

## RESSOURCES EN EAU DES ZONES ARIDES ET SEMI-ARIDES

## I. CARACTERISTIQUES DES ZONES ARIDES ET SEMI-ARIDES

Tout d'abord il est nécessaire de distinguer l'aridité, laquelle est un phénomène climatique permanent et chronique, de la sécheresse, phénomène conjoncturel et exceptionnel.

L'aridité présente trois caractéristiques essentielles:  
— insuffisance des apports d'alimentation par les précipitations efficaces, d'où bilan d'eau déficitaire;  
— ressources en eau de surface faibles et irrégulières;  
— ressources en eau souterraine en état de pénurie permanent.

1 - *Insuffisance des apports d'alimentation par les précipitations efficaces, d'où bilan d'eau déficitaire*

Les apports par les précipitations efficaces (PE = P - ETR) sont faibles étant donné la hauteur de précipitation, P, inférieure à 400 mm/an et l'évapotranspiration, ETR, est très élevée de plusieurs m/an (valeur moyenne de 1,5 à 1,8 m/an). L'alimentation est ainsi réduite de quelques millimètres à des dizaines de mm/an.

Exemple: lac Nasser (Haute Egypte):

Evaporation: 2,6 m/an, soit sur toute la surface:  $15.10^9 \text{ m}^3/\text{an}$ .

Il en résulte que les bilans d'eau sont déficitaires (exemple de l'aquifère à nappe captive du Continental intercalaire du Sahara septentrional, Tableau I).

2 - *Ressources en eau de surface faibles et irrégulières*

La figure 1 montre les schémas d'écoulement comparés en zone aride et en zone humide. Un exemple d'extrême irrégularité des débits écoulés est donné par le fleuve Sénégal (figure 2). A noter un endoréisme fréquent (bassin hydrologiques fermés sans écoulement vers la mer, figure 1): exemple du bassin du Tchad. L'importance des débits solides (matières en suspension) provoque le colmatage rapide des retenues des réservoirs.

L'accroissement des débits captés par forages artésiens a entraîné deux conséquences graves: pompage dans certains forages et baisse du débit des sources artésiennes. D'où accroissement du coût de production de l'eau.

Le création de réservoirs de surface entraîne trois conséquences nuisibles: colmatage rapide des retenues, importantes pertes par évaporation (lac Nasser) et altération de la santé par l'apparition de maladies endémiques (ascariose, bihardie).

Les diverses conditions de l'écoulement de surface réduisent fortement les arrivées à la mer.

Tab. 1 - Bilan d'eau de l'aquifère à nappe captive du Continental intercalaire du bassin du Sahara septentrional.

Superficie du bassin:  $780.000 \text{ km}^2$

Réserve en eau souterraine:  $6 \times 10^{13} \text{ m}^3 = 60.000.000 \times 10^6 \text{ m}^3$  soit un débit théorique de  $1.000 \text{ m}^3/\text{s}$  pendant 2.000 ans.

Eléments du bilan en $\text{m}^3/\text{s}$	1956	1970
<b>ENTREES CONSTANTES</b>		
Atlas	2, 03	
Grand erg	3, 55	6, 01
Tinrhert	0, 43	
Lybie	0, 49	
Dahar tunisien	1, 89	
total des entrées	8, 50	8, 50
<b>SORTIES CROISSANTES</b>		
Percolation verticale par failles		
El Biod	0, 55	0, 55
Chott Fedjej	0, 30	0, 29
Sorties aux limites		
Adrar	1, 80	1, 80
Tidiket	1, 94	1, 90
Tunisie: mer au golfe de Gabes	3, 58	3, 48
Exploitation par forages et creusement de foggaras	0, 32	3, 05
total des sorties	8, 50	11, 07
D'où prélèvement sur la réserve	2, 57	
Soit en volume de 1959 à 1970	$154 \times 10^9 \text{ m}^3$	

Remarques importantes:

1 - Noter le faible apport de l'alimentation, égale à  $8,5 \text{ m}^3/\text{s}$  soit  $270 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ . A comparer avec l'importance de la réserve:  $60.000.000 \times 10^6 \text{ m}^3$ .

2 - Un faible accroissement des débits d'exploitation provoque un déséquilibre du bilan important. C'est la caractéristique essentielle des bilan d'eau en zone aride. Celle-ci entraîne une conséquence capitale dans la gestion des ressources en eau.

Exemples: bassin du Tigre et de l'Euphrate (Irak):

débit amount en Mésopotamie:  $108.10^9 \text{ m}^3/\text{an}$ .

débit au golfe persique:  $46.10^9 \text{ m}^3/\text{an}$ .

bassin du Bahr al Gazal (Egypte):

débit amount:  $14.10^9 \text{ m}^3/\text{an}$ .

débit au confluent du Nil: 0,5 à  $2.10^9 \text{ m}^3/\text{an}$ .

3 - *Ressources en eau souterraine en état de pénurie permanent*

Les ressources en eau souterraine sont les seules ressources permanentes disponibles, d'où:

— primauté de la ressource en eau souterraine exploitable;

— stockages importants dans les aquifères entraînant une exploitation minière, ou déstockage de l'eau souterraine.

— importance des aquifères profonds à nappe captive, avec en général des stockages importants (réserves permanentes);

(\*) Professeur d'hydrogéologie - Université de Paris.

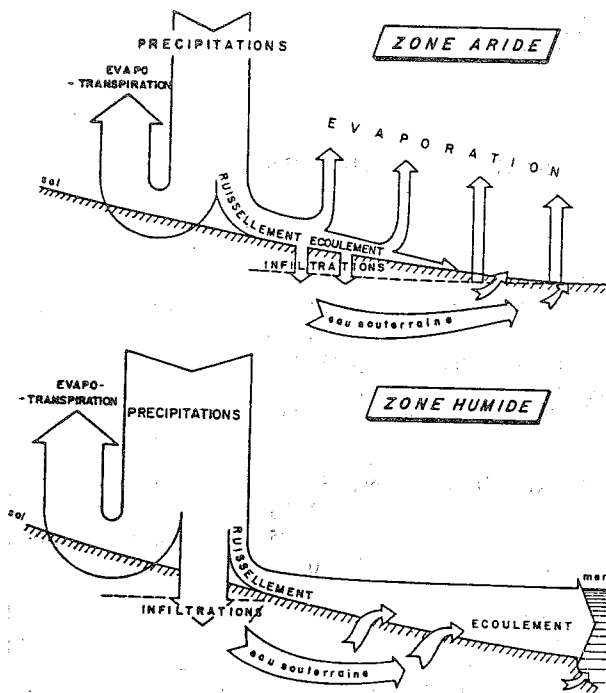


Fig. 1 - Schémas d'écoulement en zone aride et en zone humide. Les caractéristiques des zones arides sont: les faibles hauteurs de précipitations et l'évaporation intense. Il en résulte un écoulement de surface moins élevé et un endoréisme fréquent. L'infiltration alimente les eaux souterraines sur de plus grandes surfaces (zones d'épendage des eaux de crues).

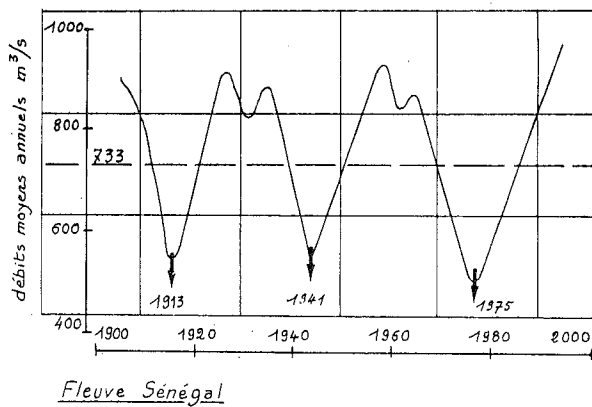


Fig. 2 - Régime de l'écoulement du fleuve Sénégal. Noter l'irrégularité des débits, en particulier lors des années de sécheresse extrême, 1913, 1941 et 1975.

— salinité des eaux souterraines, souvent élevée.

La ressource est égale au volume d'eau, exprimé en débits ( $m^3/s$  ou  $km^3/an$ ) pouvant être extrait de l'aquifère pendant une durée déterminée, en respectant des contraintes imposées.

La ressource en eau souterraine renouvelable potentielle, égale au débit de l'infiltration ou au débit de sorties de l'aquifère est faible et insuffisante pour satisfaire les besoins en eau (Exemple: Sahara =  $8,5 m^3/s$ . D'où une pénurie des aquifères à nappe libre, proches de la surface, ou localisations ponctuelles (underflow des cours d'eau et des étendues d'eau libre). D'où nécessité d'une exploitation intensive des nappes

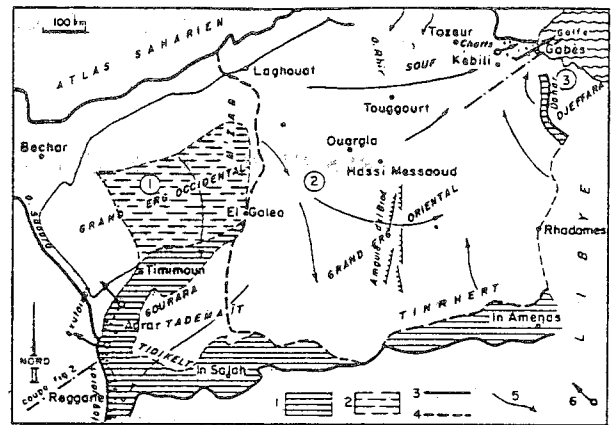


Fig. 3 - Bassin sédimentaire du Sahara septentrional. Cadre général du système aquifère du Continental intercalaire (C.I.) 1. Affleurements de la formation - 2. Affleurements sous le Grand Erg occidental (drainance) - 3. Limites du bassin hydrogéologique - 4. Ligne de partage des eaux souterraines - 5. Direction de l'écoulement souterrain - 6. Exutoires principaux.  
a - sous-bassin occidental; b - sous-bassin oriental; c - sous-bassin de la Djéffara.

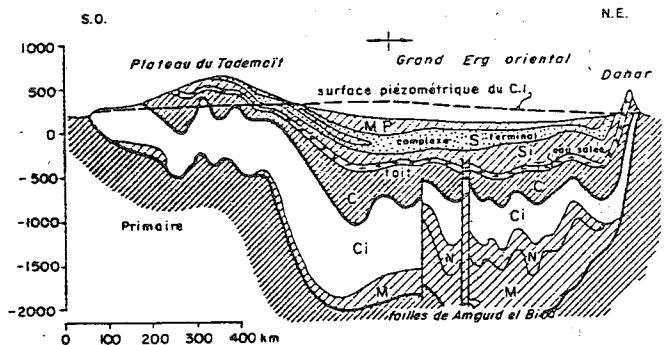


Fig. 4 - Coupe hydrogéologique schématique du bassin hydrogéologique du Sahara septentrional  
En haut: en pointillé la formation du complexe terminal  
MP - Mio-pliocène  
S - Formation perméable sablo-gréseuse du Complexe terminal, du Crétacé sup. au Miocène.  
Au centre: formation géologique imperméable d'argiles et évaporites  
Si - Sénonien inférieur argilo-gypseux  
T - Turonien dolomitique (aquifère à eaux salées)  
C - Cénomaniens argileux et évaporites.  
En bas: Ci - Formation géologique perméable sablo-gréseuse du Continental intercalaire du Crétacé inférieur.  
Substratum de l'aquifère: N - Néocomien argileux; M - Malm (Jurassique supérieur).

profondes, non ou peu rechargées, c'est-à-dire de la ressource en eau souterraine non renouvelable potentielle.

La ressource en eau souterraine exploitable (tableau II) est, en zone aride, le volume d'eau pouvant être prélevé sur la ressource non renouvelable potentielle, compte-tenu de contraintes physiques (productivité des ouvrages de captages), socio-économiques (coût de production de l'eau), d'environnement (maintien de la profondeur de la surface piézométrique à un niveau suffisant) et politiques (politique générale de l'eau). Cette ressource est la seule pouvant assurer en permanence des disponibilités en eau pour satisfaire les besoins domestiques, industriels et agricoles. Ces derniers étant prioritaires.

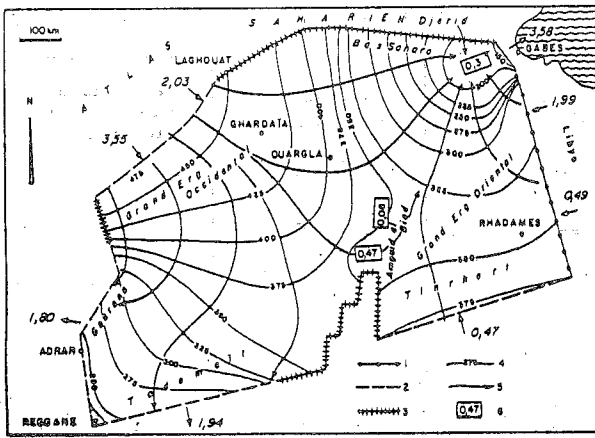


Fig. 5 - Système d'écoulement de l'aquifère du Continental intercalaire. Carte piézométrique et conditions aux limites (1956). Flux entrant et sortant en  $m^3/s$ .  
 1 - Condition de flux. 2 - Conditions de potentiel. 3 - Limite imperméable. 4 - Courbe équipotentielle avec son altitude. 5 - Ligne de courant. 6 - Flux de percolation verticale ascendante, en  $m^3/s$ .

Tab. II - Indicateurs de l'importance des eaux souterraines dans l'économie de l'eau de pays de la zone aride et semi-aride

INDICATEURS	RESSOURCE EN EAU SOUTERRAINE (RENOUVELABLE)		UTILISATION DES EAUX SOUTERRAINES	
	Flux global <sup>1</sup> $10^9 m^3/an$	Proportion des ressources en eaux internes totales - %	Prélèvements d'eau souterraine $10^6 m^3/an$	Proportion des prélèvements en eau totale - %
Algérie	= 5	= 20	= 1400	70
Arabie Saoudite			= 1700	= 73
Australie	38	11	= 2500	15
Iran	30 à 40	25 à 30	18700	41
Iraq	13	38	1200	= 3
Israël	0,9	69	1150	67
Jordanie	0,58		165	43
Koweït			130	= 100
Liban	3	70		
Libye	0,5	71	1470	= 100
Maroc	10	33	2550	25
Mauritanie	= 0,3	75		
Oman			430	= 100
Syrie	4,1	53	5500 (avec sources)	78,5
Tunisie	= 1	= 33	620	58
U.S.A. (MRC - Regions) :			3200	43
- Rio Grande				
- California-South Pacific			26200	46
- Lower Colorado			6900	39

\* défini par l'alimentation globale des nappes souterraines du territoire ("ressources naturelles théoriques")  
 100: date : 1975 ou une année plus récente.

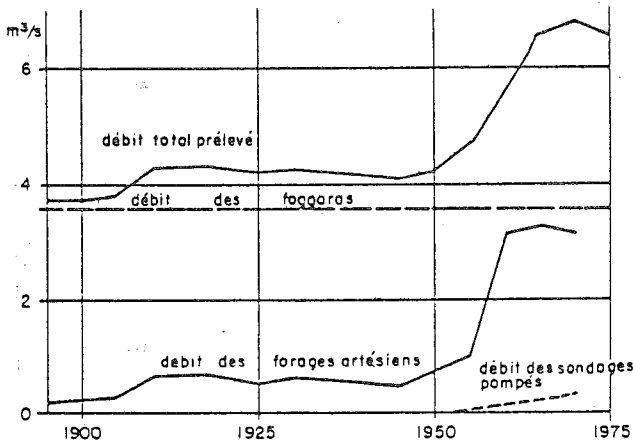


Fig. 6 - Historique des prélèvements dans l'aquifère du continental intercalaire en Algérie et en Tunisie.

La pénurie de la recharge des eaux souterraines entraîne une technique d'exploitation par prélèvements sur les réserves, dite exploitation minière ou de déstockage. Elle aboutit à l'épuisement progressif des ressources et à un accroissement du coût de production de l'eau. Celui-ci devient rapidement prohibitif (fig. 8 et 9 et tableaux II et III).

Exemples: Acquifère à nappe captive des grès de Nubie (Egypte).

Superficie:  $1.800.000 km^2$

Ressource en eau souterraine renouvelable potentielle:  $1.10^9 m^3/an$

Réserve totale:  $6.000.10^9 m^3$

Prélèvement totale sur la réserve (rab. = 100 m):  $600.10^9 m^3$

Exploitation actuelle par déstockage:  $370.10^6 m^3/an$   
 = ressource en eau souterraine exploitable.

Dont 75% prélevés sur la réserve.

Acquifère à nappe captive du Grand bassin d'Australie

Superficie:  $1.750.000 km^2$ .

Ressource en eau souterraine renouvelable potentielle:  $150.10^6 m^3/an$

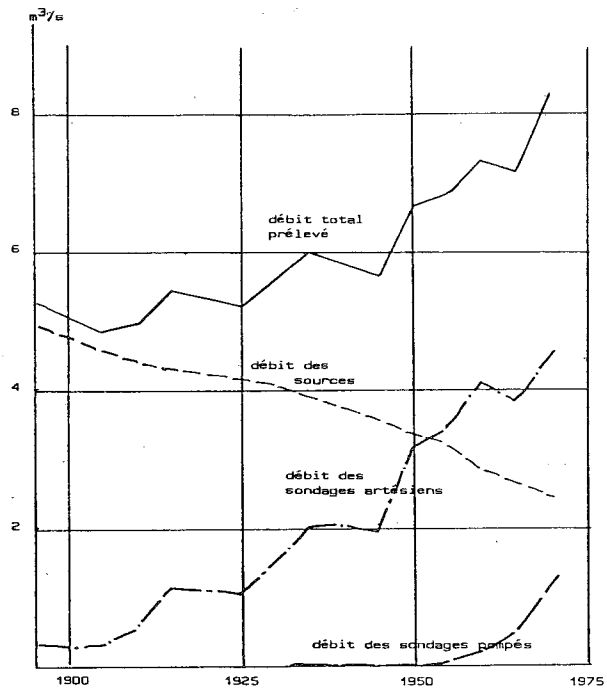


Fig. 7 - Historique des débits prélevés dans l'aquifère du Complexe terminal en Tunisie.

Prélèvement totale (1890-1970), en moyenne annuelle:  $600.10^6 m^3/an$   
 Soit un volume d'eau extrait:  $48.10^9 m^3/an$   
 Dont un prélèvement sur la réserve (95% en 80 ans)  $44.10^9 m^3/an$

Ces deux exemples montrent l'importance de l'exploitation minière, ou déstockage, des eaux souterraines.

Tableau III - Des mines d'eau en terres arides. Exemples d'exploitation intensive d'eau souterraine en zone aride ou semi-aride

Pays et Localisation	Date de référence	Aquifère	Type d'ouvrage	Nombre d'ouvrage	Prélèvement annuel total $10^6 m^3/an$
ALGERIE Oued Rhir (SAHARA) (ERESS/UNESCO)	1970	"Complexe terminal" captif, calc. crétacé-éocènes	forages	1 800	260
ARABIE SAOUDITE région orientale (ECWA, UN, 1976)	= 1975	Calc. tertiaires captifs	forages	28 000	1 723
CHINE - HO PEI, bassin Beilonggan (62 000 km <sup>2</sup> )	1978	Alluv. + sédim. fluvio-lac. quat. libres + captifs	puits et forages	= 600 000	= 10 000
EGYPTE Delta du Nil Oasis Kharga & Dakhla,...	= 1975	Alluv. Quat.	Puits et forages	-	500
	1969	Grès de Nabile captifs	forages	1 070	335
IRAN Plateau central (845 000 km <sup>2</sup> )	1977	Alluv. & calc. quatern.	galeries (ghanats) + captages sources puits forages	9 600 13 500 7 600	10 400
IRAN Total	1977	Alluv. & calc. quatern.	galeries, puits et forages	14 000 37 000	18 690
LIBYE Jeffara (20.000 km <sup>2</sup> )	1978	Sable, grès, calc. tertiaires et second.	forages	-	532
U.S.A. - Californie - Arizona/Salt River Valley (région de Phoenix)	1965	Alluvions quatern.	puits et forages	= 100 000	20 000
	= 1970	Alluvions quatern. et pliocène		-	2 100
YEMEN-S. (PDRY)	= 1975	Alluvions quatern. Grès crétacés	puits et forages forages	5 800 600	350

## II. GESTION RIGOREUSE DE LA RESSOURCE

Les caractéristiques des zones arides et semi-arides entraînent une gestion rigoureuse de la ressource en eau, portant principalement sur les points suivants:

- évaluation de la ressource en eau souterraine exploitable;
- maîtrise de l'exploitation minière ou déstockage;
- accroissement de l'alimentation des eaux souterraines;
- relais à promouvoir après épuisement de la ressource en eau souterraine exploitable.

### 1 - Evaluation de la ressource en eau souterraine exploitable

L'unité de domaine d'espace pour toutes les évaluations est le système aquifère. Il en résulte des études hydrogéologiques précises avec emploi de toutes les techniques actuellement disponibles. Leur finalité est l'emploi obligatoire de modèles mathématiques en régime permanent (exemple: Sahara). D'où nécessité d'acquisition de données numériques sur les paramètres géologiques et hydrodynamiques du système aquifère.

Nécessité d'études hydrochimiques précises avec définition de l'aptitude de l'eau aux usages agricoles.

### 2 - Maîtrise de l'exploitation minière ou déstockage

La nécessité d'un exploitation minière des ressources en eau aboutissant à l'épuisement des réserves permanentes (déstockage) nécessite des prévisions rigoureuses sur l'approfondissement de la surface piézométrique, dans le temps, en fonction des débits prélevés. D'où l'emploi obligatoire des modèles mathématiques de prévisions en régime transitoire. La conséquence majeure est l'augmentation du coût de production de l'eau avec le temps (Exemple du Sud tunisien).

### 3 - Accroissement de l'alimentation des eaux souterraines

Des méthodes d'accroissements de l'alimentation des eaux souterraines permettent de retarder l'épuisement de la ressource en eau souterraine exploitable. Ce sont:

- création de barrages souterrains, dans le lit des cours d'eau favorisant l'infiltration de l'eau;
- création de petites retenues dans la zone d'alimenta-

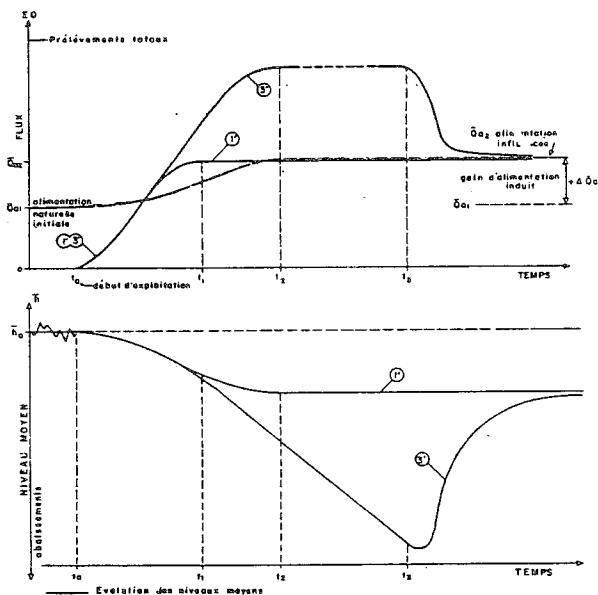


Fig. 8 - Schémas de stratégie d'exploitation d'une nappe souterraine, avec alimentation supplémentaire induite. Evolutions des prélèvements totaux et des niveaux moyens (Figurations sans échelle).

- 1 - Prélèvements croissants ( $t_0$  à  $t_1$ ) puis stationnaires =  $\bar{Q}_2 > \bar{Q}_1$  initial. Régime de suréquilibre atteint en  $\approx t_2$  après une phase temporaire à prélèvements  $>$  alimentation qui croît avec retard.
- Exploitation de réserve temporaire suivie d'établissement d'un régime de suréquilibre par réduction des prélèvements (après  $t_3$ ) amenés à une valeur stationnaire  $\approx \bar{Q}_2$

L'exploitation des eaux souterraines, l'aquifère étant l'unité de gestion, se pratique selon deux stratégies: captage du flux souterrain et exploitation minière ou déstockage de la réserve en eau souterraine permanente. Souvent les deux stratégies se combinent et alternent. En zone aride, seule la seconde permet d'assurer la pérennité des approvisionnement.

- le captage du flux souterrain, porte sur une fraction de la ressource en eau souterraine renouvelable potentielle. Il aboutit à un équilibre hydrodynamique naturel traduit par une stabilisation de la surface piézométrique à un niveau pré-déterminé (figure en haut de page). Par suite de répercussions sur l'alimentation naturelle ou induite, cette stabilisation s'établit dans de courts délais. C'est évidemment le mode de gestion le plus rationnel.

- le captage de la réserve permanente en eau souterraine ou exploitation minière ou déstockage. Il aboutit à un déséquilibre hydrodynamique, volontaire et permanent (figure en bas de page). Celui-ci provoque un abaissement continu de la surface piézométrique, impliquant des règles strictes de planification.

tion des aquifères (Exemple: Matmatas dans l'extrême sud tunisien);

- alimentation artificielle des nappes d'eau souterraine par les eaux de crues, soit ds zones d'épandages, soit des lits des cours d'eau;
- récupération maximale des eaux usées après traitement.

#### 4 - Relais à promouvoir après épuisement de la ressource en eau souterraine exploitable

L'exploitation minière des eaux souterraines

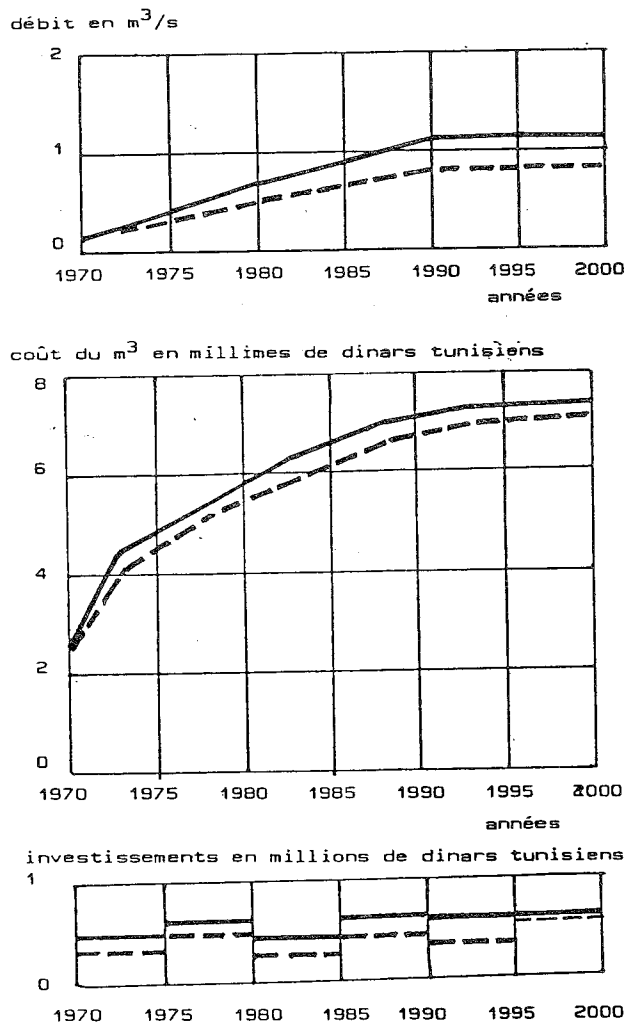


Fig. 9 - Evolution des débits simulés et résultats économique Région di Sud tunisien

entraîne, à plus ou moins longue échéance, un épuisement de la ressource en eau souterraine exploitable. L'effet principal étant la profondeur excessive de la surface piézométrique et ses conséquences sur le coût de production de l'eau et sur l'environnement. Dès à présent il faut prévoir des relais afin d'assurer la pérennité des approvisionnements (délais 30 à 50 ans). Citons en particulier:

- dessalement des eaux de surface, marines et continentales et des eaux souterraines dont le prix de revient est en décroissance;
- création de grandes surfaces d'eau libre, augmentant l'infiltration. Elles présentent l'inconvénient d'accroître les pertes par évaporation. Celles-ci sont en partie compensées par un gain sur les précipitations.

### III. METHODES ET TECHNIQUES DE PROSPECTION

La prospection des eaux souterraines en zone aride et semi-aride utilise les méthodes et techniques de prospection classiques de l'hydrogéologie en les adaptant aux conditions particulières de ces régions (grands espaces à explorer, manque de documents topographiques précis, ect.). Nous citerons en particulier la télédétection,

la géophysique appliquée et les modèles mathématiques.

- la télédétection traite des photographies aériennes et des images prises par des satellites. Actuellement nous disposons d'une couverture de toute la surface de la terre, à différentes échelles. Son emploi pallie ainsi au manque de cartes topographiques. Leur traitement par des méthodes informatiques aboutit à des résultats rapides et d'excellente qualité, en particulier par la cartographie automatique, souvent en couleurs.
- les prospections géophysiques classiques et nouvelles sont d'une application pratique. En particulier la prospection par la méthode des résistivités est très efficace dans les régions de socle pour localiser les zones de fractures (figure 10). L'emploi conjugué de la télédétec-

tion et de la géophysique, dans les zones de socle, a permis de porter la pourcentage de réussite des forages d'eau, de 50 à 80%.

- les modèles mathématiques, en régime permanent ou transitoire, sont utilisés au cours de toutes les phases de l'étude hydrogéologique: prospection, établissement des bilans d'eau, évaluation des ressources en eau, prévisions de l'évolution de la profondeur de la surface piézométrique en fonction des débits exploités, etc. Leur emploi est devenu systématique. Mais il doit être constamment contrôlé par l'hydrogéologue.

En résumé, l'hydrogéologie est une science pluridisciplinaire, mettant en oeuvre toutes les méthodes et techniques des Sciences naturelles et physiques.

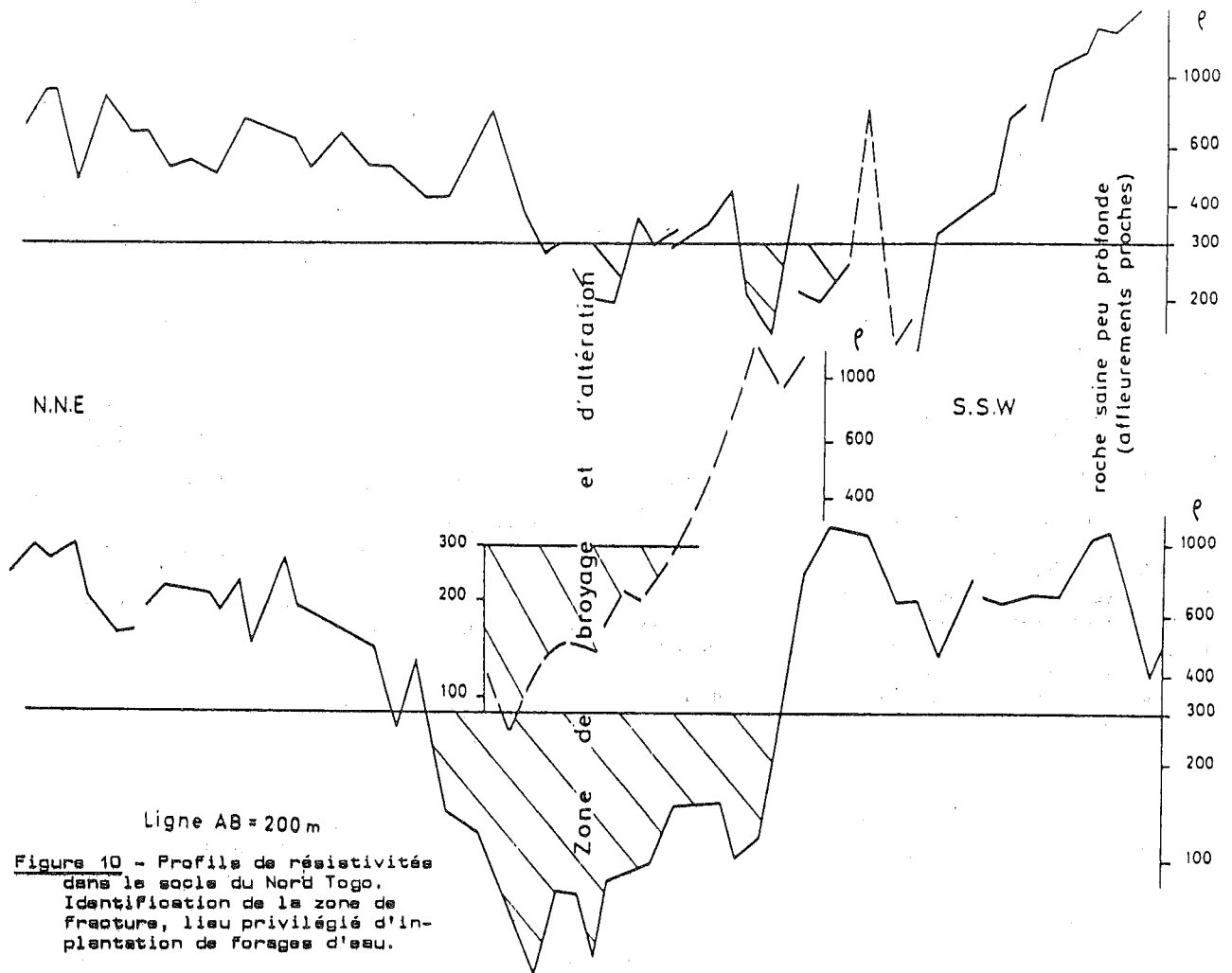


Fig. 10 - Profils de résistivités dans le socle du Nord Togo. Identification de la zone de fracture, lieu privilégié d'implantation de forages d'eau