ressources en eau souterraine effectives.

ANNEXE II

Tableau 1 - Prélèvements et utilisations d'eau souterraine en Europe

Pays	Date de valeur	Prélèvements d'eau souterraine		Affectation des eaux d'origine souterraine par secteur économique d'utilisation (10 ⁹ m ³ /an)			Proportion d'origine souterraine des volumes d'eau utilisés par les principaux secteurs économiques			Références
		Total en 10 ⁹ m ³ /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) - %	
ALLEMAGNE (RFA)	1981	7,77 g	18,7	4,01	3,54 h	0,14	78,3	32,6	75,5	4
	1985	6,99	17							51, 57
ALLEMAGNE (ex-DDR)	1975	1,78	21,4	0,59	0,96	0,23	75	15	21	29,4
AUTRICHE	1980	1,17	37	0,61	0,50	0,06	97	21	60	40
	1985	1,12	53							57
BELGIQUE	1980	0,78	8,6	0,43	0,17	0,03	64	~ 3	30	40, 51
DANEMARK	1977	1,32	~ 90	0,53	0,29	0,50	98			30
ESPAGNE	~ 1980	6,3	25		1,4	4,9		~ 40	22,8	45, 46
	1985	5,41	12							57
FINLANDE	1980	0,37	~ 11	0,24	0,04	0,09	52	14,3	3	40
	1985	0,28-0,32	12-8							57
FRANCE	1984	7,03	18,1	3,65	2,1 h	1,2	61,7	40 h	28,6	53
GRECE	1980	1,87	29,3	0,24	0,05	1,58	32	50	27,5	40
HONGRIE	1972	1,6	18,5	0,56	0,76	0,28	78	31,5	11,2	40
	1985	1,76	30							
IRLANDE	1980	0,17	16	0,06	0,064	0,05	17	12	28	56
ISLANDE	1984	0,095	95							
ITALIE	1979	12,16	26	6,4 c	1,6	4,06	93	~ 14	~ 25	30, 16
LUXEMBOURG	1976	0,026	45	0,013	0,013		71/56	38		30
	1985	0,045	67							57
NORVEGE	1985	0,11	4,8	0,03	0,08	-				51, 57
PAYS-BAS	1981	1,28	8,2	0,41	0,57	0,3	67	14	39	47
	1985	1,14	7,9							57
POLOGNE	1980-81	2,0	11,9	1,4	0,8 f	e	50	5,7		40
	1985	2,06	13,6							52
PORTUGAL	1980	2,0	19	0,78	0,46 c	0,78	49	11,4	15,7	40, 51
ROUMANIE	1975	1,18	8	0,72	0,45	0,01	50	8	16,5	29,1, 29,2
ROYAUME UNI	1975	2,38	23,3	1,22	1,11 c	0,05	28	10,2	36	40
	1985	2,35	20							51, 57
SUEDE	1985	0,48	16,8	0,44	0,04	-	40	1,3	-	40, 51
SUISSE	1983	1,0	33	0,72	0,4	-	70	20	-	40, 52
	1985	1,0	64							57
TCHÉCOSLOVAQUIE	1980	1,22	21	0,60	0,4	0,14	61	9,7	2,8	40
	1985	1,44	25							52
URSS entière	1980	36 (f)	10,2	14	17	5	70	15,7	2,2	40
	1984	45 (h)	~ 10	21	7	10	70	~ 15	~ 2	(i)
	1985	37	10,4	10,7	6,4	10,9	43	~ 7	~ 5	56
dont :										
BIELORUSSIE	1985	1,06	38	0,55	0,14	0,3	-	-	-	56
UKRAINE	1985	4,22	10,8	1,28	0,74	2,2	25	4,4	13	56
YOUgoslavie	1980	1,1	8,7	0,54	0,46	0,10	75	4,3	7,7	40

Notes

- (a) Prélèvements totaux d'eau douce seuls pris en compte. 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) Y compris à partir des nappes souterraines réalimentées par infiltration des cours d'eau.
 (h) Exhaure minière comprise.
 (i) Selon I. S. ZEKTSER et R. G. DZHAMALOV (1988).

**Tableau 2 - Prélèvements et utilisations d'eau souterraine en quelques pays
d'Afrique, Amériques, Asie et Océanie**

Pays	Date de valeur	Prélèvements d'eau souterraine		Affectation des eaux d'origine souterraine par secteur économique d'utilisation (10 ⁹ m ³ /an)			Proportion d'origine souterraine des volumes d'eau utilisés par les principaux secteurs économiques			Réf.
		Total en 10 ⁹ m ³ /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) - %	
AFRIQUE DU SUD	1980	1,79	13	0,19	0,1	1,5	7,5	-	18	49
ALGERIE	1985	2,0	59							16
CAP VERT	1980	0,03	80	0,007	ε	0,025				50
EGYPTE	1985	3,4	6,4							16
GABON	1989	0,0005	-	0,0005	0	0				
LIBYE	1985	2,1	100	0,28	0,09	1,74				50
MADAGASCAR	1984	4,76	29	0,015						55
MALI	1989	0,1	-	0,046	ε	0,60				59
MAROC	1985	3	27							7, 16
MAURITANIE	~ 1985	0,88	47							22
NIGER	~ 1988	~ 0,13	~ 9	0,075	0,005	0,05	70	100	0,5	60
SENEGAL	~ 1985	0,25	-	0,06	ε	0,18				50
SOMALIE	~ 1985	~ 0,3	3,5							22
SOUDAN	~ 1985	0,28	1,3							22
TCHAD	1990	0,085	53	0,025	-	0,06	100	-	~ 40	21
TUNISIE	1985	1,23	53,5	0,15	-	0,95				16
CANADA	1985	1,6	4	0,55	0,18	0,54	10	0,6	17	56
USA	1985	101,3 (b)	21,7	20,17	5,43	63,1	40	18	33	23
MEXIQUE	~ 1985	23,3	41	3,1	5,4	15	75		33	25
ARGENTINE	~ 1975	4,7	15	0,5	0,9	3,3	11	19	70	37
PEROU	1973	2	-	0,5	0,3	1,2	25	15	60	35
CUBA	1975	3,8	47							35
ARABIE SAOUDITE	1985	7,43	89	0,4	0,6	~ 6,4	50	100	86	2
BANGLADESH	1979	3,4	-	0,45	0,03	~ 3				48
CHINE	~ 1985	74,6	~ 15			~ 40			~ 10	9
CHYPRE	1985	0,28	81	0,27	0,01	0,24	90	100	80	28, 41
COREE DU SUD	~ 1985	1,2	8			0,2				13, 39
EMIRATS ARABES U.	~ 1985	0,39	80							22
INDE	1979	150	35	4,6	1,9	143,5			40	48
IRAQ	1985	0,2	0,5	0,1	0,08	ε	18	5	ε	22, 41
IRAN	~ 1980	29	~ 40							41
ISRAEL	1986	1,2	67							16
JAPON	1980	11,8	13,9							57
	1980	13,1	15,8	3,6	5	3,7	28	41	7	48
JORDANIE	1985	0,41	31							22
LIBAN	1985	0,60	12							22
OMAN	1985	~ 0,4								22
PAKISTAN	1980	~ 45	29			~ 40			25	48
PHILIPPINES	1980	~ 4	~ 13	2	2		~ 50	~ 50		48
SYRIE	~ 1985	3,67	14							22
TAIWAN	~ 1976	3,2	19							39
THAILANDE	1980	0,7	-	0,42	0,18	0,1				48
TURQUIE	1985	5	32							16
	1987	6,3	21	27	-	3,6	38	15		57
YEMEN DU NORD	~ 1985	1	32							22
YEMEN DU SUD	1975	0,35	18							29
AUSTRALIE	1983	2,46	14	0,48		1,64				43

Remarques sur les données de l'annexe II

La connaissance des prélèvements et des utilisations d'eau souterraine dans le monde est sujette à autant d'incertitudes que l'estimation des ressources, mais pour d'autres raisons, qui tiennent :

- au défaut de statistiques en de nombreux pays, surtout en Afrique et en Amérique latine,
- à l'inégale validité des statistiques nationales disponibles et au manque d'actualité de certaines d'entre elles (antérieures aux années 80),
- à des manques d'homogénéité dans la conception des prélèvements d'eau souterraine comptabilisés en différents pays : prise en compte ou non des captages de source, des exploitations de nappes alluviales soutirant des eaux fluviales, de l'exhaure des mines,
- à des défauts d'homogénéité des répartitions entre secteurs d'utilisation (confusion fréquente entre alimentation des collectivités et affectation aux usages domestiques ; agrégation ou non des industries auto-approvisionnées et desservies par les distributions publiques...),
- aux différences d'approches pour estimer les quantités d'eau prélevées et utilisées : inventaire et comptage ou calcul basés sur des "besoins" présumés satisfaits par eau souterraine ; le secteur agricole est le plus sujet à incertitude.

Il n'est donc pas étonnant que pour un même pays et une même date de valeur, les données provenant de sources diverses divergent parfois notablement. C'est le cas en particulier des répertoires publiés respectivement par les Nations Unies (Commission économique pour l'Europe, monographies du DTCD...), par l'OCDE, par la Commission internationale de l'irrigation et du drainage (ICID), ou par diverses organisations régionales ou nationales.

Aussi, lorsqu'on a inscrit dans les deux tableaux, pour certains pays, des données relatives à plusieurs dates de valeur (par exemple 1980, 1985) leurs différences éventuelles n'ont pas nécessairement la signification d'une évolution, mais plutôt de variantes dans les modes ou la précision des estimations. Il en va de même pour les ratios estimés par rapport aux utilisations d'eau de surface (globalement ou par secteur) qui sont évidemment très sensibles aux estimations de ces dernières, qui peuvent être plus ou moins complètes (prise en compte inégale de certains secteurs tels que le refroidissement des centrales thermiques, des eaux saumâtres utilisées... ; ce qui explique des "variations" apparentes en peu d'années.

C'est dire que les tableaux de données présentés doivent être exploités avec une grande prudence.

Références des données des tableaux annexes I et II

- (1) ABDEL-RAHMAN I.H. (1987) - Egypt. Blue Plan Scenarios. (Inédit, Feb. - March, Cairo).
- (2) AL-IBRAHIM A.A. (King Fahd University of Petroleum & Minerals-Dahran) (1989) - Depletion of Ground-Water. The most important source for Saudi Arabia. (Ambio, sous presse 1989, Stockholm).
- (3) BANNAGA I.Y. (1978) - Water Resources of the Sudan. (ACSAD, 1st Arab Sympos. on Water Resources, Damas 18-23 nov., II, Water Legislation, Publ. 1980, Damas).
- (4) BAYER W. (1984) - Erste Ergebnisse einer wasserwirtschaftlichen Bilanz für die Bundesrepublik Deutschland. (Wirtschaft und Statistik, n° 6, p. 497-502).
- (5) BOURGEOIS M. (1979) - Notice explicative de la carte de planification des ressources en eau de Côte d'Ivoire, du Ghana, du Togo et du Bénin. (C.I.E.H., B.R.G.M., Doc. 79 AGE 005, 99 p. Orléans).
- (6) BOURGEOIS M. (1979) - Notice explicative des cartes de planification des ressources en eau du Cameroun. (C.I.E.H., B.R.G.M., Doc. 80 AGE 007, 68 p. Orléans).
- (7) BOUTAYEB N. (1990) - Rapport sur l'expérience du Maroc. (Séminaire stratégies de gestion des eaux dans les pays méditerranéens, horizon 2010, Alger Mai, CCE/Gouvern. algér./CEFIGRE. 13 p.).
- (9) CHEN MENGXIONG (1985) - Groundwater Resources and development in China. (18th Congr. I.A.H., Hydrogeology in the Service of Man, Cambridge, Sept., 14 p.).
- (10) GUSTAFSSON J.E. (1986) - Resources Management in India and China. An Overview. (Journ. of Rural Studies, Vol. 2, n° 2, pp. 139-151, U-K).
- (11) KULGA D., ADANALI K. (1990) - Country report on Water Resources Development in Turkey. (Séminaire stratégies de gestion des eaux dans les pays méditerranéens, horizon 2010, Alger Mai CCE/Gouvern. algér./CEFIGRE, 10 p.).
- (12) LAU J.E. & al. (1987) - Hydrogeology of Australia. (B.M.R.G.G., Bull. 227, Austr. Gov. Publ. Serv. Canberra).
- (13) LEE Dong Woo (1987) - Potential of Ground Water in Korea/S. (UN Intern. Sympos. and Workshop Ground water Economics, Barcelona Oct. Publ. Ground water Economics, E. CUSTODIO & A. GURGUI eds., 625 p. Elsevier).
- (14) L'VOVICH M.I. (1974) - World water resources and their future. (Mysl' P.H. Moscow, Engl. Transl. 1979, AGU, Washington).
- (15) LYTRAS C., TSIOURTIS N. (1990) - National report on medium and long term water management strategies - Cyprus. (Séminaire stratégies de gestion des eaux dans les pays méditerranéens, horizon 2010, Alger Mai, CCE/Gouvern. algér./CEFIGRE. 20 p.).
- (16) MARGAT J. (1989) - L'eau dans le bassin méditerranéen - Prospective des besoins et des ressources. (PNUE/PAM Plan Bleu, doc. BRGM, Orléans).
- (17) MINTZKER N. (1987) - Water in Israël - Towards the Future (TAHAL / in Scénarios du Plan Bleu pour Israël, Juil.).

- (18) NEULAND H. (1988) - Foodstuff Production Target in Arid Zones: Issues and Prospects from the Arabian Peninsula (I.W.R.A./A.I.R.E., 6e Congrès, Ottawa. Mai-Juin, Vol. III, pp. 115-126).
- (19) PALLAS Ph. (1980) - Water resources of the Socialist People's Libyan Arab Jamahiriya, in "The Geology of Libya", II, Part 4, Hydrogeology (2ème Sympos. Geol. Libya, Tripoli, Sept. 1978, p. 539-594, Ed. Al Fateh Univ. Tripoli & London Acad. Press Inc. London). Sources: Ground Water Authority (1978).
- (20) SALEM A. (1990) - Rapport national de l'Algérie. (Séminaire stratégies de gestion des eaux dans les pays méditerranéens, horizon 2010, Alger Mai, CCE/Gouvern. algér./CEFIGRE. 29 p. + annexes).
- (21) SCHNEIDER J.L. (1990) - Carte géologique et cartes hydrogéologiques à 1/1 500 000 de la République du Tchad. Mémoire explicatif. (Doc. BRGM, Orléans).
- (22) SHAHIN Mamdouh (1989) - Review and Assessment of Water Resources in the Arab Region. (Water International, 14, pp. 206-219. IWRA, USA).
- (23) SOLLEY W.B., MERK Ch. F., PIERCE R.R. (1988) - Estimated Use of Water in the United States in 1985. (U.S.G.S., Circular 1004, 81 p. Denver).
- (24) SUN CHANGREN (1986) - Development of Ground water Resources and environmental geological work in China. (19th Congr. I.A.H., Karlovy-Vary, Sept. 8 p.).
- (25) TINAJERO GONZALEZ J.A. (1980) - La sobreexplotación del agua subterránea en México. (Ingeniería Civil, 6 p. México).
- (26) ZHAO KEJING (1985) - Water Resources Assessment in China (Water Management Seminar, Minist. Wat. Res. & Electric Power de Chine/CEFIGRE, Mars, pp. 56-66 Beijing).
- (27) ZEBIDI H. (1986) - Bilan des ressources en eau de la Tunisie, 1985. (Doc. Minist. Agriculture/Dir. Ress. eau, Décembre, Tunis).
- (28) ZOMENIS S.L. (1985) - Cyprus Water Resources: over-exploitation. Results and Measures Taken. (Commonwealth Sciences Council, Proceed; Seminar Geohydrology of Drought Prone areas in Africa, Lobatse, Botswana, Nov. C.S.C. Technic. Publ. n° 202. pp. 49-57, London).
- (29) COLLECTIF (1977) - UN Water Conference, Mar-del-Plata, Argentina,
 - (29,1) ECE regional report (Conf. 70/6).
 - (29,2) The long-term national programme for river basin development. Basis of the water management policy in Romania (Conf. 70/TP 45).
 - (29,3) Water resources, needs and water management planning in Yugoslavia (Conf. 70/TP 58).
 - (29,4) Rational use of ground water resources in the German Democratic Republic (Institut. Wat. Manag., Berlin, Conf. 70/TP 60).
 - (29,5) 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).
 - (29,6) Monograph on the water supply in Denmark/Hydrogeological surveying and planning (Conf. 70/TP 207 & 208).
- (30) COLLECTIF (1982) - Groundwater resources of the European Community. (CCE. 10 vol. Bruxelles - Luxembourg).
- (31) COLLECTIF (1986) - Proceeding of the Symposium on Water Resources and their Utilization in the Arab World, Kuwait, 17-20 Feb., en arabe -sauf Bahraïn en anglais-.

- (32) COLLECTIF (1990) - Groundwater in Europe. (UN/DTCD, Nat. Ressources/Water serie, New York, à paraître).
- (33) ANONYME (1970) - Les tendances en matière d'utilisation et de mise en valeur des ressources hydrauliques dans la région de la CEE. (NU - CEE, ST/ECE/WATER/1, New York).
- (34) Anonyme/NU (1970) - Liban - Etude des eaux souterraines. (Rapport technique, NU, PNUD New-York).
- (35) ANONYME (1976) - Ground Water in the Western Hemisphere. (UN.DTCD, Natural Resources/Water Series n° 4. New-York).
- (36) ANONYME/BRGM (1976) - Cartes de planification des ressources en eau souterraine des états membres du C.I.E.H. de l'Afrique soudano-sahélienne. Notice explicative. (Com. interafr. ét. hydr. Sér. hydrogéologie, FAC/BRGM, Ouagadougou).
→ Pays intéressés : Burkina Faso, Cameroun, Mali, Mauritanie, Niger, Sénégal, Tchad.
- (37) ANONYME (1977) - Recursos hidricos/Argentina. (Subsecretario de Recursos Hidricos, INCYTH - Mars, Bueno-Aires).
- (38) ANONYME/BGR (1977) - National water master plan of Jordan. (7 vol., Hannover).
- (39) ANONYME/ICID (1981-1983) - Irrigation and drainage in the world. (ICID, 3 vol. , 3e ed., New-Delhi).
- (40) ANONYME (1981) - Perspectives à long terme de l'utilisation des ressources en eau et de l'approvisionnement en eau de la région de la CEE. (NU/CEE, ECE/Water/26, New-York).
- (41) ANONYME (1982) - Ground Water in the Eastern Mediterranean and Western Asia. (UN-DTCD, Natural Resources/Water Series n° 9. New-York).
- (42) ANONYME/BRGM (1982) - Notice explicative de la carte de planification des ressources en eau du Gabon et du Congo. (C.I.E.H., B.R.G.M., Doc. 82, AGE 055, 116 p. Orléans).
- (43) ANONYME (1983) - Ground Water in the Pacific Region. (UN - DTCD, Natural Resources/Water Series n° 12. New-York).
- (44) ANONYME (1984) - Fourth Development Plan (1985-1990), Saudi Arabia. (Ministry of Planning, Kingdom of Saudi Arabia, Riadh).
- (45) ANONYME/IGME (1985) - Las aguas subterraneas en España. (I.G.M.E., 17 p. + annexes, Madrid).
- (46) ANONYME/MOPU (1985) - Medio Ambiente en España 1984. (Monogr. Direc. Gener. del Medio Ambiente, Madrid).
- (47) ANONYME (1986) - Water in the Nederland. (TNO Committee on Hydrologic. Research).
- (48) ANONYME (1986) - Ground Water in Continental Asia (Central, Eastern, Southern, South-eastern Asia). (UN - DTCD, Natural Resources/Water Series n° 15. New-York).
- (49) ANONYME (1986) - Management of the Water Resources of the Republic of South Africa. (Depart. of Water Affairs, Pretoria).
- (50) ANONYME (1987) - Les eaux souterraines de l'Afrique septentrionale et occidentale. (UN - DTCD, Ressources naturelles / Série Eau n° 18, New-York).

- (51) ANONYME/OCDE (1987) - Données OCDE sur l'environnement. - Compendium 1987. (OCDE, Part I, 3. Eaux intérieures. p. 43-61. Paris).
- (52) ANONYME (1987) - Environment statistic in Europe and North America. An experimental compendium - Chap. 1.3. - Water. (UN/ECE, Statistical standards and studies n° 39, New-York).
- (53) ANONYME (1988) - Les prélèvements d'eau en France par usage et par source de 1981 à 1984. (Minist. Envir., Dir. Eau & prév. pollutions/Ag. fin. de bassin. Janv., 16 p. Neuilly-sur-Seine).
- (54) ANONYME /WRI-IIED (1988) - World Resources 1988-89. Chap. 8 Fresh Water, Tables 21 Fresh Water. (World Res. Inst. & Intern. Inst. for Environment and Development, Basic Books Inc., New-York).
- (55) ANONYME (1988) - Les eaux souterraines de l'Afrique orientale, centrale et australe. (UN-DTCD, Ressources naturelles/Série Eau, n° 19. New-York).
- (56) ANONYME (1989) - Utilisation des ressources en eau et lutte contre la pollution de l'eau : tendances, politiques et perspectives. (NU/Comm. écon. Europe, ECE/ENVWA/10, 57 p. New-York).
- (57) ANONYME/OCDE (1989) - Données OCDE sur l'environnement - Compendium 1989. (OCDE, Part I-3 Eaux intérieures, 3.1 B p. 52. Paris).
- (58) ANONYME (1990) - Rapport national Albanie. (Séminaire Stratégies de gestion des eaux dans les pays méditerranéens, horizon 2010, Alger Mai. CCE/Gouvern. algér./CEFIGRE, 9 p.).
- (59) ANONYME (1990) - Schéma directeur de mise en valeur des ressources en eau du Mali. (Doc. Rep. du Mali et PNUD/DCTD, Projet MLI/84/005, Déc.).
- (60) ANONYME (1990) - Planification, mise en valeur et gestion des ressources en eau souterraine en milieu rural/Niger. (Doc. Rep. du Niger et PNUD/DCTD, Projet NER/86/001. Mars).
- (61) ANONYME/PNUD (1990) - Synthèse hydrogéologique du Mali (Rép. du Mali/PNUD-DTCD, Rapport du projet MLI/84/005, Sept.).
- (62) ANONYME/PNUD (1990) - Développement et gestion des ressources en eau d'Haïti. (Rapports du projet PNUD/DCTD HAI/86/003).

