



HAL
open science

Quelques problèmes du gisement et de l'exploitation des eaux souterraines en zone aride, Koweït (Arabie Nord-Est)

Saïd Mohammed Abusada

► **To cite this version:**

Saïd Mohammed Abusada. Quelques problèmes du gisement et de l'exploitation des eaux souterraines en zone aride, Koweït (Arabie Nord-Est). Hydrologie. Université Scientifique et Médicale de Grenoble, 1980. Français. NNT: . tel-00756512

HAL Id: tel-00756512

<https://theses.hal.science/tel-00756512>

Submitted on 23 Nov 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

205 112
1980
47

Arabie

205112
1980
47

UNIVERSITE SCIENTIFIQUE
ET MEDICALE DE GRENOBLE

THESE DE DOCTORAT DE SPECIALITE
Géologie appliquée
Option : Hydrogéologie

**Quelques problèmes du gisement et de l'exploitation
des eaux souterraines en zone aride : KOWEIT (Arabie Nord-Est)**

par Said Mohammed ABUSADA
*Hydrogéologue du Ministère de l'Electricité
et de l'Eau de KOWEIT*

Soutenue en Mai 1980 devant la Commission d'Examen

R. BARBIER	Professeur à l'U.S.M.G.	Président
G. CASTANY	Professeur à l'Université de Paris VI	Examinateur
R. MICHEL	Professeur à l'U.S.M.G.	Examinateur
J. SARROT REYNAULD	Professeur à l'U.S.M.G. Directeur de la Thèse	Rapporteur

UNIVERSITÉ SCIENTIFIQUE
ET MÉDICALE DE GRENOBLE

205142
1980
47

THESE DE DOCTORAT DE SPECIALITÉ
Géologie appliquée
Option : Hydrogéologie

**Quelques problèmes du gisement et de l'exploitation
des eaux souterraines en zone aride : KOWEIT (Arabie Nord-Est)**

par Said Mohammed ABUSADA
*Hydrogéologue du Ministère de l'Électricité
et de l'Eau de KOWEIT*

T. 80/277

Soutenu en Mai 1980 devant la Commission d'Examen

R. BARBIER	Professeur à l'U.S.M.G.	Président
G. CASTANY	Professeur à l'Université de Paris VI	Examinateur
R. MICHEL	Professeur à l'U.S.M.G.	Examinateur
J. SARROT-REYNAULD	Professeur à l'U.S.M.G. — Directeur de la Thèse	Rapporteur



2021
1961
14

Quelques problèmes de gisement et de l'exploitation
des eaux souterraines en zone aride : KOWEIT (Arabie Nord-Est)

par Saïd Mohammed ABUSADA
Hydrogéologue de l'Institut de l'Électricité
et de l'Eau de KOWEIT

Édition
Édition
Édition
Édition

Édition
Édition
Édition
Édition

Je dédie ce travail

à la mémoire de mes parents

à ma femme

à ma fille Dina et à mon fils Eyad

au Koweït

et au peuple Arabe

AVANT - PROPOS

Au terme de cette étude, il m'est agréable de pouvoir remercier tous ceux qui m'ont permis de la réaliser.

En premier lieu, Monsieur le Professeur J. SARROT REYNAULD, Directeur du Service d'Hydrogéologie de l'Institut Dolomieu, qui m'a accueilli à l'Institut Dolomieu lors de mes séjours en France et conseillé pendant son voyage au Koweït. Malgré ses nombreuses occupations il n'a pas ménagé son temps pour que ce travail puisse voir le jour. Les conseils et les critiques qu'il a bien voulu apporter à mon manuscrit m'ont été d'un grand secours.

Je remercie le Professeur R. BARBIER qui me fait l'honneur de Présider le Jury.

Je remercie également Messieurs les Professeurs R. MICHEL et G. CASTANY qui ont bien voulu accepter de participer à ce Jury.

Mes remerciements vont également à Monsieur le Professeur Mahdi HANTUSH, à qui je dois une bonne partie de ma formation hydrogéologique, et qui m'a toujours encouragé pour mener à bien mes études.

Mes remerciements s'adressent aussi à Monsieur Zeid AL FAHAD, Sous-Secrétaire du Ministère de l'Electricité et de l'Eau, grâce à qui j'ai pu continuer ce travail, ainsi qu'à Monsieur Saoud AL NASSER, Directeur de l'Administration de l'Eau pour ses encouragements.

Je tiens à remercier Monsieur F. AL MUTAWA, Directeur du G.W.D. pour m'avoir permis d'utiliser les données employées dans cette étude. Mes remerciements vont également à Madame SARA OMAR pour m'avoir fourni toutes ces données. Je remercie également mon collègue Dr. Yelder SHENAY pour ses conseils et critiques, ainsi que Messieurs A. AL SUMAIT et H. SHUKRALLAH.

Je tiens à remercier le Gouvernement Français qui m'a accordé des bourses pendant les périodes de stage en France. Je remercie notamment Monsieur P. FAUGERE, Attaché culturel à Koweït.

Ma reconnaissance va également à "KUWAIT FOUNDATION FOR THE ADVANCEMENT OF SCIENCE" qui a accepté de financer partiellement cette étude. Je tiens à remercier notamment Dr. AL AQUIL et Dr. J. MANASSA pour leurs encouragements.

Je remercie mes collègues du G.W.D. et du Troisième Cycle à l'Institut Dolomieu pour leur aide amicale pendant la réalisation de cette étude.

Mes remerciements vont notamment à Messieurs A. AL-SHARHAN, M. HAMMO, F.F. ZDENEK, Dr. M. AHMAD, Dr. Y. SHUHAIBER, A. ADSANI, Dr. Z. NAJJAR, F. BUSHMAN, Dr. I. HAMIDA, ainsi qu'à tous ceux qui ont influencé ma vie professionnelle de façon agréable. Je n'oublie pas mes collègues A. AL ASSFOUR, S. QUTTAINEH, I. NADI, Y. AL HAJJI, F. QUABAZARD, A. AL GHARABALLY, M. AL QUAISSI, M. AL MUTAWA, A. A. BOUHASSAN, A.A. ASSALEH, Dr. M.A. JAWAD, Dr. FIDA, et Dr.A.A. RAZZAQ.

Je remercie Madame N. REVOL pour la dactylographie du texte de la thèse ainsi que Monsieur THOMAS pour la dactylographie des tableaux. Mes remerciements vont également à Melle ARGOT pour son aide photographique, ainsi qu'à Messieurs B. JAFFAR, M. ABOUHILWA, A. RAOUF et M. SHAHIN pour leur aide dans de nombreuses formalités.

Enfin, je veux exprimer ma gratitude et ma profonde reconnaissance à mes parents et mes frères. Je remercie notamment mon frère Ahmad qui a toujours été à mes côtés pendant les contre-temps.

Tous les mots restent faibles pour exprimer ma reconnaissance à ma femme Samira qui m'a déchargé de tous les problèmes quotidiens afin que je puisse me consacrer entièrement à la réalisation de ce travail.

A tous, ainsi qu'à ma fille Dina et mon fils Eyad, je dédie cet ouvrage.

CHAPITRE PREMIER

INTRODUCTION

1.1. BUT DE L'ÉTUDE

L'Etat du Koweït, étant un pays aride dans lequel beaucoup de travaux intéressants sur les eaux souterraines ont été effectués et dont la plus grande partie des ressources en eaux souterraines est saumâtre, représente un exemple attrayant à considérer par les planificateurs des ressources en eaux et par les étudiants en hydrogéologie, soit pour en profiter dans les pays de conditions similaires, soit pour analyser les questions qu'il pose.

Dans ce cadre, le but de cette étude est d'examiner les méthodes pratiques d'exploitation des eaux souterraines suivies dans l'Etat du Koweït à la lumière des conditions hydrogéologiques de gisement des eaux souterraines d'une part, et des besoins en eaux d'autre part. Quelques problèmes concernant les méthodes d'évaluation des ressources en eaux souterraines, la localisation et le dessin des champs des puits, la construction et les méthodes de développement des puits, l'alimentation artificielle des nappes souterraines, les possibilités d'exploitation d'autres aquifères et la conservation des eaux souterraines seront considérés.

1.2. PRÉSENTATION SOMMAIRE DE L'ÉTAT DE KOWEIT

L'Etat du Koweït, indépendant depuis 1961, occupe une superficie de 17 820 km² de désert et d'îles basses. Son terrain est la continuation du grand désert qui couvre de vastes étendues dans les pays arabiques voisins. Il est situé à l'ultime point de rencontre du désert et de la mer, au fond du Golfe Arabique à l'Est (Fig. 1-1 et 1-2).

Une équipe danoise a découvert dans l'île de Faylica les vestiges d'un temple ainsi que de nombreuses pièces de monnaies frappées à l'effigie d'Alexandre le Grand et de son successeur Antiochus. Des fouilles ultérieures confirment le passage de la flotte d'Alexandre dans les eaux du Koweït et l'activité, sur l'île qu'il nomma Ikaros, de nombreux marchands grecs. Un ensemble de sceaux et de tessons de poterie révéla que l'île avait déjà une position commerciale importante sur la route qui menait des rivages de l'Océan Indien à la vallée du Tigre et de l'Euphrate, à l'époque où fleurissait en Irak la civilisation de Sumer et à Bahrain celle de Dilmoun.

En 1756, Koweït la capitale de l'Etat, fut une cité active avec une population de 10 000 âmes, qui vécut de la pêche des perles et du commerce et posséda 800 bateaux.

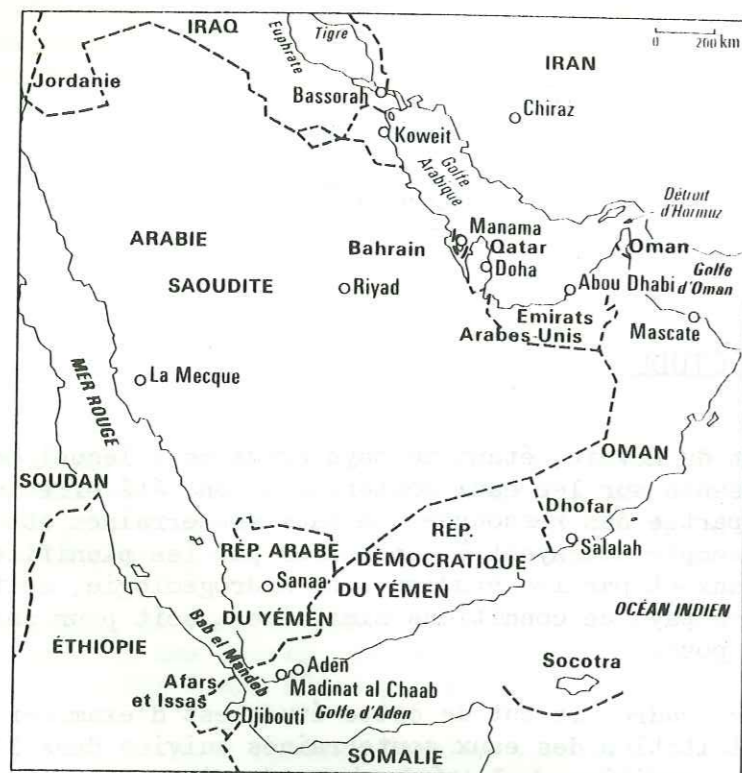


FIG. 1-1. — Localisation de Koweït

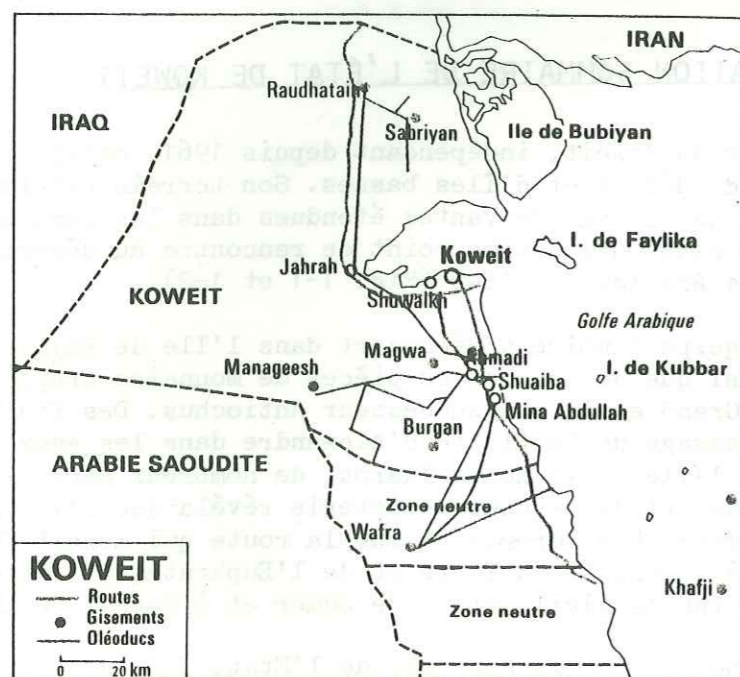


FIG. 1-2. — Carte de l'état de Koweït

En 1950, le Koweït avait 150 000 habitants. En 1957, leur nombre était monté à 206 473. En 1965, il atteignait 467 339, dont 50 % d'étrangers. En 1978, il approchait 1 200 000.

Environ 95 % du produit national brut de l'Etat vient du pétrole. Ses ressources en hydrocarbures sont estimées à l'heure actuelle, en ce qui concerne les réserves pétrolières à 10 milliards de tonnes, soit un siècle d'exploitation au rythme actuel de production, et à 920 milliards de mètres cubes de gaz, soit 60 années d'exploitation. L'industrialisation de la pêche entreprise en 1963, aboutit aujourd'hui à une importante exportation sur les Etats Unis. Engagée en 1961 avec la création de la zone industrielle de Shuaiba, l'activité industrielle ne fournit guère aujourd'hui que 3 % du PNB, comptant deux grands complexes de production d'eau et d'électricité, une cimenterie, un grand moulin, une raffinerie qui est l'une des plus modernes du monde, et deux usines d'engrais azotés. De très vastes projets sont à l'étude qui étendront l'activité de la pétrochimie et prévoient la production de soufre pour l'agriculture, de lubrifiants et d'emballages de plastiques (Denise 1976).

1.3. LES RESSOURCES EN EAU DU KOWEIT

1.3.1. HISTORIQUE

Du fait que Koweït est un pays aride avec une moyenne actuelle de 115 mm de précipitation, privé d'eau potable naturelle de surface, et dont les eaux souterraines sont saumâtres en majeure partie, le pays est donc l'un des plus pauvres du monde, en ce qui concerne les ressources naturelles en eau potable. Avant la fin du XIXe siècle, lorsque la population était peu nombreuse, on peut dire que le pays ne subissait pas de problème d'insuffisance d'eau. Des eaux potables, flottantes sur les eaux souterraines saumâtres étaient exploitées dans des puits peu profonds creusés à la main dans les dépressions topographiques où les lits des cours d'eau où s'infiltraient des eaux de pluie pendant l'hiver. De plus, 60 % des habitants avaient l'habitude de recueillir des eaux de pluie tombant sur les toits de leurs maisons, vers des citernes souterraines d'une capacité de 4 m³, construites spécialement pour les emmagasiner et les utiliser plus tard. Les Koweïtiens construisaient aussi de petites digues de sable afin d'intercepter les eaux de pluie allant vers la mer le long d'importants cours d'eau. Une grande partie de ces eaux était perdue par l'évaporation et par infiltration dans le sol, mais une partie des eaux infiltrées était recueillie pendant l'été par des puits peu profonds.

Le problème de l'eau parut pour la première fois au début du XXe siècle, lorsque la population augmentait, particulièrement pendant l'hiver de l'année 1907-1908, où les précipitations furent très maigres. Ce fait motivait l'un des propriétaires de bateaux à transporter, avec son bateau, de l'eau du Shott Al Arab qui se situe à 96,5 km au Nord de la capitale. En 1932, le nombre des bateaux "Boum" qui s'occupaient de cette activité augmenta à 49, et chacun transportait de 100 à 150 tonnes d'eau potable environ. En 1939, une société nationale fut établie pour régler

cette activité qui approvisionna Koweït des 4/5 de ses besoins en eau potable. En 1950, l'importation des eaux de Shott Al Arab s'est terminée finalement lorsque la KOC (Kuwait Oil Company) établit à Ahmadi une usine de distillation de l'eau de la mer d'une capacité de 300 000 litres par jour. Cette usine fournit 100 000 litres/jour à la ville de Koweït. En 1953, l'Etat mit en construction à Shuwekh, à quelques kilomètres de la capitale, un important complexe qui l'alimentait, en 1962, en courant électrique et en eau distillée à raison de 81 millions de litres chaque jour.

1.3.2. RESSOURCES ACTUELLES

L'Etat du Koweït se sert à l'heure actuelle de trois ressources en eaux principales:

- . les eaux de la mer,
- . les eaux souterraines
- . les eaux d'égouts.

1.3.2.1. LES EAUX DE LA MER

L'eau du golfe constitue la plus importante ressource en eau pour l'Etat du Koweït. Le Golfe Arabique est une ressource inépuisable d'eau potable grâce aux progrès dans les techniques de dessalement que le pays a pu mettre en oeuvre grâce à ses ressources en énergie. Bien que la technique de distillation de l'eau de mer fut introduite au Koweït en 1950, la percée sensationnelle fut faite en 1960 lorsque le Ministère de l'électricité et de l'eau mit en construction la première usine de dessalement par la technique de multi-stage flash distillation (MSF) marquant l'introduction du dessalement à grande échelle, pas seulement au Koweït mais aussi dans le monde entier. Bien que la technique du MSF ait été connue avant 1950, sa forme actuelle a été développée par le Professeur R.S. SILVER de l'Université de Glasgow, et adoptée par G. & J. WEIR. Co d'Ecosse (fig. 1-3) Par la réduction des tubages de transfert de chaleur qui sont les éléments les plus chers du système, le Professeur SILVER avait atteint deux buts: la réduction de moitié du coût de production de l'eau et la réduction du volume de l'usine d'une façon imprévue. En produisant de l'eau et de l'électricité, Koweït adopte le système à double but dans lequel la vapeur sous forte pression produite dans les chaudières est utilisée pour la production d'énergie dans les turbines, et la vapeur à basse pression qui sort des turbines est utilisée comme source d'énergie pour chauffer la saumure jusqu'à la température désirée. Par suite de l'accouplement de l'énergie et de la distillation, l'électricité et l'eau produites sont moins chères que celles provenant d'usines d'énergie et d'eau équivalentes. L'énergie électrique et la saumure concentrée effluente de quelques usines de distillation sont utilisées pour la production de sel commun, de chlore, d'acide chlorydrique, de soude caustique et de quelques autres sous-produits. Koweït, avec ses 29 usines de distillation d'une capacité totale de 463,334 millions de litres par jour en 1979, est le leader du monde pour la production de l'eau distillée. Le tableau 1-1 contient quelques données sur les usines actuelles et projetées de distillation. On constate que la production totale en eau distillée sera de 1226,474 milliard de litres par jour en 1985. En plus, Koweït surveille de près le développement du procédé de dessalement par osmose inverse. Ce procédé a l'avantage de dépenses réduites en énergie. Un système d'osmose inverse exige de 15 à 45 kwh d'énergie électrique pour la production de 4 542 litres d'eau potable à partir d'eau saumâtre et d'eau de la mer respectivement. La production de la

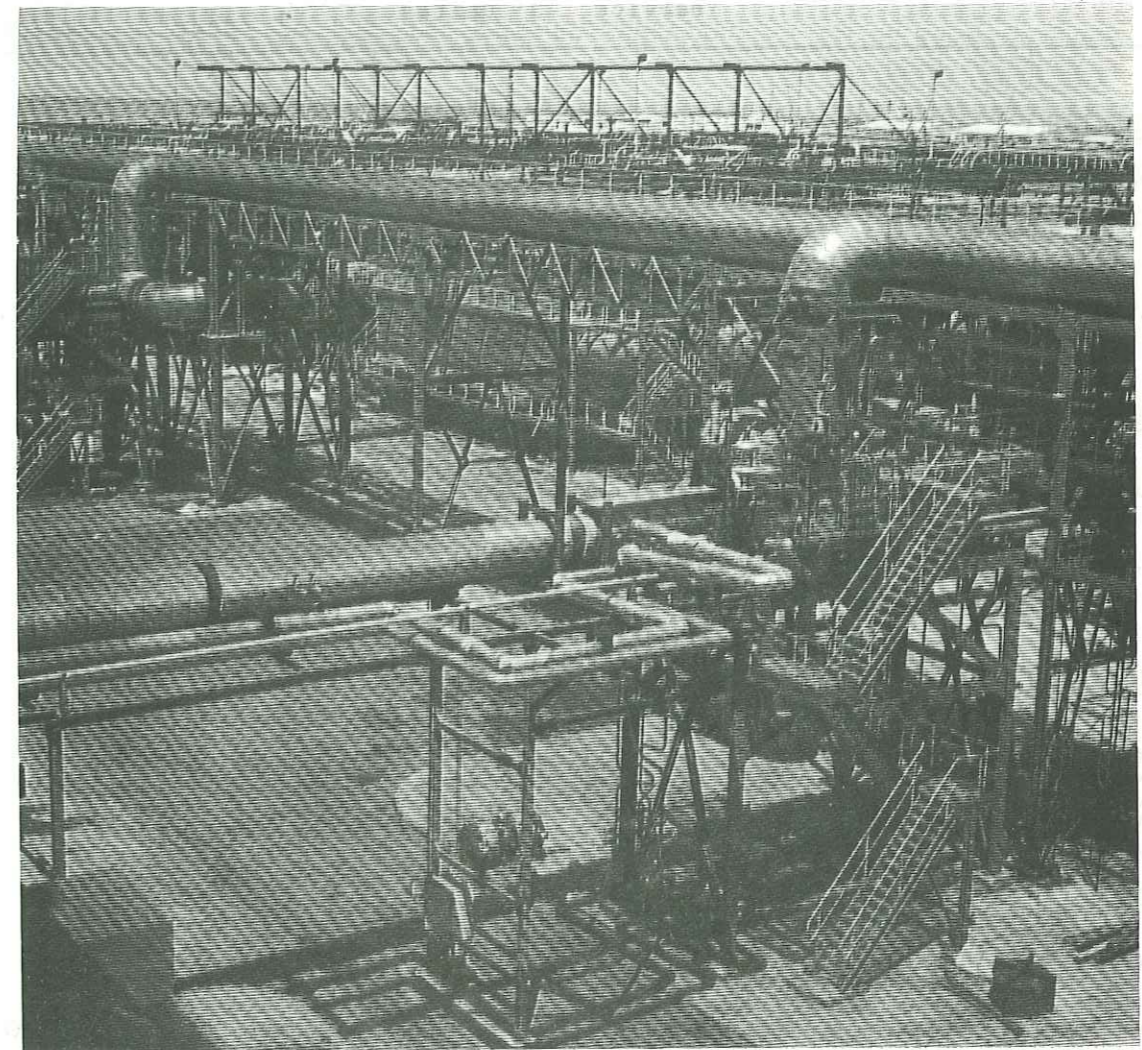


FIG. 1-3.—Usine d'énergie électrique et de distillation. Shuaiba-sud

Tableau 1-1

Usines Actuelles et Projetées de Dessalement

Usine	Fournisseur	Année de service	Nombre d'unités	Production/Unité m ³ /jour	Production Totale m ³ /jour
SHUWAIKH					
E1, E2	Weir-Westgarth	1960	2	4542	9085
F1, F2	" "	1965-1966	2	4542	9085
G1, G2	Westinghouse	1968	2	9085	18170
B1, B2	IHI	1968	2	9085	18170
A	"	1970	1	18170	18170
SHUAIBA NORD					
A1, A2, A3	Weir-Westgarth	1965-1966	3	4542	13627
B	Westinghouse	1968	1	9085	9085
C1, C2	IHI	1968	2	9085	18170
D	Alsthem	1971	1	22712	22712
SHUAIBA SUD					
A1, A2, A3, A4	Alsthem	1971-1972	4	22712	90850
A5, A6	IHI	1975	2	22712	45425
DOHA EST					
A1, A2, A3	IHI	1978	3	27255	81765
A5, A6, A7	IHI	1978	4	27255	109020
SHUWAIKH					
--	--	1983-1984	-	-	327060
DOHA EST					
--	--	1985	-	-	436080

même quantité d'eau potable exige 350 kwh d'énergie électrique dans les usines de MSF au Koweit. Néanmoins, quelques problèmes opérationnels restent à résoudre. Par exemple, la teneur en sels dissous, la turbidité et la température influencent considérablement les membranes d'osmose comme pour les eaux souterraines saumâtres et l'eau du Golfe. Donc il est nécessaire d'identifier les membranes et le système de prétraitement qui sont compatibles avec les conditions locales, avant qu'on puisse adopter le dessalement par osmose inverse à grande échelle.

1.3.2.2. LES EAUX SOUTERRAINES

Bien que la plus grande partie des eaux souterraines du Koweit soient saumâtres, elles constituent la deuxième ressource à l'échelle d'importance, et elles se divisent en quatre catégories selon leur teneur totale en sels dissous:

- (1) les eaux potables à moins de 1 200 ppm;
- (2) les eaux saumâtres de 1 200 à 10 000 ppm;
- (3) les eaux salées de 10 000 à 50 000 ppm;
- (4) les eaux saumurées à plus de 50 000 ppm.

A l'heure actuelle, l'exploitation de cette ressource se limite à la catégorie (1) et à la partie de la catégorie (2) qui contient moins de 7 500 ppm. Les eaux potables sont très limitées en quantité. Elles sont produites à raison de 6,8 millions de litres/jour, et elles seront épuisées dans vingt années environ. Elles flottent sur les eaux saumâtres sous les dépressions de Rhaudhatain et Umm-Al-Aish à la profondeur moyenne de 75 m dans quelques bancs de grès du Pléistocène. Leur teneur en sels dissous varie entre 300 et 1 200 ppm et leur usage est presque limité à l'approvisionnement en eau potable, au Koweit nord, d'Al-Abdally. Les eaux souterraines saumâtres sont également en quantités limitées. Elles sont extraites à raison de 730 millions de litres/jour. Le rabattement des nappes dans les champs des puits A, B, C, D, E est prévu comme devant être de 60-90 m dans quelques cinquantes ans.

Le rabattement des nappes dans le champ de puits de Sulaibiya a déjà atteint 60 m environ.

Les eaux saumâtres se trouvent dans les formations géologiques du groupe du Koweit et du groupe de Hasa qui consistent en sables, graviers, grès, calcaires, argiles et silts dont l'âge varie du Pléistocène à l'Eocène, la profondeur variant de quelques mètres à 480 m environ.

Les eaux saumâtres souterraines sont utilisées en premier lieu pour l'irrigation des fermes et des jardins publics et privés. Elles sont aussi mélangées avec les eaux distillées à raison de 10 à 20 % pour rendre ces dernières agréables pour la consommation humaine. La figure 1-4 montre la situation des champs de puits. On constate qu'ils sont concentrés dans les lieux où se trouvent les eaux souterraines à teneur totale en sels dissous inférieure à 10 000 ppm. Le tableau 1-2 contient quelques données sur la capacité de production, les teneurs totales en sels dissous et l'espérance de vie des champs de puits existants.

On constate que la capacité courante de production est de 737 millions de litres/jour. Le tableau 1-3 contient quelques données sur les régions où on peut construire des champs de puits additionnels pour faire face à la demande en eau à l'avenir. On constate que la quantité additionnelle de 466 millions de litres/jour peut être produite à partir de régions portant ainsi la capacité

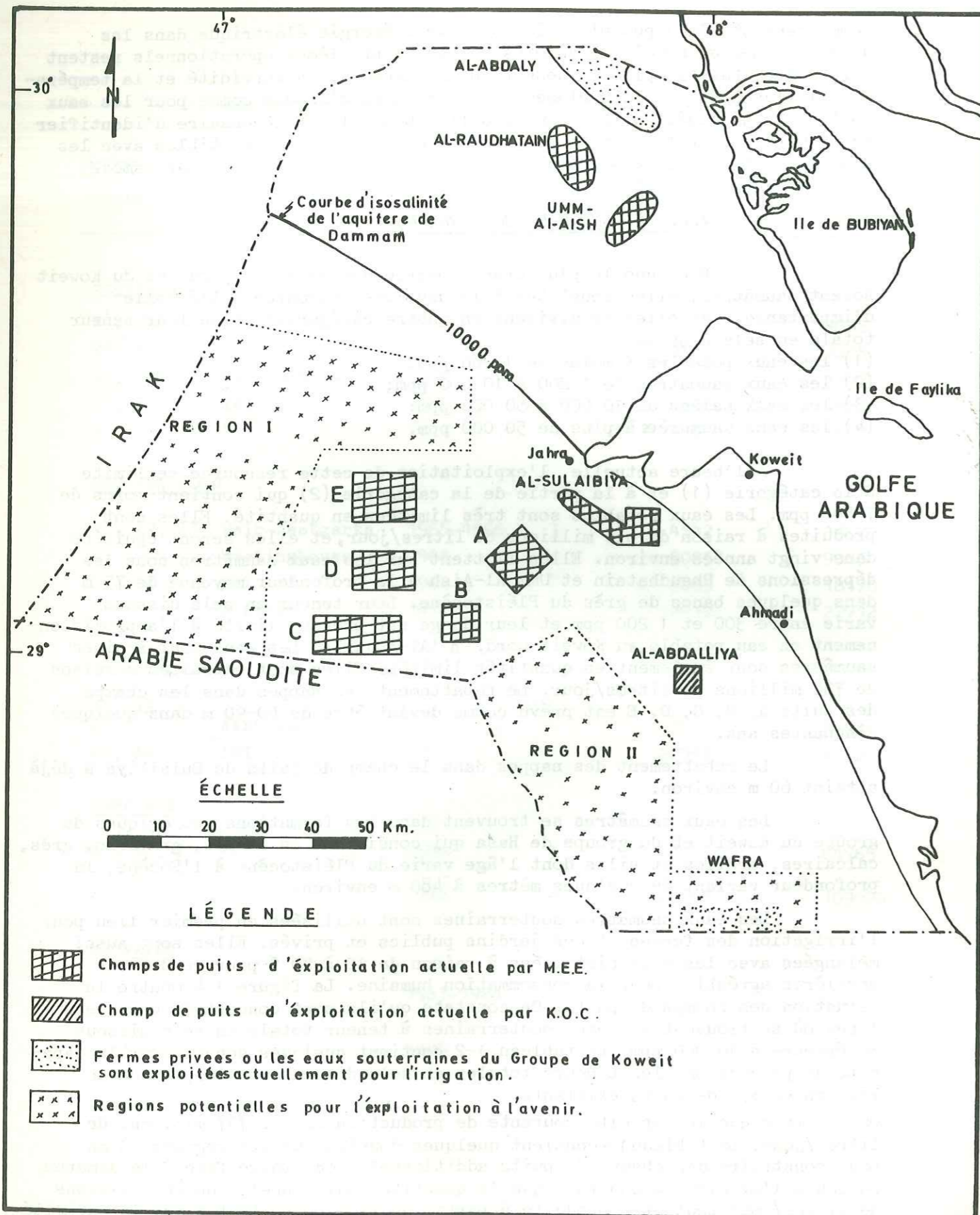


FIG. 1.4.—Champs de puits et régions d'exploitation actuelle et potentielle des eaux souterraines au Koweït.

TABLEAU 1-2
CHAMPS DE PUIXS EXPLOITANT LES EAUX POTABLES ET SAUMÂTRES

Nom du champ	Date du commencement du captage	Puits du captage		Aquifères	Capacité du captage en million litres/jour	Concentration totale en sels dissous en ppm	Espérance de vie en ans	Remarques
		Forés	Existants					
A (Shigaya)	1972	13	13	Groupe de Koweït et Formation de Damman	36	3000-4000	Plus de 50	Exploité par le Ministère de l'Électricité et de l'Eau.
B "	1975	16	16	Formation de Damman	36-45	3000	"	"
C "	1975	32	32	"	73-91	"	"	"
D "	1979-1980	24	24	"	55-64	3000-4000	"	"
E "	1979-1980	30	30	Groupe de Koweït et Formation de Damman	68-77	3500-5000	"	"
Sulaibiya	1954	136	118	Formation de Damman	55-91	4000-7000	Plus de 25	"
Raudhatain et Umm-Al-Aish	1963	52	26	Les parties saturées supérieures du Groupe de Koweït	6,8	500-1200	Plus de 20	"
Al Abdalliya	1941	27	10	Formation de Damman	27	3500-4500	Plus de 25	Exploité par KOC
Al Abdally	1960	200	200	Groupe de Koweït supérieur	91-136	3000-8000	Plus de 15	Exploité pour l'irrigation des fermes privées.
Wafra	1960	340	340	Groupe de Koweït	181-273	5000-8000	"	"

REGIONS POTENTIELLES POUR L'EXPLOITATION DES EAUX SOUTERRAINES SAUMÂTRES

Nom de la Region	Aquifères	Production Estimée million L/jour	Teneur Totale Estimée en Sels dissous ppm	Espérance de vie ans	Remarques
I	Groupe de Koweït et Formation de Dammam	159-182	3500-5000	plus de 25	à étudier en détail
II	Formation de Dammam	136	3500-6000	plus de 25	-
Wafra	Formation de Dammam	136-182	4500-6500	plus de 25	exploré et étudié en détail.

totale de la production potentielle connue à partir des eaux souterraines du pays à 1 200 millions de litres/jour environ. On discutera en détail ce sujet dans les chapitres suivants et on se contente ici de mentionner que les limites de l'exploitation sont l'empiètement des eaux saumâtres en ce qui concerne les eaux potables de Raudhatain, et le rabattement de quelques 60 - 90 m environ du niveau de l'eau en ce qui concerne les eaux saumâtres d'autres champs de puits.

1.3.2.3. LES EAUX D'EGOUTS

Bien que l'usine de traitement des eaux d'égouts fut destinée à la capacité de 1 000 millions de litres/jour, à l'heure actuelle, elle ne traite que 40 millions de litres/jour parce que seulement une partie de la cité est annexée au système de drainage. Cette usine sera élargie pour traiter 1 500 millions de litres/jour en 1985. L'effluent du traitement secondaire est utilisé entièrement pour l'irrigation. Trois usines additionnelles ont été dessinées pour qu'elles soient complétées en 1980.

Il est prévu que Koweït consommera plus de 2 064 millions de litres/jour en 1990. Soixante dix pour cent de cette eau sera recueillie par le système de drainage.

La moyenne annuelle des précipitations sur la surface agglomérée de la ville de Koweït est de 18 170 millions de litres/jour. Ce chiffre sera doublé à brève échéance. A présent un réseau conduit le ruissellement de surface des chaussées à la mer (ALNASSER, S.A. 1978).

1.3.3. AUTRES RESSOURCES EN EAUX

On vient d'exposer les ressources actuelles en eau qui sont mises à l'exploitation à un certain degré. Il y a d'autres ressources à considérer: les eaux du Chott Al Arab, les eaux de ruissellement des surfaces rurales et les eaux souterraines salées.

1.3.3.1. LES EAUX DU CHOTT AL ARAB

Les deux rivières du Tigre et de l'Euphrate se rencontrent près de la ville de Qurna en Irak et s'écoulent ensemble dans un seul grand cours d'eau qui est le Chott Al-Arab qui se jette dans le Golfe Arabique près de la ville de Fau, toujours en Irak (Fig.1-1). Ce grand cours d'eau a 180 km de longueur, 1 255 m de largeur (1,5 km près de son embouchure) et de 9 à 18 m de profondeur. La quantité d'eau qu'il conduit chaque année au Golfe Arabique est estimée à 70 milliards de mètres cubes. Le 11 mai 1964, un accord a été passé avec le gouvernement de l'Irak pour le pompage de 454 millions de litres/jour depuis le Chott Al-Arab jusqu'à Koweït. Plusieurs maisons ont été appelées en consultation pour faire les études nécessaires. Toutes les études indiquèrent que le projet était faisable et comportèrent des projets détaillés, mais ils n'ont jamais été exécutés. En 1979, un accord nouveau a été passé avec l'Irak pour augmenter la quantité d'eau jusqu'à 1 364 millions de litres/jour. L'exécution de ce projet est en voie d'étude.

1.3.3.2. LES EAUX DE RUISSELLEMENT DES SURFACES RURALES

En ce qui concerne les eaux de ruissellement des surfaces rurales, il n'y en a pas de façon permanente par suite du climat aride. Cependant, de Novembre à Avril, quelques dépressions topographiques se remplissent d'eau de pluie et la retiennent pour quelques semaines. La plus grande partie de ces eaux s'évapore. Un projet pour la collecte d'un maximum de 22,71 millions de litres/jour de ces eaux de pluie, afin de les emmagasiner dans les nappes souterraines à travers une fosse construite spécialement et recouverte de graviers, a été exécuté en 1964 dans la plus grande dépression qui est celle de Raudhatain. Une moyenne annuelle de 643,45 millions de litres d'eau de pluie tombe sur la dépression. Parsons Corporation a estimé que 507,19 millions de litres/jour peuvent s'infiltrer à travers cette fosse.

1.3.3.3. EAUX SOUTERRAINES SALEES

L'exploitation actuelle de l'eau souterraine se limite à l'eau qui contient moins de 6 500 ppm de teneur totale en sels dissous. Néanmoins, avec le progrès dans les techniques de dessalement, en particulier la technique d'osmose inverse, les eaux souterraines qui dépassent cette limite sont dignes d'être considérées et étudiées afin de s'en servir à l'avenir.

1.3.3.4. AUTRES TECHNIQUES

Il y a encore d'autres techniques à considérer pour le rehaussement des réserves en eaux. Citons comme exemple, la technique d'augmentation des pluies, l'importation de l'eau et le transport par les pétroliers qui retournent normalement vides avant qu'ils soient rechargés de pétrole, l'usage des icebergs comme ressource en eau et la récolte des rosées et des brouillards.

1.3.4. LES RESSOURCES DISPONIBLES EN FACE DE LA DEMANDE

Le premier recensement de la population a été fait en 1957 où elle était de 221 840 âmes dont 45,8 % d'étrangers. Au cours des 13 ans qui suivirent la population a augmenté à raison de 10-12 % et en 1970, elle était de 766 390 âmes dont 53,3 % d'étrangers. Depuis 1970, des règles sévères sur l'immigration ont été établies, et en conséquence, l'augmentation de la population a décliné jusqu'à 6,1 % selon le recensement de 1975 (Fig. 1-5). Depuis 1975, la commission de planification a utilisé 3 taux d'augmentation de population (3,5 %, 5 % et 6,5 %) dans ses prévisions pour la période 1976-2000 en employant la formule $P_n = P_0 (1+r)^n$ dans laquelle P_n = population prévue, P_0 = base de population (population de l'an 1976), r = taux d'augmentation et n = nombre d'années s'écoulant. La Figure 1-5 montre graphiquement les populations prévues en employant les trois taux mentionnés ci-dessus.

La moyenne de la capacité totale de la production potentielle connue d'eaux souterraines saumâtres du Koweït est de 1 200 millions de litres/jour (tableaux 1-2 et 1-3). On constate que seulement 825 millions de litres/jour peuvent être produits par le Ministère de l'Electricité et de l'Eau pour faire face aux demandes en eau pour les mélanges avec

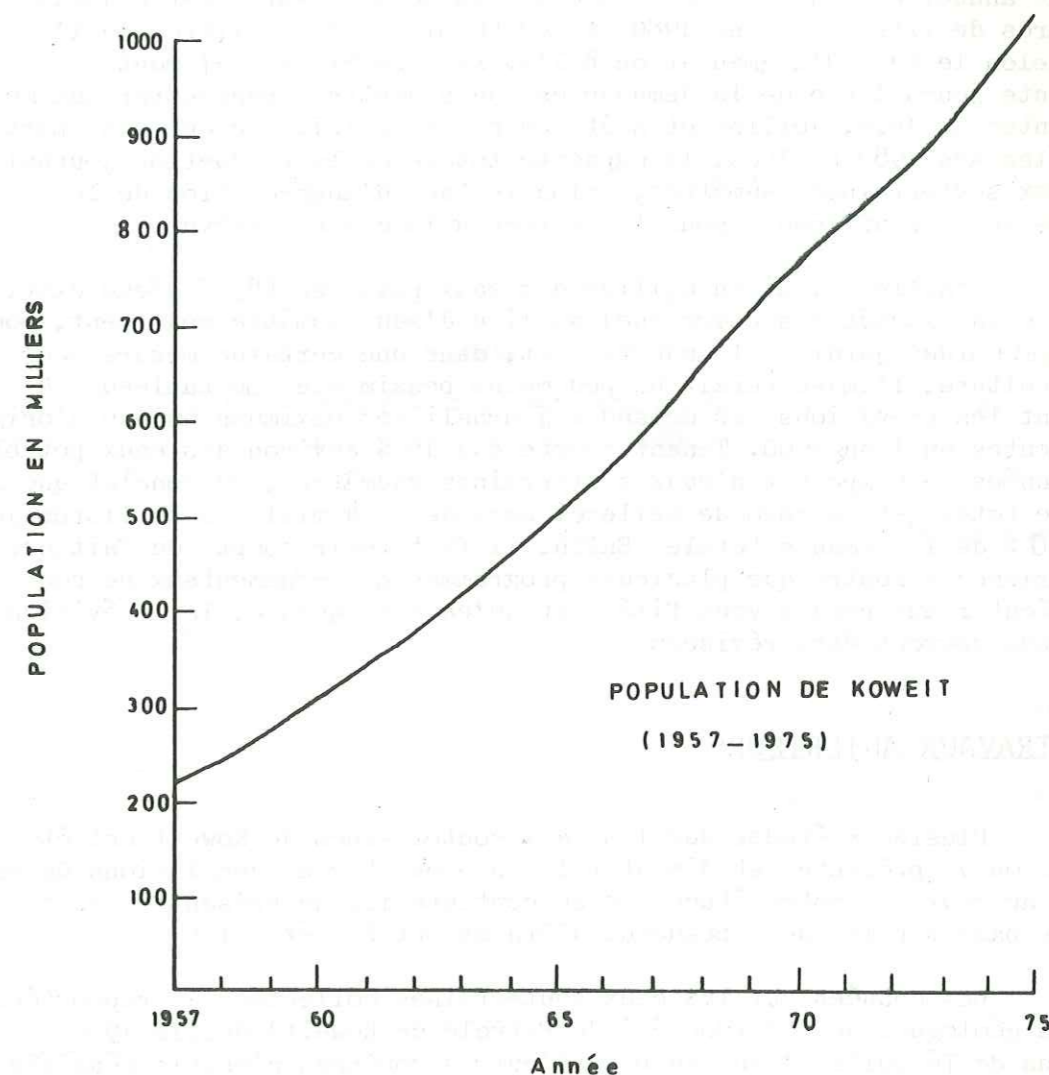


FIG. 1-5.—Population de Koweït, 1957-1975

les eaux distillées, l'irrigation des jardins, l'agriculture et l'industrie. La prévision de la demande en eau saumâtre est très difficile par suite de l'existence de trois variables séparées: les trois taux possibles d'augmentation de la population, le taux d'augmentation de la consommation par tête et le taux de développement de l'agriculture. En conséquence, les graphiques suivants qui montrent les prévisions de demande totale ne peuvent qu'être approximatifs. La Figure 1-6 montre la demande annuelle totale. On constate que la demande varie entre 158,99 milliards de litres en l'an 1976 et 908,50 milliards de litres en l'an 2000 selon le taux d'augmentation à l'avenir. La Figure 1-7 montre la pointe journalière de la demande en eau saumâtre à rencontrer aux mois de pointes de Juin, Juillet et Août. On constate ici, que quelque part entre les ans 1982 et 1985, la capacité totale de la production journalière des eaux souterraines saumâtres, selon le taux d'augmentation de la demande sera insuffisante pour faire face à la demande prévue.

D'ailleurs, si on utilise des eaux potables (85 % d'eau distillée + 15 % d'eau saumâtre souterraine) au lieu d'eau saumâtre seulement, pour l'irrigation des jardins, l'industrie et, dans une certaine mesure pour l'agriculture, l'image serait un peu moins pessimiste. Le tableau 1-4 contient les prévisions des demandes journalières maximums en eau d'origines différentes en l'an 2000. Tenant compte que 15 % environ des eaux potables mentionnées se composent d'eaux souterraines saumâtres, on conclut que la demande totale et maximum de celle-ci sera de 734 millions de litres/jour soit 20 % de la demande totale. Enfin, il faut tenir compte du fait que l'expérience a montré que plusieurs programmes gouvernementaux ne sont pas exécutés aux rendez-vous fixés, et qu'en conséquence, les prévisions ci-dessus devront être révisées.

1.4. TRAVAUX ANTERIEURS

Plusieurs études sur les eaux souterraines de Koweït ont été faites. On va présenter et discuter les découvertes et conclusions de ces études au cours de notre étude. On se contente ici de présenter les travaux de base sur lesquels beaucoup d'études ont été établies.

Les données sur les eaux souterraines collectées et rapportées par les géologues de KOC (Société de Pétrole de Koweït) depuis 1936 sur plus de 76 puits d'eau, en plus d'autres sondages d'essais réalisés pour obtenir l'eau nécessaire pour les recherches pétrolières, bien qu'elles aient été préparées par des géologues plutôt que par des hydrogéologues, donnent une idée très générale des aquifères principaux du pays. Citons ici le rapport de D.I. MILTON et C.C.S. DAVIES en 1961, qui consiste en 12 pages, sur les ressources en eau de Koweït et leur utilisation.

Après la découverte par hasard de l'eau souterraine potable de Raudhatain, pendant la construction de la route de Koweït-Bassoura en 1960, le Ministère de l'Electricité et de l'Eau appela la Parsons Corporation de Los Angeles (Etats Unis) pour évaluer cette eau et l'exploiter. En plus, Parsons Corporation fut chargé de faire l'exploration de l'eau souterraine de l'Etat entier.

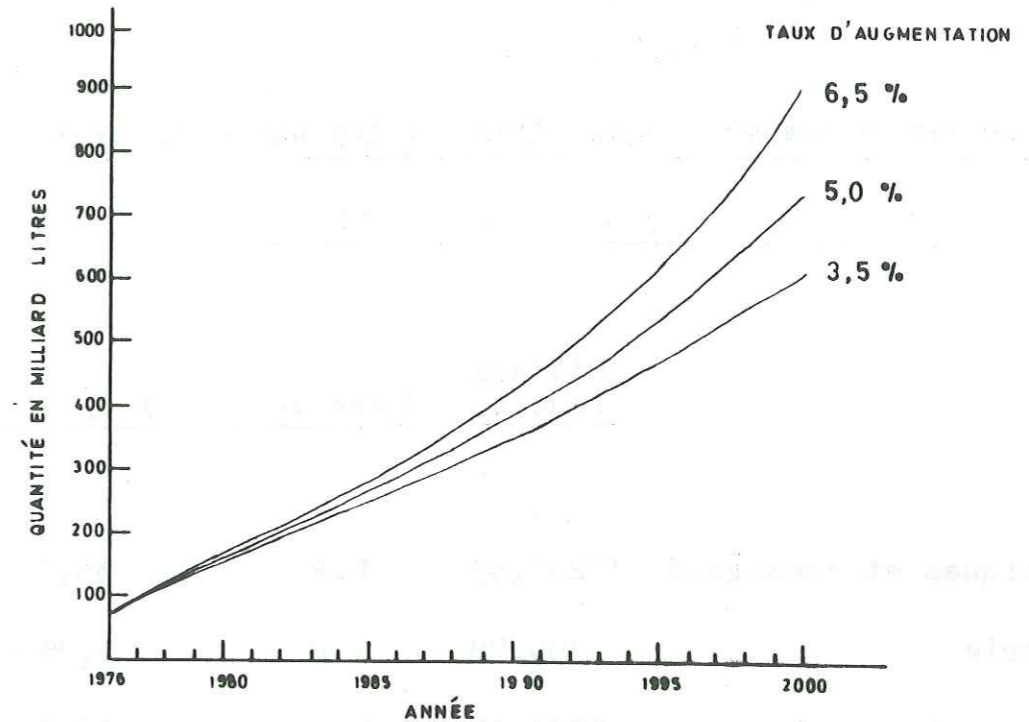


FIG. 1-6.—Demande annuelle totale pour l'irrigation et la population, 1976-2000

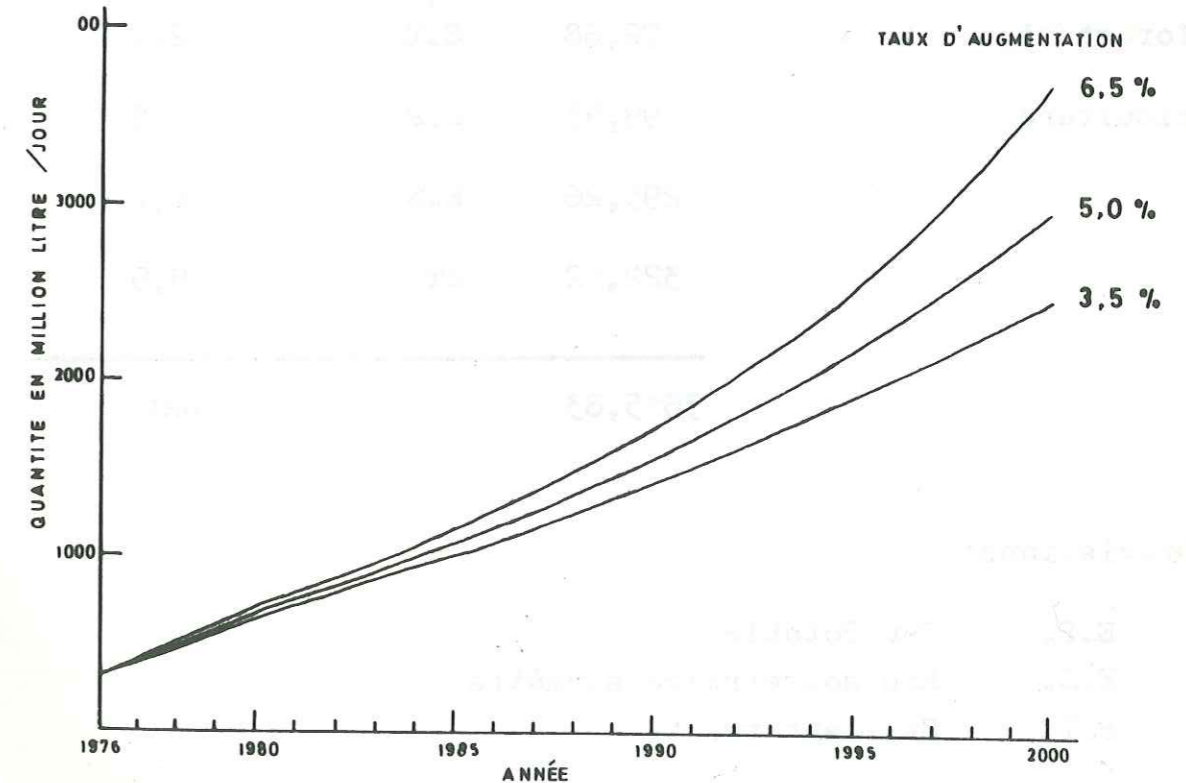


FIG. 1-7.—Demande journalière de pointe, 1976-2000
(d'après Gabazard, 1977)

Tableau 1-4

PREVISIONS DES DEMANDES JOURNALIERES EN EAU DES RESSOURCESDIFFERENTES PENDANT L'ÉTÉ DE L'ANNÉE 2000

	<u>Million L/jour</u>	<u>Ressource</u>	<u>% de totale</u>
- Domestiques et commerce	1285,53	E.P	35,5
- Industrie	190,78	E.P	5,3%
- Jardins privés	1031,15	E.P	28,5
- Jardins publics	317,97	E.P	8,8
- Afforestation	72,68	E.T	2,0
- Agriculture	99,93	E.P	2,8
	295,26	E.S	8,2
	322,52	ET	8,9
	<hr/>		
	3615,83		100

Abreviations:

E.P.	Eau Potable
E.S.	Eau souterraine saumâtre
E.T.	Effluent traité

Ses travaux qui ont duré quatre ans et ont comporté le forage de plus de 200 puits et sondages d'essais, sont rapportés dans trois tomes de quelques trois cents pages.

En 1966, le Ministère de l'Electricité et de l'Eau créa la section des eaux souterraines (SES) qui depuis ce temps-là s'est occupée de toutes les activités de recherche et d'exploitation des eaux souterraines à Koweït. Ses travaux jusqu'à l'heure actuelle comprennent le forage de plus de 260 puits et sondages d'essais, soit par ses propres équipes, soit par des entrepreneurs. Au cours de ses travaux, SES invitait plusieurs savants et consultants pour bénéficier de leurs avis parmi lesquels on cite:

- THOMAS, H.E. de USGS qui écrivit en 1966 un rapport de 13 pages, intitulé "Le programme des ressources en eau de Koweït";

- BURDON D.J. de OAA écrivit en 1966 un rapport de 59 pages intitulé "L'investigation de l'aquifère calcaire de Dammam au Koweït";

- MOID AHMAD de OAA écrivit en 1969 un rapport de 48 pages intitulé: " L'étude des eaux souterraines de Koweït";

- HANTUSH M.S. écrivit un rapport de 18 pages en 1969 intitulé: "Memorandum sur le projet des eaux souterraines de Shigaya".

Les travaux d'autres chercheurs qui ont contribué à l'étude des ressources en eaux souterraines de Koweït, en plus de ceux mentionnés ci-dessus, seront présentés et discutés au cours de notre étude.

CHAPITRE II - TOPOGRAPHIE

La topographie de Koweït s'est formée sous l'influence de plusieurs facteurs: la nature et la structure des couches de surface et sous-jacentes, les mouvements tectoniques qui sont relativement récents et l'action de la température, des vents et des précipitations.

Le soubassement du Golfe Arabique s'est mis en place principalement pendant l'orogénèse du Zagros qui est du Plio-Pleistocène (P.KASSTER). Bien que le relief topographique de Koweït soit généralement bas et plat il reflète bien la morphologie des couches géologiques sous-jacentes comme le montrent quelques dépressions, crêtes et ondulations douces de la surface du sol. De grandes sections de celle-ci peuvent être considérées comme des parties d'un vaste pédiment formé pendant les temps pluvieux du Pleistocène. Des sables ou des graviers (détachés ou faiblement consolidés) ont été déposés par des ruisseaux chargés de débris qui probablement proviennent de l'Ouest ou du Nord Ouest.

La surface du sol de Koweït penche généralement vers le Nord Est avec une pente moyenne de 1/500. Elle s'élève du niveau de la mer au bord du Golfe à une altitude de 285 m au coin extrême sud-ouest du pays (Fig.2-1).

On peut subdiviser les traits topographiques principaux de Koweït en quatre catégories: les reliefs saillants, les vallées et dépressions, les reliefs éoliens et les îles et rivages (Fig.2-2).

2.1. LES GRANDS TRAITES DE LA TOPOGRAPHIE

2.1.1. LES COLLINES CONIQUES ET ALLONGEES

Jebel Sanam se situe immédiatement au Nord de la frontière Irako-Koweïtienne. C'est une colline ovale, avec un diamètre maximum de 1 520 m à sa base qui s'élève à 153 m. Il est le point de repère le plus remarqué dans la région, et il est interprété comme un dôme de sel en profondeur (OWEN & NASSR). Les affleurements de surface sont subdivisés en deux zones principales:

- (a) un bord circulaire extérieur de sédiments mio-pléistocènes inclinés,
- (b) un noyau intérieur de sédiments considérablement perturbés et rompus qui sont composés en premier lieu de dolomies dures et bréchiques, de gypse et de marnes dures, rougeâtres et vertes.

Un dyke altéré de dolérite était récemment visible dans une carrière. Aucun fossile n'a été découvert dans cette zone, et par conséquent la datation de ces sédiments reste une affaire de tendance personnelle. L'idée règne qu'ils sont probablement jurassiques.

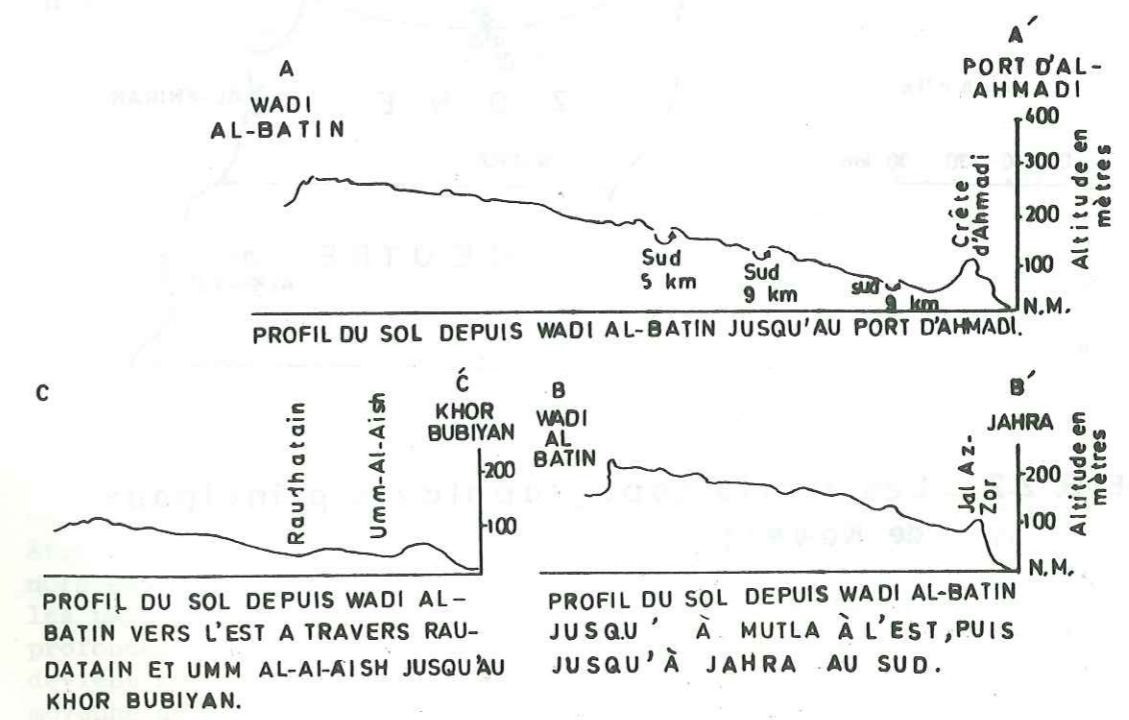
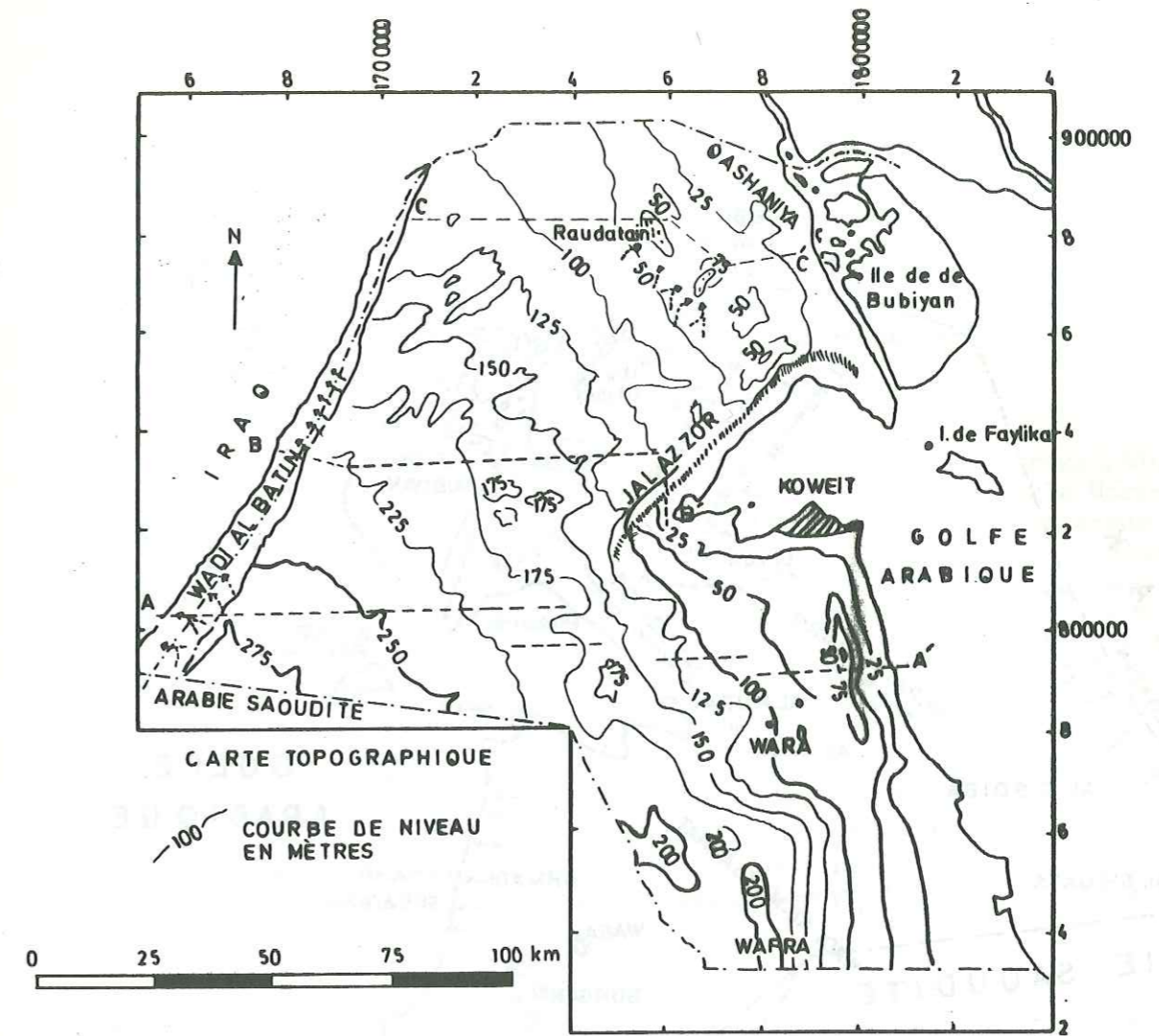


FIG. 2-1.— Carte topographique et quelques profils du sol.

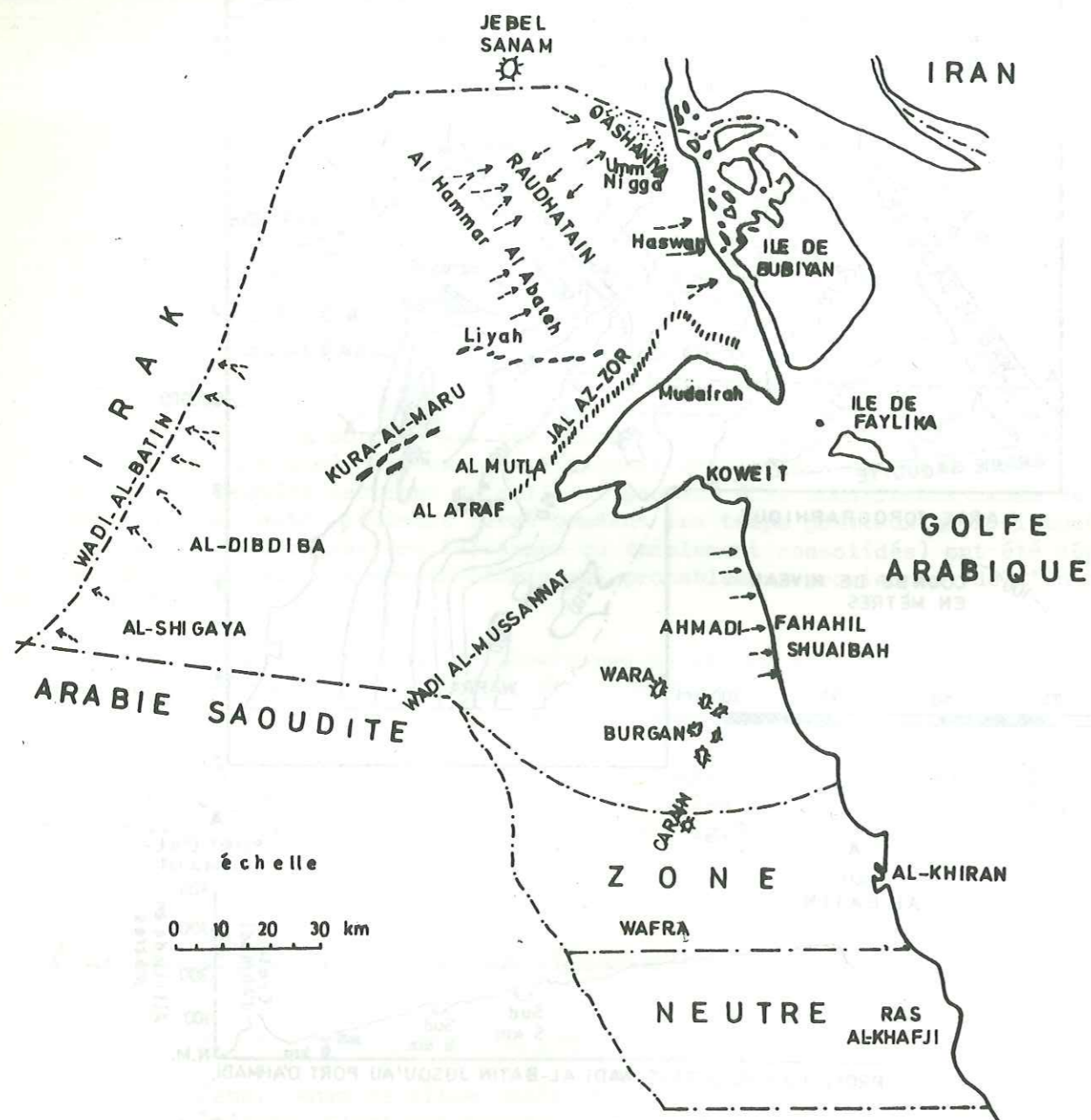


FIG. 2-2.— Les traits topographiques principaux de Koweit.

Les collines de Wara, Burgan, Carain et de Madaniyat forment de puissants reliefs. La colline de Wara est la plus frappante de celles-ci et elle a un relief de 30 m. Les collines de Burgan ont des formes généralement circulaires à leur base, et montent à 46 mètres environ au-dessus de la plaine environnante. Les collines de Madaniyat et de Carain sont beaucoup moins rondes. Ces collines se composent généralement de roches relativement dures, telles que les grès et calcaires de Wara.

2.1.2. LES CRETES ET LES CUESTA

L'escarpement de Jal Az Zor est l'un des traits topographiques principaux de l'Etat de Koweit. Il se dirige d'Al Atraf vers le Nord-Est à Al Bahra, sur une distance de 60 km environ. Cet escarpement borde le rivage du Nord Ouest de la baie de Koweit et s'élève à une hauteur maximum de 145 m au-dessus du niveau de la mer. D'Al Atraf à Bahra, l'escarpement suit un tracé rectiligne vers le Nord Ouest. Près de Bahra, le Jal Az Zor tourne vers l'Est et vers le Sud-Est. Les terrasses côtières penchent vers la baie. Seuls les 30 à 40 m supérieurs de l'escarpement ont des flancs raides. Derrière l'escarpement la surface du sol s'enfonce doucement vers une dépression peu profonde. La base de l'escarpement est couverte par des sédiments meubles, et montre une séquence de sables et de graviers du groupe de Koweit, qui contient un mince horizon équivalent de la formation du Fars inférieur du Miocène. Le relief topographique de cet escarpement qui est plutôt un promoteur, suggère que son origine est liée à la présence d'une faille (OWEN & NASSR), ou plus probablement d'une structure anticlinale (FOX).

La crête d'Al Ahmadi est une élévation douce de 137 m environ séparant la plaine de Burgan et la côte du Golfe. Cette crête, et plusieurs autres crêtes, moins prononcées et parallèles à la côte sud de Koweit, correspondent aussi aux structures souterraines. Elles semblent reliées à des mouvements géologiques récents (FUSHS & al., OWEN & NASSR).

Au Nord et à l'Ouest de Koweit la surface du sol est couverte par de vastes plaines de graviers. Des crêtes parallèles et coiffées elles aussi de graviers se dirigent vers le Nord Est. Bien que les altitudes de celles-ci ne dépassent pas quelques pieds par rapport au niveau général de la surface du sol, elles sont des traits caractéristiques de cette région. Ces crêtes sont privées de végétation, mais on trouve un peu de végétation dans les dépressions sableuses qui les séparent. Citons comme exemple les crêtes de Kura Al Naru, Shagat Al Jilib, Al Layah et celle de Al Shagaya.

2.1.3. LES VALLEES ET LES DEPRESSIONS

La vaste vallée peu profonde du Wadi Al Batin marque la frontière ouest du pays et constitue sa seule dépression majeure. Cette vallée peut être due à une subsidence périodique le long d'une ligne de faille profonde nord-est - sud-ouest, qui peut être suivie sur de longues distances dans les pays voisins. Au centre de Koweit, le Wadi Al Batin se trouve à une profondeur de 50 m au-dessous du niveau du plateau, mais la dénivellation devient moins importante vers la frontière irakienne. Il a une largeur moyenne de 6 à 8 km. Seules les parties supérieures de ses pentes sont décapées par le drainage. Quelques ravins qui ont des parois raides de 4,5 à 60 m de hauteur n'existent que dans l'extrême Sud-Ouest de Koweit.

Dans ceux-ci quelques petites crêtes peuvent s'observer sur de courtes distances. La vallée du Wadi Al Mussannat qui traverse la frontière au Sud près de Managish est moins prononcée, et elle a probablement une origine identique à celle-ci.

Des dépressions topographiques peu profondes, localement appelées "Khabra", sont répandues dans le pays, comme celles de Al-Abdally, d'Umm Kadir, d'Umm Omarat, de Mahzoul, d'Umm Omarat Al Rakay, d'Al Matila et d'Al Atraf. Ces dépressions sont couvertes par une couche de silt presque imperméable, et elles forment occasionnellement des lacs de playas pendant l'hiver où elles servent de sources temporaires d'eau pour les bédouins.

Au Nord et à l'Ouest du pays, se trouve un système de drainage relativement dense qui se compose de petits systèmes de vallées peu profondes qui se déversent vers le Nord-Est et la frontière Irakienne vers une dépression peu profonde, celle de Raudatain. Les dépressions de Raudatain, s'de Umm Al Aish et Raudatain sud qui ont des superficies de 725 km², 790 km² et 544 km² respectivement, font partie d'un grand bassin de drainage mal divisé avec une superficie totale de 2 059 km². Les lignes de partage entre ces bassins sont assez bien définies dans les cours supérieurs, mais elles sont floues et discontinues dans les parties basses. Le relief maximum dans le bassin est de 82 m environ, mais le relief local à l'intérieur des dépressions est de moins de 46 m. Des oueds se développent dans le tiers inférieur du bassin et se terminent en éventails incomplets et peu marqués de silts et de sables. Les portions actives de l'oued peuvent comprendre un chenal de 18-30 m de largeur, creusé de 0,6 à 2 m en-dessous de la surface environnante et marqué par des sables grossiers. Le chenal de l'oued est normalement incisé à travers les phtanites "gatch" communes dans d'autres zones. L'oued s'écoule vers la dépression du centre du bassin et inonde les zones de playas qui se trouvent le long de l'axe de la dépression. La plus large de celles-ci, au Nord de Koweït a été observée quand les zones inondées couvraient une superficie de 1 km². Plusieurs autres playas sont fréquemment inondées par le ruissellement des zones imperméables adjacentes. Au Raudatain et Umm Al Aish elles s'étendent en dépressions réniformes qui ont de 5 à 10 m de long et dont la superficie totale est de 26 km² (Fig. 2-3).

La dépression de Raudatain a une altitude de 35 m. La surface du sol y monte vers l'Ouest à raison de 1,76 m par km. et vers l'Est à raison de 2,94 m par km. environ. Sa playa principale et plusieurs autres playas s'étendent du Sud vers le bassin de Raudatain Sud, sans aucune ligne de partage distincte. La dépression d'Umm Al Aish contient plusieurs playas plus petites. L'altitude moyenne est de 26,8 m. Les pentes ascendantes sont de 2,4 m et d'un peu plus de 2,4 m par km. vers l'Ouest et vers l'Est respectivement.

Au Nord-Est de Koweït, à l'Est de la route de Bassoura, le ruissellement se fait vers la côte de Khor Al Sabiya. Le mode de drainage devient plus obscur dans le Sud Ouest de Koweït. C'est seulement autour de Al Dibdiba que la direction de drainage nord-est peut être reconnue dans des vallées peu développées. Dans la partie centrale de Koweït et dans la partie de la zone neutre, quelques oueds existent.

Dans les zones côtières, de grandes tâches salées se développent sous l'influence des eaux souterraines marines et sous l'influence des inondations occasionnelles, comme celles de Khor Al Sabiya, Al Khiran et Khor Al Khafji.

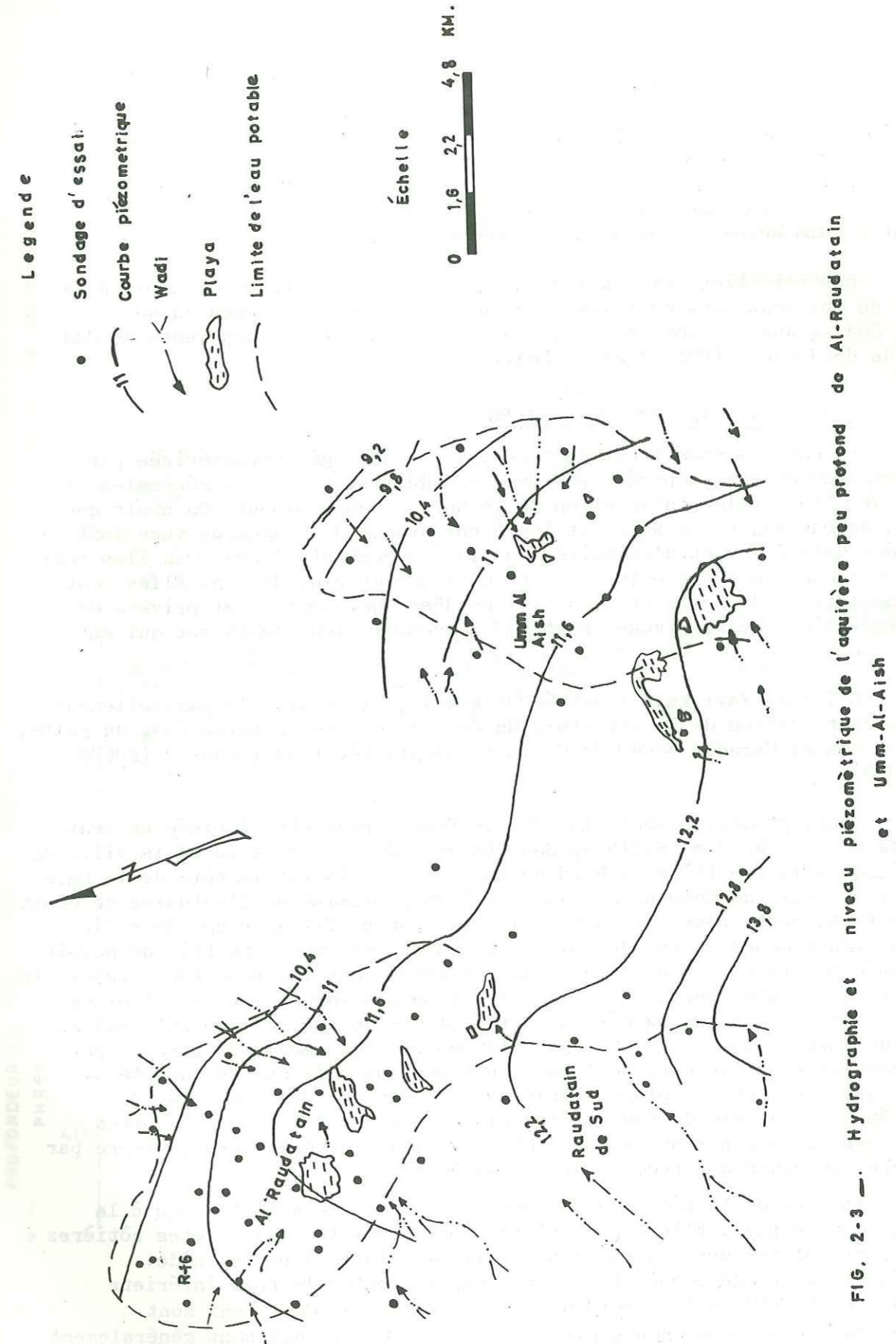


FIG. 2-3 — Hydrographie et niveau piézométrique de l'aquifère peu profond de Al-Raudatain et Umm-Al-Aish

2.1.4. LES RELIEFS ÉOLIENS

Bien que de vastes parties de la surface du sol de Koweït soient couvertes par des couches minces de sables éoliens, les vrais sables de dunes n'existent que dans une zone très limitée au Nord Est de Koweït, près de la frontière Irakienne. Quelques dunes en forme de croissant qui se trouvent à Umm Negga ont jusqu'à 25 m de hauteur.

Des striations et des linéations dans la couverture de sable à la surface du sol sont nettement visibles sur les photos aériennes du Nord Est, du Sud et dans la zone neutre, indiquant la dominance des vents de Sud Est et de Nord Ouest (FUSH & al. 1968).

2.1.5. LES ILES ET LES RIVAGES

La côte de Koweït est de type bas et submergé, caractérisée par la présence de criques séparées par des promontoires. Elle est généralement plate, car elle est la continuation de la surface du pédiment. On croit que les îles de Bubiyan et de Warba et leurs entourages de plages de vase sont des dépôts deltaïques et d'estuaires du système Euphrate-Tigre. Ces îles sont plates et aucune d'entre elles n'a une altitude de plus de 3 m. Elles sont des accumulations d'argile et de silt, inondées quelques fois et privées de toute végétation. Leurs rivages sont indistincts le long de la mer qui est peu profonde.

L'île de Faylika, à l'entrée de Koweït, est considérée partiellement comme la continuation de la structure de Jal Az Zor. Les petites îles du golfe, Kubbar et Umm Al Maradem consistent en sédiments récifaux remaniés (FUCHS & al. 1968).

Géomorphologiquement, la côte de Koweït peut être divisée en deux zones: la zone du Nord et celle du Sud. La zone du Nord s'étend de la ville de Koweït jusqu'à la frontière du Nord du pays et elle inclut la côte de la baie de Koweït et celle de Khor Al Sabiya. Due à sa proximité de l'estuaire de Chott Chott Al Arab, cette zone est caractérisée par un profil de plage de relief bas et de pente douce et par des plages de vastes étendues. La baie de Koweït est dominée par la marée où les courants de marée sont les processus essentiels de transport des sédiments, pendant que l'action des vagues est très limitée mais celle-ci prévaut sur la côte sud. Les plages de la ligne de côte sud de la baie de Koweït consistent en bermes lavées par des vagues et bornées par des rivages de marée du côté de la mer, par des dunes de sables du côté de la terre qui couvrent les plages élevées sub-récentes. Dans la ligne de côte du Nord de la baie de Koweït, les plages forment des bandes étroites limitées vers la mer par une vaste zone de vase de marée et vers la terre par des rivages de dunes qui recouvrent des marécages.

La zone de la côte sud s'étend de la ville de Koweït jusqu'à la frontière sud du pays. Elle se caractérise par l'existence de crêtes côtières sableuses et oolithiques et, par des profils de plages à pente raide. Les sédiments de plage occupent la zone comprise entre le bord inférieur de la plaine tidale et le rebord des crêtes côtières. Celles-ci sont limitées, du côté du continent, par de vastes marécages qui sont généralement couverts de dunes de sables éoliennes.

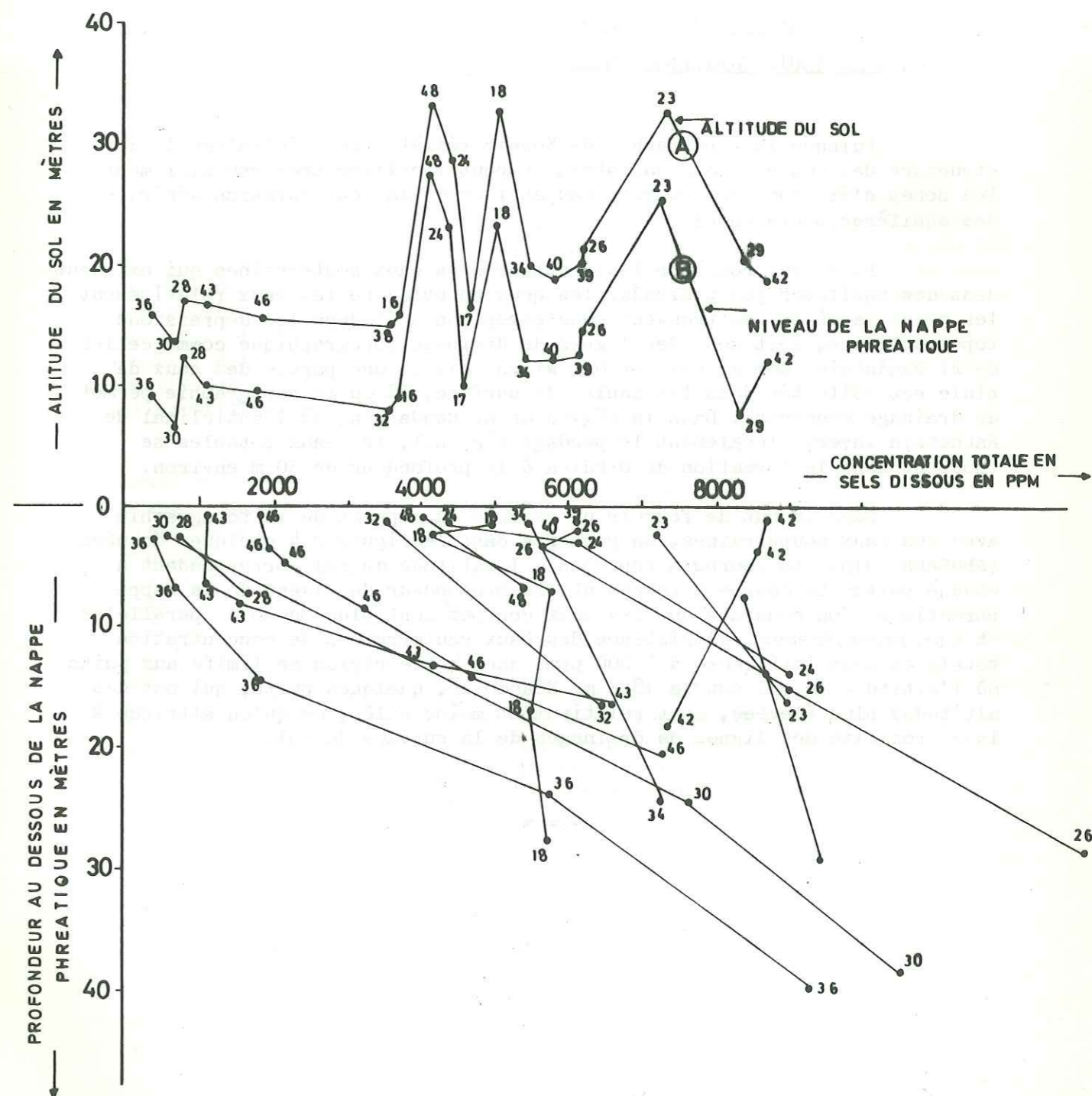


FIG. 2-4. — Variation de la concentration totale en sels dissous dans les eaux souterraines d'Al-Quashaniya en fonction des variations de l'altitude et de la profondeur.

Des criques ou des baies, qui caractérisent la côte de Koweït, telles que Khor Al Sabiya, Al-Khiran et Khor Al Khajfi sont probablement des vallées noyées (Khalaf).

2.2. QUELQUES REMARQUES SUR LES RAPPORTS ENTRE LA TOPOGRAPHIE ET LES EAUX SOUTERRAINES.

Puisque la topographie de Koweït reflète très généralement la structure des couches sous-jacentes, on peut localiser très grossièrement les zones d'érosion des cours d'eau anciens et la configuration générale des aquifères souterrains.

En ce qui concerne les ressources en eaux souterraines qui existent dans des aquifères peu profonds, les eaux potables ou les eaux relativement les moins saumâtres se trouvent sans exception soit sous les dépressions topographiques, soit sous des lignes de drainage topographique comme celles de Al Raudatain, Umm Al Aish et Umm Nigga. Ainsi, une partie des eaux de pluie est collectée dans les sables de surface, là où la topographie permet un drainage concentré. Dans la région de Al Raudatain, où l'anticlinal de Raudatain inverse localement le pendage régional, les eaux potables se trouvent dans la formation de Dibdiba à la profondeur de 30 m environ.

Dans le but de fournir un exemple du rapport de la topographie avec les eaux souterraines, on présente dans la figure 2-4 quelques données (ABUSADA 1973). La courbe A représente l'altitude du sol correspondant à chaque puits. La courbe B représente la profondeur du niveau de la nappe phréatique. On constate que les deux courbes sont plus ou moins parallèles et que, grossièrement, l'existence des eaux souterraines de concentration totale en sels inférieure à 5 000 ppm, dans cette région se limite aux puits où l'altitude du sol est de 18,3 m. Néanmoins, quelques puits, qui ont des altitudes plus élevées, sont relativement moins salés, ce qu'on attribue à leur proximité des lignes de drainages de la surface du sol.

CHAPITRE III - ETUDE GEOLOGIQUE

3.1. GÉOLOGIE RÉGIONALE

3.1.1. GENERALITES

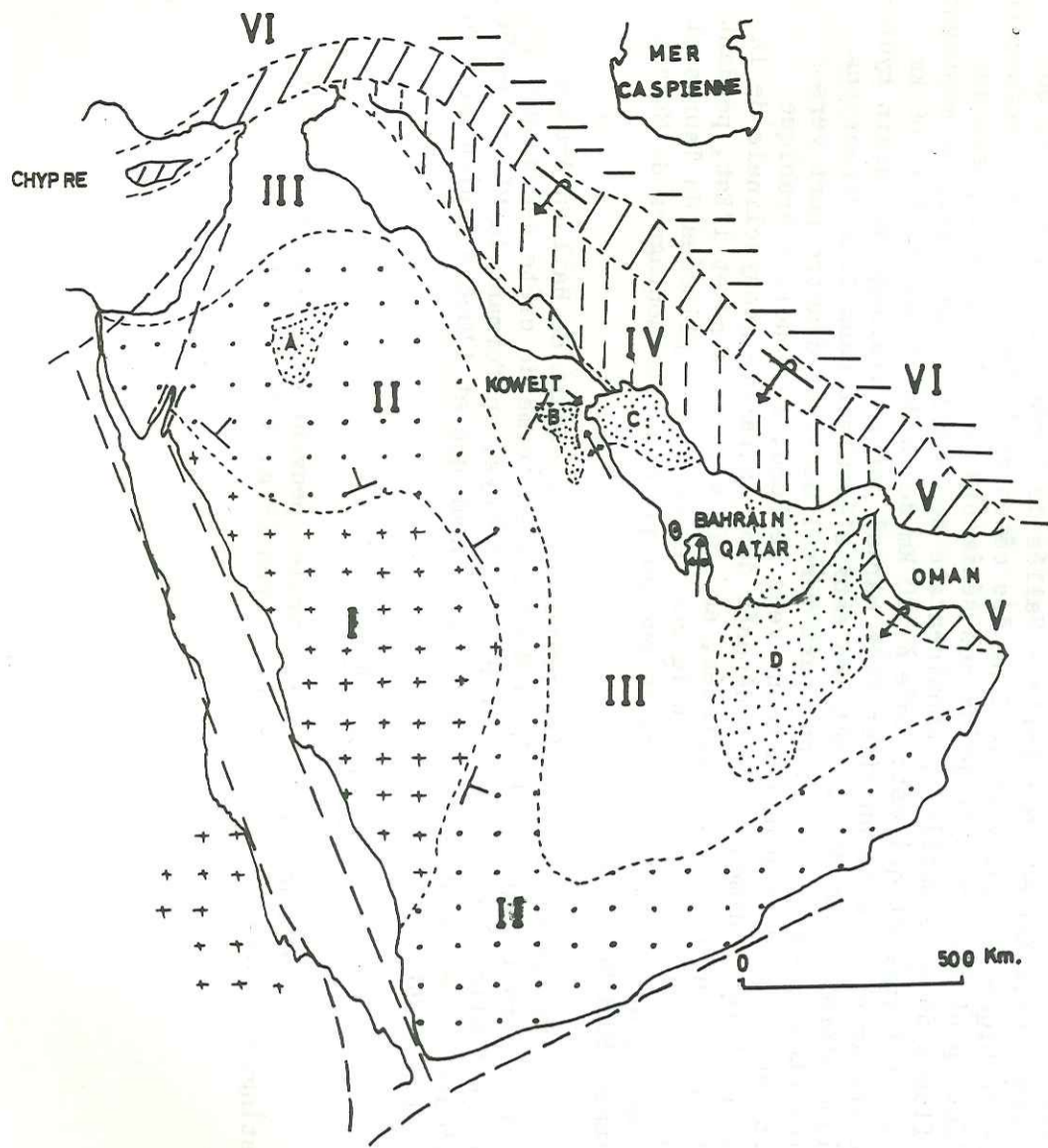
Le Golfe Arabique représente une mer qui est un vestige de la grande Téthys et qui se situe dans l'axe du grand bassin compris entre le bouclier Arabo-Nubien au Sud et le bouclier Sibérien au Nord. Des couches de sédiments se sont déposées sur les deux flancs de ce bassin et se sont mises à glisser sous l'influence de leur propre poids. Le glissement sur le flanc sibérien a été plus intense que sur le flanc arabe du bassin. Ainsi les montagnes du Zagros et celles d'Oman, qui ferment le bassin avec leurs pendages opposés (renversés), ont été formées par le glissement (NAJJAR 1975).

Le bouclier Arabique représente une partie du grand bouclier Arabo-Nubien qui en se déplaçant vers le Nord a provoqué le resserrement graduel de la Téthys qui formait sa côte nord. Pendant que le bouclier Arabo-Nubien s'avancait au Tertiaire vers le Nord, il se fendait en donnant naissance au système d'effondrement du Golfe d'Aden - Golfe d'Aquaba - Wadi Araba - Mer Morte - Vallée de Jordanie. En effet, le bouclier Arabique se soulevait le long des côtes de la Mer Rouge et s'enfonçait à l'Est, peut-être sous le poids des sédiments qui s'étaient déposés sur ses flancs dans la partie épicontinentale de la Téthys. La chaîne de montagne qui s'est formée et qui est située à 120 km de la Mer Rouge et à 1 200 km du Golfe Arabique a eu un effet très marqué sur le drainage du bassin hydrologique d'Arabie Saoudite, dont les eaux s'écoulent dans deux directions différentes, c'est à dire d'une part vers l'Ouest et d'autre part vers l'Est. Au cours de son déplacement vers le Nord, le bouclier Arabique comprimait les sédiments épais déposés dans la partie géosynclinale de la Téthys, et ceux-ci étaient plissés, au loin vers le Nord et l'Est, pendant l'orogénèse du Tertiaire. C'est le cas des montagnes plissées du Taurus et du Zagros, qui s'étendent vers le Sud jusque dans les montagnes de Muskat et Oman (BURDON 1973).

Un éperon du bouclier principal s'étendait de Hail en Arabie Saoudite vers le Nord et le Nord-Nord Est en forme de crête ascendante qui, pendant l'Oligocène séparait en deux la Téthys, en formant la Méditerranée à l'Ouest et au Nord-Ouest, et le Golfe Arabique et l'Océan Indien au Nord-Est et à l'Est.

3.1.2. UNITES STRUCTURALES

Six grandes unités structurales peuvent être schématiquement distinguées entre la Mer Rouge et l'Iran (Fig. 3-1 et 3-2).



L É G E N D E

- I, Bouclier Arabe.
- II. Plate-forme Arabe tabulaire.
- III. Plate-forme Arabe ondulée.
- IV. Les foothills.
- V. Chaines des Iranides.
- VI. Haut plateau Iranien.
- (A) Bassin de Sirhan Turaif.
- (B) Bassin de Dibdiba.
- (C) Bassin du Golfe Arabe du nord.
- (D) Bassin d'Al Rub'Al Khali.
- ↑ Direction et pendage des couches.
- Faille d'effondrement.
- ↗ Axe anticlinal.
- ↘ Pli couché

FIG. 3-1.—SCHÉMA STRUCTURAL DU MOYEN-ORIENT.

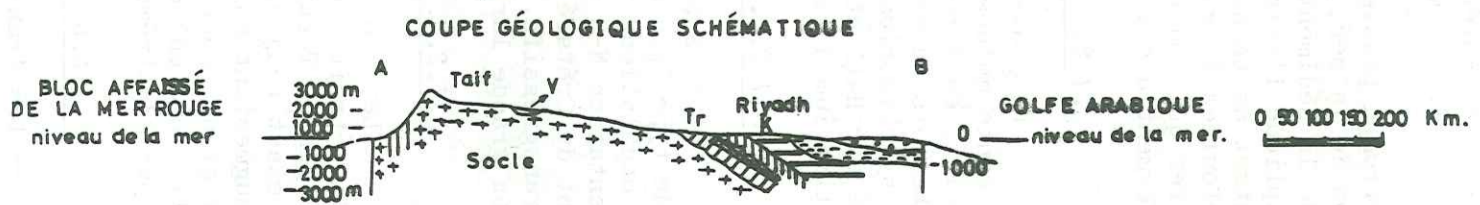
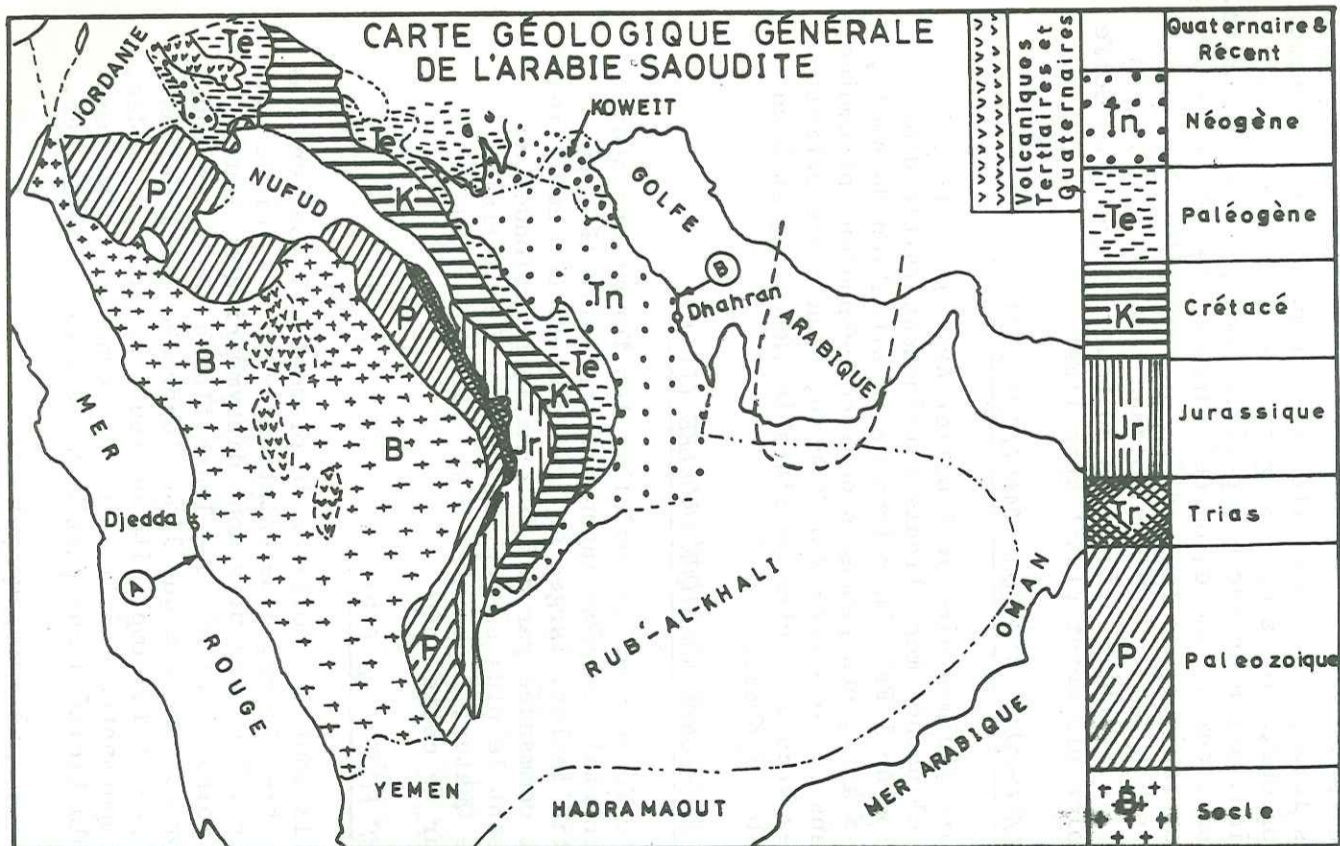


FIG. 3-2.— CARTE GÉOLOGIQUE GÉNÉRALE DE L'ARABIE SAOUDITE ET COUPE GÉOLOGIQUE SCHÉMATIQUE.

3.1.2.1. LE BOUCLIER ARABIQUE (I)

La superficie du bouclier Arabe est d'environ le tiers de la superficie entière de la péninsule Arabique. Ses roches sont principalement granitiques, mais des roches sédimentaires du Précambrien et des roches volcaniques y existent aussi. Le processus de sédimentation a été interrompu plusieurs fois par des activités volcaniques, soulèvements, régressions de la mer, érosions, suivis de transgressions de la mer et de reprises de la sédimentation, selon un cycle répétitif pendant le Précambrien. Ainsi s'explique l'existence, sur le socle, de ceintures minces et serrées de sédiments et de taches sporadiques de laves d'âge Oligocène-Miocène qui ont été refoulées à travers des failles ou des volcans anciens. Les roches sédimentaires qui couvrent les parties orientales du bouclier jusqu'au Golfe Arabe forment des auréoles plongeant plutôt vers l'Est.

3.1.2.2. PLATE-FORME ARABIQUE TABULAIRE (II)

La couverture sédimentaire du bouclier Arabe dans cette zone ne présente qu'une inclinaison monoclinale extrêmement faible d'un degré ou moins, en direction de l'Est. En raison de la situation du socle, de ses bombements ou de ses arcs, ces pendages doux correspondent néanmoins à un large synclinorium dans le Nord vers Wadi Sirhan, à un vaste anticlinorium basé sur Hail et les arcs du centre de l'Arabie (Riyadh), et à un autre synclinorium à Al Rub' Al Khali.

3.1.2.3. PLATE-FORME ARABIQUE ONDULÉE (III)

Sur la plate-forme arabe ondulée, les formations sédimentaires de type épicontinental ou même lagunaire sont affectées par de légères ondulations anticlinales, larges et très plates. Ces anticlinaux dont l'orientation N-S est commandée par des déformations profondes du socle datant du Crétacé, sont le plus souvent masqués par les terrains miocènes transgressifs. Le Qatar, Bahrein et même Koweït se situent dans la plus grande largeur de cette zone.

3.1.2.4. LES FOOTHILLS (IV)

Les Foothills sont des collines de piémont qui montrent une série de plis étroits mais très longs, d'orientation N-O - S-E qui se sont formés à la fin du Tertiaire. Tous ces plis sont dissymétriques, leurs flancs est étant toujours moins redressés que leurs flancs ouest, et leur amplitude augmentant au fur et à mesure que l'on s'approche des Iranides. Malgré leur grande continuité et la simplicité de leurs parties profondes, certains plis montrent d'importantes complications tectoniques de surface provoquées par l'extrême plasticité d'une partie des terrains tertiaires.

3.1.2.5. CHAÎNE DES IRANIDES (V)

Les Iranides constituent une chaîne très violemment plissée, de type géosynclinal et alpin, dont les structures extrêmement complexes ont pris naissance durant le Crétacé supérieur et le Tertiaire. Cette chaîne qui chevauche vers le Sud-Ouest l'unité précédente s'étend depuis l'île de Chypre et le Taurus au Nord jusqu'en Arabie au Sud où elle donne l'arc chevauchant d'Oman.

3.1.2.6. LE HAUT PLATEAU IRANIEN

Le haut plateau Iranien, situé entre la chaîne de l'Elbrouz au Nord et la chaîne des Iranides au Sud est une plate-forme cristallophyllienne où des bassins plus ou moins profonds renferment des dépôts primaires, secondaires et tertiaires de nature généralement épicontinentale. Ces dépôts ont été plissés à plusieurs reprises de façon assez modérée, entre la fin du Crétacé et le Pliocène.

3.1.3. STRATIGRAPHIE

Depuis le Précambrien jusqu'au Tertiaire, la péninsule Arabique était une partie du système géosynclinal de la Téthys qui s'étendait de Gibraltar jusqu'à Java. Après le Pleistocène, la mer n'a transgressé que très occasionnellement et de façon très limitée.

Pendant l'intervalle du Lipalien qui sépare le Précambrien du Cambrien, le socle a été érodé et transformé en pénéplaine. Les faciès étaient essentiellement continentaux, littoraux, lagunaires et épicontinentaux. La position du littoral variait quand le bouclier principal remontait et redescendait en pulsations lentes, tandis que les océans répondaient aux changements eustatiques de niveau. Puisque le sol du bouclier était relativement horizontal, de petits changements d'altitude du sol ou de l'océan produisaient de grands déplacements des rivages.

Des roches sédimentaires du Paléozoïque, Mésozoïque et Tertiaire sont magnifiquement exposées en Arabie centrale où les roches affleurent sous forme d'une grande ceinture courbée flanquant la marge est du bouclier. Ces couches reflètent certainement la configuration profonde du socle et s'enfoncent doucement et uniformément vers le Nord-Est, l'Est et le Sud-Est. Le pendage varie progressivement d'un peu plus de un degré dans les unités des roches paléozoïques et mésozoïques à moins de 0°30' dans le Crétacé supérieur et l'Eocène. Des escarpements essentiellement parallèles, faisant face à l'Ouest et comportant chacun un chapeau calcaire résistant, dominent la partie visible du monoclinial intérieur. Des grès et des argiles schisteuses moins résistantes tapissent les vallées et les plaines.

À l'Est du monoclinial, des roches du Tertiaire et d'autres roches plus jeunes affleurent, mais les couches paléozoïques et mésozoïques n'affleurent à nouveau que dans les montagnes d'Oman dans l'extrême Est de l'Arabie. Les principales régions d'affleurement de ces formations sédimentaires sont illustrées sur la figure 3-2. Les détails d'âge, les noms et les descriptions lithologiques générales de celles-ci sont présentés sur la figure 3-3, et nous nous contenterons de présenter les remarques suivantes sur la stratigraphie et la tectonique.

3.1.3.1. LES ROCHES DETRITIQUES DU PALÉOZOÏQUE INFÉRIEUR

Les roches du Paléozoïque inférieur sont principalement des grès à gros grains d'origine continentale, mais des argiles schisteuses

COUPE LITHOLOGIQUE	UNITES LITHOSTRATIGRAPHIQUES		LITHOLOGIE DOMINANTE	ÉPAISSEUR	UNITES STRATI-GRAPHIQUES PRINCIPALES	UNITES CHRONOLOGIQUES				
	FORMATION	MEMBRE				ÉTAGE	ÉPOQUE	PÉRIODE	ÈRE	
H A S A	Daba Récent		SABLES, GRÈS, GRAVIER, CALCAIRE	± 100 m.	UNITÉ DÉTRITIQUE NÉOGÈNE	Miocène		NÉOGÈNE	CÉNOZOÏQUE	
	DABA		SABLE, CALCAIRE, MARNES ETC.							
	DAMMAN		CALCAIRE, CALCAIRE CRAVEUX, CALCAIRE DOLOMITIQUE, AVEC DES ZONES SILICIEUSES VERS LE HAUT ET FOUILLEUSE EN BAS.	± 250 m.	CALCAIRE DU PALÉOGÈNE	ÉOCÈNE MOYEN (Lusitanien)		PALÉOGÈNE		
	RUS		ANHYDRITE AVEC DES INTERCALATIONS DE CALCAIRE ET DE SCHISTE ARGILEUX.	± 150 m.	EVAPORITES	ÉOCÈNE INFÉRIEUR				
	UHMAL - RADHUMA		CALCAIRE CALCAIRE, DOLOMITIQUE DANS QUELQUES PARTIES, INTERCALATIONS D'ANHYDRITE ET DE SCHISTE ARGILEUX.	± 500 m.		PALÉOCÈNE				
	A R U M A	TAYARAT	SCHISTE ARGILEUX, BITUMINEUX, PYRITEUX ET CALCAIRES MICROCRISTALLINS ALTERNANT.	± 110 m.	UNITÉ CALCAIRE DU CRÉTACÉ	MAASTRICHTIEN		CRÉTACÉ SUPÉRIEUR		C R É T A C É
		BAHRA	CALCAIRE, CALCAIRE DOLOM, CALCAIRE SILIC. & ZONES DE SCHISTES ARGILEUX.	± 250 m.	SUPÉRIEUR	SÉNONIEN				
		GUDAIR	SCHISTE SILT, AVEC INTERCALATIONS DU SABLE ET DE CHAUX.							
	W A S I A	MAGWA	CALCAIRE À CRISTAUX FINS AVEC INTERCALATIONS DE SCHISTE PYRITEUX CROISSANT DE HAUT EN BAS	± 150 m.	UNITÉ DÉTRITIQUE DU CRÉTACÉ MOYEN	TURONIEN		CRÉTACÉ MOYEN		M É S O Z O I Q U E
		AHMADI	SCHISTE ARGILEUX GRIS VERDATRE OU BRUN AVEC UN HORIZON DE CALCAIRE MARNÉUX VERS LA BASE.	± 90 m.						
		WARA	GRÈS FIN ET PHANITE.	± 60 m.						
		MAJDOUD	CALCAIRE DÉTRITIQUE, PSEUDO-COQUILLIER AVEC INTERCALATIONS DU SABLE COQUILLIER.	± 70 m.						
BURGAN		GRÈS FIN OU MOYEN AVEC INTERCALATIONS DE SCHISTE ARGILEUX.	± 200 m.							
SHUAIBA		CALCAIRE DOLOMITIQUE AVEC QUELQUES VIDES PAR DISSOLUTION.	100 m.	UNITÉ CALCAIRE DÉTRITIQUE DU CRÉTACÉ INFÉRIEUR	APTIEN ?		CRÉTACÉ INFÉRIEUR			
ZUBAIR (- Biyad)		COUCHES ALTERNANT DU SCHISTE ARGILEUX ET DE GRÈS AVEC DES FACIES PLUS SABLEUX AU HOWEIT.	± 400 m.							
N A J D	RATAWI (- DUWAIB)	SCHISTE ARGILEUX NOIR ET PYRITEUX & INTERCALATIONS DE CALCAIRE DOLOMITIQUE.	± 200 m.	UNITÉ DÉTRITIQUE DU CRÉTACÉ INFÉRIEUR	BARRENIEN		CRÉTACÉ INFÉRIEUR	J U R A S S I Q U E		
	MINAGISH	CALCAIRE DÉTRITIQUE MARNÉUX À LA BASE ET DOLOMITIQUE DANS QUELQUES PARTIES.	± 450 m.		NEOCÈNE					
	HITH	ANHYDRITE ET SEL GEMME.	± 100 m.		BERRIASIEN					
	ARAB	CALCAIRE DÉTRITIQUE CALCAIRE MICROCRISTALLIN ET CRYPTO-CRISTALLIN DOLOMITI ET ANHYDRITE.	± 120 m.	UNITÉ CALCAIRE DU JURASSIQUE	PORTLANDIEN.		JURASSIQUE SUPÉRIEUR			
	JUBAILA	CALCAIRE MICROCRISTALLIN ET CRYPTO-CRISTALLIN & DOLOMITI AVEC INTERCALATIONS DE CALCAIRE DÉTRITIQUE.	± 100 m.		KIMMERIDGIEN.					
	HANIFA	CALCAIRE MICRO- ET CRYPTO-CRISTALLIN, CALCAIRE DÉTRITIQUE ET CORALLIEN & CALCAIRE DE RECIF.	± 100 m.		CALLOVIEN-OXFORDIEN					
	TUWAIQ	MARNES, CALCAIRE MICRO- ET CRYPTO-CRISTALLIN, SCHISTE ARGILEUX, ET CALCAIRE DÉTRITIQUE.	± 200 m.		BAJOCIEN-BATHONIEN		JURASSIQUE MOYEN			
	DHRUMA	SCHISTE ARGILEUX, CALCAIRE MICRO- ET CRYPTO-CRISTALLIN & GRÈS SUBORDONNÉ.	± 400 m.		TOARCIEEN (LIAS)		JURASSIQUE INFÉRIEUR			
	NARRAT	GRÈS AVEC INTERCALATIONS DE SCHISTE ARGILEUX.	± 300 m.	UNITÉ DÉTRITIQUE PERMO-TRIASIQUE	KEUPER		TRIAS SUPÉRIEUR			
	E L - S I R	JILH	GRÈS, CALCAIRE MICRO- ET CRYPTO-CRISTALLIN, SCHISTE ARGILEUX & BANDES DE GYPSE.	± 300 m.		MUSCHELKALK			TRIAS MOYEN	
SUDAIR		SCHISTE ARGILEUX ROUGEÂTRE ET VERDATRE.	± 100 m.		BUNTER		TRIAS INFÉRIEUR			
KHUFF		CALCAIRE SCHISTE ARGILEUX AVEC DES INTERCALATIONS SABLEUSES QUI PRÉDOMINENT VERS LE SUD.	± 170 m.							
JAUF		CALCAIRE SCHISTE ARGILEUX & GRÈS.	± 300 m.	UNITÉ DÉTRITIQUE MARINE			PERMIEN			
TABUK		SCHISTE ARGILEUX & GRÈS	± 1000 m.				DEVONIEN			
S A Q	UHM SAHM	GRÈS	± 800 m.	PALÉOZOÏQUE			SILURIEN			
	QUWEIRA						CAMBRIEN			

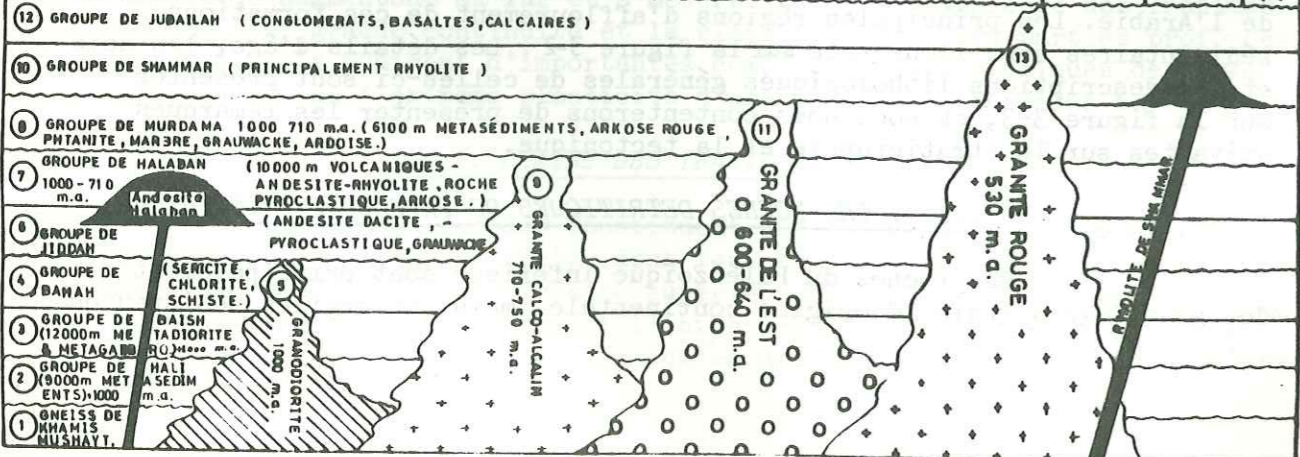


FIG. 3-3 - COUPE SYNTHÉTIQUE MONTRANT LES UNITÉS PRINCIPALES DES ROCHES EN ARABIE. (d'après NAJJAR, 1975)

marines se trouvent à plusieurs niveaux et les 300 m supérieurs sont principalement des argiles schisteuses avec des couches minces de calcaire. Généralement, elles sont visibles dans le Nord du centre et le Nord Ouest de l'Arabie, près du socle Précambrien où elles ont une épaisseur d'environ 3 000 m. Les 600 m inférieurs du Paléozoïque peuvent être équivalents, au moins partiellement, des formations du Cambrien de Jordanie. Les couches supérieures sont datées avec certitude de l'Ordovicien inférieur, du Silurien et du Dévonien inférieur.

3.1.3.2. LES ROCHES DÉTRITIQUES DU PERMIEN SUPÉRIEUR ET DU TRIAS

Le Paléozoïque supérieur est une période de régression de la mer, et pendant le Carbonifère la mer ne couvrait que la pointe nord de la péninsule, ce qui explique l'absence des roches du Carbonifère sauf dans quelques horizons sableux à Bahrain. Les couches équivalentes aux couches pétrolifères d'Irak, de Syrie et du Sinaï n'existent pas en Arabie. Ainsi, le dépôt initial de la formation d'Al-Khuf se trouve directement sur le socle dans les secteurs où les dépôts précédents ont été entièrement érodés.

Généralement, la période Permo-Triasique était une période d'oscillations marines avec environ 1 000 m de roches sédimentaires que l'on trouve dans la région de l'escarpement central. La formation d'Al Khuff est le plus souvent du calcaire déposé en eau peu profonde; les couches sous-jacentes sont des sédiments détritiques non marins, sauf dans la partie moyenne où se trouve une couche épaisse de calcaire.

3.1.3.3. LES ROCHES DÉTRITIQUES ET CALCAIRES DU JURASSIQUE INFÉRIEUR ET MOYEN

Environ 200 à 500 m de ces roches se trouvent, près du milieu de la région de l'escarpement, et consistent en argiles schisteuses marines lardées de bancs calcaires. Ceux-ci passent à des grès partiellement continentaux au Nord et au Sud des zones d'affleurement. Généralement, pendant le Jurassique la mer était transgressive, très vaste et calme. Elle couvrait entièrement toute l'Arabie, mais était peu profonde. A la fin du Jurassique, la subsidence s'étant arrêtée, l'anhydrite de la formation de Hith s'est déposée dans une mer fermée peu profonde.

3.1.3.4. LES CALCAIRES DU JURASSIQUE SUPÉRIEUR ET LE DÉBUT DU CRÉTACÉ INFÉRIEUR

Ceux-ci sont les calcaires purs qui constituent les montagnes de Tuwayk dans la région de l'escarpement. La sédimentation calcaire a été interrompue plusieurs fois pendant les derniers étages du Jurassique en raison de la prédominance de conditions lagunaires qui ont provoqué des dépôts cycliques d'anhydrites et de calcarenites.

3.1.3.5. LES ROCHES DÉTRITIQUES DE LA FIN DU CRÉTACÉ INFÉRIEUR

Ces roches sont non marines et apparaissent seulement dans les parties moyennes et du sud de la région de l'escarpement. Ce sont principalement des grès à gros grains, à stratification entrecroisée dont l'épaisseur moyenne est de 700 m.

052 329006 4

3.1.3.6. LES ROCHES DETRITIQUES DU CRETACE MOYEN

Elles sont généralement non marines dans le Sud et deviennent progressivement marines dans le Nord où elles s'avancent vers le Nord ouest sur des couches plus anciennes jusqu'en Jordanie. Dans l'Arabie centrale, ce sont des grès minces mais remarquablement persistants, généralement avec quelques argiles schisteuses entrelardées, de lentilles minces et locales, de calcaires et de dolomies. La plus grande partie des grès est brune et à stratification entrecroisée.

3.1.3.7. LES CALCAIRES DU CRETACE SUPERIEUR - EOCENE

Ces roches sont exclusivement des calcaires et dolomies. Elles sont très visibles le long de la bordure est de la ceinture d'escarpement et continuent vers le nord ouest en Irak. La séquence comprend environ 500 m de roches du Crétacé supérieur, du Paléocène, de l'Eocène inférieur et de l'Eocène moyen.

Le Crétacé représente une phase d'instabilité en Arabie. C'est pendant le Crétacé supérieur qu'une orogénèse soulevait la ceinture centrale des montagnes du Zagros en établissant une série d'îles le long de leur direction. C'est aussi pendant cette période que les plis du type d'Ahmadi qui sont des crêtes parallèles au Golfe et qui diminuent vers l'Ouest ont été formés. Les faciès dominants des sédiments déposés dans la région avant cette orogénèse étaient des calcaires tandis que des sédiments détritiques ont été déposés en grandes quantités par la suite. Pendant le Crétacé supérieur et le Cénozoïque inférieur, des faciès détritiques se sont accumulés dans les zones proches des régions soulevées, mais, plus loin vers l'Ouest et vers le Sud, le dépôt des calcaires continuait. Le soulèvement qui a commencé pendant le Crétacé supérieur a continué jusqu'à l'époque actuelle.

Pendant le Paléocène et l'Eocène, le groupe de Hasa s'est déposé et représente une phase de stabilité. Il est différencié du Crétacé sous-jacent par un changement de faune (NAJJAR 1975).

Après le dépôt de la formation de Dammam, toute l'Arabie était émergée sauf dans un petit golfe. La formation de Dammam a été exposée à l'érosion pendant l'Eocène supérieur et l'Oligocène qui ont été des périodes de volcanisme et de tectonique intenses. C'est ainsi que la formation calcaire de Dammam est devenue très poreuse et très perméable.

3.1.3.8. LES ROCHES DETRITIQUES DU MIOCENE ET DU PLIOCENE

La période du Miocène au Pliocène représente un seul cycle sédimentaire pendant lequel les formations de Ghar et de Fars au Koweït et les formations Hadruk, Dan, Hafuf et Kharj, en Arabie saoudite, se sont déposées. Après cette période la mer n'a transgressé que très occasionnellement et de façon intermittente et limitée. Ainsi le Néogène est représenté par 200 à 600 m de roches principalement détritiques et non marines. Ces dépôts forment un groupe hétérogène de grès marneux, marnes sableuses et calcaires sableux et couvrent Al Rub' Al Khali et l'Arabie du Nord Est.

3.1.3.9. LES DEPOTS QUATERNAIRES

Les dépôts principaux d'âge quaternaire sont les sables éoliens qui forment les trois grands déserts principaux, le Nafud au Nord (68 000 km²), la bande longue de Dahna, et environ 60 000 km² d'Al'Rub Al'Khali au Sud. Il y a aussi de grandes étendues de graviers dont la Dibdiba est la plus grande d'entre elles. Les dépôts de Sabkhas sont aussi importants principalement à 60 km de la côte est du Golfe.

3.1.4. TECTONIQUE

3.1.4.1. LES FAILLES

Il y a trois directions principales de failles en Arabie.

- 1) La direction NNE-SSO dont les directions du Golfe d'Aquaba, la baie de Koweït et la côte du Nord des Emirats Arabes Unis représentent des exemples;
- 2) La direction NNO-SSE comme celle de la Mer Rouge;
- 3) La direction ENE-OSO, le long de laquelle l'île de Socotra est séparée d'Aden.

L'intersection de deux familles de failles détermine des formes triangulaires soit externes, telle que la péninsule du Sinaï, la baie de Koweït et la péninsule Arabique elle-même, soit internes telles qu'Al'Rub Al'Khali, Wadi Sarhan et Wadi Dibdiba. Les formes internes sont des bassins triangulaires créés par les directions principales des failles. Ce sont des bassins tectono-sédimentaires, ce qui explique l'épaisseur très grande des sédiments qui se trouvent près de la côte. Par exemple, au coin ouest d'Al-Rub'Al-Khali, les sédiments sont très épais, alors qu'ils sont relativement minces plus loin vers le Nord.

Ces failles sont très anciennes (Précambrien) dans le socle et ces bassins ne sont que des bassins tectoniques encore subsidents actuellement, ce qui explique pourquoi le Tigre et l'Euphrate ne forment pas de delta (NAJJAR 1975).

D'autres directions de failles moins importantes sont celles de direction N-S et E-O.

3.1.4.2. LES PLIS

En Arabie, il y a quatre types principaux de plis:

- 1) Les plis couchés des montagnes du Zagros et d'Oman;
- 2) Les crêtes plongeantes du type du Zagros ou d'Ahmadi (NNO-SSE), qui sont des parallèles aux montagnes du Zagros et d'Oman;
- 3) Les dômes du type de Burgan qui sont des structures en forme de dôme plongeant dans toutes les directions. On explique leur origine par des mouvements ascensionnels des couches de sels du Cambrien et ils se trouvent le long de la côte arabique du Golfe. La plus grande partie des champs de pétrole dans cette région sont des dômes.

4) Les plis NNE-SSO tels que les structures de Bahrain et Qatar.

J. FLANDRIN et J. CHAPELLE (1961) ont mentionné que la période principale durant laquelle des structures de la plate-forme arabe se sont formées se place avant le Maestrichtien et correspond à la discordance séparant cet étage du Campanien sous-jacent. Par la suite les plis ont légèrement rejoué vers la fin de l'Eocène, mais la grande phase orogénique Pliocène, qui modela si énergiquement la zone des foothills, ne s'est traduite ici par aucune déformation appréciable. Ainsi des dépôts du Miocène-Pliocène sont-ils pratiquement horizontaux et masquent-ils presque partout la structure des terrains plus anciens. Par contre, nous pensons que la phase orogénique pliocène se manifeste assez clairement sur le sol de la plate-forme arabe, bien que localement, par des structures de Qatar, Bahrain et la crête d'Ahmadi.

3.2. GÉOLOGIE DES COUCHES RENCONTREES AU KOWEIT

3.2.1. GENERALITES

Selon MITCHEL (1957) le Koweit et la zone neutre se situent sur le bord instable du bouclier arabe, c'est-à-dire dans la zone de la plate-forme arabe ondulée. Il est évident que les sédiments du Paléozoïque et du Mésozoïque se sont déposés en eau profonde, tandis que la sédimentation en eau peu profonde, prédominait pendant le Tertiaire et le Mio-Pliocène, quand la mer de Téthys était réduite à un très petit "vestige".

Au Koweit, on n'a trouvé que des structures douces qui n'excèdent pas 3° de pente. Selon MILTON (1965), ces structures (telles que les structures de Mangish, Raudatain, Umm Gudair etc..) se sont développées, le plus souvent depuis, au moins, le Crétacé moyen et vraisemblablement même dès le Jurassique supérieur, exception faite de la structure d'Ahmadi qui paraît être le résultat de mouvements tangentiels post-Eocènes, vraisemblablement reliés à l'orogène de Zagros.

L'escarpement de Jal Az Zor est considéré par MILTON comme un effet de l'érosion, tandis que FUSH et al. (1968) l'interprètent comme la continuation de l'élément structural de Wadi Mussannat qui est parallèle au Wadi Al Batin. Celui-ci s'étend à plusieurs centaines de kilomètres en direction du Sud-Ouest. FUCH et al. pensent que les deux Wadi ainsi que l'escarpement sont des expressions des linéaments tectoniques importants du socle.

L'exploitation actuelle de l'eau souterraine au Koweit se limite aux couches aquifères dans le groupe de Koweit et à la formation calcaire de Dammam dans le groupe sous-jacent de Hasa. D'ailleurs la profondeur maximum de forage pour l'exploration de l'eau souterraine a été de 760 m dans la formation d'Umm Al Radhuma.

On présentera dans les sections suivantes la stratigraphie générale des couches pénétrées et, de façon un peu plus détaillée la géologie des couches supérieures dans lesquelles on a exploité et on explore l'eau souterraine.

3.2.2. STRATIGRAPHIE GENERALE DES COUCHES PENETREES

Environ 6 100 m de sédiments ont été pénétrés par forage dans la région de Bassoura-Koweit. Leurs âges s'échelonnent entre l'époque récente et le Trias. Ils renferment 1 585 m de sédiments cénozoïques et 4 510 m de sédiments mésozoïques (OMEN et NASR 1958). La succession des couches pénétrées dans cette région est résumée sur la figure 3-3. Les figures 3-4 et 3-6 indiquent les corrélations nord-sud et ouest-est à travers la région pendant que la figure 3-5 montre les champs et puits pétroliers.

Le Miocène Pléistocène est représenté par des couches arénacées avec un développement d'évaporites du Miocène moyen qui s'amincissent vers le Sud-Ouest vers le désert de l'Ouest de l'Irak en avançant comme une langue dans le Nord de Koweit.

L'Eocène est représenté par une séquence de calcaires qui est interrompue par un intervalle d'évaporites minces, mais très étendues.

Le Crétacé voit un développement de calcaires prédominants sur des marnes et des argiles schisteuses minces. Cette lithologie continue dans la partie supérieure du Crétacé moyen.

Les parties inférieures du Crétacé moyen et la partie majeure du Crétacé inférieur consistent principalement en sables et grès avec des horizons contenant de l'argile schisteuse et, pour le moins, deux niveaux calcaires bien développés. Le contenu en sable de cette succession augmente considérablement dans le Sud vers Burgan où il représente 75 % de la coupe. Dans le Nord, au Zubair, il ne comprend que 30 %. La partie la plus basse du Crétacé inférieur est représentée par une succession de calcaires et d'argiles schisteuses.

Le Jurassique dans le Koweit sud-est se compose principalement de calcaires avec une épaisse série (418m) d'anhydrite et de sel. Le Trias vraisemblablement, autant qu'on sache dans la région, se compose d'argiles schisteuses et de grès.

Une lacune majeure dans la succession ci-dessus a eu lieu pendant l'Eocène supérieur et l'Oligocène. Une autre lacune mineure vraisemblable existe au Crétacé supérieur (pré-Maestrichtien). La lacune de la fin du Crétacé moyen (post Cénomaniens/Turonien) est nettement reconnue.

On peut mentionner en plus, que les isopaches dessinés pour tous les intervalles au-dessus du Crétacé moyen montrent l'amincissement progressif des sédiments sur les parties des crêtes de quelques structures forées au Koweit et en Irak, indiquant que le plissement naissant a persisté depuis ce temps-là.

3.2.3. GÉOLOGIE DES COUCHES SUPERIEURES

Les couches géologiques supérieures sont celles dans lesquelles on a exploité et/ou exploré l'eau souterraine. En commençant de haut en bas on rencontre le Groupe de Koweit et le Groupe de Hasa.

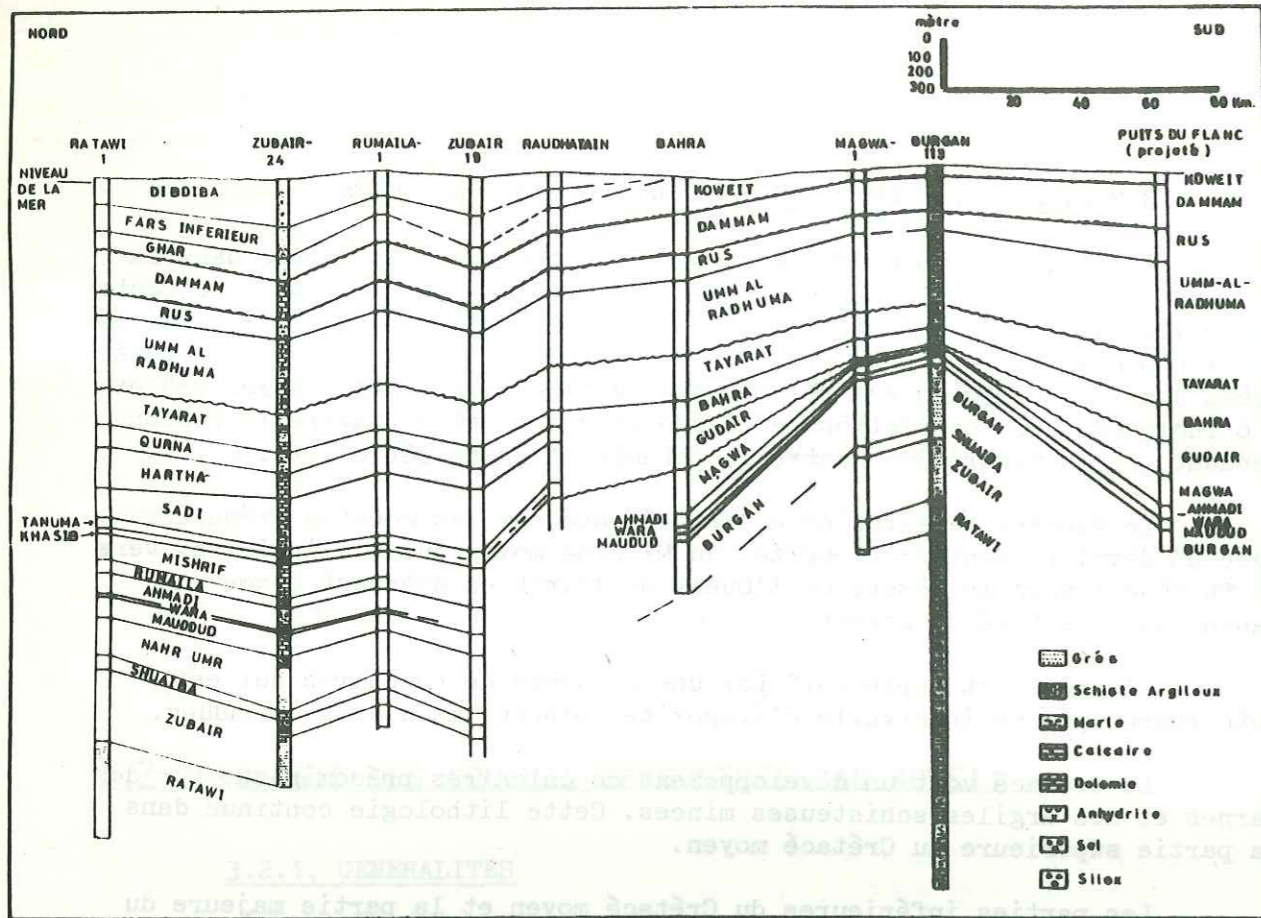


FIG. 3-4. — CORRELATION NORD-SUD DANS LA RÉGION DE KOWEIT-BASSOURA.

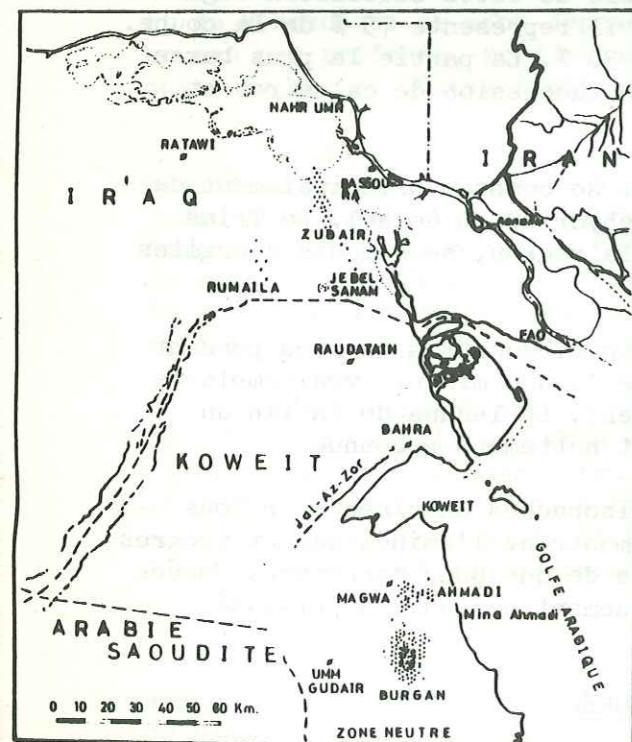


FIG. 3-5 — CHAMPS ET PUIITS PETROLIERS DANS LA REGION DE KOWEIT-BASSOURA.

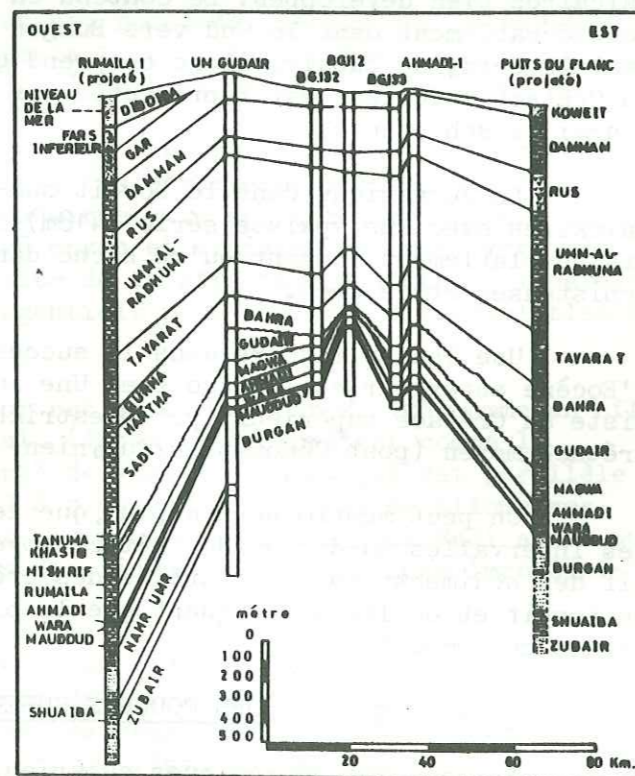


FIG. 3-6. — CORRELATION OUEST-EST DANS LA REGION DE KOWEIT-BASSOURA.

3.2.3.1. GROUPE DE KOWEIT

Le Groupe de Koweit comporte tous les sédiments déposés sur la surface d'érosion de la formation de Dammam sous-jacente. Celle-ci s'enfonce doucement vers l'Est - Nord-Est. La continuation de l'orogénèse du Zagros a créé des petits bassins sur sa surface, sur laquelle des dépôts marins se sont mis en place près de la côte actuelle pendant que des dépôts continentaux se développaient vers l'intérieur. Il est possible de subdiviser ce groupe comme suit:

- les dépôts récents;
- les sédiments récents et subrécents;
- la formation de Dibdiba (Miocène Pliocène)
- la formation du Fars inférieur (Miocène);
- la formation de Ghar.

Le Groupe de Koweit en Irak sud atteint l'épaisseur maximum de 855 m, mais, dans le Koweit sud, à Ahmadi, il est d'environ 6 m. L'augmentation nette de l'épaisseur dès Ahmadi vers le Nord et l'Est est principalement due au pendage régional tandis que l'augmentation d'épaisseur vers l'Ouest est influencée par la topographie ascendante et par les onduations structurales dans la formation de Dammam sous-jacente. Dans le Sud de Koweit, la subdivision du Groupe de Koweit n'est pas possible puisque cette portion de la colonne stratigraphique est plutôt mince et consiste en sables et graviers fins que l'on appelle simplement le Groupe de Koweit (OWEN et NASR 1957, FUCH et al. 1967). Donc, dans l'état de Koweit n'affleurent que quelques formations et dépôts du Groupe de Koweit, et de façon très limitée dans la carrière d'Ahmadi, les parties supérieures de la formation de Dammam (Pl. - 2).

3.2.3.1.1. Les dépôts récents

Les dépôts récents consistent en:

- sables de plage qui sont des sables fins et qui se trouvent le long de la côte sud de Koweit et de la zone neutre. Des sables fins éoliens se trouvent derrière tous les obstacles en indiquant une direction permanente des vents du sud-est. Quelques dunes de sables en forme de croissant à Umm Nigga dans le Nord de Koweit indiquent un mouvement lent dans la direction opposée.
- des argiles minces couvrant les fonds des petits bassins (playas).
- des sables fins ou des sables grossiers avec des graviers et des blocs de matériaux érodés et transportés pendant des pluies occasionnellement intenses se trouvent dans les oueds.

3.2.3.1.2. Sédiments récents et subrécents

Des grès stratifiés, poreux et faiblement lapidifiés et du calcaire avec un contenu variable de fossiles se trouvent dans les zones de marée de la bordure sud de la baie de Koweit, et aussi autour des îles de Mis'chan, Faylika et Auha. Les îles plates de Bubiyan et Warba au Nord Est de Koweit consistent en dépôt épais de silts et d'argiles qui sont considérés comme des sédiments deltaïques de l'Euphrate et du Tigre. Des matériaux de récifs retravaillés qui consistent en débris organiques et en quartz fortement cimentés encadrent les îles de Kubbar et Umm-Al-Maradim.

3.2.3.1.3. Formation de Dibdiba

En 1938, Birjisiya (Lat. 30° 22' N, long. 47° 38' E) a été choisi comme coupe représentative (MACAFADYAN 1938). Les affleurements de la formation de Dibdiba se situent dans la région de Bassoura et dans le Nord de Koweït. La succession enregistrée au puits Zubair n°26 a une épaisseur de 360 m (OWEN & NASR 1955).

La formation de Dibdiba consiste principalement en sables et graviers avec des argiles résiduelles et des sables qui sont occasionnellement cimentés par du calcaire et du gypse. Essentiellement, cette formation ne contient pas de fossiles à l'exception de quelques horizons d'argile. A l'Ouest de Zubair et dans le Nord de Koweït, ces couches de sable et de graviers sont couronnées par de gros cailloux de roches ignées, métamorphiques et sédimentaires qui sont généralement en forme de galets à facettes.

La formation de Dibdiba ou le groupe Koweït indifférencié couvrent toute la région de Koweït Bassoura, sauf le coin Nord Est qui est recouvert de dépôts alluviaux récents. On ne peut guère discerner de pendages importants dans les affleurements. Les couches de grès individualisées sont généralement entrecroisées et non persistantes. La formation de Dibdiba s'amincit vers l'Ouest et vers le Sud de Zubair. Dans le champ de Rumailah, elle a une épaisseur de quelques 150 m et elle se coince entièrement plus loin vers l'Ouest. Dans le Sud, elle a une épaisseur de 213 m au bout des champs de Zubair, et elle est réduite à 61 m dans l'escarpement de Jal-Az-Zor.

La partie supérieure de Dibdiba est généralement considérée comme un pédiment formé pendant le Pléistocène par des rivières ou des inondations qui déposaient des accumulations de graviers et de sables en forme d'éventails d'épaisseurs variées. Dans les parties supérieures, les gros graviers prédominent puisque les grains fins ont été enlevés par les vents. Plus tard, les processus de l'érosion, en jouant dans la direction Sud-Ouest - Nord-Est, ont recoupé les couvertures de graviers sur de grandes étendues. A l'heure actuelle, leurs vestiges forment des crêtes basses qui sont étroites et allongées. Les parties les plus inférieures de Dibdiba semblent passer progressivement à la Formation de "Fars Inférieur"

sous-jacente. La limite entre les deux formations n'est pas définie puisque la lithologie est presque identique. Néanmoins, FUCH et al (1967) ont montré par l'analyse des minéraux lourds, que les grenats, pyroxènes, amphiboles et épidotes prédominent dans le Dibdiba tandis que le Zircon prédomine dans les roches plus anciennes.

Autres dépôts du Pléistocène

Des calcaires oolithiques du Pléistocène se trouvent sur le rivage raide au Sud de la baie du Koweït dans les petites îles d'Umm-Al-Nammel et sur les terrasses et le pied de Jal-Az-Zar.

Leur épaisseur maximum est de 10 m. Ce sont des calcaires oolithiques à grain fin, en couches minces partiellement entrecroisées. Fréquemment, ils passent latéralement et verticalement à des grès à grains grossiers et fins qui sont cimentés par du quartz et contiennent, en proportions variables, des grains oolithiques et des boules sporadiques d'argile brune et rougeâtre.

3.2.3.1.4. La formation du Fars inférieur (Miocène)

Le nom de Fars est le nom d'une province dans le Sud Ouest de l'Iran où se trouvent les affleurements de cette formation (PILGRIM 1908). Dans la région de Koweït-Bassoura, c'est seulement le Fars inférieur qui est représenté. La coupe de référence dans cette région est celle du puits Nahr Umr n°3 entre les profondeurs 336,79 et 681,19 m. Cet intervalle se compose des couches entrelardées d'anhydrite, de gypse, d'argiles, de marnes et de calcaires d'eau peu profonde qui contiennent *Ostrea latimarginata* Vred., *Clausinella* sp., *Quinqueloculina* sp. etc.

L'épaisseur du Fars inférieur varie de 344 m au Nahr Umr, à 183 m à Zubair et 92 m à Rumaila.

Plus loin vers l'Ouest, cette formation s'élève et montre une coupe peu épaisse d'argiles schisteuses, de sables et de calcaires sableux contenant : *Ostrea Latimarginata*.

Vers le Sud, dans l'Etat de Koweït, la Fars inférieur a été reconnu par KOC au Raudhatain entre les profondeurs 105.15 et 214.57 m où il est composé principalement d'anhydrite, de gypse, d'argiles, marnes et calcaires d'eau peu profonde. Les fossiles identifiés sont *Ostrea Latimarginata*, *Clausinella* et *Quinqueloculina* sp.

Dans le Jal-Az-Zor, le long de la côte nord de la baie de Koweït se trouvent 38 m de sables fins, de silts et d'argiles qui contiennent *Ostrea Latimarginata*, *Ostrea vestita*, *Lamellibranches*. Cette unité est intercalée entre des dépôts sus-jacents et sous-jacents de sables épais et non fossilifères. Elle consiste en couches qui sont certainement équivalentes de la formation du Fars inférieur et qui ont été déposées vraisemblablement à la limite extrême du bassin des évaporites du Fars inférieur. Le Fars inférieur typique recouvre le calcaire bien connu d'Asmari et on pense qu'il se situe entre Miocène inférieur et Miocène moyen.

Le passage de la formation du Fars inférieur à la formation sous-jacente de Ghar est progressif et sa limite est imprécise.

3.2.3.1.5. La formation de Ghar

Ghar est le nom d'une localité dans la région de Bassoura et la coupe type qu'on présente ici est celle relevée dans le puits de Zubair n°3 entre les profondeurs 461 et 590 m.

La formation de Ghar consiste principalement en sables et graviers. Les sables sont généralement grossiers non consolidés. Quelques calcaires sableux et quelques rares traces d'argiles et d'anhydrites se trouvent en plus dans la succession, mais ne dépassent pas 5 % de l'épaisseur totale de la formation.

L'épaisseur de la formation de Ghar augmente dans la direction Sud-Ouest vers ce qu'on croit être la région de son origine. Les épaisseurs représentatives dans les trois champs du Sud de l'Irak sont Nahr Umr n°1, 106,67 m; Zubair n°3, 128,62 m et Rumaila n°7, 165,80 m.

La détermination de l'âge de la formation de Ghar n'est pas possible par manque de fossiles. Uniquement en fonction de considérations stratigraphiques, cette formation appartiendrait au Miocène, ou peut-être à l'Oligocène inférieur ? Son contact avec la formation sous-jacente de Dammam est discordant.

Remarques sur l'ensemble du Groupe de Koweït

La subdivision du Groupe de Koweït en Dibdiba, Fars inférieur et Ghar dépend essentiellement de la présence des couches du Fars inférieur. Quand celles-ci sont absentes ou trop peu développées, on appelle l'ensemble de ce groupe simplement le Groupe de Koweït, car il est difficile de différencier les deux formations détritiques de Ghar et Dibdiba.

La plus grande partie de l'eau souterraine de ce groupe est une eau saumâtre ou salée, tandis qu'une quantité très petite d'eau potable se trouve dans les parties supérieures de la formation de Dibdiba. Les eaux saumâtres sont exploitées pour l'irrigation des fermes privées au Wafra et à Abdally à raison de plus de 340 millions de litre/jour au total, en utilisant des puits soit forés, soit construits à la main. Elles sont aussi exploitées par le gouvernement dans les champs de puits A et E à raison de plus de 60 millions l/jour au total. Les eaux potables sont exploitées exclusivement par le gouvernement dans les champs de puits de Raudhatain et Umm Al Aish à raison de 7 millions l/jour (fig. 1-4).

3.2.3.2. GROUPE DE HASA

Le Groupe de Hasa est une unité étendue et facilement reconnue. Il a été défini par des géologues d'ARAMCO en Arabie Saoudite, et il consiste en trois formations géologiques:

- Formation de Dammam - calcaire - Eocène Moyen
- Formation de Rus-Anhydrite-Eocène inférieur
- Formation d'Umm Al Radhuma-calcaire-Paléocène à Eocène inférieur.

Le Groupe de Hasa représente une phase de stabilité comme le montre son contenu d'anhydrite par contraste avec le Crétacé qui se caractérise par des changements stratigraphiques, des lacunes et une tectonique intense. En outre, la différence de faune qui le sépare du Crétacé sous-jacent justifie de le considérer comme un groupe distinct (NAJJAR 1975).

Après le dépôt de la formation de Dammam qui est la plus jeune formation de ce groupe, toute l'Arabie était émergée et pratiquement tout le temps de l'Oligocène et de l'Eocène supérieur en proie à l'érosion. La mer regressait et le rivage du golfe Arabique, à cette époque là peut être représenté schématiquement par la ligne brisée de la figure 3-2.

3.2.3.2.1. La formation de Dammam

Le nom de cette formation provient du nom du dôme de Dammam et du champ de Dammam à l'Est de l'Arabie Saoudite au bord du golfe Arabique où se trouvent ses affleurements typiques.

Généralement, la formation de Dammam est subdivisée en trois membres de haut en bas:

1) Membre III

Calcaire dense dolomitique, fossilifère et poreux avec silicification et dolomitisation secondaires, particulièrement en haut de la formation. Ce membre est considérablement altéré et lessivé. Quelquefois les cassures sont remplies par des dépôts plus jeunes.

2) Membre II

Calcaire crayeux qui contient localement des fossiles et qui est siliceux vers le haut. Il passe, en descendant, à un horizon sableux. L'érosion était vraisemblablement effective jusqu'au milieu de ce membre.

3) Membre I

Calcaire dolomitique massif suivi par une zone à nummulites et des couches d'anhydrite, avec des intercalations d'argiles vertes vers la base. Les couches d'anhydrite et les zones dolomitiques font transition avec la formation sous-jacente de Rus.

Au dessus de la formation de Dammam il y a des couches minces soit d'argiles vertes, le plus souvent, indiquant un environnement marin ou marécageux près de la côte du golfe, soit d'argiles rouges ou brunes indiquant des conditions continentales vers l'intérieur ou dans les parties élevées de la formation.

Les affleurements de la formation de Dammam occupent généralement de petites surfaces qui sont largement dispersées (POWERS et al. 1966):

- une bande irrégulière et étroite s'étend de Wadi As-Sahba à la latitude 25°41'N. Sa longueur est de 180 km et sa largeur est généralement de moins de 5 km. Ici, l'épaisseur visible de la formation d'Umm-Al-Radhuma, sous les dépôts du Miocène et Pliocène, ne dépasse pas 15 m.
- une succession complète de Dammam affleure dans l'escarpement ovale qui borde le dôme de Dammam. Les diamètres moyens intérieur et extérieur de l'anneau des roches de Dammam sont respectivement de 10 et 18 km. L'épaisseur maximum mesurée entre la formation sous-jacente de Rus et la couverture entourante est de 32,5 m.
- quatre petites buttes témoins de la Formation de Dammam ont été identifiées à l'Ouest du dôme de Dammam et au Nord d'Abqaiq. Un autre lambeau a été identifié près de Harad (Lat. 24°08' N, Long. 49° 04' E) au bout du champ pétrolier de Ghamar.
- un affleurement relativement large de la formation de Dammam d'une superficie de 20 km² environ, se trouve à la base de la péninsule de Qatar. En majeure partie, les roches y sont du Dammam mais des fenêtres occasionnelles de Rus sous-jacent se manifestent dans des excavations peu profondes. Ici l'épaisseur de la coupe varie entre 10 et 15 m.
- des affleurements nombreux et isolés des deux formations de Dammam et de Rus le long de la marge Est et Sud-Est d'Al-Rub'-Al-Khali montrent que les roches de l'Eocène forment un mur continu sous la couverture de sable éolien.
- Au Koweït, les roches de la formation de Dammam sont visibles dans la carrière d'Ahmadi où le toit se trouve à la profondeur de 6m au-dessous du sol.

Dans les coupes de référence de la région de Koweït Bassoura, la formation de Dammam se trouve:

à Burgan, puits n° 10 - de 60 à 237 m
à Zubair, puits n° 3 - de 589 à 827 m

La répartition et la configuration de cette formation dans l'Etat de Koweït seront présentées dans les chapitres sur l'étude hydrogéologique et on se contente ici de mentionner qu'elle se trouve dans l'Etat entier et que l'épaisseur varie entre 180 et 215 m.

L'âge de la formation de Dammam est Eocène moyen (Lutétien) à Eocène inférieur (Ypresien) comme le montrent les fossiles suivants qui ont été rencontrés en ordre descendant de haut en bas:

- Dictyoconus
- Rhapydionina mafadyeni
- Alveolina elliptica, Nummulites gizehensis, N. discorbinus etc.
- Operculina libyca
- Nummulites globulus leymerie

Les microfossiles sont généralement mal conservés dans les affleurements.

La base de la formation de Dammam n'affleure que dans le dôme de Dammam et dans le voisinage de Wadi-As-Sabha. Dans ces deux cas, l'argile schisteuse de Dammam se trouve concordante sur la formation sous-jacente de Rus. Le sommet des différents membres de la formation de Dammam est recouvert en discordance par des sédiments miocènes et pliocènes sus-jacents.

La formation de Dammam est l'aquifère le plus important dans l'Arabie orientale. Au Koweït, les eaux souterraines saumâtres sont exploitées par l'Etat à raison de 330 millions de l/jour.

3.2.3.2.2. La formation de Rus

La coupe représentative de la formation de Rus a été décrite par S.B. HENRY et J.W. HOOVER en 1934 sur le flanc du dôme de Dammam (Lat. 26°19'04" N, long. 50°07'51"E).

Dans la région de Koweït Bassoura, la formation de Rus consiste principalement en anhydrite dure, dense et massive, calcaires sans fossiles et un petit nombre de couches de marnes bleues.

Les affleurements de cette formation se trouvent dans les régions suivantes:

- une bande étroite s'étend de Wadi As-Sahba sur une distance de 180 km vers le haut;
- une plaque presque circulaire de 10 km de diamètre affleure à l'extrémité du dôme de Dammam. Ici l'épaisseur de la formation est de 56 m (POWER et al. 1966);

- un nombre de plaques isolées loin au Sud-Est d'Ali-Rub'-Al-Khali au Nord de Dhufar ont été identifiées comme appartenant aux formations de Rus et Dammam non différenciées.

Dans la région de Koweït-Bassoura, les intervalles de profondeur suivants ont été rapportés (OWEN & NASR 1958):

- à Burgan, puits 10 - 238-314 m
- à Zubair, puits 3 - 815-908 m

L'épaisseur totale de la formation dans cette région varie entre 76 et 198 m. Les variations en épaisseur sont principalement dues à des variations de la quantité d'anhydrite contenue. Généralement le Rus moyen est plus épais sur les flancs que sur les crêtes. La dissolution de l'anhydrite peut expliquer quelques différences d'épaisseur, comme le montrent les roches qui reposent de façon complexe autour du dôme de Dammam. Les variations en épaisseur semblent être reliées aux conditions originelles de dépôt, ce qui explique l'amincissement de la formation sur les points hauts structuraux (POWER et al. 1966).

La formation de Rus se trouve entre des roches de l'Eocène en haut et en bas et elle est présumée être Ypresienne. Son contact avec la formation sous-jacente d'Umm-Al-Radhuma est concordant.

3.2.3.2.3. La Formation d'Umm Al Radhuma

La formation d'Umm-Al-Radhuma a été définie par des géologues d'ARAMCO, S.B. HENRY et C.W. BROWN en 1935. C'est le nom de la région qui se situe au Nord de l'Arabie (lat. 28°41'N, long. 44°41'E). La coupe de référence a été dessinée par Max STEINEKE et J.W. HOOVER dans la Wadi Al-Batin où la formation entière peut-être vue dans ses parois raides. Ici, la coupe résulte de l'assemblage de plusieurs intervalles mesurés dans une traversée continue de 70 km de longueur depuis le haut de l'escarpement de Linah (lat. 27°38'03"N, long. 44°53'24"E). Ici, la section entière peut-être vue à l'exception des couches les plus hautes (POWERS et al. 1966).

Partout, la formation d'Umm-Al-Radhuma consiste en une série répétitive de:

- calcaires aphanitiques à foraminifères de couleur claire;
- calcaires calcarénitiques à foraminifères de couleur claire;
- calcaire dolomitiques;
- dolomies.

Les variations suivantes de la lithologie peuvent apparaître également:

- des silix se trouvent sporadiquement dans la coupe;
- les couches siliceuses et calcarénitiques sont plus communes dans les parties supérieures de la formation;
- du calcaire partiellement dolomitisé se trouve généralement dans les parties inférieures de la formation;
- à l'échelle régionale, il semble qu'il y a remplacement progressif des calcaires par les dolomies du Sud vers le Nord avec quelques exceptions;

- dans la région de Koweit-Bassoura, OWEN et NASR (1958) rapportèrent qu'Umm-Al-Radhuma consiste principalement en calcaires anhydritiques, dolomitiques et marneux. Les calcaires ont généralement des couleurs ternes, blanchâtres ou chamois. Deux couches prééminentes, mais relativement minces se trouvent dans le milieu de cette formation au Koweit Sud-Est et forment des marqueurs utiles.
- de petites quantités de soufre cristallin d'origine secondaire ont été constatées dans l'aire de Burgan.

Affleurements et épaisseur de la formation d'Umm Al Radhuma

Une ceinture assez large des roches de cette formation s'étend du Sud de Wadi Jobaliyah (Lat. 22°25'N) jusqu'à la frontière Irako-Saoudite sur une distance de 1 200 km. La largeur d'affleurement de la formation est très variable à cause de la couverture superficielle de sables et graviers et du recouvrement par les couches miocènes et pliocènes. Avant que cette couverture se soit mis en place, l'affleurement était vraisemblablement régulier, de 60 km de largeur au Sud et presque 120 km près de l'Irak.

Les affleurements de la formation d'Umm-Al-Radhuma forment une surface, généralement, doucement ondulée, inégale et parsemée de collines isolées et de bancs peu épais et discontinus. La zone surélevée au Nord Ouest d'Al Batin montre des caractères karstiques bien visibles et un système bien développé de chenaux qui suivent le pendage régional. Plusieurs chenaux élevés marquent la surface de la formation d'Umm-Al-Radhuma dans l'aire qui commence à l'escarpement de Lina et qui se termine, en se dirigeant vers le Nord-Est, à l'escarpement d'Umm-Al-Radhuma. La majorité de ces chenaux sont partiellement remplis et leur élévation actuelle varie entre 2 et 18 m au dessus du niveau de base local. On a signalé des effondrements du Miocène et du Pliocène dans les dômes et l'escarpement où affleure la formation d'Umm Al Radhuma (POWERS et al. 1966).

La formation d'Umm Al Radhuma est signalée dans la région de Koweit-Bassoura par OWEN et NASR (1958), dans le forage de Burgan, puits n°10 entre 314 et 805 m, et celui de Zubair, puits n° 3 entre 908,5 et 1 366,5 m.

Peu de zones contenant des fossiles ont été rencontrées dans cette région. En Irak du Sud, dans les parties supérieures de la formation on a rencontré:
Alveolina avec *A. ovoidea* et *A. oblonga* prédominant et *A. dolioliformis* de façon rare.

Au Koweit Sud-Est, *Rotalia* sp. et *Lochartia* sp. se trouvent à quelques 150 m au-dessus de la base de la formation. D'autres formes qu'on rencontre parfois dans la formation d'Umm-Al-Radhuma sont:

- . Orbitolites sp.
- . Quinqueloculina sp.
- . Coskinolina sp.
- . Sakesaria sp.
- . Lenticulina sp.
- . Globigerina sp.
- . etc.....

Les données paléontologiques indiquent que les parties inférieures de cette formation sont Paléocène pendant que les parties supérieures sont Eocène inférieur.

Le long de la marge occidentale, la formation d'Umm-Al-Radhuma repose sur la formation de Tayarat et on pense que, au moins, une discordance sépare les deux formations. La partie supérieure de la formation de Tayarat est une couche mince d'argile schisteuse et dolomitique de couleur bleu-gris à noir et contenant: *Fossoelphidium operculiferum* et *Omphalocyclus macroporus*. Immédiatement, au dessus se trouvent des calcaires ou dolomies avec des microfossiles définis du Paléocène inférieur.

Le contact avec la formation sus-jacente de Rus n'est visible qu'à Wadi As Shaba au Nord de la latitude 25°44' N sur une distance de 180 km où le calcaire dolomitique d'Umm-Al-Radhuma se trouve en conformité sous les calcaires tendres et crayeux de la formation de Rus. En dehors de cette aire, la formation d'Umm Al Radhuma est recouverte en discordance par les affleurements de marnes sableuses et de calcaires sableux du Miocène et du Pliocène ou des dépôts superficiels (POWERS et al. 1966).

La formation d'Umm-Al-Radhuma est une unité hydraulique épaisse. Elle est effectivement exploitée par l'ARAMCO en Arabie Saoudite pour l'approvisionnement en eau saumâtre de quelques installations et communautés. D'ailleurs elle n'est ni exploitée, ni explorée suffisamment dans l'Etat de Koweit.

CHAPITRE IV - CLIMATOLOGIE ET HYDROLOGIE DE SURFACE

4.1. CLIMATOLOGIE RÉGIONALE

On s'intéresse ici aux conditions climatologiques générales qui prédominent dans l'Irak Sud, l'Arabie Nord et Nord-Est y compris la région du golfe Arabique.

Généralement, la partie nord de la péninsule arabique est influencée par les précipitations de l'hiver méditerranéen. La variabilité extrême des conditions au Moyen Orient, à la fois pendant les saisons et dans les régions peut être mieux comprise si on se rapporte aux masses d'air qui ont des caractères différents et qui se déplacent d'un secteur à l'autre (FISHER 1961). En hiver, la position du Jet Stream sub-tropical tends à isoler l'Arabie Saoudite des précipitations amenées par les vents froids qui, autrement, pourraient y atteindre le Nord et le Nord Ouest. Les effets de la mousson de Sud Ouest sont très variables et la limite jusqu'à laquelle ils affectent vers le Nord l'Arabie Saoudite n'est pas nette. Dans l'Est, les pluies de la fin du printemps peuvent être attribuées à cette mousson de Sud Ouest.

La hauteur de la pluie moyenne annuelle dans les zones qui bordent le golfe ne dépasse pas 185 mm, avec une tendance à la diminution de la pluie vers l'intérieur, puis une petite augmentation quand le sol s'élève lentement.

L'évaporation annuelle le long de la côte orientale est de l'ordre de 2,2 à 2,5 m. Selon CARTER (1957), le déficit en eau dans une grande partie de l'Arabie Saoudite est de 1,2 et 1,4 m annuellement. En effet, il est évident qu'il y a de grandes possibilités pour que toute la pluie soit directement évaporée immédiatement. C'est seulement quand la pluie est bien concentrée, relativement intense et tombe pendant les périodes froides ou pendant la nuit qu'il y a possibilité de concentration de l'écoulement d'une vaste surface vers une petite surface ou un ruisseau et que l'on peut avoir les possibilités d'écoulement du ruisseau et d'alimentation des eaux souterraines. L'alimentation des eaux souterraines peut avoir encore lieu quand la pluie tombe directement sur les affleurements très poreux et perméables tels que les dunes de sable; dans ce cas là on a la chance d'avoir infiltration directe et mouvement descendant de l'eau jusqu'au dessous de la zone de l'air sec et chaud et d'évaporation potentielle (BURDON 1973).

Le tableau 4-1 contient quelques données sur la climatologie régionale. La figure 4-1 montre la situation des stations où ces données ont été mesurées (Meteorological office, Londres 1966).

QUELQUES DONNÉES CLIMATOLOGIQUES REGIONALES

SITUATION	Alt. m.	PERIODE	MOYENNE JOURNALIERE		MOYENNE MENSUELLE		ABSOLUE		HUMIDITE RELATIVE Moyenne des observations 0800 - 1800	PRECIPITATIONS			
			Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.		MOYENNE ANNUELLE	CHUTE MAX. DANS 24 h.	MOYENNE DU NOMBRE DE JOURS AVEC 1mm ou plus	
ASSULMAN	2		degré centigrade										
30° 28'N, 44° 43'E	202	1939-1943	32	14	48	-11	51	31	58	15	10
HAIL													
27° 30'N, 42° 02'E	971	1941-1945	29	13	44	-4	44	-6	53	25	99	64	17
RIYADH													
24° 39'N, 46° 42'E	591	1941-1945	32	17	44	-1,5	45	-7	54	32	81	61	10
SHARJAH													
	18	1922-1954	32	17	48	-1,5	51,5	-7	62	30	145	61	21
BASSOURA													
30° 21'N, 47° 47'E	2,5	1937-1947 1953-1955	30,5	18	46,5	-0,5	50,5	-4,5	73	45	185	86	21
ABADAN													
30° 21'N, 48° 16'E	2,1	1928-1942	32	18	48,5	0	50,5	-4,5	48	--	193	58	25
VILLE DE KOWEIT													
29° 21'N, 48° 00'E	5	1908-1953	29,5	20,5	46	3,5	48,5	+0,5	64	55	130	56	11
BUSHIRE													
28° 59'N, 50° 49'E	2,25	1876-1930	28	20,5	41	5,5	46	0	75	73	274	140	18
BAHRAINE													
26° 12'N, 50° 30'E	5,5	1928-1943	28	22	43,5	8,5	45	5	77	68	81	71	8
SHARJAH													
25° 20'N, 55° 24'E	5,5	1933-1945	31,5	20	45	7	48	1,5	72	63	107	109	7

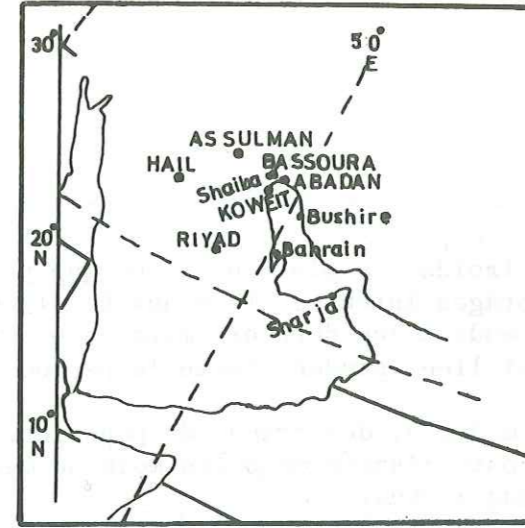


FIG.4-1. Situation des stations météorologiques régionales.

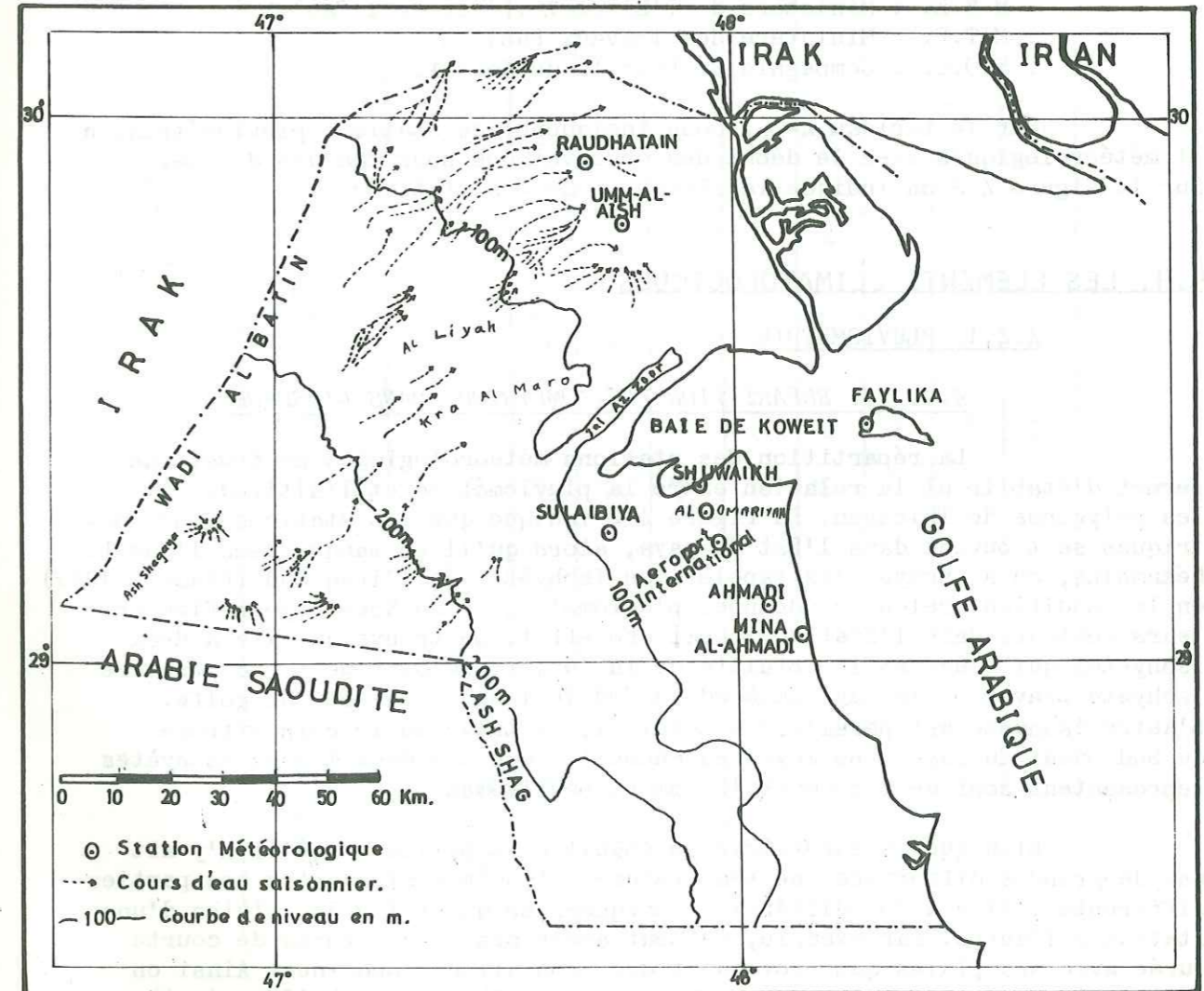


FIG.4-2. Situation des stations météorologiques au Koweit.

4.2. LE CLIMAT

Le climat de Koweït est caractérisé par des étés chauds, occasionnellement interrompus par des périodes d'humidité extrêmement élevée, et des hivers doux à froids. La pluie n'a lieu que pendant la période de Novembre à Mai. Des orages intenses et locaux ont lieu pendant les premiers mois de l'hiver, ou pendant les derniers mois de printemps. Plus généralement, des ondées légères ont lieu, pendant toute la période d'hiver.

Dés vents modérés, des orages de poussière et de sable peuvent se produire pendant toute l'année mais les mois de mai, juin, juillet ont les jours les plus poussiéreux.

4.3. LES MESURES CLIMATOLOGIQUES ET LES DONNÉES

Les données météorologiques ont été fournies par les différents services:

- . S.M. : Service Météorologique
- . M.E.E. : Ministère de l'Electricité et de l'Eau
- . M.T.P. : Ministère des Travaux Publics
- . K.O.C. : Compagnie du Pétrole de Koweït.

Sur le tableau 4-2, nous indiquons les stations pluviométriques et météorologiques avec le début des observations pour chacune d'elle. Sur la figure 4-2 on indique la situation de ces stations.

4.4. LES ÉLÉMENTS CLIMATOLOGIQUES

4.4.1. PLUVIOMETRIE

4.4.1.1. REPARTITION PLUVIOMETRIQUE DANS L'ESPACE

La répartition des stations météorologiques au Koweït ne permet d'établir ni la relation entre la pluviométrie et l'altitude, ni les polygones de Thiessen. La figure 4-2 indique que les stations pluviométriques se trouvent dans l'Est du pays, alors qu'il en manque dans l'Ouest. Néanmoins, on a essayé d'extrapoler les isohyètes de l'Iraq Sud (PARSONS 1957) en les modifiant selon les données pluviométriques de Koweït pour figurer leurs contours dans l'Etat de Koweït. En effet, on trouve qu'il y a deux isohyètes qui couvrent la totalité de la superficie de Koweït. La première isohyète traverse le pays du Nord au Sud le long de la côte du golfe. L'autre isohyète est parallèle à celui-ci, et traverse le coin extrême du Sud Ouest du pays. Les moyennes annuelles que ces deux lignes isohyètes représentent sont de 115 mm et 100 mm respectivement.

Bien que la superficie de Koweït soit petite et qu'il n'y ait pas de grandes différences de température et de pression entre ses parties différentes, il y a des différences marquées en quantités de pluies d'une station à l'autre. Par exemple, on peut avoir des orages forts de courte durée avec des pluies qui provoquent des inondations soudaines. Ainsi on peut avoir 30 mm de pluie au Fahahil pendant qu'à Ahmadi, à 10 km de là,

TABLEAU 4-2
STATIONS PLUVIOMETRIQUES ET CLIMATOLOGIQUES

No.	NOM	SITUATION		ALTITUDE en mètre	SERVICE EXPL- OITA NT.	Début Des Observations			PLUIE MOYENNE ANNUELLE en mm.	TEMPER- ATURE MOYENNE ANNUEL- LE	
		LATITUDE "Nord"	LONGITUDE "Est"			Pluie Temp.	Humi- dité	Evap- pora- tion			
1	AEROPORT INTER- NATIONAL DE KOWEIT	29° 13'	47° 58'	45	S.M.	1957	1957	1957	68	117	25.6
2	AL OMARIYA	29° 17'	47° 56'	21	MTP	1955	1955	1955	62	115	25.5
3	SHUWAIKH	29° 20'	47° 57'	11	S.M.	1953	1953	1953		120	26.0
4	ARMADI	29° 06'	48° 04'	122	KOC	1946	1947	1957		121	25.7
5	MINA AL ARMADI	29° 03'	48° 09'	16	S.M.	1956	1956	1956		99	29.9
6	UMM-AL-AISH	29° 48'	47° 46'	34	KOC	1956	1956	1956		113	25.3
7	FAYLIKA	29° 26'	48° 18'	5	S.M.	1971	1971	1971		114	24.9
8	SULAIBIYA	29° 14'	47° 43'	30	S.M.	1972	1972	1972		134	25.0
9	RAUDHATAIN	29° 55'	47° 41'	40	MEW	1961	1961	1974		108	25.0

la pluie peut être négligeable au même moment, ce qu'on peut expliquer par la situation de la station par rapport au bord de la mer et à la région de l'orage.

4.4.1.2. REPARTITION PLUVIOMETRIQUE DANS LE TEMPS

Pour connaître la répartition pluviométrique dans le temps, on a calculé les modules mensuels, c'est à dire la variation de la moyenne arithmétique des hauteurs des précipitations pour chaque mois sur un grand nombre d'années et pour les trois stations les plus représentatives dans l'Etat (voir la Figure 4-3). On constate que généralement il n'y a pas de grande différence entre les différentes stations.

Les variations de la pluie annuelle, pendant les 26 dernières années pour cinq stations sont présentées sur la figure 4-4.

La hauteur moyenne des précipitations annuelles obtenue par la moyenne arithmétique pour Koweït est de 115 mm.

Les mois les plus pluvieux vont de novembre à avril. Les mois de décembre, janvier et avril sont les plus arrosés. Le mois de février est toujours moins pluvieux que celui de janvier et le mois d'avril est plus pluvieux que celui de mars.

En hiver, du 6 décembre au 15 février, les nuages commencent à envahir le ciel et la pluie tombe après l'apparition des vents du Sud-Est.

Au printemps, du 16 février au 20 mai, particulièrement du 10 mars au 8 avril, des orages ont souvent lieu. Pendant la période du 9 avril au 13 mai, des orages locaux et brutaux se développent. Des pluies intenses tombent pendant un petit nombre de minutes. Par exemple, le 22 avril 1975 à la station d'Ouariya, 39,1 mm de pluies sont tombées en 25 minutes.

En été du 21 mai au 4 novembre, les nuages orageux et les pluies ne paraissent que très rarement, et à la fin de cette période là les nuages commencent à augmenter.

Le tableau 4-3 montre l'intensité maximum de pluie mesurée dans les différents stations.

PARSONS CORPORATION (1964) a utilisé les données de pluies orageuses pour calculer les relations: - intensité - durée - fréquence et pour étudier les modèles des orages.

On a relevé toutes les deux minutes les pluies dont l'intensité égalait ou excédait 0,1 mm. Les pluies maximums de durée de 10 à 2880 minutes ont été rangées par ordre décroissant et exprimées en mm, sur une échelle logarithmique tandis que le temps en minutes est reporté lui aussi sur échelle logarithmique. Pour les observations de 9 ans, une formule reliant intensité - durée - fréquence de la pluie a été déterminée:

$$i = \frac{330 F^{0,85}}{(t + 5)^{0,84}}$$

i = intensité moyenne de pluie en mm/hr;

t = temps en minutes qui peut être égalé ou dépassé une fois dans un nombre d'années F

Le tableau 4-4 contient les résultats obtenus.

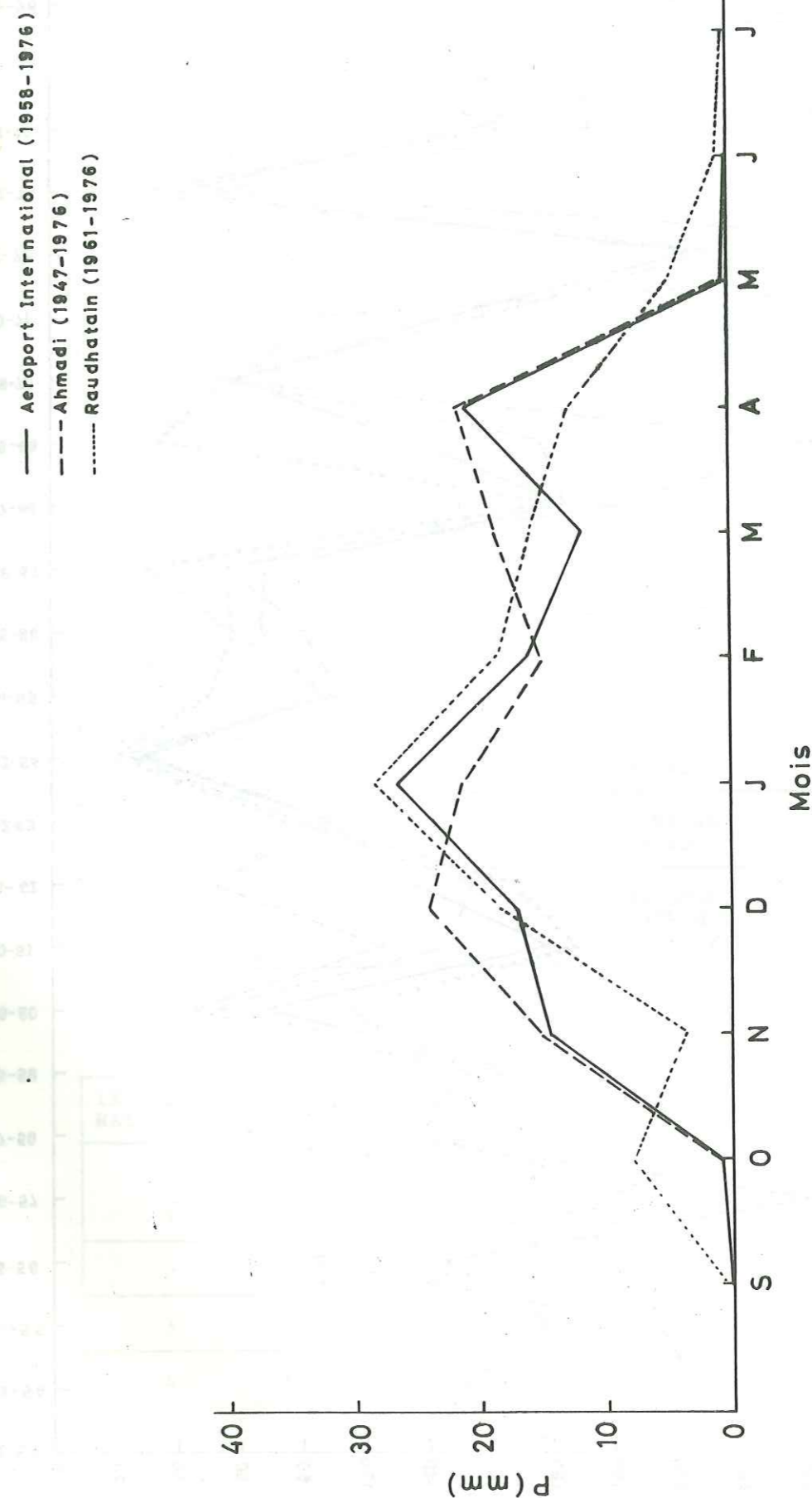


FIG. 4-3. — Modules pluviométriques mensuels.

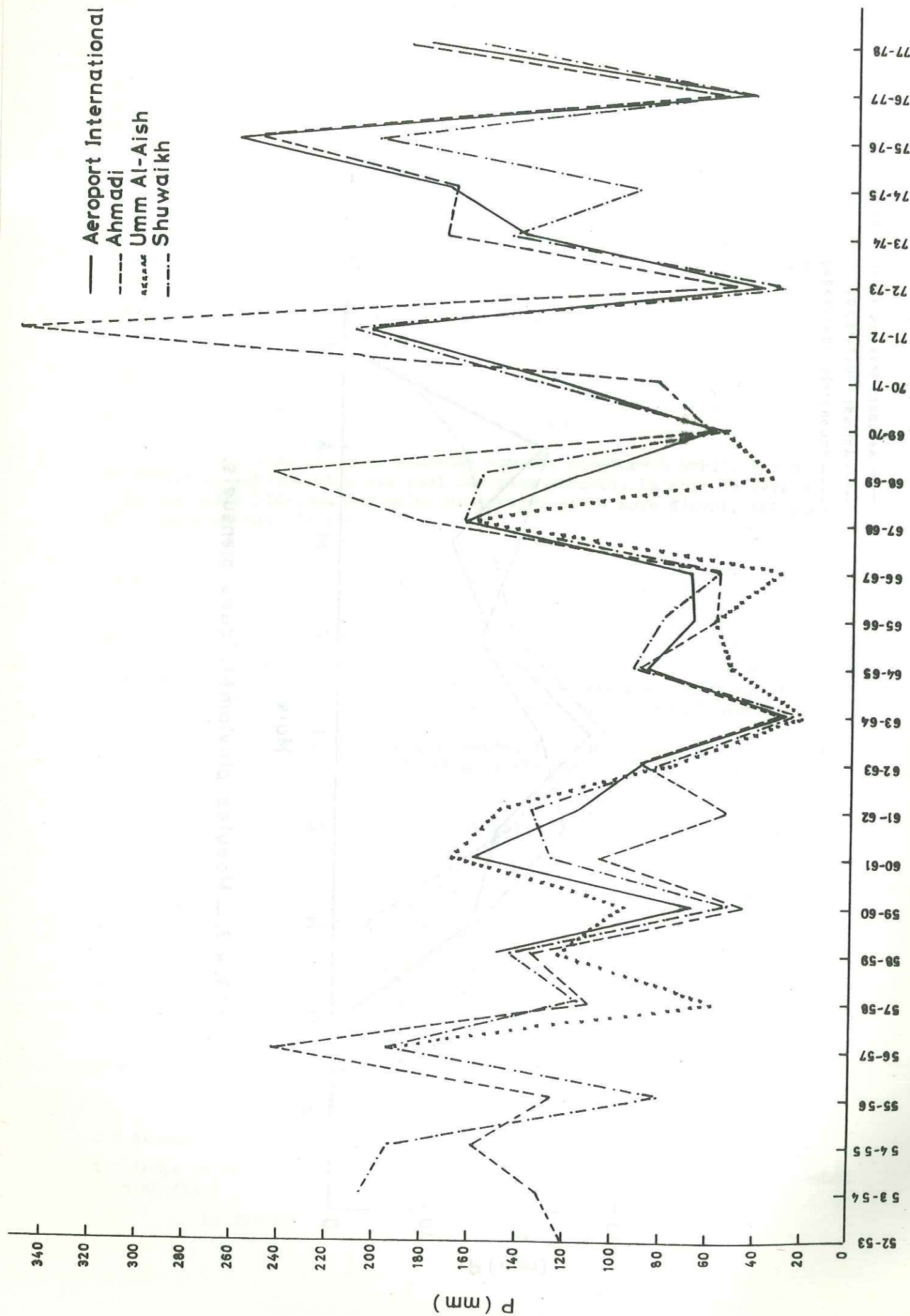


FIG. 4-4.— Variation de la pluviométrie pour 4 stations au cours de 26 années

TABLEAU 4-3
INTENSITÉ MAXIMUM DE PLUIE

INTENSITÉ DE PLUIE EN mm/min.	HAUTEUR DE LA LAME D'EAU EN mm.	DURÉE EN HEURE ET MINUTES	STATION	DATE
1,9	38,4	00:20	AEROPORT INTERNATIONAL DE KOWEIT	4 April 1976
1,6	39,1	00:25	OMARIYA	22 April 1975
1,1	38,2	00:35	AEROPORT INTERNATIONAL DE KOWEIT	22 April 1975
1,0	28,0	00:27	"	10 Fev. 1976
0,9	52,0	01:00	SULAIBIYA	3 Mars. 1954
0,8	53,9	01:00	FAYLIKA	17 Mars. 1972
0,6	24,5	00:40	AEROPORT INTERNATIONAL DE KOWEIT	11 Nov. 1967
0,5	61,6	02:05	AHMADI	16-17 Mars 1972
0,4	20,2	00:50	MINA AL AHMADI	12 April 1971
0,3	17,2	00:50	AEROPORT INTERNATIONAL DE KOWEIT	12 April 1972

TABLEAU 4-4

INTERVALLE DE RETOUR EN ANS	INTENSITÉ MOYENNE EN mm/hr. POUR UN TEMPS SPECIFIÉ (t), EN MINUTE.						
	5	10	30	60	240	1440	2880
1	48	35	17	10	3,3	0,73	0,41
2	86	63	30	18	5,9	1,3	0,71
3	187	137	65	39	13	2,9	1,6
4	342	252	120	71	23	5,3	2,9

TABLEAU 4-5

TEMPÉRATURES MOYENNES MENSUELLES ET TEMPÉRATURES MOYENNES ANNUELLES

STATION	AEROPORT INTERNATIONAL DE KOWEIT		SHUWAIKH		AHMADI		MINA AL AHMADI		UMM-AL-AISH		RAUDHATAIN	
	1968-1977		1953-1976		1956-1976		1956-1976		1956-1970		1974-1977	
PERIODE	MAX. JOUR.	MIN. JOUR.	MAX. JOUR.	MIN. JOUR.	MAX. JOUR.	MIN. JOUR.	MAX. JOUR.	MIN. JOUR.	MAX. JOUR.	MIN. JOUR.	MAX. JOUR.	MIN. JOUR.
MOYENNE												
Nombre d'annees	16	16	16	10	10	10	10	10	10	9	9	4
Janvier	18,5	7,9	12,4	18,4	9,0	13,7	17,6	8,3	12,9	19,0	6,2	12,6
Fevrier	20,7	9,3	15,0	20,7	10,8	15,7	20,4	10,3	15,3	20,7	8,3	14,5
Mars	26,1	13,5	19,6	26,0	14,7	20,3	25,8	14,0	19,9	26,8	12,3	19,5
Avril	31,2	18,3	24,4	30,3	18,8	24,5	30,2	18,3	24,3	30,8	16,5	23,7
Mai	38,2	23,7	31,1	37,8	24,7	31,3	37,9	24,3	31,1	38,6	22,3	30,5
Juin	43,4	27,1	35,9	42,6	28,1	35,3	43,3	27,6	35,5	43,6	26,4	35,0
Juillet	44,8	28,8	37,3	43,9	29,7	36,8	44,5	29,2	36,9	45,4	28,3	36,9
Aout	44,7	28,1	36,8	44,0	29,0	36,6	44,2	28,6	36,4	44,9	27,7	36,3
Septembre	41,4	24,2	33,4	40,7	25,5	32,1	41,0	25,0	33,0	42,0	23,7	32,9
Octobre	35,5	19,5	27,3	34,9	20,9	27,9	34,9	21,4	28,1	36,1	18,4	27,3
Novembre	26,5	13,9	20,1	27,3	15,3	21,3	26,3	15,3	20,8	26,3	13,1	19,7
Decembre	20,0	8,5	14,1	20,4	9,9	15,1	20,1	9,8	14,9	20,7	7,8	14,3
ANNEES	32,6	18,6	25,6	32,3	19,7	26,0	32,2	19,3	25,7	32,9	17,6	25,3

57

58

4.4.2. LA TEMPERATURE

Les données de la température dans les stations de mesure commencent à partir d'années différentes pour des raisons diverses.

La température est généralement forte pendant la plupart des jours de l'année, mais elle varie d'une saison à l'autre.

Les mesures de température effectuées aux stations Aeroport International de Koweit, Shuwaikh, Ahmadi, Mina Al-Ahmadi, Umm-Al-Aish et Raudhatain donnent une température moyenne annuelle de 25,6° c (voir tableau 4-5 et figure 4-5).

Le mois le plus chaud est le mois de juillet avec une température de 36,9°c et le mois le plus froid est le mois de janvier avec une température de 12,8°c.

Le maximum absolu mesuré à Koweit (50,8°c) a été mesuré au Shuwaikh en juin 1954. Le minimum absolu de -4,0°c a été mesuré à l'Aéroport International de Koweit le 20 janvier 1964.

En hiver, l'écart entre le maximum et le minimum journalier est très marqué. On peut y avoir un minimum de -4,0°c et un maximum de 15°c pendant le même jour.

4.4.3. LES VENTS

Les vents du Nord-Ouest, et dans une certaine mesure les vents du Sud-Est sont les plus fréquents (voir la figure 4-6). Les vents d'autres directions sont moins fréquents et leur durée est plus courte. Les vents du Nord Ouest soulèvent la poussière et la sable fréquemment, en particulier quand leur vitesse est supérieure à 12 km/h. Néanmoins, quand un gradient barométrique à forte pente existe, les vents forts du Sud et du Sud Est produisent des tempêtes poussiéreuses, mais celles-ci sont moins fréquentes.

Le tableau 4-6 indique le nombre de jours pendant lesquels la poussière et le sable réduisent la visibilité à moins de 4, 1, 0,6 et 0,1 km pendant la période de 1962 à 1973.

Tableau 4-6: Nombre moyen des jours avec la visibilité dans certaines étendues

VISIBILITE	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
Moins de 4km	9,5	9,7	11,1	10,5	12,7	14,7	13,4	8,1	7,4	7,2	6,7	7,6	119,5
Moins de 1km	3,7	3,5	4,2	3,8	4,7	5,9	5,7	2,6	1,7	2,0	1,6	2,7	42,3
Moins de 600 m	3,4	2,3	2,5	2,7	3,1	4,0	3,7	1,3	1,2	1,6	1,3	2,0	29,0
Moins de 100 m	2,3	0,7	0,8	1,6	0,5	0,4	0,3	0,3	0,4	0,8	0,7	1,2	10,2

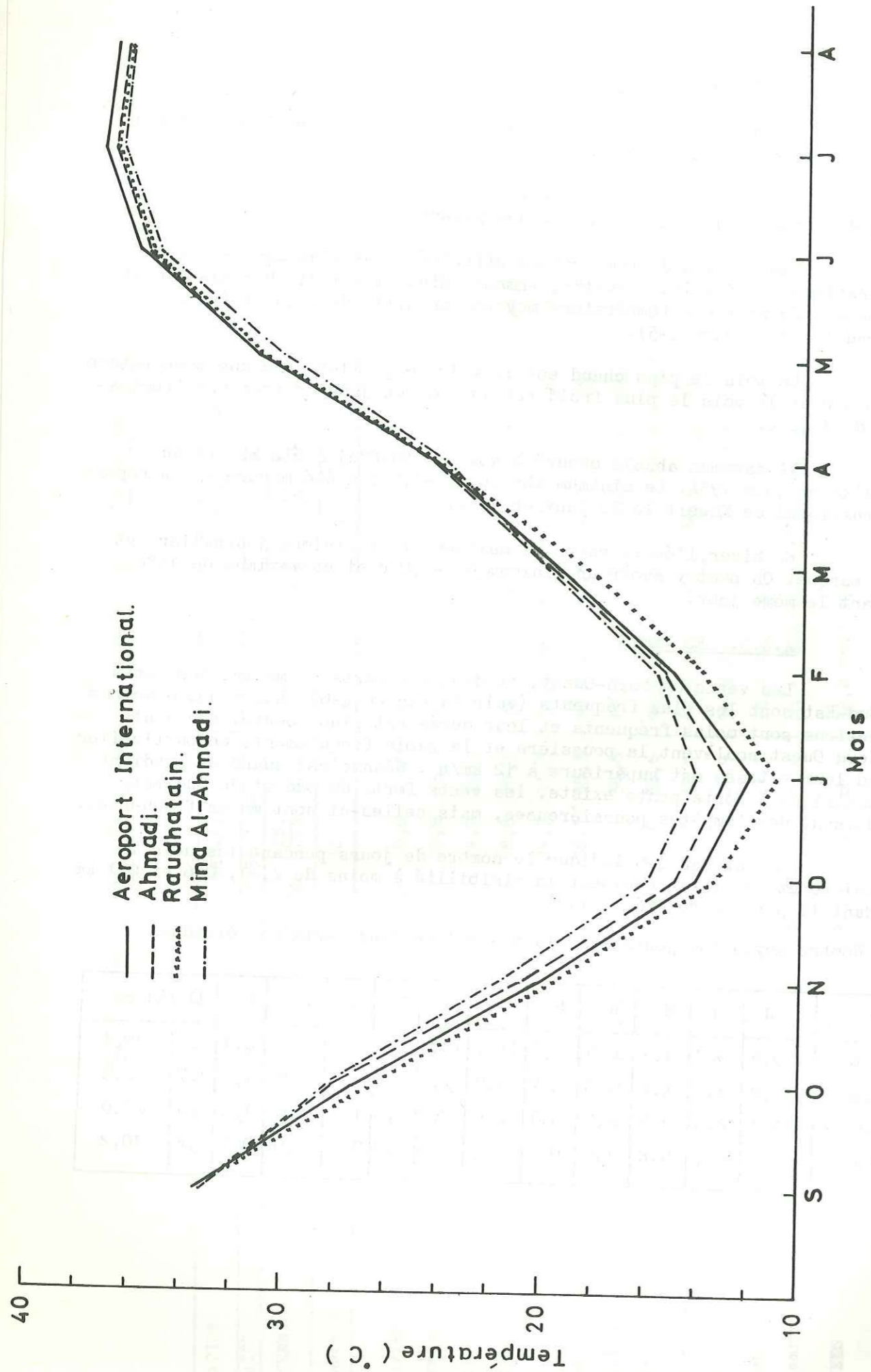


FIG. 4-5.—Températures moyennes mensuelles pour 4 stations.

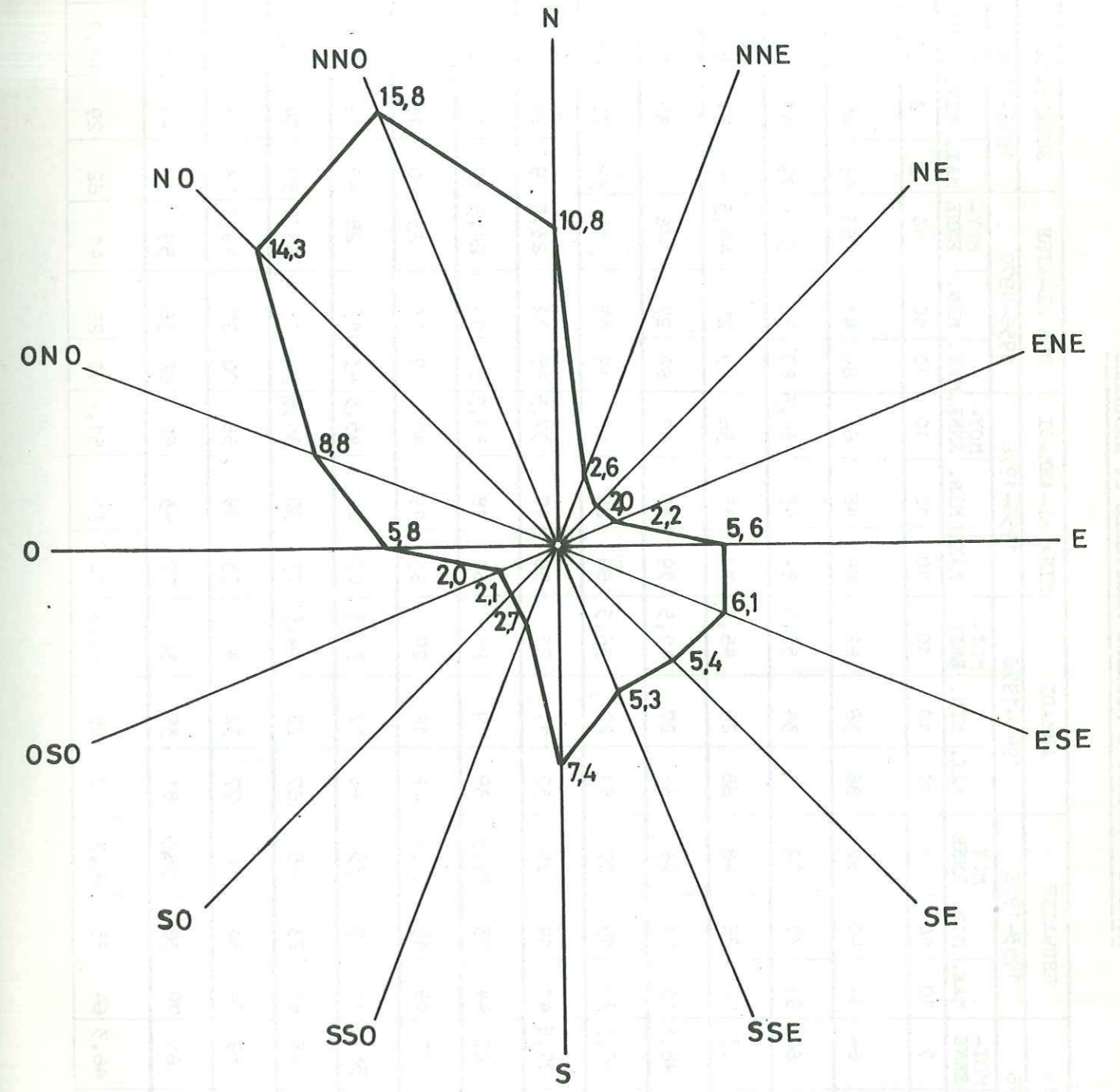


FIG. 4-6.—Directions des vents (Fréquence en %).

STATION	AL-OMARIYA			SEUWAIKH			ARMADI			MINA AL-ARMADI			UMM AL-AISH			SULAIBIYAH			FAYLIKA		
	1955-1976			1953-1976			1947-1976			1956-1976			1956-1976			1972-1976			1971-1976		
PERIODE	MAX. MIN.	MOY-ENNE		MAX. MIN.	MOY-ENNE		MAX. MIN.	MOY-ENNE		MAX. MIN.	MOY-ENNE		MAX. MIN.	MOY-ENNE		MAX. MIN.	MOY-ENNE		MAX. MIN.	MOY-ENNE	
NOMBRE D'ANS	7	7	7	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	2	2	2
J	88	64	62	84	62	62	84	66	66	89	41	65	86	45	65,5	87	41	64			
F	85	60	59	81	59	57,5	84	64,5	83	32	57,5	79	58	37	58	82	38	60			
M	77	53	48	70	48	46,5	77	56	69	20	44,5	74	34	54	77	30	53,5				
A	71	48,5	46	67	46	47,5	79	57	69	27	48	71	30	50,5	76	29	52,5				
M	59	40,5	37	55	37	36,5	69	42	49	15	32	59	27	43	71	21	46				
J	40	27,5	29	41	29	27	58	37,5	35	12	23,5	39	24	31,5	63	19	41,5				
J	41	29	29,5	44	29,5	29	61	39,5	5	14	24,5	31	19	25	59	19	39				
A	47	32	31,5	48	31,5	29	63	41	37	13	25	40	16	28	72	20	46				
S	53	36,5	35	53	35	31,5	67	45,5	43	13	28	49	19	34	77	21	49				
O	72	45	45	67	45	44,5	73	51,5	58	15	36,5	57	24	40,5	83	29	56				
N	83	59	54	74	54	4	73	56	70	27	48,5	73	33	53	78	38	58,5				
D	85	61	58,5	79	58,5	58	77	60	82	36	59	85	45	65	85	47	66				
ANNÉE	67	46,3	44,5	64	44,5	43,6	72	51,4	60	22	41	62	29	45,7	76	29	52,7				

4.4.4. HUMIDITE ET HYGROMETRIE

Les moyennes mensuelles d'humidité relative varient entre 24 % en été et 66% en hiver (été: juin, hiver: janvier). Les moyennes mensuelles maximums varient entre 31 % et 89 % pendant que les moyennes mensuelles minimums varient entre 12 % et 48 %.

L'humidité relative varie d'un jour à l'autre à cause de la différence de température et de direction des vents. Pendant quelques jours en été, l'humidité relative peut atteindre 95 % ou 100 % quand les vents de Sud-Est deviennent prédominants. Il y a aussi des variations journalières d'humidité; celle-ci augmente pendant les premières heures du jour, diminue avec l'augmentation de la radiation solaire, et puis, augmente de nouveau pendant la nuit.

Dans la région côtière du Sud, à Ahmadi et à Fahahil, la moyenne de l'humidité est relativement haute.

Les moyennes annuelles relatives se situent entre 41 % et 53 % (voir tableau 4-7).

4.4.5. EVAPORATION

L'évaporation au Koweït a été mesurée avec le bac d'évaporation de la classe A aux stations suivantes:

- Aeroport International de Koweït (1968-1977)
- Al-Omariyah (1962-1977).

Les moyennes mensuelles de l'évaporation mesurée aux évapomètres des deux stations sont les suivantes:

Tableau 4-8 : Moyennes mensuelles de l'évaporation mesurée

STATIONS	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Annuelle
Aéroport International de Koweït	102,3	126,0	223,2	282,0	415,4	585,0	613,8	548,7	414,0	269,7	165,0	102,3	3847,4
Omariyah	23,7	112,0	186,0	231,0	344,1	459,0	480,5	427,8	318,0	213,9	126,0	89,9	3071,9
Moyenne	93,0	119,0	204,6	256,5	379,8	522,0	547,2	488,3	366,0	241,8	145,5	96,1	3459,7

Donc l'évaporation mesurée aux stations par les bacs de classe "A" donne une valeur moyenne annuelle égale à 3 460 mm environ. Cette évaporation très élevée conduit à la concentration des sels au sol ou près du sol en enrichissant les couches supérieures en gypse, sel gemme et carbonate de calcium (FUCH et al. 1968).

4.4.5.1. EVAPORATION THEORIQUE (METHODE DE PENMAN)

H.C. PENMAN a utilisé en 1943 le concept de bilan de chaleur et le concept de transfert de masse pour calculer l'évaporation d'une surface libre d'eau E_0 .

Pour calculer E_0 on a utilisé le monogramme construit par PENMAN (Fig. 4-7), en employant les données enregistrées à la station météorologique de l'Aéroport International de Koweit (tableau 4-10),

où

t = température moyenne annuelle en °C;

h = moyenne de l'humidité relative;

U_2 = moyenne de la vitesse des vents (à 2 mètres au-dessus du sol);

$\frac{n}{b}$ = moyenne mensuelle de la durée du grand soleil ou n = nombre des heures véritables de grand soleil par jour, b = nombre possible maximum des heures de lumière du soleil par jour (du lever du soleil au coucher du soleil);

R_a = moyenne mensuelle de radiation solaire entrante (flux de la radiation des ondes courtes de la haute atmosphère de la terre) en Cal/cm²/jour (voir tableau 4-9).

La figure 4-8 représente des valeurs de l'évaporation calculées et mesurées ainsi que les valeurs de la pluie.

4.4.5.2. EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE

4.4.5.2.1. Méthode de BLANEY-CRIDDLE

L'évapotranspiration potentielle a été calculée en appliquant la formule de Blaney-Criddle comme suit (SCET 1970):

$$ETP \text{ mm} = K. p. (0,4572 t + 8,128)$$

où

K = un coefficient qui est fonction des cultures et de la zone climatologique (on a utilisé $K = 0,85$);

p = pourcentage de la durée moyenne du jour en relation de la moyenne annuelle.

t = température moyenne mensuelle en °C.

Le tableau 4-11 contient les résultats obtenus.

4.4.5.2.2. Méthode de PRESCOTT

Dr. Mahmoud H. ABDEL AZIZ, cité dans SCET 1970, a effectué des essais à la ferme expérimentale d'Omariya dans lesquels il a comparé les besoins réels en eau pour la luzerne. Il a observé l'évapotranspiration avec un réservoir Colorado et il a calculé l'évapotranspiration en appliquant les formules de Blaney-Criddle et de Thornthwaite. La figure 4-9 représente les résultats obtenus. On constate que l'ETP calculée en appliquant les formules est toujours plus basse que celle qui est

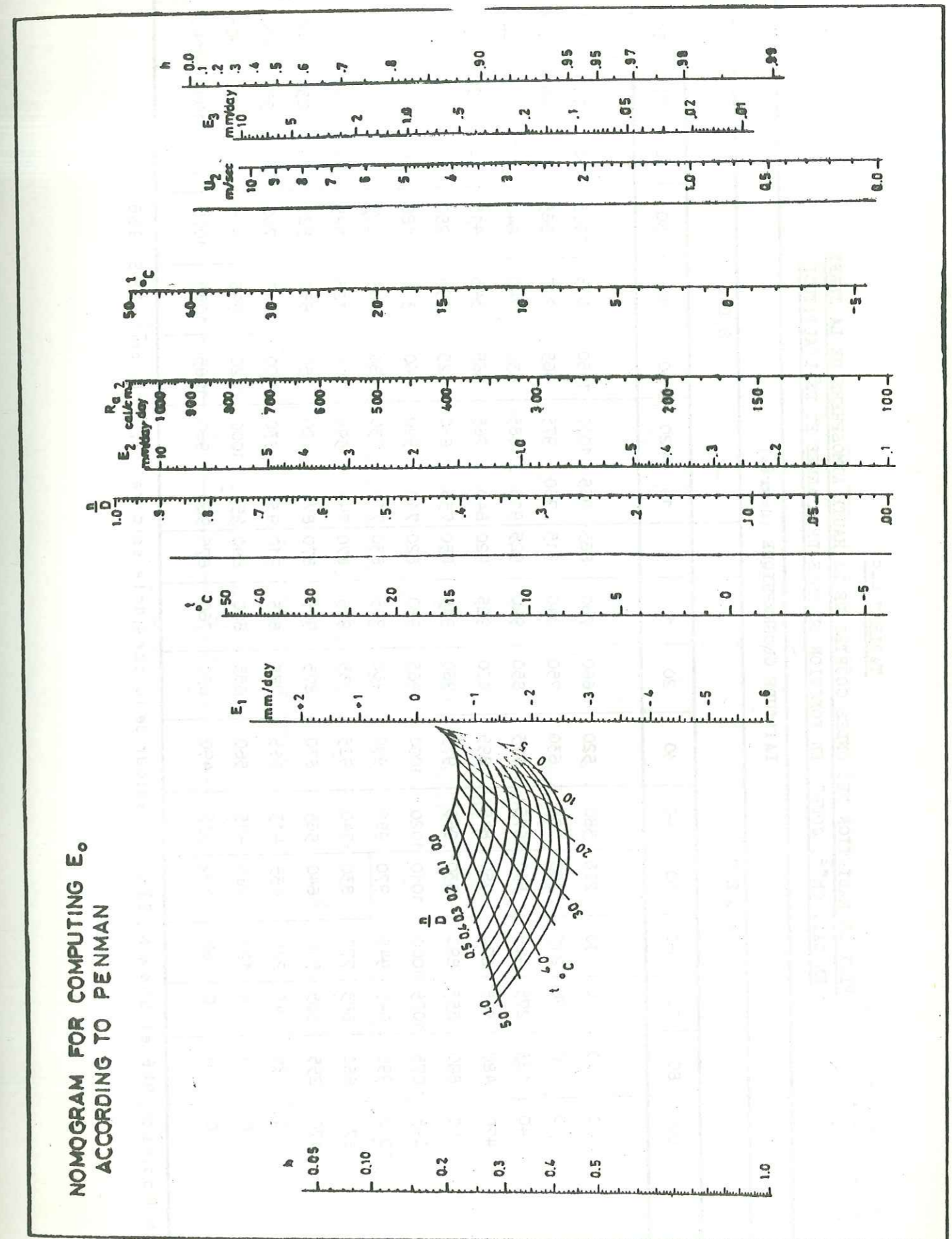


TABLEAU 4-9

FLUX DE RADIATION DES ONDES COURTES DE LA HAUTE ATMOSPHERE DE LA TERRE
EN CAL. CM⁻². JOUR⁻¹ EN FONCTION DU MOIS DE L'ANNÉE ET DE L'ALTITUDE

MOIS	LATITUDE GEOGRAPHIQUE (degrés)																		
	N O R D										S U D								
	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
J	0	0	0	90	225	380	520	660	780	885	965	1020	1050	1055	1035	1000	1000	1035	1055
F	0	0	70	215	360	505	630	750	840	915	960	975	965	925	865	785	685	645	660
M	40	125	275	425	555	675	775	850	920	925	915	885	830	740	640	510	375	225	135
A	470	480	565	670	750	845	895	920	925	920	840	765	665	545	415	280	130	15	0
M	900	890	855	890	930	965	975	960	915	850	755	650	525	390	250	110	10	0	0
J	1085	1075	1025	1000	1010	1020	1000	965	920	820	710	590	460	315	180	55	0	0	0
J	1010	995	945	945	970	985	990	960	905	830	710	730	480	345	205	75	0	0	0
A	670	660	685	770	830	740	925	935	915	870	795	595	705	325	325	190	55	0	0
S	170	255	385	510	640	565	830	875	905	870	875	820	750	650	525	390	250	100	15
O	0	25	145	285	435	415	685	785	865	910	935	930	900	840	760	660	550	450	440
N	0	0	15	120	265	415	560	685	800	890	955	1000	1020	995	975	920	885	905	920
D	0	0	0	60	190	335	490	630	760	875	960	960	1065	1080	1075	1060	1090	1140	1160

D'après N. Robinson, 1966, et Shaw, N. 1928.

Valeur de la constante solaire: 2,0 cal. cm⁻² I.P.S. 1956.

TABLEAU 4-10

MOYENNES MENSUELLES DE L'EVAPORATION MESURÉE ET CALCULÉE, STATION METEOROLOGIQUE
DE L'AEROPORT INTERNATIONAL (1957 - 1977)

MOIS	h%	t°C	$\frac{n}{D}$	Ra Cal/cm ²	U ₂ m/sec	E ₁ mm/j	E ₂ mm/j	E ₃ mm/j	E ₀ mm/m	E _{piche} mm/m	E* bac classe A mm/m	P mm/m	E ₀ /E _{piche}	E ₀ /E _{bac classe A}
J	63,20	12,50	0,68	529,34	3,94	-1,74	2,58	1,61	75,95	152,10	102,30	26,20	0,50	0,74
F	56,80	15,10	0,69	638,00	4,44	-1,81	3,35	2,10	101,92	201,90	126,00	15,20	0,50	0,81
M	47,10	19,60	0,65	780,00	5,00	-1,89	4,32	3,10	171,43	347,30	223,20	11,40	0,49	0,77
A	44,50	24,40	0,62	869,66	4,92	-1,86	5,10	3,60	205,20	424,10	282,00	20,00	0,48	0,73
M	32,00	31,10	0,70	974,00	4,98	-2,28	6,50	5,50	301,32	669,90	415,00	4,80	0,45	0,73
J	19,90	35,80	0,77	997,66	5,98	-2,90	7,50	7,70	369,00	917,40	585,00	T	0,40	0,63
J	21,10	37,40	0,76	988,00	5,69	-2,80	7,50	7,50	378,20	964,40	613,80	0	0,38	0,59
A	24,00	36,80	0,83	925,66	5,55	-2,8	8,10	7,50	396,80	848,20	548,70	0	0,47	0,72
S	28,90	33,60	0,83	823,70	4,69	-2,62	6,20	5,60	275,40	658,30	414,00	T	0,42	0,67
O	42,10	27,30	0,81	790,33	3,86	-2,20	5,50	3,40	207,70	440,00	269,70	3,80	0,47	0,77
N	52,90	20,10	0,75	568,33	3,71	-1,95	3,40	1,90	100,50	259,00	165,00	14,00	0,39	0,61
D	60,30	14,10	0,69	499,33	3,83	-1,73	2,54	1,50	71,61	176,20	102,30	18,40	0,41	0,70
Total									263,53	5 455,80	3847,00	113,80	0,45	0,71

* Pour les années 1962-1977.

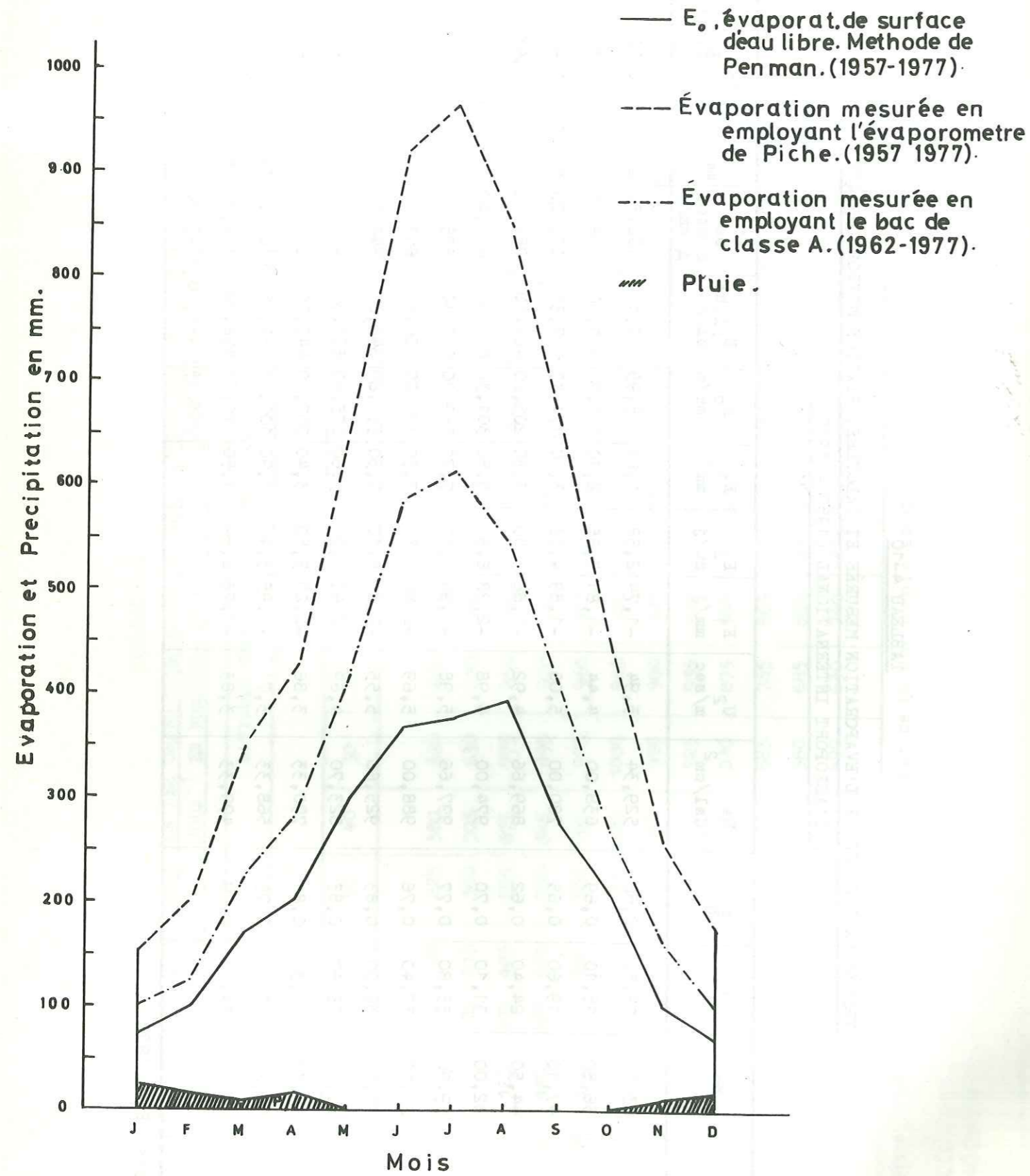


FIG. 4-8. — Variations moyennes mensuelles de l'évaporation et de la pluie à la station de l'Aéroport International.

TABEAU 4-11

EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE (Méthode de Blaney-Criddle)

STATION	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	TOTAL
AEROPORT INTERNATIONAL	89,3	92,2	122,7	144,2	180,4	196,3	203,6	195,9	165,9	142,4	107,5	91,4	1731,8
OMARIYA (FERME EXPERIMENTALE)	87,9	90,8	121,7	143,6	178,9	194,1	201,7	193,8	163,4	140,0	106,7	89,7	1712,3
UMM AL AISH	84,1	91,7	122,7	142,6	177,8	196,7	203,9	196,3	164,7	141,2	105,3	87,5	1714,5

TABEAU 4-12

EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE (Méthode de Prescott)

STATION	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	TOTAL
MENSUELLE AEROPORT INTERNATIONAL	80,5	98,7	145,0	182,7	279,6	363,3	378,4	376,9	303,4	223,3	133,2	91,3	2656,3
JOURNALIERE	2,5	3,5	4,0	6,1	9,0	12,1	12,2	1,1	10,1	7,2	4,48	2,9	
MENSUELLE OMARIYA (FERME EXPERIMENTALE)	75,3	91,6	137,0	176,2	260,5	330,9	374,7	359,9	290,1	215,6	133,4	88,7	2553,9
JOURNALIERE	2,4	3,3	4,4	5,6	8,2	11,1	12,1	11,6	9,7	6,8	4,4	2,8	
MENSUELLE UMM AL AISH	75,1	104,1	151,0	183,1	299,5	393,6	393,9	374,4	337,6	262,7	144,1	93,2	2814,6
JOURNALIERE	2,4	3,7	4,8	6,1	9,5	13,1	12,8	11,8	11,2	8,3	4,8	2,9	

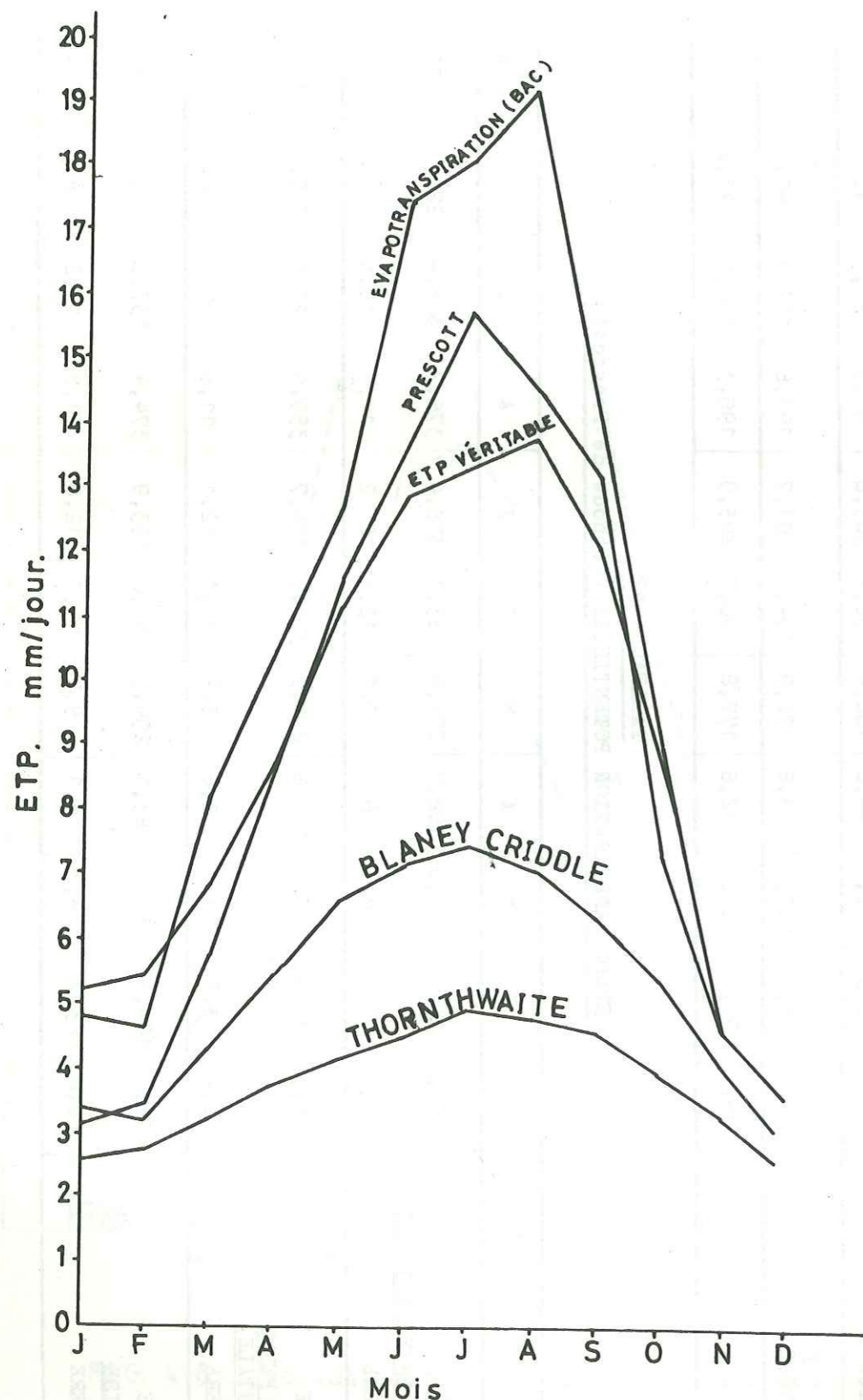


FIG. 4-9. — Évapotranspiration moyenne (d'après Dr. Mahmoud H.A. Aziz).

véritablement observée, en particulier pendant les mois les plus chauds. Dans ce but, la formule de PRESCOTT a été examinée et la courbe est reproduite dans la même figure. Comme on peut le voir, il semble qu'elle s'accorde mieux avec les résultats véritables.

La formule de PRESCOTT est:

$$ETP = K \cdot E_w \cdot 0,75$$

où

ETP = Évapotranspiration potentielle en mm;

K = Coefficient de végétation dont les valeurs sont les suivantes: pour E_w exprimé en centimètres:

K = 2 pour les récoltes de fourrage et de céréales;
 1,5 pour les récoltes d'évaporation moyenne (les légumes en particulier);
 1,0 pour les récoltes des arbustes.

E_w = 21,9(s·d) pour un mois de 31 jours;
 21,2(s·d) pour un mois de 30 jours;
 19,8(s·d) pour un mois de 28 jours.

s = Tension de vapeur saturante exprimée en cm de mercure;

d = 1 - h ; h = humidité moyenne mensuelle.

Les résultats journaliers et mensuels obtenus en mm couvrent trois stations et sont donnés dans le tableau 4-12. Dans les calculs la valeur de K = 1,5 a été appliquée.

4.5. HYDROLOGIE DE SURFACE

4.5.1. HYDROGRAPHIE REGIONALE

Bien que les pluies en Arabie soient faibles, le réseau hydrographique y est bien marqué et dense. La plupart des oueds sont profonds, ce qu'on peut expliquer par la grande intensité de la pluie quand celle-ci tombe (on peut avoir dans quelques régions une hauteur de 50 mm qui tombe en un petit nombre d'heures). Ce phénomène caractérise l'hydrologie des zones arides.

Chaque année, les ruisseaux et les inondations se forment dans les oueds principaux, pendant que les oueds secondaires peuvent demeurer sans écoulement pour plusieurs années.

En Arabie, il n'y a pas de rivières permanentes à l'exception de quelques rivières secondaires dans les montagnes d'Assir et du Yémen dans lesquelles l'écoulement diminue graduellement et disparaît avant de déboucher à la mer.

Le réseau hydrographique peut être subdivisé en plusieurs groupes (voir la figure 4-10 d'après M.S. SAFADI 1973).

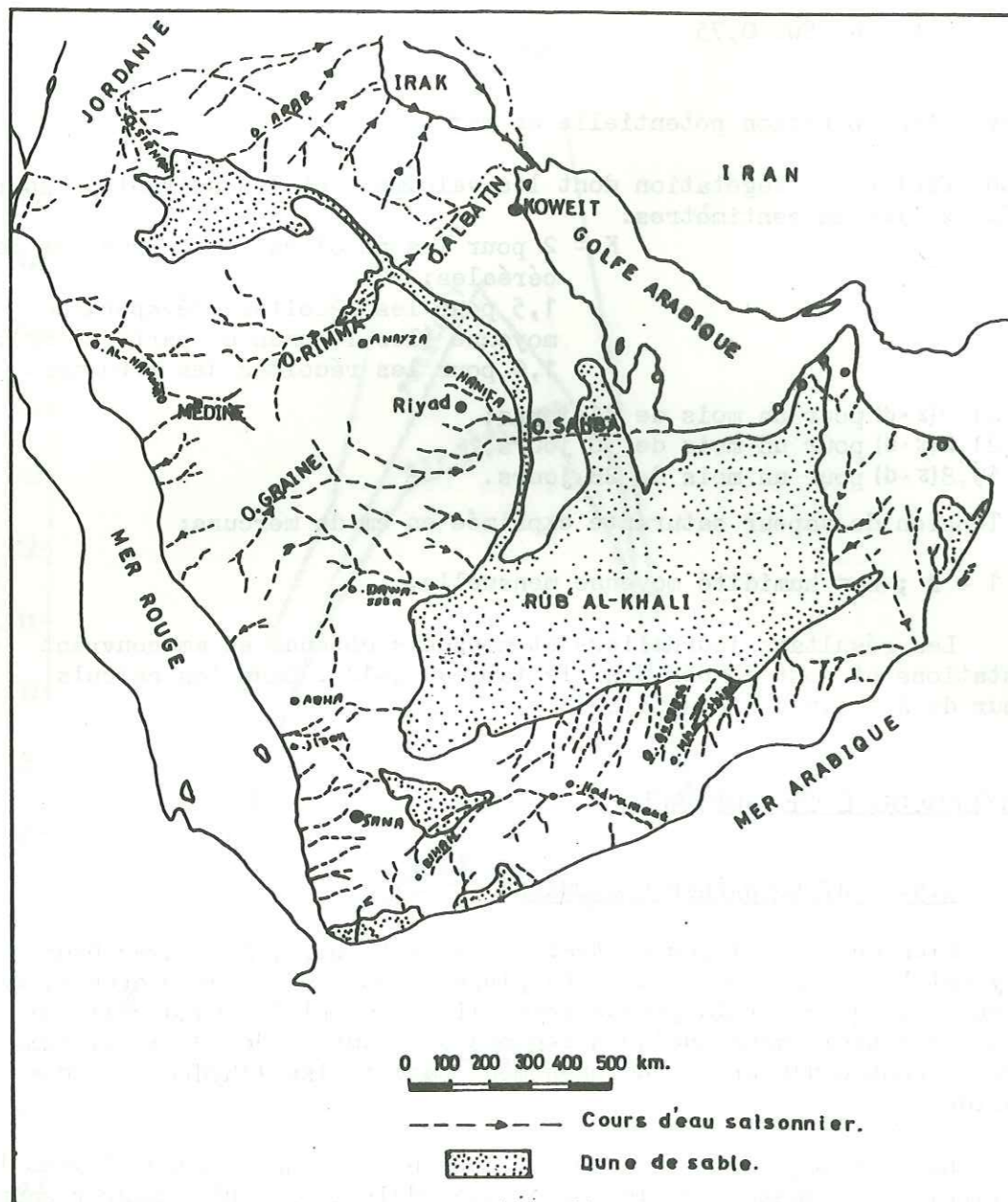


FIG. 4-10. — Réseau hydrographique régional.

4.5.1.1. LES OUEDS DES BANDES COTIÈRES

Ce sont les oueds qui prennent naissance aux pieds des montagnes côtières et qui donnent sur la mer. Ils sont relativement courts à l'exception de quelques oueds importants comme Wadi Al-Hammad qui passe par Médine, Wadi Jizan, et quelques autres oueds côtiers au Yémen, et Wadi Halfine. Sur leurs bords, il y a des agglomérations qui se servent de leurs eaux de surface et de leurs eaux souterraines emmagasinées dans leurs alluvions peu profondes.

4.5.1.2. LES OUEDS INTÉRIEURS OUVERTS

Ce sont des oueds qui se forment soit aux pieds des montagnes côtières, soit aux pieds des montagnes intérieures et qui se déversent dans les mers et les rivières. Ils sont généralement très longs et ils forment de grands bassins saisonniers. Ces oueds peuvent être subdivisés, selon les mers et les rivières dans lesquelles ils se jettent comme suit :

- les oueds se jettant dans l'Euphrate comme les oueds de Wadi Oubaid et prenant naissance dans le Nord de Hammad;
- les oueds qui débouchent dans le Golfe Arabe comme Wadi Al Batin qui est la continuation de Wadi Al Rimma, Wadi Hanifa dans la région de Riyad et Wadi Al Shaba qui est la continuation de Wadi Grain;
- les oueds qui se jettent dans la mer Arabe comme Wadi Hadramaout qui est la continuation de Wadi Bihan.

4.5.1.3. LES OUEDS INTÉRIEURS FERMÉS

Ce sont les oueds qui sont formés comme les précédents, aux pieds intérieures des montagnes côtières et aux pieds des reliefs intérieurs, mais qui se déversent dans des bassins et dépressions fermés. Ces oueds forment plusieurs bassins et contribuent à l'alimentation des eaux souterraines dans la péninsule Arabe. La plupart de ces oueds se déversent dans le désert d'Al Rub Al'Khali. On mentionne ici, comme exemples, les oueds de Wadi Mhaithine qui se jettent dans Al'Rub Al'Khali. Il y a aussi l'oued Sirhan au Nord Ouest qui se jette dans la dépression d'Al'Azraq en Jordanie.

4.5.2. CYCLE DE L'EAU AU KOWEIT

On a déjà présenté quelques aspects hydrographiques de Koweït dans le chapitre 2 sur la topographie. On se contentera ici de présenter quelques remarques sur le cycle de l'eau au Koweït.

Au Koweït, les conditions climatologiques extrêmes contrôlent beaucoup les processus qui affectent les eaux souterraines. La quantité d'eau disponible à l'infiltration est petite puisque la moyenne annuelle des pluies est seulement de 115 mm environ.

Les pertes par évaporation diminuent encore cette contribution. L'évaporation est forte à cause des températures ambiantes, qui peuvent en été augmenter à plus de 50°C à l'ombre, et à cause de l'action persistante des vents. Des pertes moyennes journalières de plus de 27 mm par jour ont été mesurées à la station de l'Aéroport International de Koweït en Juin 1970. L'évaporation dans la zone du sol et la transpiration de l'eau par les plantes produisent un déficit en humidité du sol qui doit être compensé avant que l'infiltration puisse avoir lieu.

La faiblesse des précipitations à Koweït, affecte la qualité des eaux souterraines et la quantité disponible à l'infiltration. L'infiltration et la percolation directes sont généralement insuffisantes pour laver des sels solubles des sédiments et les eaux souterraines sont souvent de qualité médiocre. Dans les endroits où l'écoulement de surface s'est concentré, comme dans les oueds et les playas, on peut avoir une infiltration et une percolation en quantités suffisantes pour alimenter des gisements d'eaux potables. Au puits n° 29 foré dans une aire de dunes de sable où la perméabilité de surface est forte mais où il n'y a pas de ligne de drainage qui concentre l'écoulement, l'eau rencontrée a une concentration de plus de 8 300 ppm de sels dissous. Dans un petit bassin voisin, au Hanabiya, où se trouve un petit système de drainage bien développé, l'eau souterraine rencontrée dans le puits N 45 avait une concentration totale en sels dissous de 500 ppm.

Puisque les précipitations sont faibles et les sols sableux et secs, l'écoulement de l'eau sur le sol est faible et même tellement faible qu'il n'y a même pas de rivières intermittentes. Jusqu'à présent, il n'y a pas d'observations sur le taux de débit de l'écoulement de surface. Néanmoins des orages sévères provoquent des écoulements qui sont substantiels, mais de durées courtes dans des aires de drainage développé et ils donnent des eaux qui représentent une source pour l'alimentation et qui s'accumulent dans les nombreux lacs de playas. Ces lacs tels qu'on en trouve au Raudatain et Umm Al Aish, ne paraissent pas constituer une source majeure d'alimentation puisqu'ils se trouvent dans des cuvettes dont les parties basses argileuses réduisent grandement le taux d'infiltration. En effet, la plus grande partie de l'eau de l'écoulement qui atteint les lacs de playa est perdue par évaporation. Le sol des playas ne retient que l'humidité suffisante pour permettre la pousse de l'herbe pendant quelques semaines.

L'infiltration a été peu étudiée au Koweït, particulièrement en ce qui concerne l'alimentation artificielle. Le taux de l'infiltration est extrêmement bas dans les aires au-dessous des quelles on trouve les phtanites "gatch" et les cuvettes argileuses, modéré le long des oueds et autour de quelques bassins, et plutôt fort dans les chenaux qui tranchent à travers les sédiments fins et cimentés à faible perméabilité. Au-dessous de la zone d'infiltration, les eaux descendent vers la surface libre des nappes. Bien que la mesure de la percolation véritable n'ait pas été déterminée au Koweït jusqu'à présent, il semble que 50 % environ du ruissellement direct qui atteint les oueds dans les aires les plus perméables atteignent véritablement la surface libre des eaux souterraines (PARSONS 1963).

Dans les aquifères souterrains, les eaux remplissent tous les espaces interstitiels des roches. Elles se trouvent entre les grains des sables et des sédiments les plus fins de la formation de Dibdiba et des formations sous-jacentes.

En plus, elles remplissent les diaclases et les fissures de dissolution dans les calcaires tels que la formation de Damman.

Le gisement et la qualité des eaux souterraines dans les roches du groupe de Koweït sont reliés à la topographie. Les oueds et les bassins sont les zones d'entrée des eaux les plus rapides, tandis que le calcaire de la formation de Damman se trouve généralement à une profondeur considérable au-dessous du niveau phréatique. Donc le mouvement et la qualité de l'eau y sont contrôlés par la perméabilité indépendamment des conditions de surface.

Après avoir rejoint les nappes souterraines, les eaux s'écoulent lentement sous l'effet du gradient hydraulique vers les points de décharge tels que les sources, les puits en production ou les suintements dans la mer. Dans les endroits où le ruissellement du surface est concentré tel que dans les oueds et les bassins, il y a assez d'infiltration et de percolation pour que se forment des accumulations d'eaux souterraines potables qui forment des points hauts au dessus du niveau phréatique. Néanmoins avec le temps l'intumescence s'aplatit à cause de l'écoulement vers l'extérieur si l'alimentation secondaire cesse. Comme les eaux souterraines s'écoulent vers la mer où en dehors des lieux de l'alimentation, leur contenu en sels minéraux augmente avec le temps et le contact avec les sels des sédiments.

L'écoulement des eaux dans le calcaire de la formation de Damman se fait, généralement du Sud-Ouest à l'Est ou au Nord Est, mais prend des chemins divers qui sont contrôlés par la perméabilité, la structure et la nature des couches sous-jacentes. Une grande partie des eaux de Damman entre dans les secteurs où la formation se trouve près du sol.

En Arabie, la décharge se fait partiellement dans le Golfe Arabique en particulier dans la baie de Koweït.

CHAPITRE V

HYDROGÉOLOGIE RÉGIONALE ET GISEMENTS DES EAUX SOUTERRAINES AU KOWEIT

5.1. HYDROGÉOLOGIE RÉGIONALE

5.1.1. LES CARACTÈRES HYDROGÉOLOGIQUES DES FORMATIONS SEDIMENTAIRES EN ARABIE

En Arabie, il y a deux sortes de couches aquifères potentielles; les grès et les couches carbonatées. Les grès prédominent dans les séries anciennes, alors que les roches carbonatées deviennent plus importantes dans les séries plus récentes. En effet, les aquifères gréseux se trouvent dans l'Ouest. Ils commencent à la bordure des affleurements du socle, et s'étendent vers l'Est où les aquifères carbonatés deviennent plus importants.

Puisque les eaux souterraines s'écoulent de l'Ouest à l'Est, elles tendent à se déplacer des grès plus anciens et souvent plus profonds vers les aquifères carbonatés à la faveur des ouvertures qui peuvent exister dans les aquicludes qui les séparent habituellement. De plus, à l'Est le niveau de la mer forme une sorte de barrière pour les eaux souterraines, alors que les altitudes y diminuent: l'eau souterraine se trouve plus proche du sol dans l'Est que dans l'Ouest, à l'exception de l'eau dans les alluvions qui remplissent les oueds bien entendu.

Le tableau 5-1 contient une description générale des formations sédimentaires en Arabie, en fonction de leurs caractères hydrogéologiques.

BURDON et OTKUN, 1968, ont résumé l'importance relative des aquifères gréseux et carbonatés dans le tableau 5-2. On y constate que dans l'épaisseur de 5 500 mètres de roches sédimentaires en Arabie, il y a 3 200 m de grès et 2 300 m de roches carbonatées environ.

Des facteurs comme l'absence de fissures, l'absence d'alimentation, l'épuisement des couches aquifères aux niveaux les plus bas, la position structurale et la salinité de l'eau peuvent rendre l'exploitation des eaux souterraines irréalisable dans quelques parties des sédiments indiqués dans le tableau 5-2.

Les aquifères gréseux peuvent être considérés comme poreux et perméables dans la masse, mais l'écoulement des eaux souterraines s'y fait principalement le long des joints et des zones fissurées.

Tableau 5-1

Description générale des formations sédimentaires en Arabie reliées à leurs caractères hydrogéologiques
(BURDON 1973)

EPOQUES	NOMS	HYDROGEOLOGIE GENERALE
Néogène	Néogène	Se trouve en discordance sur l'Eocène; lithologie variable; qualité et quantité de l'eau variables, exploité dans les régions d'Al Hasa et Al Qualif.
Eocène moyen	Dammam	Bon aquifère carbonaté mais variable dans l'Est de l'Arabie.
Eocène inférieur	Rus	Principalement aquichude avec gypse-anhydrite-marnes
Eocène inférieur/ Paléocène	Umm-Al Radhuma	L'unité supérieure est un aquifère majeur dolomitique. L'unité inférieure formée de calcaires et schistes argileux est généralement un aquifère faible.
Crétacé supérieur	Aruma	Calcaires, dolomies et schistes argileux augmentant vers l'Est. Aquifère irrégulier à rendement généralement faible.
Crétacé moyen supérieur	Wasia	Aquifère majeur formé principalement de grès aux affleurements mais où les schistes argileux et les carbonates augmentent en profondeur.
Crétacé moyen	Shu'aiba	Pas d'affleurement; calcaires dolomitiques avec quelques vides par dissolutions.
Crétacé moyen inférieur	Biyadh	Aquifère gréseux continu avec le Wasia sus-jacent dans l'aire d'affleurement. En profondeur, il est entrelardé de façon croissante de schistes argileux et de carbonates.
Crétacé inférieur	Buwaib	Grès mince reposant sur un calcaire tendre; faible potentiel en eaux souterraines.
Crétacé inférieur	Yammama et Sunlay	Calcaire tendre avec potentiel faible où nul en eaux souterraines.
Jurassique Supérieur	Hith/Arab	Calcaires -dolomies avec beaucoup d'anhydrite, karst, mauvaise qualité de l'eau.
Jurassique supé- rieur moyen	Hanifa	Calcaires et marnes tendres: principalement aquichude avec quelques eaux salées.
Jurassique supé- rieur moyen	Tuwaiq	La montagne de Tuwaiq forme un escarpement frappant, mais cet horizon n'est pas connu comme une couche aquifère.
Jurassique moyen	Dhruma	Couche aquifère sableuse dans le Nord; aquifère potentiel dans ses faciès carbonatés et gréseux vers le Sud de Riyadh.
Jurassique inférieur	Marrat	Calcaires, dolomies sableuses avec schistes argileux; aquifère à faible rendement dans l'aire d'affleurement
Jurassique Trias	Minjur	Aquifère majeur au-dessous de Riyadh. Grès éolien et torrentiel, non marin avec rares intercalations marines.

... suite tableau 5-1

EPOQUES	NOMS	HYDROGEOLOGIE GENERALE
Trias	Jilh	Calcaires et grès interstratifiés. Eaux à 2 000 ppm à l'affleurement. La salinité augmente en profondeur.
Permo- Trias	Sudair	Aquichude de schistes argileux
Permien	Khuff	Calcaires avec grès à la base; Aquifère très variable.
Anté-permien (probablement Cambrien)	Wajid	Complexe de grès continentaux de base avec quelques schistes argileux. Aquifère majeur dans le Sud de l'Arabie avec quelques sources et puits récemment forés.
Dévonien	Jauf	Grès carbonatés; Aquifère d'intérêt local
Silurien	Tabuk	Aquifère gréseux
Cambrien	Saq	Complexe de grès de base reposant sur le socle cristallin dans son aire d'affleurement; couche aquifère majeure.

TABLEAU 5 - 2

CLASSIFICATION DES ROCHES SEDIMENTAIRES GRESEUSES
OU CARBONATEES EN ARABIE COMME AQUIFERES POTENTIELS
(d' après Burdon et Otkun, 1968).

EPOQUES	LITHOLOGIE	EPAISSEUR APPROXIMATIVE en m.		
		Grès	Carbonate	Total
Tertiaire Crétacé Supérieur	Carbonates; quelques schistes argileux-marnes.	-	800	800
Crétacé moyen	Grès et roches detritiques	450	-	450
Crétacé Inférieur Jurassique	Carbonates; sulfates rares.	-	1350	1350
Trias	Grès; carbonates rares	750	-	750
Permien	Carbonates: quelques schistes argileux.	-	150	150
Anté- Permien	Grès; schistes argileux carbonates	2000	-	2000
		3200	2300	5500

Beaucoup de grès sont bien cimentés ou métamorphisés. Les couches aquifères carbonatées manquent généralement de porosité intergranulaire; l'emmagasinement et la transmission des eaux souterraines se font dans des diverses ouvertures qui peuvent exister. Ces formations sont dissoutes par les eaux souterraines circulant et contenant le bioxyde de carbone libre. La karstification ancienne ou actuelle peut les rendre capables d'emmagasinier et de transmettre de grands volumes d'eaux souterraines, généralement dans des chenaux.

5.1.2. PRINCIPALES COUCHES AQUIFERES EN ARABIE

Dans la succession des roches sédimentaires en Arabie Saoudite, il est possible d'identifier onze niveaux aquifères principaux. La classification générale de ces aquifères est résumée dans le tableau 5-3. On y constate la prédominance des aquifères gréseux dans les formations les plus anciennes et l'importance croissante des aquifères carbonatés dans les séries plus récentes.

Les valeurs de la transmissivité sont approximatives et n'ont de sens spécifique que dans des coupes définies, puisque l'épaisseur moyenne ne peut pas représenter l'épaisseur véritable dans les points où la transmissivité a été déterminée.

5.1.3. HYDROCHIMIE

5.1.3.1. LA CHIMIE DES EAUX SOUTERRAINES

La composition des eaux souterraines change au cours de leur mouvement à travers l'aquifère. L'anion dominant dans les eaux peu minéralisées est l'ion bi-carbonate. Les sulfates et les chlorures prédominent dans les eaux souterraines à salinité intermédiaire et haute respectivement. Ali Naimi (1965) a montré que, dans l'Arabie Nord-Est, la salinité des eaux souterraines augmente vers l'Est, le Nord Est et vers la mer. La teneur en NaCl augmente en raison du mélange des eaux souterraines avec les eaux de la mer et de l'évaporation, l'eau souterraine s'élevant vers le haut dans les "Sebkhats" qui caractérisent cette région.

Dans le tableau 5-4 on présente 7 analyses d'eaux souterraines de couches aquifères exploitées. Elles comportent de l'eau d'alluvions d'oued (1 200 ppm de CTSD), quatre échantillons d'eau des aquifères carbonatés ou des couches aquifères connexes en Arabie est et deux échantillons des eaux des aquifères gréseux en Arabie centrale.

5.1.3.2. DONNEES ISOTOPIQUES

Le carbone 14 a été utilisé pour dater les eaux souterraines de l'Oasis d'Al-Hasa (60 km à l'Ouest du Golfe Arabique). Les eaux émergent de la formation calcaire très karstifiée de Hofuf (Néogène), mais proviennent en réalité de la formation plus profonde d'Umm-Al-Radhuma d'où elles s'échappent vers le haut à travers des joints et des failles à la profondeur de 280m (voir tableau 5-5). La concentration moyenne en deuterium de (-39.6 ± 0.7) ,

TABLEAU 5 - 3

PRINCIPALES COUCHES AQUIFERES EN ARABIE

NO.	EPOQUES	COUCHE AQUIFERE PRINCIPALE	LITHOLOGIE	EPAISSEUR m	TRANSMISSIVITE $\times 10^2 \text{ m}^2/\text{jour}$
1	Cambrien	SAQ	Grès	+ 1000	5 - 10
2	Ordovicien/Silurien	TABUK	Grès	600	9,9 (Tabuk infer.)
3	Paleozoïque (Permien)	WAJID	Grès/ peu de carbonate	1000	6,2 - 18,6
4	Trias supérieur	MINJUR	Grès	400	1,5 - 12,4
5	Jurassique Inférieur	DHRUMA	Grès/ carbonates	375	
6	Crétacé Inférieur	BIYADH	Grès	600	3,7 - 12,4
7	Cénomani- en	WASIA	Grès	600	2,6 - 173,9
8	Paléocène Eocene Inférieur	UMM-AL RADHUMA	Carbonates	490	3,4 - 372,6
9	Eocène	DAMMAM	Carbonates	+ 32	max. 6,2
10	Néogène	NEOGENE	Détritiques	variable	variable
11	Quaternaire	ALLUVIONS	Alluvions	petite	variable

TABLEAU 5-4

EXEMPLES DE COMPOSITION DE QUELQUES EAUX SOUTERRAINES
TYPIQUES EXPLOITEES DANS DIVERS AQUIFERES
EN ARABIE SAOUDITE (d' après Burden 1973)

Anion/Cation	1	2	3	4	5	6	7
Ca	92	192	208	148	725	226	158
Mg	29	199	77	63	140	63	39
Na+K	23	19	398	195	295	120	165
HCO ₃	200	195	214	165	182	191	205
CO ₂	-	-	-	-	-	-	10
SO ₄	178	312	456	244	2275	515	425
Cl	36	358	745	379	362	256	195
NO ₃	-	-	-	19	-	-	2
SiO ₂	28	-	-	-	-	-	20
B	-	-	-	0.15	-	-	0.13
TDS Rapport	558	1275	2098	1193	3960	1401	1150
TDS Addition	626	1275	2098	1330	3979	1371	1219
pH	7.2	-	-	7.3	7.4	7.7	7.5
°C	27°	-	-	30.5°	31.1°	30.5°	40.5°

1. Alluvions Quaternaires d' oueds, puits Namar; rapport Français.
2. Couche aquifère Neogène alimentant les sources d' Al Hasa; TAO/SAU/6, Tableau 20, p.113.
3. Couche aquifère d' Alat (Dammam supérieur), la moyenne dans la région de Qatif-Dammam-Al-Khobar; TAO/SAU/6, Tableau 3.
4. Umm Al Radhuma à Harradh; forage HARWW-1; rapport ARAMCO juin, 1965.
5. Umm-Al-Radhuma au Qaisumah, Harrar Al Batin; puits T-8-2 échantillonné le 25 juin 1964.
6. Wasia-Biyadh au Bijdiah; puits Bij WW-13; rapport d' ARAMCO 1960.
7. Minjur à Riyadh; puits No.1 d' Ash-Shumasi, novembre 1961. Glen Brown, tableau 2, 1963.

l'absence de tritium et la faible teneur en ¹⁴C indiquent que l'eau provient d'un réservoir ancien. A Ayn Mansur, l'analyse de ¹⁴C indique que l'âge des eaux souterraines de l'oasis d'Al Hasa est de plus de 33 000 ans (A. SAYARI et ZOTL 1978). L'oasis d'Al Hasa se trouve à une distance de 140km environ à l'Est de l'affleurement de la formation d'Umm Al Radhuma (fig.5-1)

Tableau 5-5

Quelques données hydrogéologiques de sondages d'essai à l'oasis d'Al Hasa (d'après ITAL Consult)

Couche Aquifère	Profondeur (m)	Température °c	Concentration totale en sels dissous (ppm)	Niveau piézométrique en mètre au-dessus du niveau de la mer
Néogène	0 - 180	29	1 415	145. 6
Alat	180 - 190	34	1 140	133. 7
Khobar	200 - 230	35	1 040	139. 8
Umm-Al-Radhuma	280 - 600	39	900	154. 0
Wasia	900 - 1,330	-	17 651	196. 0

Selon l'étude de SHAMPINE W.J. et al. (1978), les courbes d'égales concentrations en D et en ¹⁸O sont actuellement parallèles dans les aquifères Néogène, Dammam (membre Khubar), Umm Al Radhuma et Wasia en Arabie orientale bien que des variations importantes de répartition de ces deux isotopes existent dans tous les aquifères étudiés. Généralement, la teneur en ¹⁸O se traduit par un δ ‰ ¹⁸O de - 2,5 environ dans les aires d'affleurements tandis qu'elle décroît vers l'aval où le δ ‰ ¹⁸O est de -6,5 environ. On pense que les variations des teneurs dans chaque aquifère sont dues aux changements paléoclimatiques et particulièrement à celui des températures.

Les résultats des analyses des teneurs en ¹⁸O indiquent que l'eau de l'aquifère d'Umm Al Radhuma s'écoule vers le haut dans les aquifères sus-jacents et, en fait, elle se déverse en surface par plusieurs sources.

De plus, les données indiquent que l'aquifère de Wasia (au dessous d'Umm Al Radhuma) n'est pas en communication avec les aquifères sus-jacents.

On pense selon les données des analyses ¹⁴C, que la plus grande partie des eaux souterraines en Arabie Saoudite orientale s'est infiltrée il y a 20 000 à 25 000 ans.

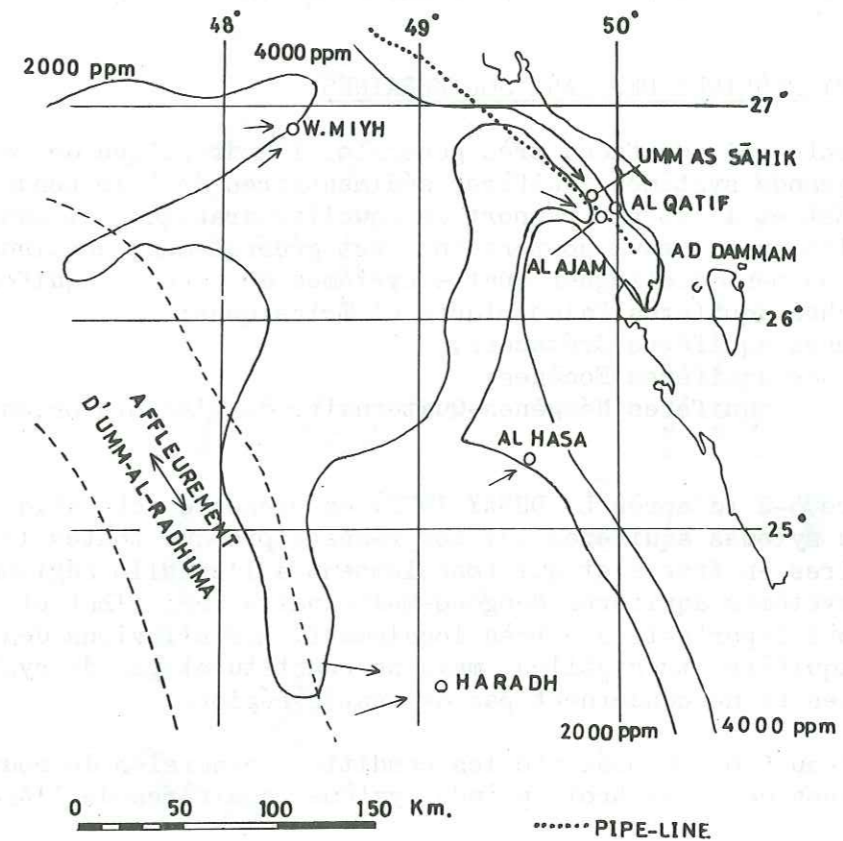


FIG. 5-1.- Minéralisation et directions d'écoulement des eaux souterraines entre la région d'affleurement de la Formation d'Umm-Al-Radhuma et l'aire côtière du Golfe (d'après A. I. NAIMI, 1965).

Néanmoins, les teneurs en tritium des eaux prélevées dans un site de dunes de sable indiquent qu'il y a un mouvement de l'eau, vers le bas, à raison de 20 mm par an, mais la profondeur totale d'infiltration n'est pas connue.

La valeur de $\delta \text{‰}^{18}\text{O} = -2,5$ mesurée dans les aires d'affleurement des grands aquifères est très semblable à celle mesurée dans les aquifères des alluvions, et on pense donc que l'alimentation des grands aquifères pourrait également se faire dans les aires d'affleurement, mais la participation à la recharge de cette infiltration est vraisemblablement très faible.

5.1.4. HYDRAULIQUE DES EAUX SOUTERRAINES

On présente ici, de façon très générale, l'hydraulique des eaux souterraines des grands systèmes aquifères sédimentaires dont le pendage est vers le Nord-Est et l'Est par rapport au bouclier arabe, et dans lesquels la circulation des eaux souterraines est généralement continue. Dans ce cadre là, on peut distinguer quatre systèmes de couches aquifères :

- système des couches aquifères Paléozoïques et Triasiques;
- système des couches aquifères Crétacées;
- système des couches aquifères Éocènes;
- système des couches aquifères Néogènes-Quaternaire de l'Arabie orientale.

Sur la figure 5-2 (d'après L. DUBAY 1970) on présente schématiquement les trois premiers systèmes aquifères qui comprennent presque toutes les régions sédimentaires en Arabie et qui fonctionnent à l'échelle régionale. D'autre part les systèmes aquifères Néogène-Quaternaire vers l'Est et l'Ouest du bouclier, ne sont importants que très localement. Les alluvions des oueds peuvent être des aquifères très utiles, mais ne constituent pas de systèmes hydrauliques uniques et ne concernent pas de vastes régions.

Dans le tableau 5-6, on présente les conditions générales de mouvement des eaux souterraines dans les trois grands systèmes aquifères de l'Arabie.

5.1.4.1. SYSTEME DES AQUIFERES PALEOZOIQUES ET TRIASIQUES

La plupart des couches aquifères Paléozoïques et Triasiques sont des grès. Le socle cristallin Précambrien au-dessous semble être un aquiclude. L'alimentation des aquifères a eu lieu principalement pendant les périodes géologiques pluviales. Néanmoins, le ruissellement actuel à la surface du socle s'infiltré dans les affleurements de grès du système, soit directement, soit à travers le Grand Nefud sus-jacent dans le Nord. Le fait que les grès du Groupe de Wajid soient pleins d'eau de bonne qualité jusqu'à la surface d'affleurement au Sud dans la région de l'Ouest de Dawasir, est considéré comme la preuve qu'il ne possède pas d'exutoire naturel. Néanmoins, comme la plupart des formations dures montrent plusieurs systèmes de joints s'entrecoupant, on peut penser qu'il existe quelques fuites limitées vers l'extérieur du système.

Les eaux souterraines s'infiltrant en profondeur peuvent se réchauffer, se minéraliser, et se charger en gaz, particulièrement en oxyde et bioxyde de carbone, hydrogène sulfuré et méthane ce qui entraîne des changements en poids spécifique. Quelques eaux peuvent alors remonter vers la

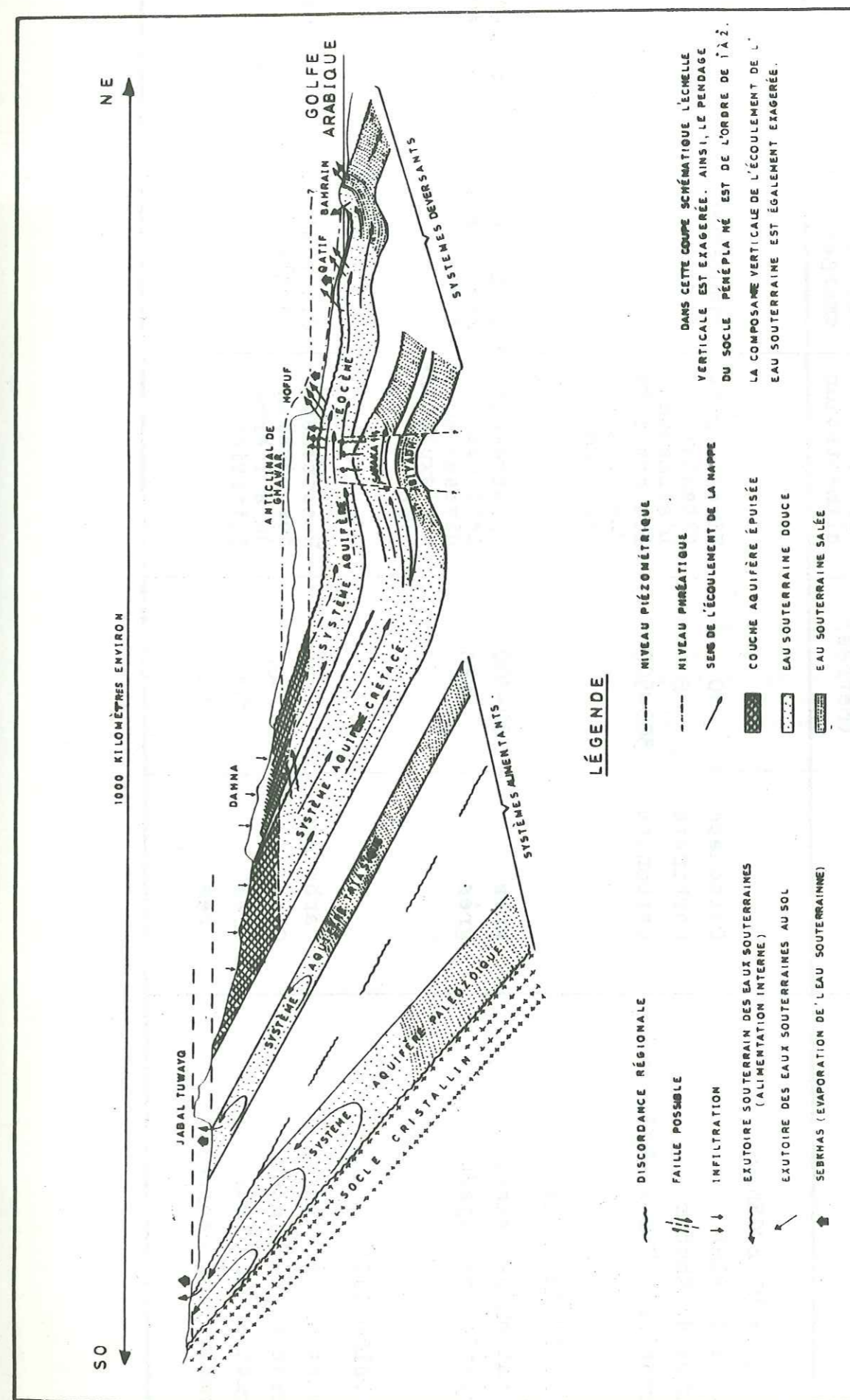


FIG. 5-2.— Coupe hydrogéologique schématisée du bassin sédimentaire de l'Arabie. (D'après le rapport d'ITALOCOSULTANT, 1971)

MOUVEMENT DES EAUX SOUTERRAINES DANS LES TROIS GRANDS SYSTEMES
AQUIFERES EN ARABIE

SYSTEME AQUIFERE ET COMPOSANTS	LITHOLOGIE	EPAISS- EUR (Mètres)	MOUVEMENT DES EAUX SOUTERRAINES		
			Aire d' alimentation	Aire d' emmagasinement	Aire de décharge
SYSTEME AQUIFERE EOCENE: Membre d' Alat Membre de Khobar Formation d'Umm-Al-Radhuma	Carbonate Carbonate Carbonate	10 8 300-500	Niveaux rab- attants; L'alimentat- ion est infé- rieure à la décharge.	mouvement ouvert	Sources et evaporat- ion
SYSTEME AQUIFERE CRETACÉ: Formation de Sakaka Formation de Biyadh	grès grès	50-300 650	rabattement lent des niveaux dû à l'exploita- tion	petit mouve- ment, quasi- fermé	transfert souterrain
SYSTEME PALEO-TRIAS: Formation de Dhruma Formation de Minjur Formation de Tabuk Formation de Sag/Wajid	Carbonate Grès Grès Grès	- 400 1000 1000	Rabattement des niveaux dû à l'exp- loitation.	Circulation fermée	pas de décharge naturelle

surface et il y aurait une circulation fermée dans la zone d'emmagasinement de l'eau souterraine dans le système.

Les eaux souterraines des couches aquifères du système Paléozoïque ont été exploitées et utilisées depuis un temps immémorial pour l'approvisionnement en eau en Arabie centrale (au Tabak, Hail, Quassim et Riyadh) et l'eau est généralement jaillissante.

5.1.4.2. SYSTEME DES AQUIFERES CRETACES

Le système des couches aquifères crétaées comprend les grès des formations de Biyadh et Sakaka qui forment le groupe de Wasia dans la région où il affleure et présente une épaisseur de 1 000 m au maximum. Dans la région d'affleurement, la formation de Sakaka se trouve en contact direct (mais discordant) avec la formation de Biyadh sous-jacente. En descendant vers l'Est dans la direction du pendage, les schistes argileux et les calcaires apparaissent progressivement entre les deux formations de grès et les séparent à la façon d'un aquiclude. Les formations du groupe d'Aruma sus-jacent (concordant) et les formations du groupe de Thamama sous-jacent (discordant) sont des aquicludes qui limitent le système aquifère crétaé.

Beaucoup de l'eau emmagasinée dans ce système provient de grandes périodes pluviales du Quaternaire. Elle a de 20 000 à 23 000 ans d'âge dans les régions de Khrais et Abquaiq. OTKUM (1969) a estimé que l'alimentation annuelle du système est de 284 à 1893 x 10³ m³. Il semble que l'alimentation actuelle soit inférieure à l'écoulement naturel et que les niveaux de l'eau aient baissé, indépendamment des effets dus à l'exploitation, depuis des périodes pluviales.

Le système est considéré comme un système aquifère captif (souvent artésien). Il y a transfert souterrain vers le système des eaux souterraines sus-jacent, ce qui a lieu principalement à travers les zones de perturbations tectoniques, en particulier au-dessus des anticlinaux et des dômes.

Par suite de la grande épaisseur des sédiments sus-jacents, les eaux souterraines plus profondes du système aquifère Crétaé ne sont exploitées que de façon très limitée. D'ailleurs, il y a de fortes indications que, dans les zones plus profondes, les eaux souterraines sont très minéralisées. Vers la bordure ouest de Koweit, les eaux souterraines de ce système ont une concentration totale en sels dissous de 200 000 ppm environ, ce qui peut être dû à leur origine (eaux connées), à la dissolution de couches de sel gemme ou à l'influence de saumures des champs pétroliers (BURDON 1973).

5.1.4.3. SYSTEME DES AQUIFERES EOCENES

Le système aquifère éocène comprend les Formations d'Umm Al Radhuma et de Dammam. Il est coiffé par les aquicludes du complexe Néogène sus-jacent. Les Formations sous-jacentes du groupe d'Aruma sont également des aquicludes. La Formation d'Umm Al Radhuma comprend deux parties: la partie supérieure est meilleure comme aquifère que la partie inférieure. L'épaisseur totale de cette formation est de l'ordre de 300 à 500 m. Dans la Formation de Dammam, il y a deux couches aquifères en Arabie Saoudite, le membre des

calcaires d'Alat (10 m environ) et des calcaires de Khobar (8 m environ); en dépit de leur épaisseur, ces deux membres calcaires sont des couches aquifères majeures d'importance régionale.

Les trois couches aquifères des calcaires tendent à se comporter comme un seul système hydraulique souterrain, bien que des aquicludes viennent s'intercaler effectivement en quelques endroits. Néanmoins, l'eau souterraine peut s'écouler de haut en bas ou vice versa avec une égalisation des pressions, en particulier sur les crêtes des dômes et des anticlinaux. Donc, bien que les trois couches aquifères soient distinctes localement et montrent des variations de salinité, pression et rendement, elles peuvent être considérées comme un seul système hydraulique sur le plan régional.

Les trois couches aquifères du système Eocène ont à la fois des ouvertures primaires et secondaires. Les karsts sont variables, mais ils sont abondants dans les aires anticlinales et les dômes. Ils peuvent être rencontrés également dans les synclinaux et les bassins mais ils tendent à y être masqués en profondeur par la couverture.

Beaucoup de l'eau souterraine emmagasinée et coulant à travers le système aquifère a son origine dans les périodes pluviales anciennes. L'alimentation actuelle est maigre et elle est inférieure à l'écoulement naturel et induit. Il est évident que, pendant les cinquantes dernières années, le taux d'épuisement a été régulier (BURDON, 1973), et cet épuisement a débuté même avant le commencement de l'exploitation des eaux souterraines. Il est vraisemblable que les oueds secs d'aujourd'hui et les couches aquifères sous-jacentes étaient jadis pleins d'eau jusqu'au niveau des talwegs des oueds; depuis cette époque, les niveaux des eaux souterraines se sont régulièrement abaissés pendant que les fleuves s'asséchaient et que l'alimentation diminuait.

L'alimentation actuelle est maigre, mais elle peut être de quelque importance par:

- infiltration après établissement d'un écoulement de surface qui est rare. On constate que les sables éoliens de Dahna recouvrent une grande partie de l'affleurement de la Formation d'Umm Al Radhuma; ces conditions tendent à favoriser l'infiltration à travers la couverture du sable.

- transfert souterrain des eaux du Groupe de Wasia sous-jacent qui sont plus profondes, sous plus forte pression, plus chaudes et ascendantes dans le système aquifère Eocène. Un tel remplissage tend à se produire dans les régions des anticlinaux et des dômes.

- dans le système aquifère Eocène lui-même, il y a aussi transfert des eaux souterraines de la Formation d'Umm Al Radhuma vers le haut, c'est à dire vers la couche aquifère d'Alat sus-jacente. La Formation d'Umm Al Radhuma est de beaucoup la plus épaisse couche aquifère dans le système Eocène et elle peut fournir de grandes quantités d'eaux souterraines aux couches aquifères plus minces sus-jacentes.

Les caractéristiques hydrauliques du système aquifère Eocène ont été examinées auparavant. Généralement le système est captif à l'échelle régionale, mais localement il est libre dans les aires et points d'exutoire. En quelques endroits, les pressions sont suffisantes pour que l'on ait des forages jaillissants. D'après L. DUBAY 1971, le tableau 5-7 contient les limites générales des caractéristiques hydrauliques. On y constate que la transmissivité, déterminée à partir des données régionales, est plus de 10 fois plus grande que la transmissivité déterminée par essai de pompage. On peut admettre cela par suite de la nature anisotrope et karstique du système.

Tableau 5-7 : Caractéristiques hydrauliques des composants du système des couches aquifères éocènes dans l'Est de l'Arabie Saoudite d'après L. DUBAY, rapport d'Ital Consult, 1971)

	Gradient Régional mètre/kilomètre		Transmissivité (m ² /s)		Coefficient d'emmagasinement Essai de pompage
	Haut	Bas	Régionale	Essai de pompage	
Alat	-	-	-	3.6 x 10 ⁻³	4 x 10 ⁻⁴
Alat + Khobar	0.2/2.0	0.05	2.0 - 3.0	2.0 x 10 ⁻¹	7.8 x 10 ⁻³
Khobar	-	-	-	2.7 x 10 ⁻¹	2.1 x 10 ⁻⁵
Umm Al Radhuma	0.8	0.2	-	3.9 x 10 ⁻¹	4.2 x 10 ⁻³

L'écoulement naturel de l'ensemble du système des couches aquifères éocènes se fait par:

- (1) des sources terrestres;
- (2) des sources sous-marines;
- (3) l'évaporation de surface des "sebkhas".

Les sources les plus importantes parmi les sources terrestres sont les sources des oasis de Hofuf; celles-ci donnent quelques mètres/cubes/secondes, ce qui indique l'importance du système. Il y a de nombreux récits sur les sources sous-marines du golfe, mais le nombre total de ces sources et leur débit combiné en eau potable et saumâtre n'est pas connu. Selon BURDON (1973), ces sources sont dues à l'écoulement de la nappe captive de type artésien à travers des joints et crevasses des structures d'effondrement; ce ne sont pas des sources noyées qui prenaient naissance sur la terre et qui continueraient à s'écouler après leur submersion due au relèvement du niveau de la mer (ou lac) comme cela est fréquent au pourtour de la Méditerranée. Le suintement ascendant à travers les sédiments Néogènes et Quaternaires sus-jacents est considéré comme le mécanisme majeur de la décharge. L'eau est enfin évaporée à partir des "Sebkhas" qui se trouvent le long de la côte du golfe. PICKE a calculé que la perte annuelle des Sebkhas, par évaporation, dans la région côtière de l'Arabie Saoudite est de 500 millions de mètres cubes.

En Arabie Saoudite orientale, il y a une extraction considérable à partir du système des couches aquifères Eocènes par des puits et des trous de forages. Les deux membres supérieurs, Khobar et Alat sont de beaucoup les plus développés. En quelques endroits, on constate un surdéveloppement et un envahissement par l'eau de mer. Quelquefois, le développement a été mal ménagé; des couches aquifères à forte pression s'échappent dans des couches aquifères à faible pression, en raison du mauvais tubage. La formation d'Umm Al Radhuma qui alimente la formation de Dammam (Alat et Khobar) est développée indirectement à travers ces deux membres. En plus, elle est développée elle-même en beaucoup d'endroits dont le plus important correspond à l'installation du Roi Faycal.

5.1.4.4. SYSTEME DES AQUIFERES NEOGENE-QUATERNAIRE DE L'ARABIE ORIENTALE

On considère ici toutes les couches aquifères superficielles de l'Arabie orientale qui se trouvent sur les affleurements du substratum ou sur les séries sédimentaires consolidées de l'Arabie de l'Est, c'est à dire la zone dont la surface de drainage est inclinée principalement vers l'Est et donc vers le golfe. Ce sont principalement des couches aquifères non consolidées ou mal consolidées et où les circulations des eaux souterraines sont purement locales.

Les couches aquifères Miocène et Pliocène de l'Arabie orientale peuvent être de bons milieux aquifères, mais elles sont alimentées en eau souterraine principalement ou presque entièrement par suintement vers le haut à partir du système aquifère régional Eocène. L'exemple le plus spectaculaire est celui des sources qui alimentent les oasis de Hofuf. Ces sources sortent en effet de sédiments néogènes mais les 14 m³ par seconde qu'elles débitent proviennent indirectement mais réellement des couches aquifères Eocènes. Très vraisemblablement des eaux souterraines s'écoulent encore des aquifères Eocènes vers les aquifères Néogènes, mais de façon plus calme et moins concentrée. Comme on l'a mentionné auparavant, les Sebkhass de la zone côtière sont considérés comme des bacs d'évaporation où les eaux souterraines, en suintant vers le haut à travers le Néogène et le Quaternaire, quittent finalement le système en s'évaporant dans l'atmosphère.

L'autre source des eaux souterraines superficielles en Arabie orientale est fournie par les sables et les graviers qui sont situés de telle façon qu'ils puissent être alimentés par de rares torrents et qui sont capables de retenir l'eau pour de longues durées utiles. Une telle sorte de gisement des eaux souterraines est normalement libre et phréatique. Les alluvions de remplissage dans les oueds anciens fournissent l'exemple classique de ce type d'eaux souterraines.

Les graviers et sables qui remplissent des dépressions topographiques peuvent contenir de l'eau de bonne qualité. Les gisements les meilleurs connus de ce genre là sont ceux qu'on trouve au Raudhatain au Koweït. Bien que l'eau puisse y être de bonne qualité, la quantité est limitée et l'alimentation dépend des ruissellements rares et irréguliers qui atteignent l'aire de la nappe aquifère.

5.2. GISEMENTS DES EAUX SOUTERRAINES ET SYSTEMES DES AQUIFERES AU KOWEIT

On étudiera ici la répartition générale des couches aquifères aquitardes et aquifuges ainsi que la répartition générale de la concentration en sels dissous dans les eaux souterraines qu'elles contiennent. Notre étude se borne aux systèmes Néogène et Eocène, car c'est dans leurs couches qu'on a effectué des travaux de forage, exploration et exploitation des eaux souterraines. Dans ce cadre on dispose de données de travaux de forage de plus de 250 puits et sondages d'essai, de diagraphies géophysiques, levés géophysiques, analyses d'eau et pompages d'essai. D'ailleurs, on présentera et discutera quelques problèmes et aspects spécifiques de l'hydrodynamique et de l'hydrochimie des systèmes aquifères de façon assez détaillée dans des chapitres séparés (voir chapitre 6 et 7).

On distingue 4 genres principaux de gisement des eaux souterraines (Fig. 5-3, 5-4 et 5-5).

- Gisement des eaux souterraines peu profondes, près du sol;
- Gisement des eaux souterraines du Groupe de Koweït;
- Gisement des eaux souterraines dans la Formation de Dammam;
- Gisement des eaux souterraines dans la Formation d'Umm Al Radhuma.

5.2.1. GISEMENT DES EAUX SOUTERRAINES PEU PROFONDES

Le gisement des eaux souterraines peu profondes au Koweït est contrôlé par la pluie, la topographie et la lithologie des terrains proches de la surface du sol. Les matériaux en surface au Koweït consistent en sables et graviers, mais souvent aussi en silts moins perméables. Très peu de l'eau de la pluie s'infiltrerait véritablement dans le sol.

L'épaisseur des dépôts récents est variable, mais elle augmente généralement dans les zones côtières vers le Nord, en variant de 2 à 23 m environ. Les dépôts récents consistent principalement en sables éoliens, alluvions dans les oueds et bassins de drainage intérieur, dépôts de plages, dépôts deltaïques et d'estuaire et graviers.

Pendant les saisons pluvieuses, l'eau s'accumule dans les sables et graviers de la surface sous lesquels se trouvent des couches relativement imperméables. Ce genre d'eau est généralement exploité par des puits creusés à la main par des bédouïns. Ces puits peuvent être temporaires ou permanents selon l'aire du bassin versant où ils sont situés. Les puits temporaires ne sont utilisables généralement que pour quelques mois après les pluies d'hiver. La qualité de l'eau de ces puits se détériore généralement après la fin de la saison pluviale. Les puits permanents, qui sont alimentés localement par des bassins un peu plus larges souffrent encore de la détérioration de la qualité de l'eau, mais de façon plus lente; la qualité de l'eau devient de nouveau meilleure quand celle-ci est réapprovisionnée pendant la saison pluvieuse suivante. Les dépôts peu profonds contiennent des bandes irrégulières de gypse ou des sables et argiles gypseuses, ce qui entraîne une augmentation relative de la teneur en sulfate dans les eaux qui y percolent.

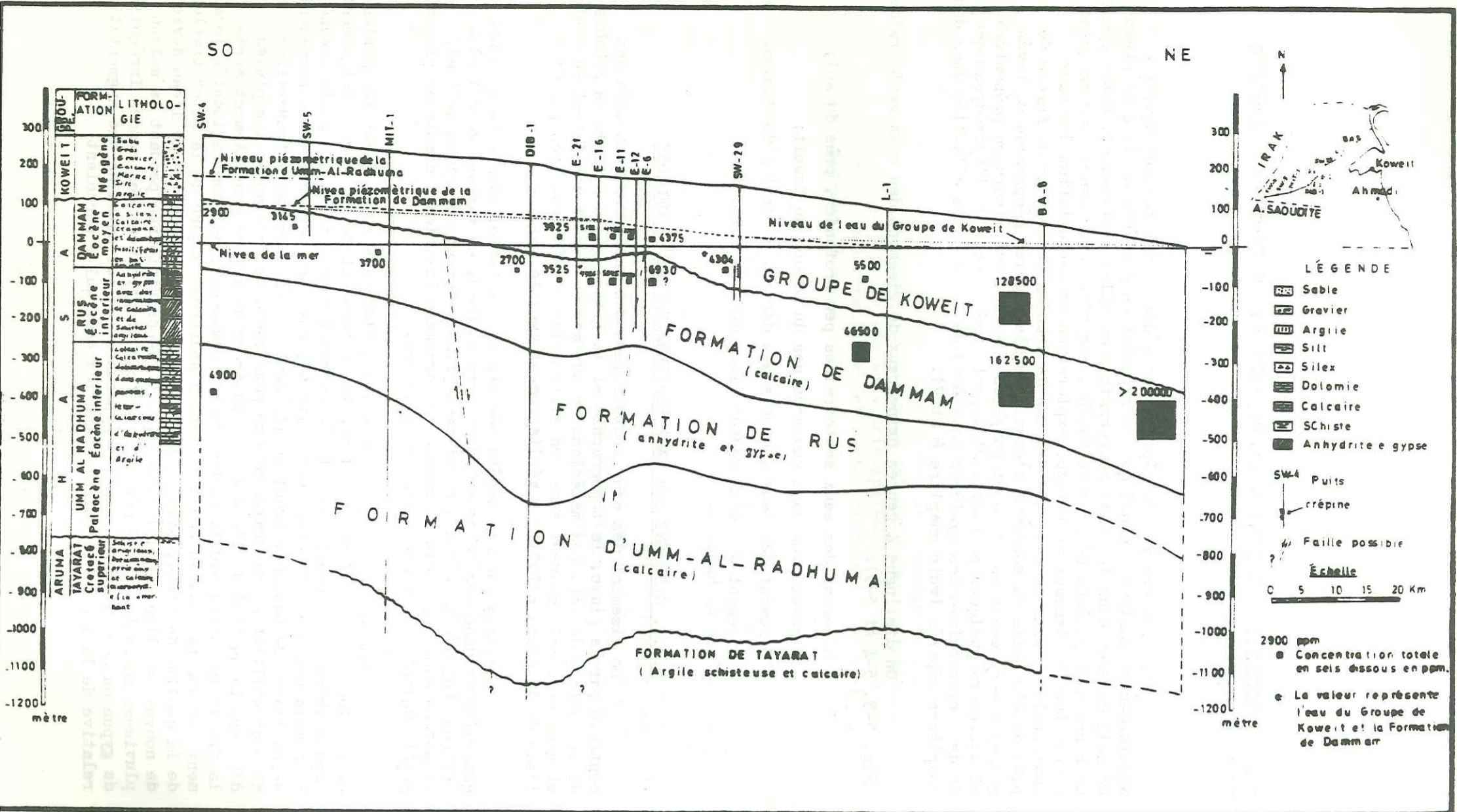


FIG. 5.3.- Coupe hydrogéologique SO-NE montrant les couches aquifères principales dans les systèmes Néogène & Éocène - Paléocène au Koweït.

92

FIG. 5.4.

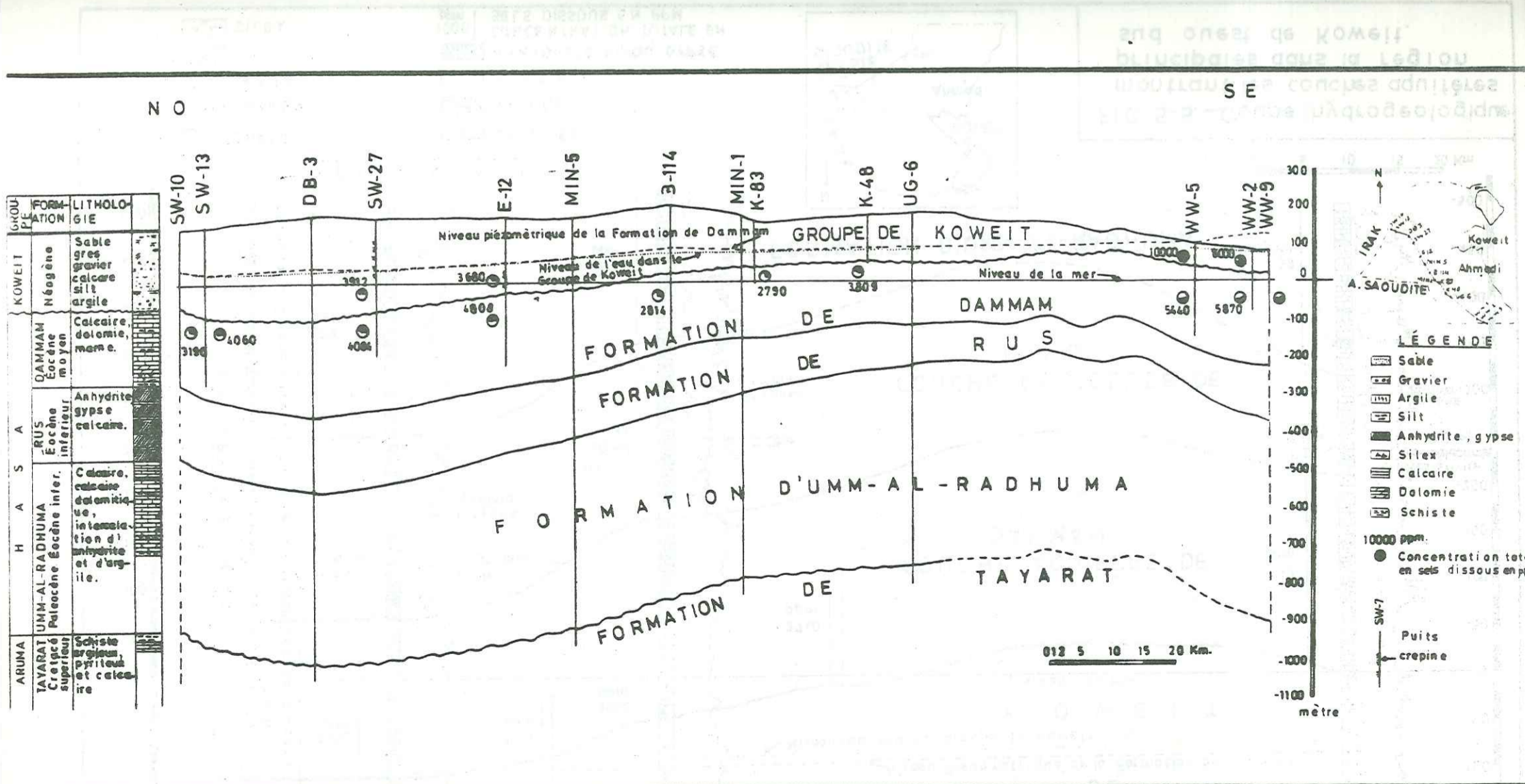
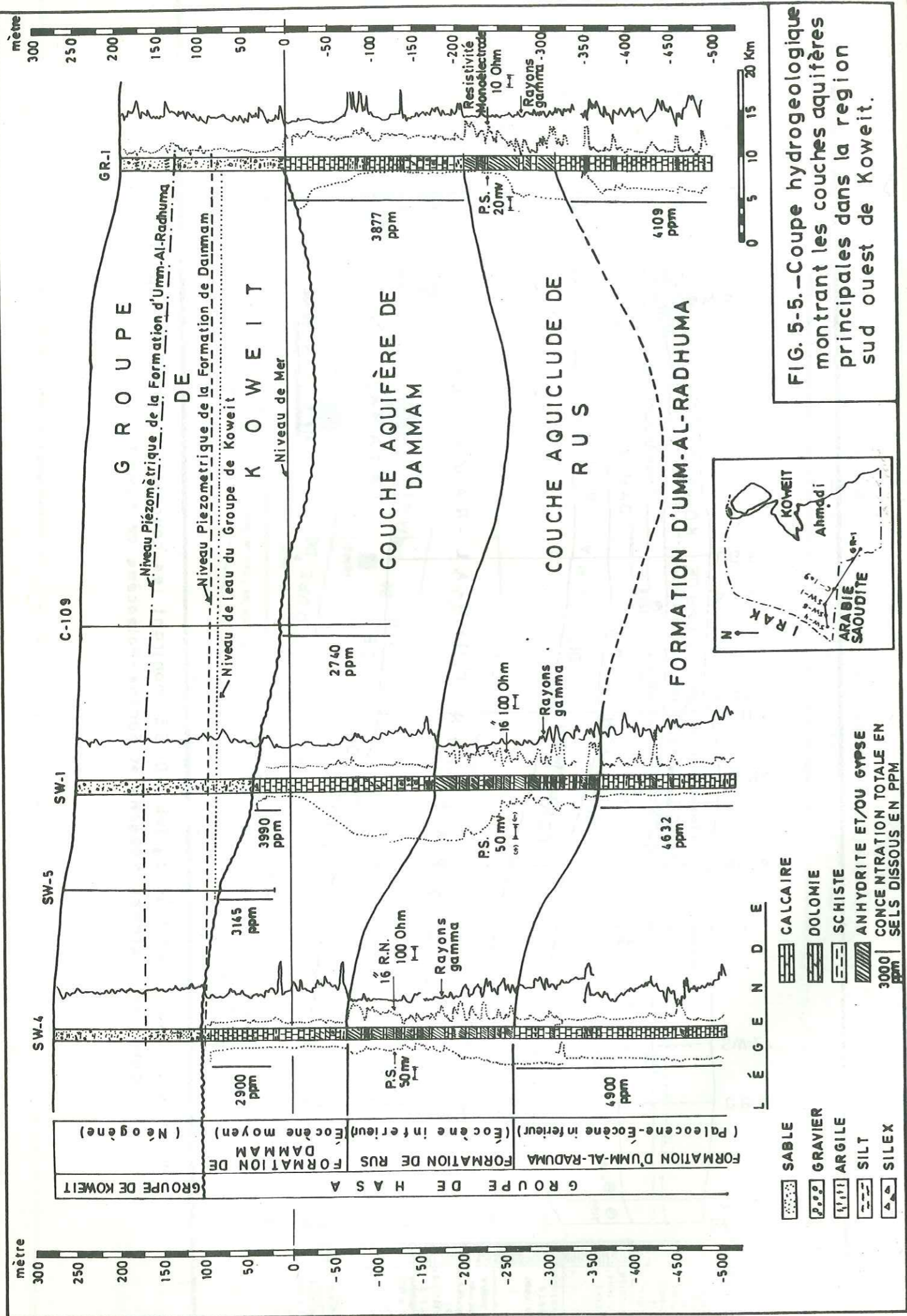


FIG. 5.4.- Coupe hydrogéologique NO-SE montrant les couches aquifères principales dans les systèmes Néogène et Éocène - Paléocène de Koweït.

93



En quelques endroits du Koweit tels que Jahra, Sulmiya, Fintas Hawalli et Shuaiba après la saison pluvieuse, il est possible de rencontrer des eaux douces à la profondeur de 3 à 15 m. Un cas particulier de gisement d'eau souterraine douce à saumâtre, dans les dépôts peu profonds se trouve dans l'île de Faylika. La plus grande partie de cette île ne dépasse pas l'altitude de quelques pieds au dessus du niveau de la mer. Là, un gisement convexe d'eau douce ou saumâtre flotte sur une surface concave d'eau de mer par suite de la différence de densité des fluides (MILTON et DAVIS 1961).

5.2.2. GISEMENT DES EAUX SOUTERRAINES DU GROUPE DE KOWEIT

Le Groupe de Koweit couvre la surface de l'Etat du Koweit toute entière. Il consiste en une alternance de couches de sables, graviers, grès argiles, silts et calcaires ou marnes dont l'épaisseur augmente généralement vers le Nord Est. L'épaisseur du Groupe de Koweit dans le coin sud-ouest du pays est de 150 m environ. Elle augmente jusqu'à 425 m environ dans le Nord et le Nord Est, mais elle est de 7 m environ dans la région sud-est, à la crête d'Ahmadi (Fig. 5-6).

Sur la figure 5-7 on présente l'épaisseur saturée en eau souterraine du Groupe de Koweit. On y constate que celui-ci est sec dans le coin sud-ouest du pays. L'épaisseur saturée augmente vers le Nord et le Nord Est où elle atteint 410 m environ. Dans le Sud, au Wafra, elle atteint 40-60 m environ.

Les données lithologiques ainsi que le carottage géophysique des sondages permettent de diviser le Groupe de Koweit en deux couches aquifères. La couche aquifère supérieure et la couche aquifère inférieure qui sont séparées l'une de l'autre par un aquitarde. Sur la Figure 5-8 on présente une carte hydrogéologique de l'Ouest à l'Est du centre du Koweit. On y constate que:

- le Groupe de Koweit est sec à l'extrême Ouest (puits SW-7)).
- la couche aquifère supérieure varie en épaisseur de zéro (puits SW 16, SW 2, SW 24 et E6) à 70 m environ (puits J3). Elle consiste en une alternance de couches de sables, de graviers, d'argiles rouges où vertes et de couches minces de gypse et de calcaire.
- la couche aquifère inférieure varie en épaisseur de 10 à 55 m environ. Elle consiste en sables à gros grains, graviers et quelques couches d'argile verte.
- la couche aquitarde, entre les deux couches aquifères supérieure et inférieure, consiste principalement en couches d'argile sableuse, de calcaire argileux et de quelques couches de grès.
- au-dessous de la couche aquifère inférieure, il y a une couche d'argile verte et sableuse qui est connue comme l'argile de base (fig.5-9). Celle-ci se trouve en discordance sur la surface d'érosion de la Formation calcaire de Dammam sousjacent (Fig.5-10).

La couche aquifère supérieure du Groupe de Koweit semble être soit une couche aquifère libre à fuites, soit une couche aquifère à fuites au-dessus de laquelle se trouve un aquitarde contenant une surface piézométrique libre. Néanmoins, localement l'aquitarde intercalaire peut se fondre dans la couche aquifère inférieure en formant avec celle-ci, une couche aquitarde relativement perméable. L'ensemble: couches aquifères

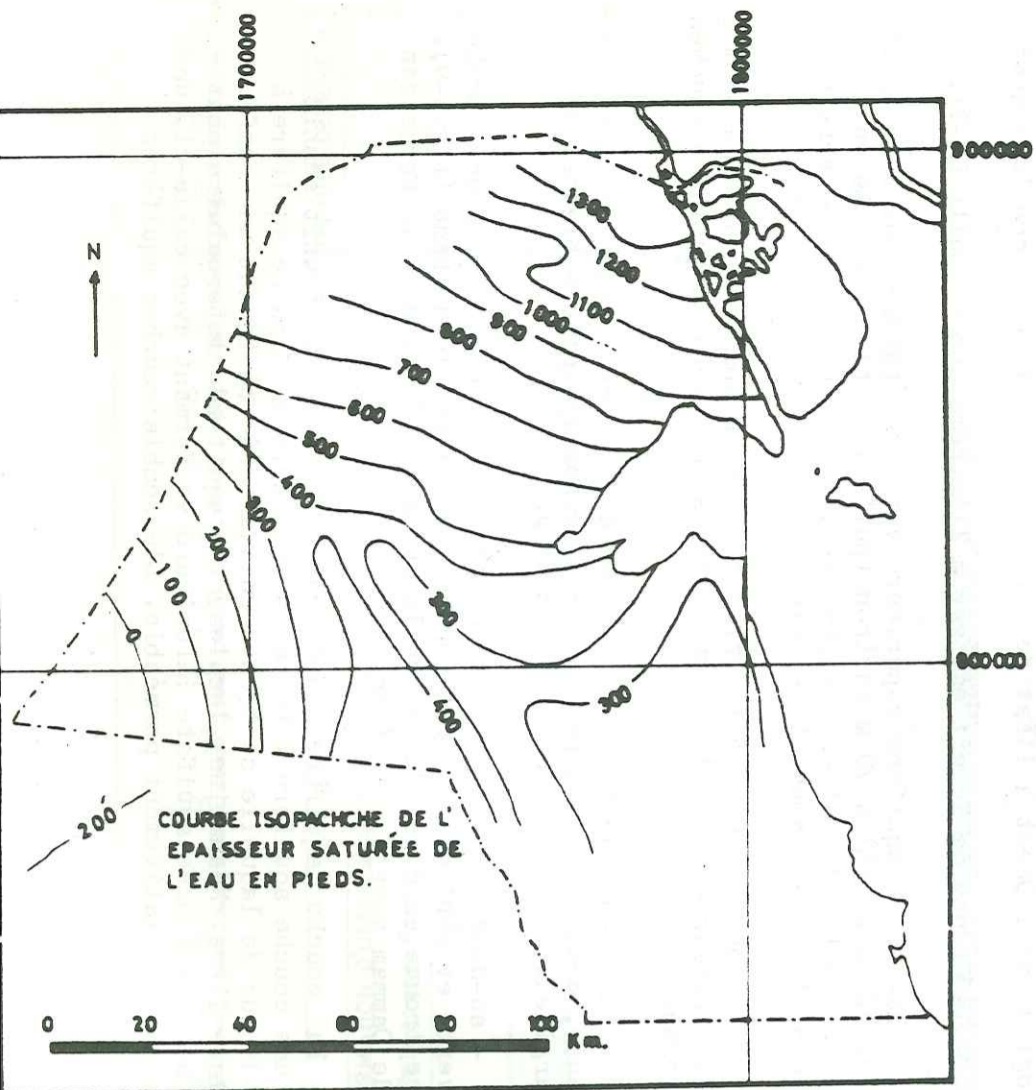


FIG. 5-7. Carte des isopaches des dépôts saturés en eau dans le Groupe de Koweït.

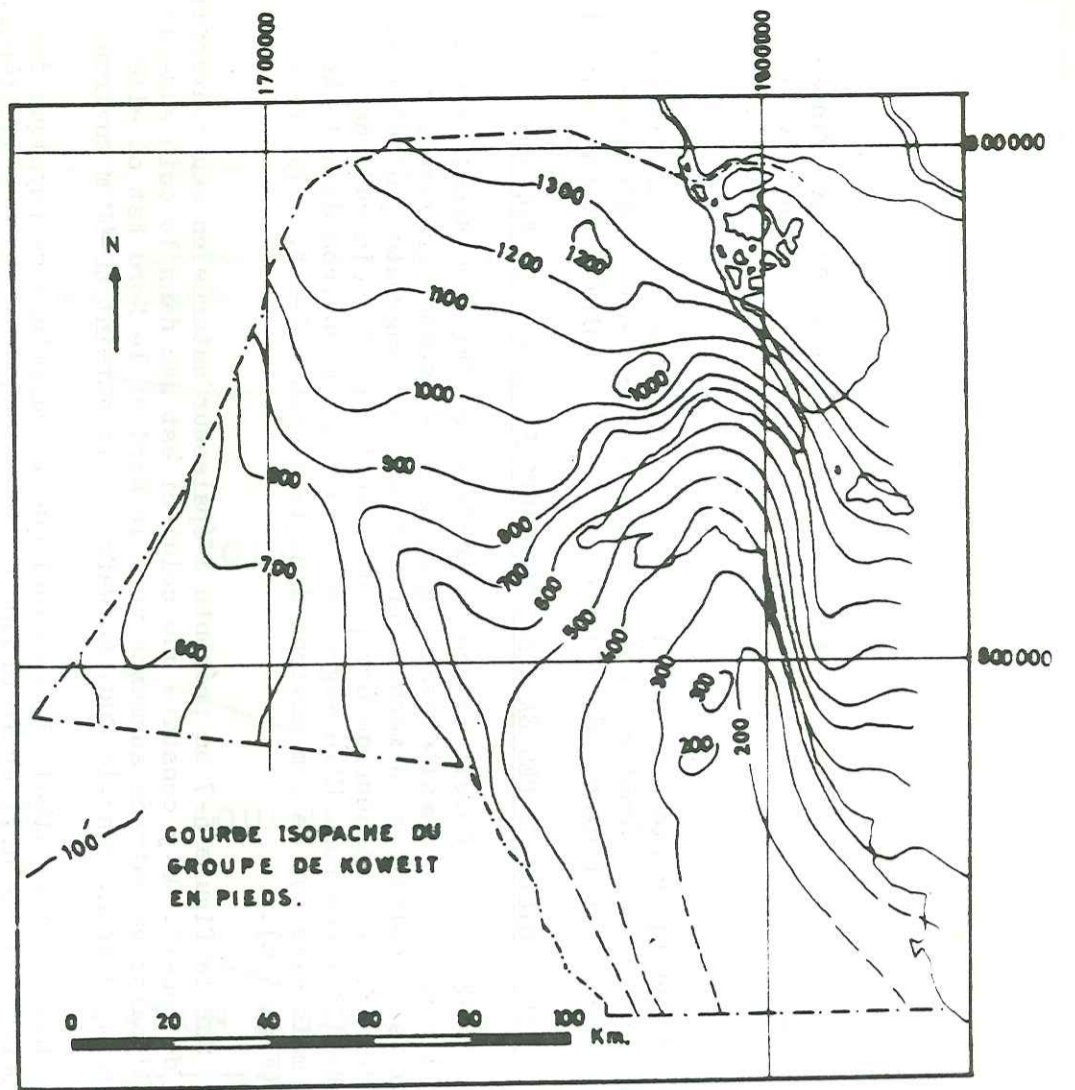


FIG. 5-6. Carte des isopaches du Groupe de Koweït (d'après la carte de K.O.C. 1966)

96

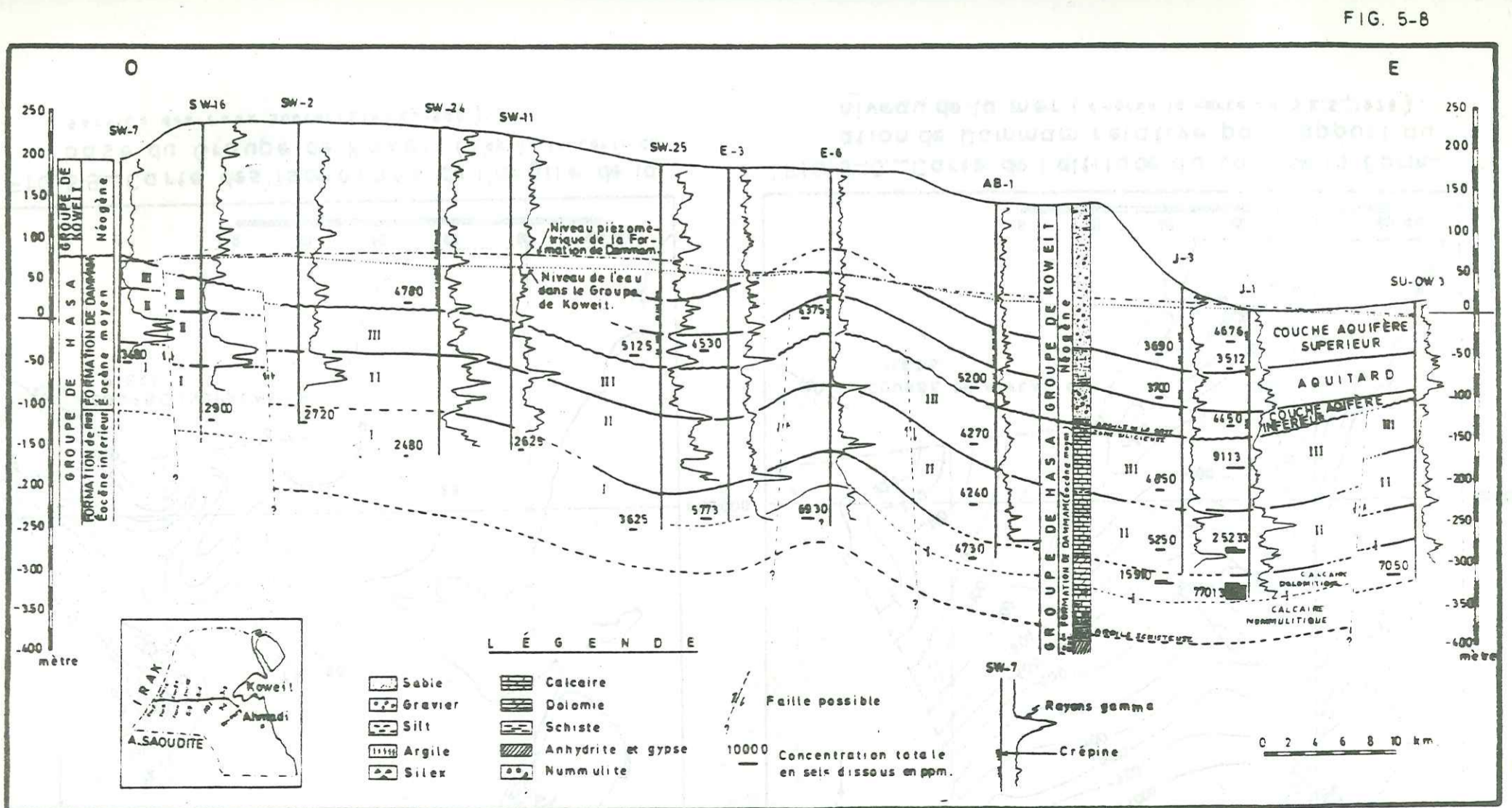


FIG. 5-8. Coupe hydrogéologique O-E montrant les couches aquifères du Groupe de Koweït et de la Formation de Damman.

97

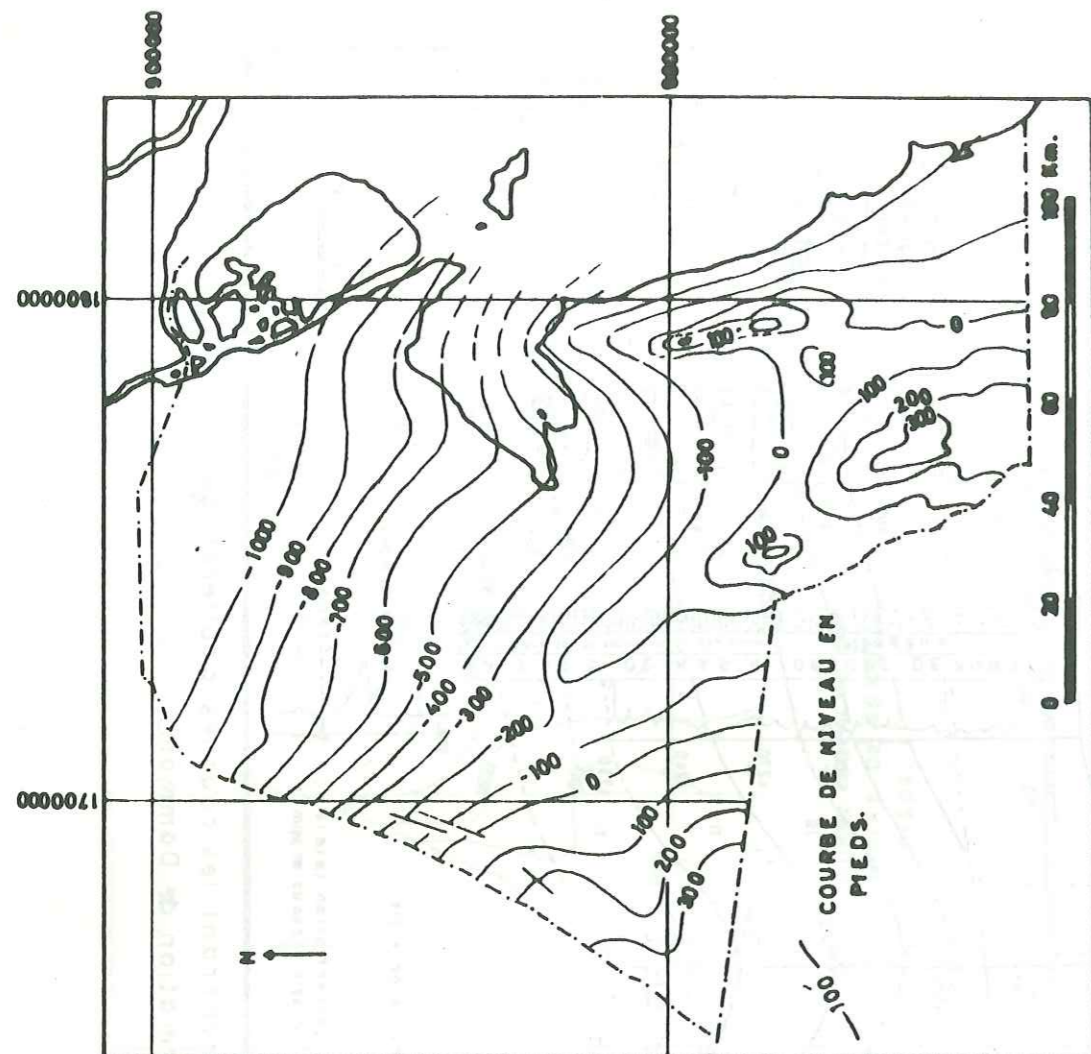


FIG. 5-10.—Carte de l'altitude du toit de la Formation de Dammam relative par rapport au niveau de la mer (d'après la carte du S.E.S., 1975).

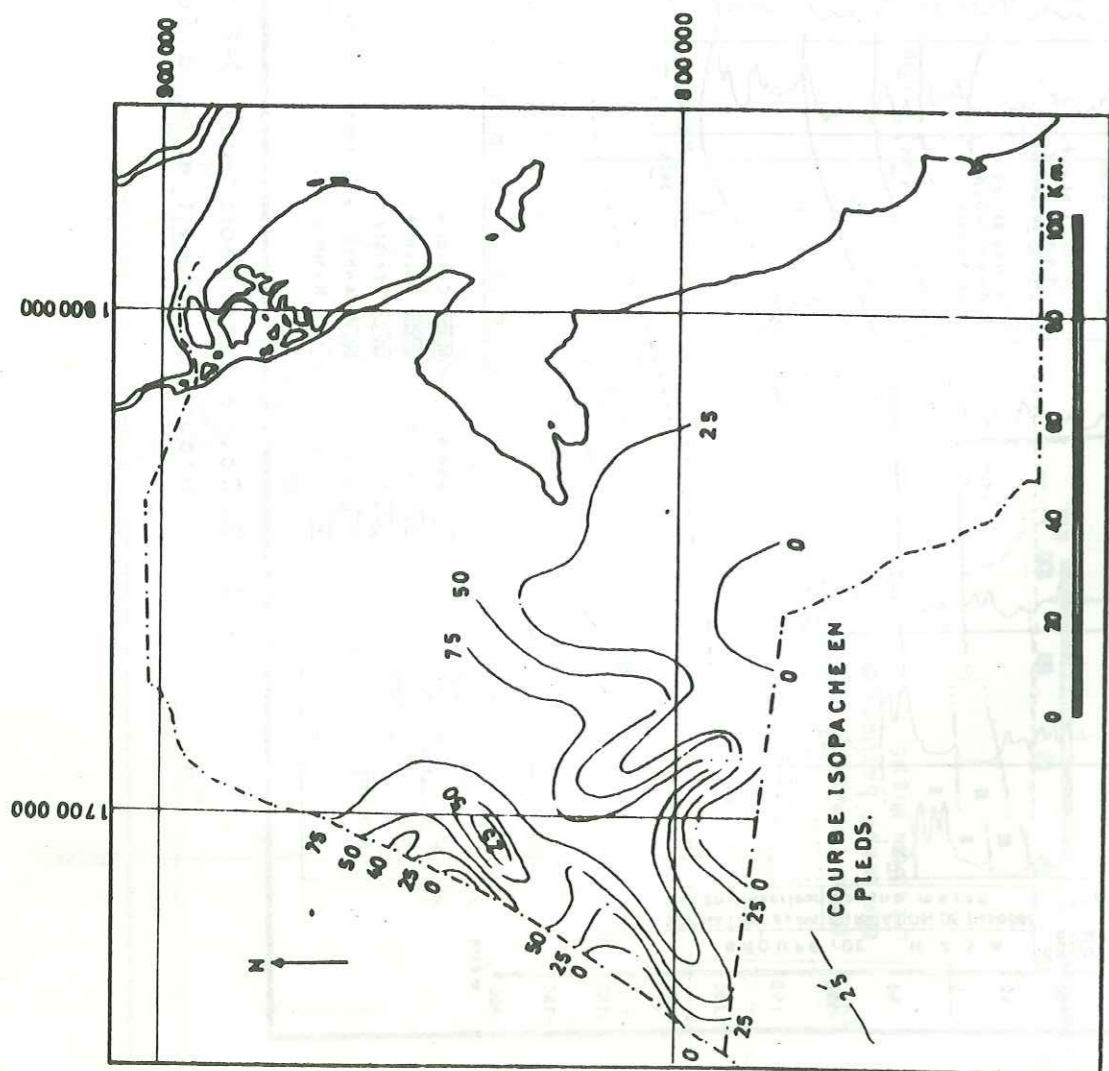


FIG. 5-9.—Carte des isopaches de l'argile de la base du Groupe de Koweït (d'après la carte du Service des Eaux Souterraines, 1968).

(supérieure et inférieure) du Groupe de Koweït et couche aquifère de la formation calcaire de Dammam sousjacent, qui est semi-captive, forme un système qu'on peut appeler "couches aquifères à fuites couplées" ou "couches aquifères à fuites mutuelles" (HANTUSH, 1969).

La plupart des couches aquifères du Groupe de Koweït contiennent des eaux souterraines saumâtres ou salées. La salinité de l'eau y augmente généralement avec la profondeur et vers le Nord Est en variant de 3 000 à 120 000 ppm (voir le chapitre 6).

Les eaux souterraines du Groupe de Koweït ont deux origines: la fuite vers le haut de la Formation de Dammam sousjacent et l'infiltration des eaux à travers le sol de Koweït, l'Iraq, l'Arabie Saoudite à l'Ouest et au Sud-Ouest de Koweït.

Les eaux souterraines douces du Groupe de Koweït ne sont rencontrées que de façon très limitée dans les parties supérieures de la couche aquifère supérieure. Elles flottent sur les eaux saumâtres, en particulier sous les dépressions topographiques comme celles de Raudhatain, Umm al Aish et Quashaniya au Nord et Nord Est de Koweït (Fig. 5-11):

(1) Al Raudhatain - Les eaux souterraines douces dont la concentration totale en sels dissous est inférieure à 1 000 ppm, se trouvent dans trois couches aquifères de grès dont l'épaisseur moyenne combinée est de 21 m. Ces couches aquifères sont séparées l'une de l'autre par des couches de silts et d'argiles à perméabilité basse (PARSONS 1964), et elles se trouvent dans la partie supérieure de la Formation de Dibdiba sur une structure légèrement synclinale (fig. 5-12 et 5-13).

Les eaux souterraines douces d'un bout à l'autre du bassin flottent sur des eaux saumâtres ou salées, avec un transition brusque de l'eau douce à l'eau saumâtre-salée avec la profondeur. La concentration totale en sels dissous augmente radialement par rapport au centre de la dépression en variant entre 200 et 8 000 ppm. L'épaisseur de l'ensemble des couches aquifères supérieure et moyenne, contenant de l'eau douce varie de 10,7 à 18,3 m ou plus et elle contient de l'eau saumâtre dans la partie supérieure et de l'eau salée dans la partie inférieure.

L'eau souterraine est libre dans la couche aquifère supérieure, tandis qu'elle est semi-captive dans les deux couches aquifères moyenne et inférieure. La profondeur du niveau initial de l'eau varie entre 23 et 46 m. L'alimentation naturelle du système aquifère en eau douce est de 2 650 m³/j calculée comme underflow en utilisant la carte piézométrique et les valeurs moyennes de transmissivité (PARSONS 1964).

(2) Umm Al Aish - Les eaux souterraines dont la concentration totale en sels dissous est inférieure à 2 000 ppm se trouvent dans trois couches de sable aquifère (épaisseur totale de 30 m environ) à la profondeur de 53,3 m au dessous du sol. L'altitude du sol est presque la même que celle de Raudhatain. Néanmoins, l'altitude des couches aquifères comparables à l'Umm Al Aish est de 12,2 m plus élevée que celle de Raudhatain (voir fig. 5-14 et 5-15). L'alimentation naturelle dans la partie utilisable du bassin d'Umm Al Aish, calculée



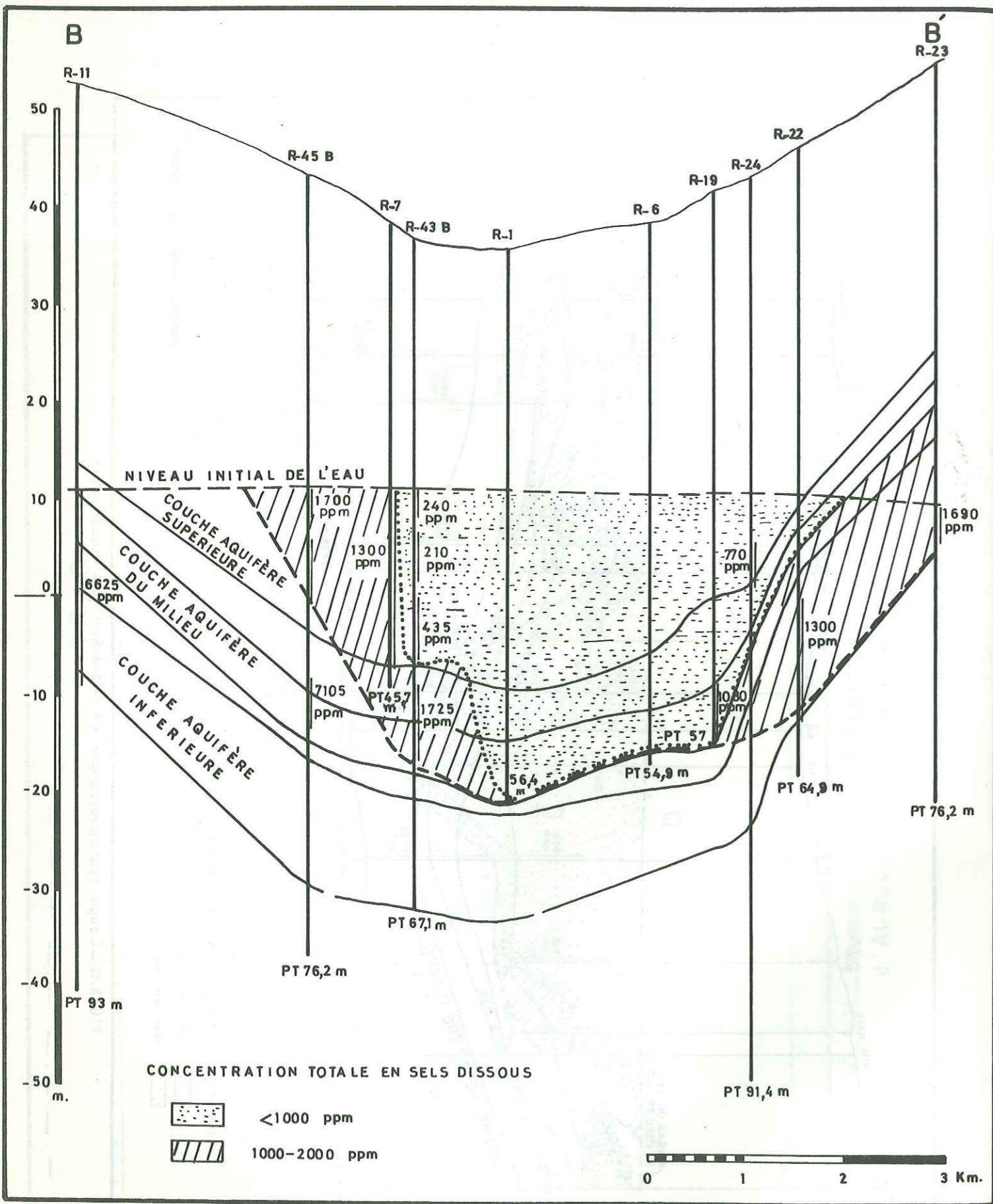


FIG. 5-13.— Coupe hydrogéologique BB' (SO-NE) d'Al-Raudhatin

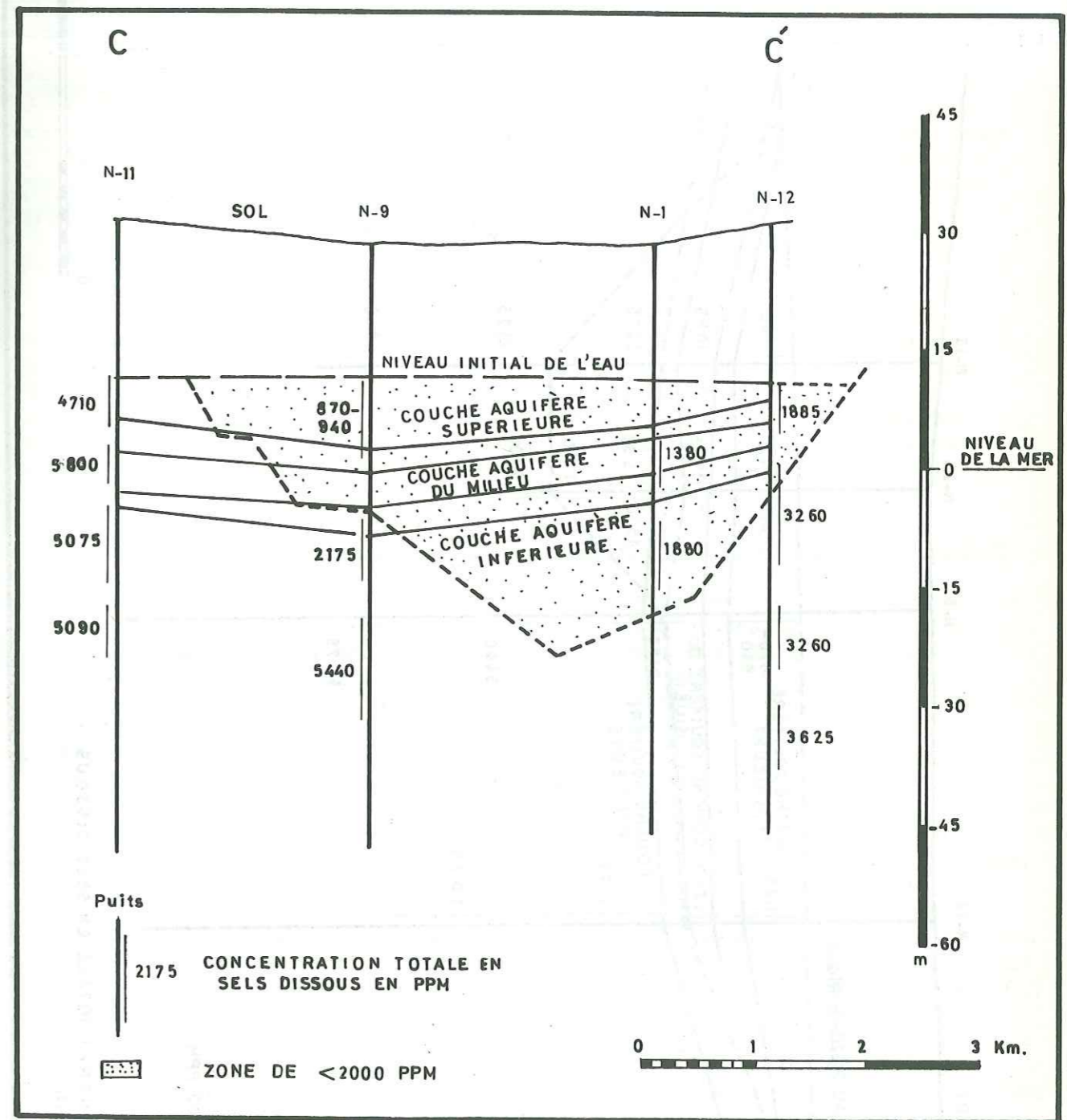


FIG. 5-14.— Coupe hydrogéologique CC' (NO-SE) d'Umm-Al-Aish.

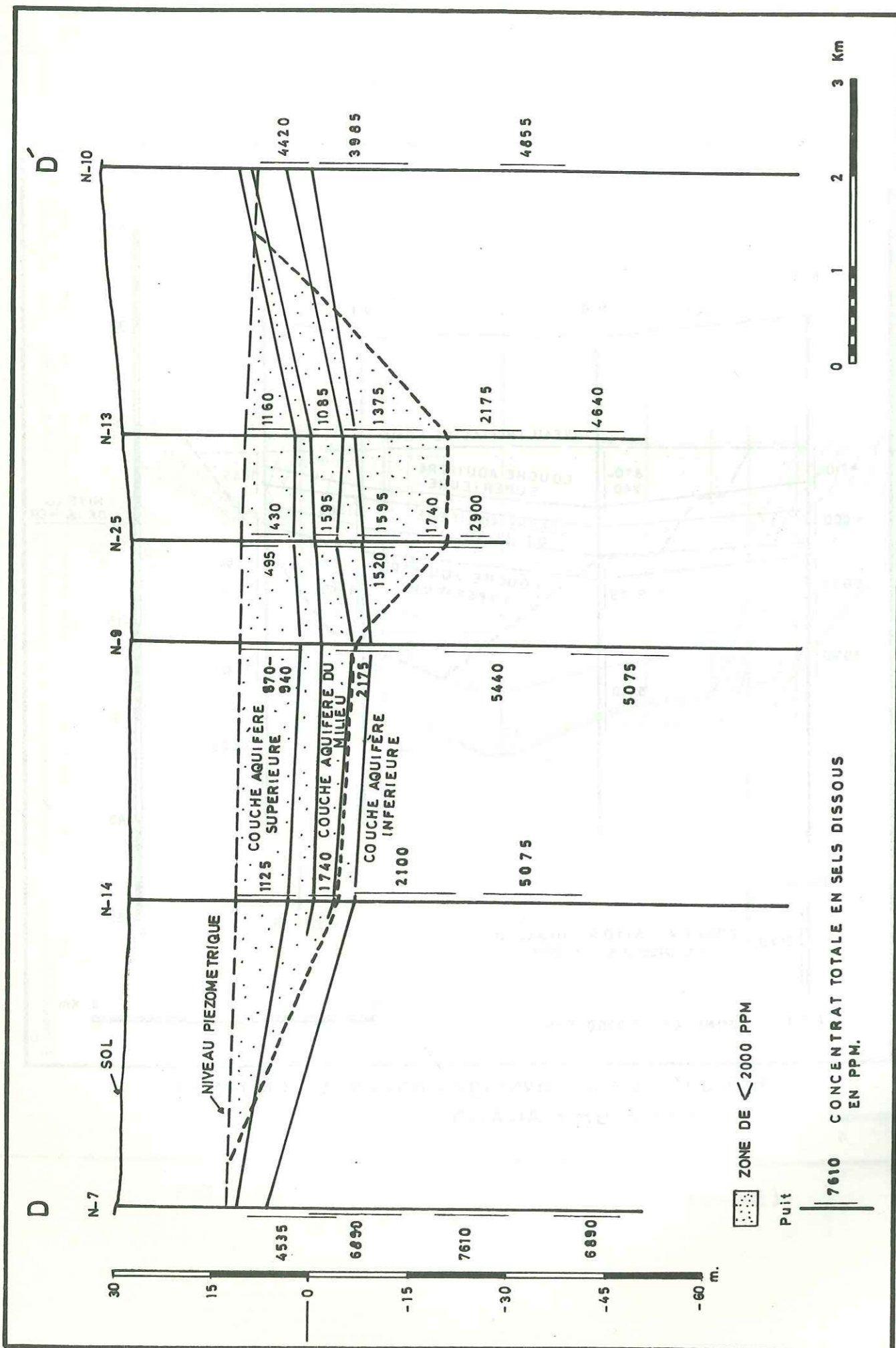


FIG. 5-15.-Coupe hydrogéologique D D'(NE-SO) d'Umm Al-Aish.

comme underflow en utilisant la carte piézométrique et les valeurs moyennes de transmissivité est de 222,62 m³/j. Bien que le volume du champ d'Umm Al Aish soit identique à celui de Raudhatain, la transmissivité des aquifères d'Umm Al Aish est le dixième de celle des aquifères de Raudhatain, ce qui explique la différence de débit de l'underflow (PARSONS 1964).

(3) Al Quashaniya - L'aire de Al-Quashaniya comprend les trois dépressions d'Al-Hannabiya, Al-Quashaniya et Umm-Nigga. Elle est bordée par le relief du champ pétrolier d'Al Raudhatain à l'Ouest et par des sables de dunes vers l'Est. Les dépressions d'Umm-Nigga et Al-Quashaniya se trouvent à l'extrémité du système d'oueds, qui quelquefois reçoit une alimentation suffisante pour produire des lacs peu profonds.

Al Hannabiya est une dépression plus aplatie que celles-ci et elle contient des oueds plus larges et diffus.

Les couches aquifères dans cette aire diffèrent de celles de Raudhatain et d'Umm-Al-Aish, voire même d'un puits à l'autre dans l'aire elle-même. Donc l'existence des eaux souterraines, dont la concentration totale en sels dissous est inférieure à 2 000 ppm, se limite aux poches à la profondeur de 17 à 27 m au-dessous du sol (fig. 5-16). L'alimentation naturelle de cette aire, calculée comme underflow en utilisant les valeurs approximatives de transmissivité ainsi que la carte piézométrique est de 114 m³/j (PARSONS 1964).

5.2.3. GISEMENT DES EAUX SOUTERRAINES DANS LA FORMATION DE DAMMAM

La Formation de Dammam consiste principalement en 140 à 290 mètres de calcaires, calcaires crayeux et calcaires dolomitiques avec quelques zones siliceuses, argileuses, sableuses et fossilifères (Fig. 5-17). Au Koweït, elle se subdivise, lithologiquement et hydrologiquement en trois membres dont l'épaisseur est plus ou moins égale (fig. 5-8 et 5-18). Le toit de la formation de Dammam consiste en 7-10 m de schistes argileux et silteux semi-perméables, tandis que l'anhydrite de la Formation de Rus qui forme le mur de la Formation de Dammam est elle généralement imperméable.

Le calcaire de la Formation de Dammam n'est pas seulement érodé sur sa surface, mais de plus en plus il est karstifié en profondeur. En outre, il est fissuré et crevassé. Certains joints et ouvertures ont été sélectivement élargis par les circulations actives des eaux souterraines. La zone de karst s'est développée en profondeur un peu au-dessous de la surface d'érosion en laissant une zone de calcaire non karstifiée et essentiellement imperméable qu'on appelle "carapace" au-dessous du toit de calcaire (BURDON & SAFADI 1964). Sur la figure 5-20, on présente la coupe hydrogéologique composée construite par BURDON (BURDON & SHARHAN 1966). On y constate que l'identification du toit de la Formation de Dammam, dans les forages, par la rencontre des silex peut être trompeuse puisqu'on peut rencontrer les silex dans plusieurs horizons dans cette formation. La totalité du membre III peut être localement absent quelquefois. On peut pénétrer une épaisseur considérable de la Formation de Dammam avant qu'on rencontre le silex ce qui peut conduire à attribuer, par erreur une partie de la Formation de Dammam au Groupe de Koweït.

Un levé géophysique a été exécuté par CGG en employant les méthodes de réflexion sismique et sondages électriques sur une aire de 1 100 km² au Sud Ouest de Koweït (fig. 5-21). On a relevé quinze lignes de 25 à 40 km de largeur dans la direction ouest-est et séparées de 2,5 km, en employant 455 sondages électriques.

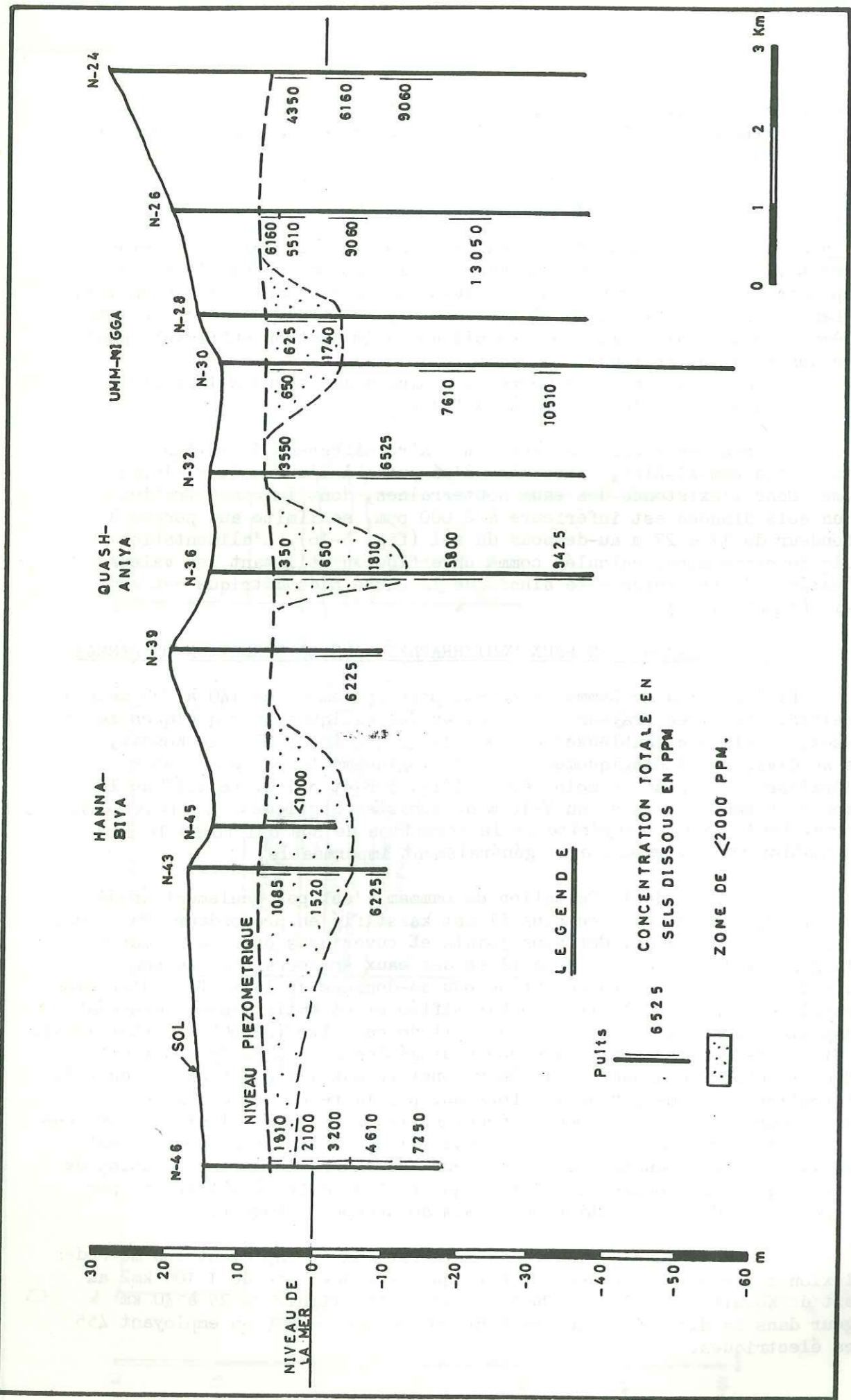


FIG. 5-16.—Coupe EÉ (NO-SE) d Al Quashaniya.

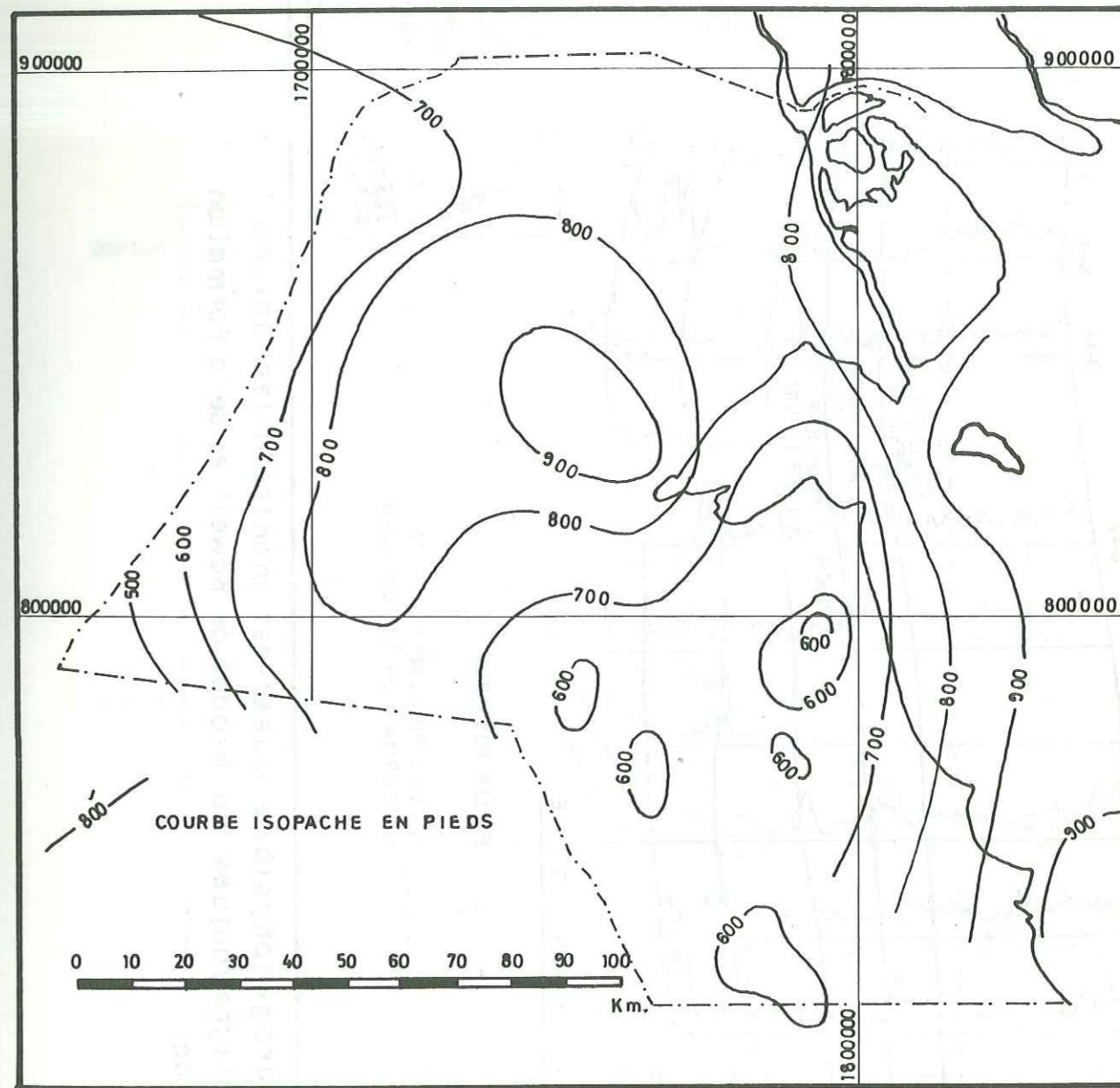


FIG. 5-17.—Carte isopache de la Formation de Damman (D'APRÈS LA CARTE DE K.O.C.)

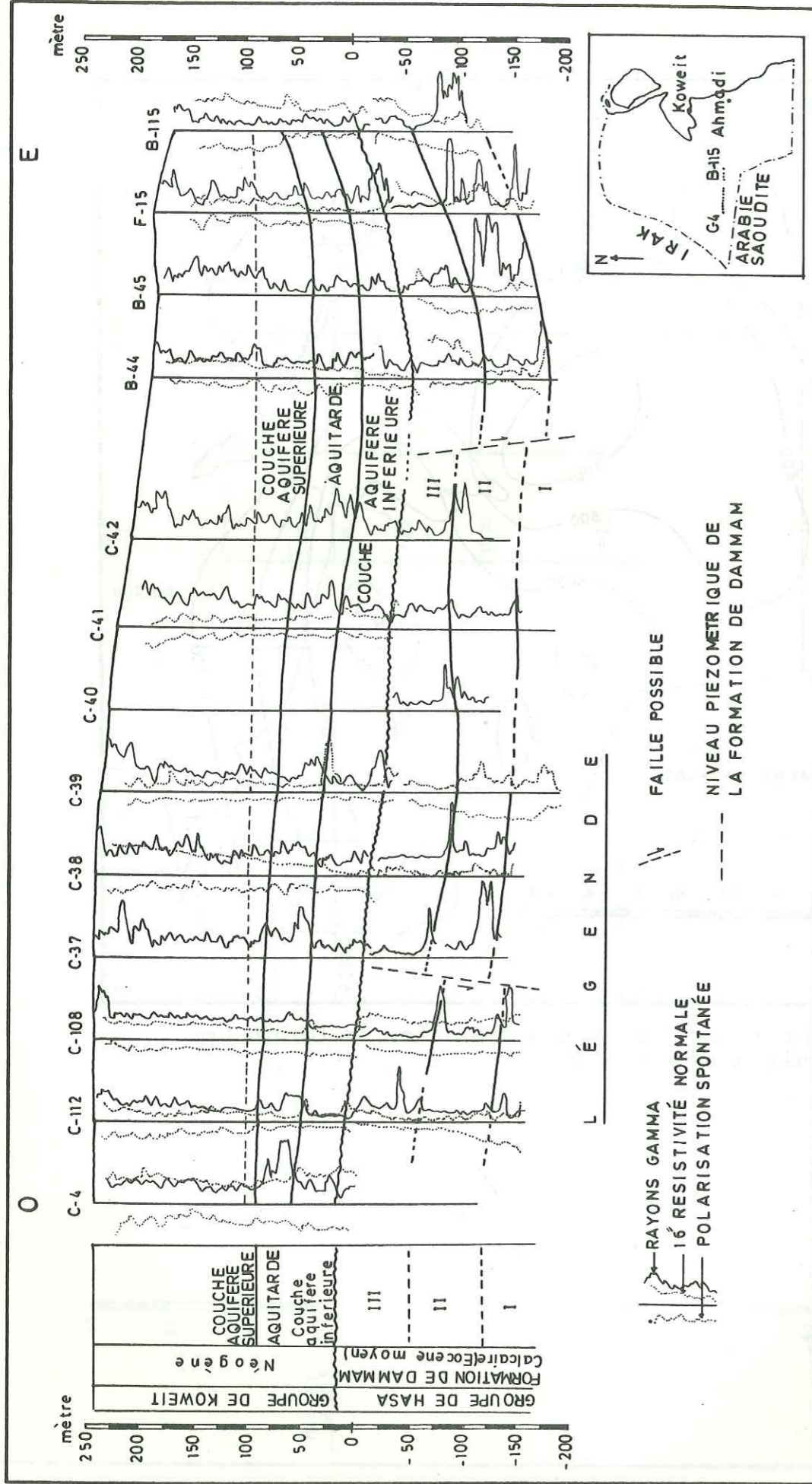


FIG. 5-18.—Coupe hydrogéophysique ouest-est montrant les unités hydrostratigraphiques du Groupe de Koweït et de la Formation de Damman.

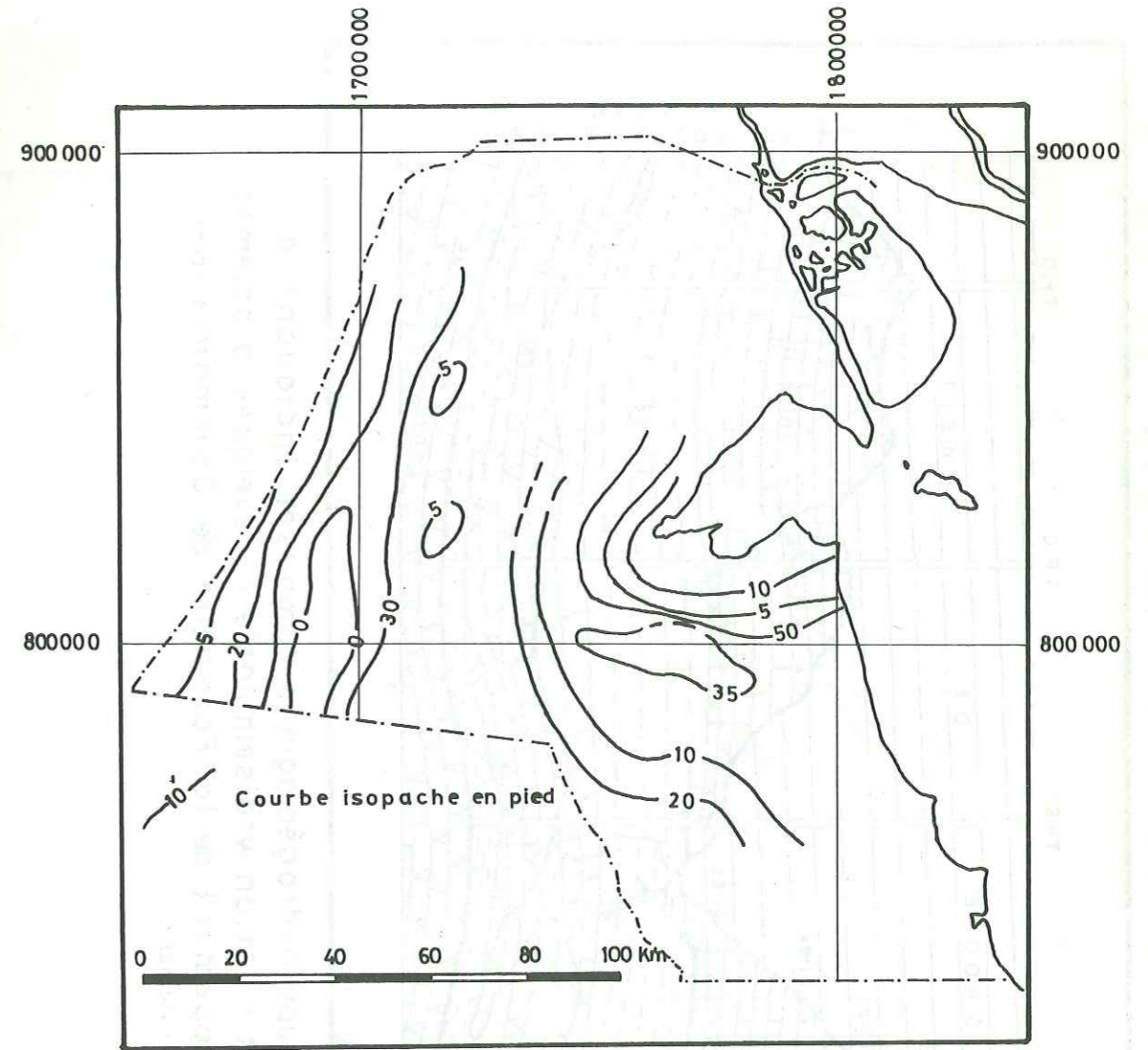


FIG. 5-19.—Carte des isopaches des calcaires à silex de la Formation de Damman (d'après la carte de S.E.S., 1967).

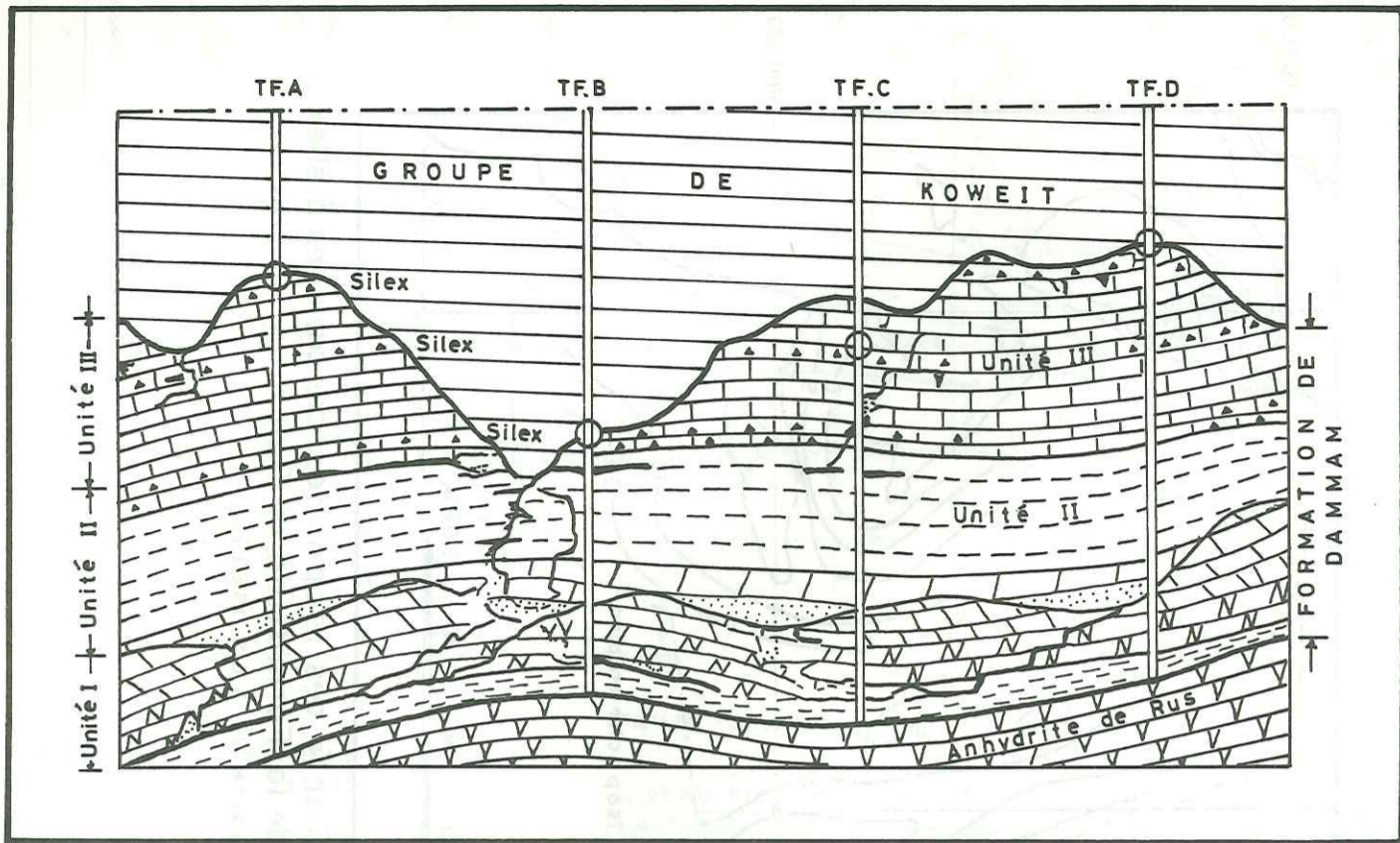


FIG. 5-20.— Coupe hydrogéologique composée indiquant la paleokarstification vraisemblable et quelques problèmes du développement de la Formation de Dammam (d'après Burdon et Al-Sharhan).

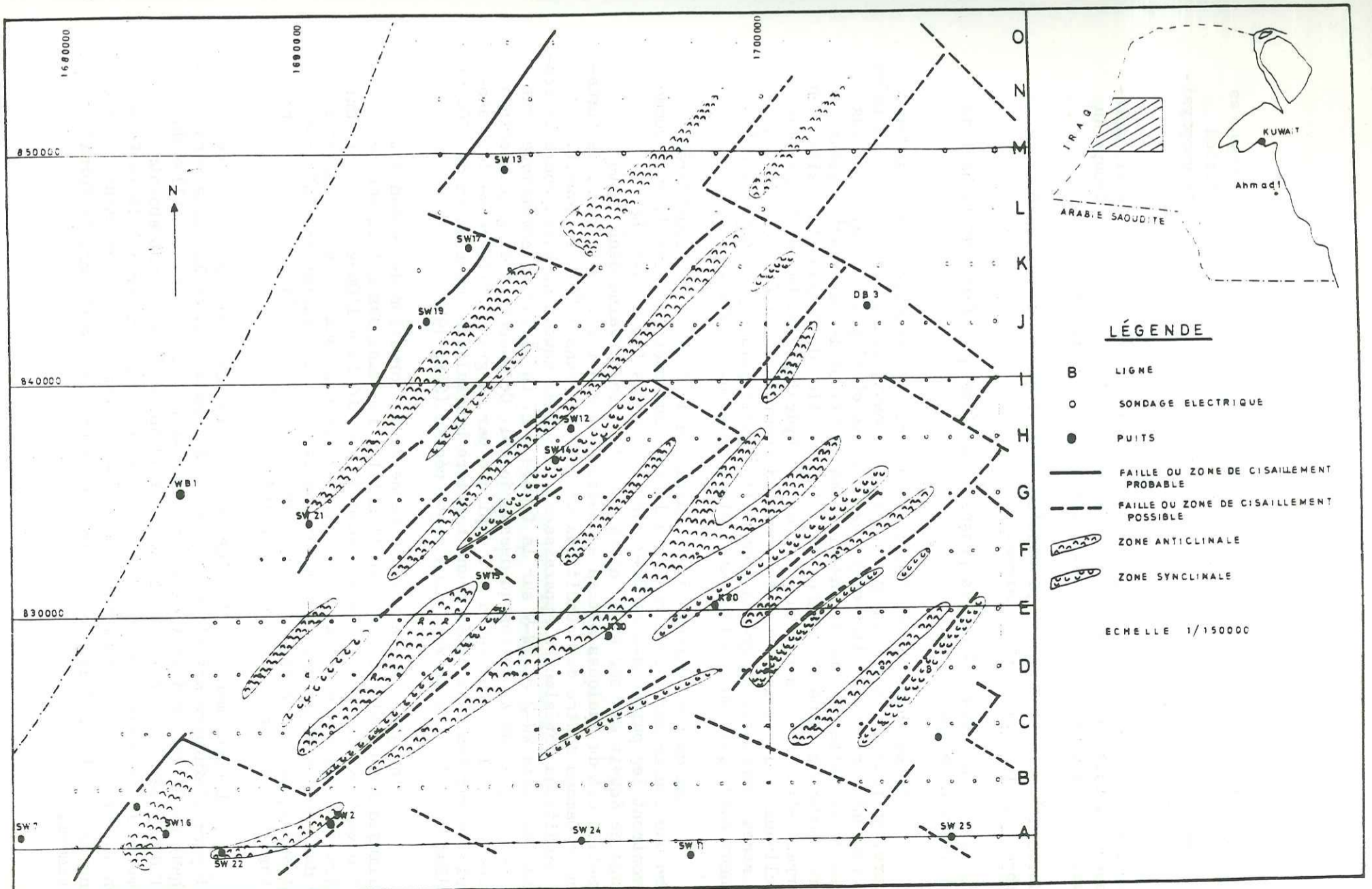


Fig 5-21.—Carte synthétique de la prospection géophysique de la Formation de Dammam (D'APRÈS C.G.G.1969).

Le levé sismique a été réparti sur six lignes ouest-est séparées de 5 kms, et 2 traverses. Les 4 lignes nord (1 à 0) n'ont été relevées qu'en employant la méthode électrique. L'interprétation des données géophysiques a permis de cartographier trois horizons (CGG 1969):

. Horizon A défini par la prospection sismique et correspondant vraisemblablement au toit du complexe qui renferme l'argile de base du Groupe du Koweit et les membres III et II de la Formation de Dammam.

. Horizon B déterminé par la prospection électrique et qui représente le membre I de la Formation de Dammam.

. Horizon C cartographié par la prospection sismique, figurant le haut de la Formation de Rus.

La synthèse des résultats obtenus par les techniques géophysiques montre, en plus des anticlinaux et des synclinaux, plusieurs zones tectonisées qui peuvent être des failles dans les endroits où il y a des rejets et des zones de cisaillement quand ceux-ci manquent. Si les axes anticlinaux correspondent à la décompression dans la Formation de Dammam, leur situation pourrait être intéressante du point de vue hydrologique. Par ailleurs, les synclinaux et les zones de cisaillement doivent être évitées, car ce sont des zones comprimées malgré la possibilité qu'il puisse y exister de petits chenaux karstiques ou des fractures mineures (C.G.G. 1969).

La couche aquifère de la Formation de Dammam est considérée comme une couche aquifère libre dans le coin sud-ouest extrême du pays comme le montrent les puits SW-4 et SW-7 sur les figures 5-3 et 5-8. Là, le Groupe de Koweit est sec et le niveau de l'eau souterraine dans cette formation est de quelques mètres au dessous de son toit. Ailleurs, la formation de Dammam montre des conditions artésiennes dans l'Etat de Koweit. Des conditions artésiennes apparaissent au Sud de Koweit au Wafra comme le montrent les puits WW-2 et WW-9 sur la figure 5-4. Le niveau piézométrique peut y être de plus de 40 mètres au dessus du sol. Ce phénomène de grande charge piézométrique locale au Wafra est expliqué par la grande différence de transmissivité sur les deux côtés d'une barrière hydraulique qui s'étend de l'Ouest à l'Est au Sud du puits WW-5 dans cette région (SES, 1975).

L'origine de l'eau souterraine de la Formation de Dammam est l'alimentation qu'elle reçoit par l'infiltration dans ses affleurements qui se trouvent en Iraq Sud (à la distance de 130-400 km à l'Ouest de Koweit sur l'aire de 3 000 km² environ.). La région entre ces deux aires est couverte par des couches Néogènes, de composition et d'origine variables. Celles-ci sont suffisamment perméables pour permettre quelque infiltration d'eau dans la Formation de Dammam sousjacent (MILETIC 1963).

L'écoulement de l'eau de la Formation de Dammam au Koweit se fait par: l'exutoire artificiel des puits de production et la fuite vers le haut au Groupe de Koweit dans les endroits où les calcaires à silice du toit de Dammam et l'argile de la base du Groupe de Koweit sont absents ou moins imperméables. Néanmoins, quand la charge piézométrique de la Formation de Dammam est suffisamment réduite par le pompage, l'écoulement de l'eau s'inverse et il y a drainage de l'eau du Groupe de Koweit vers la Formation de Dammam.

La concentration totale en sels dissous dans les eaux souterraines de la Formation de Dammam varie entre 2 400 ppm dans le coin Sud Ouest de Koweit et plus de 200 000 ppm au Nord Est du pays (voir chapitre 6).

La formation de Rus sous-jacente consiste en anhydrite ou gypse avec des calcaires et des marnes subsidiaires. Cette formation se comporte donc comme une couche aquiclude. Néanmoins, on ne peut exclure complètement la possibilité que la formation de Dammam soit alimentée par l'eau souterraine de la Formation d'Umm Al Radhuma à travers la Formation de Rus aux endroits où celle-ci est intensivement tectonisée.

5.2.4. GISEMENT DES EAUX SOUTERRAINES DE LA FORMATION D'UMM AL RADHUMA

La Formation d'Umm Al Radhuma consiste en calcaires, calcarénites, calcaires dolomitiques dans quelques parties et intercalations d'anhydrite et schistes argileux. Elle s'étend sous le sol de l'Etat de Koweit à la profondeur de 880 mètres au Sud Ouest de Koweit (puits DB-1 sur la fig 5-3) à 220 mètres au Sud-Est de Koweit (voir la fig. 5-4). Son épaisseur moyenne est de 500 mètres environ dans la plupart du pays, sauf au Nord Est où elle est de 350 à 400 mètres environ.

Les données sur la qualité de l'eau souterraine de cette formation sont très limitées. Il n'y a que trois puits pour lesquels les valeurs de la concentration totale en sels dissous et les analyses chimiques de l'eau de la moitié supérieure de cette Formation sont disponibles. Sur la fig. 5-5 on constate que dans le Sud Est du pays, la concentration totale en sels dissous varie entre 4 900 ppm (puits SW-4) et 4 100 ppm (puits GR-1). Là, la qualité de l'eau de la Formation d'Umm Al Radhuma est toujours pire que celle de la Formation de Dammam. La différence est de l'ordre de 200 à 2 000 ppm.

La charge piézométrique de la Formation d'Umm Al Radhuma est toujours supérieure à celle de la Formation de Dammam. La différence entre les deux est de l'ordre de 40-75 m (Fig. 5-5).

On croit que l'alimentation de la Formation d'Umm Al Radhuma doit se faire dans les régions de ses affleurements en Iraq et en Arabie Saoudite, en dehors de Koweit vers l'Ouest.

On discutera quelques aspects hydrochimiques et hydrauliques de cette Formation dans les deux chapitres suivants. On se contente ici de mentionner qu'à la suite des résultats de travaux de forage des trois puits (SW-4, SW-1, et GR-1), cette Formation ne peut être considérée comme une couche aquifère à cause de sa transmissivité basse et de son contenu élevé en H₂S.

5.2.5. CONCLUSIONS SUR LE GISEMENT DES EAUX SOUTERRAINES DE KOWEIT

Le commentaire des coupes hydrogéologiques suivantes nous permettra de présenter les conclusions sur le gisement des eaux souterraines de Koweit.

Coupe SO-NE (Fig. 5-3)

Nous avons dessiné cette coupe pour montrer les variations de gisement dans la direction du pendage régional des couches géologiques, dont l'épaisseur totale est de 1 200 m environ, sur une distance de 150 km environ. On y constate que:

. Les graviers, sables, silts, etc. du Groupe de Koweit (Néogène) couvrent la surface d'érosion de la Formation calcaire de Damman sous-jacente. L'épaisseur du Groupe de Koweit augmente de 160 m dans le Sud Ouest à 375 m dans le Nord-Est. Ce Groupe est sec dans les parties sud-ouest mais son épaisseur saturée en eau augmente progressivement vers le Nord-Est.

. La Formation calcaire de Damman (Eocène moyen) augmente également en épaisseur dans la direction du pendage régional, mais de façon moins prononcée, avec une épaisseur moyenne de 220 m environ. Cette Formation est entièrement saturée en eau sauf dans ses parties supérieures au Koweit Sud-Ouest.

. L'ensemble Groupe de Koweit et Formation de Damman se vide vers le Nord Est dans le Golfe Arabique à travers le Groupe de Koweit. Le niveau piézométrique mesuré de la Formation de Damman est plus élevé que celui du Groupe de Koweit dans les secteurs sud-ouest, mais il en est autrement au Nord Est. Néanmoins, la charge hydraulique véritable de la Formation de Damman excède celle du Groupe de Koweit presque partout quand on considère la correction qu'on doit faire en raison de la différence de densité des eaux souterraines (voir le paragraphe 7.6).

. La qualité de l'eau se détériore progressivement. Elle passe de 2 900 ppm dans le Sud-Ouest à 200 000 ppm environ dans le Nord-Est.

. Les Formations sous-jacentes correspondant à l'anhydrite de Rus (Eocène inférieur) et au calcaire d'Umm Al Radhuma (Paléocène-Eocène inférieur) ont une épaisseur moyenne de 150 et 450 m respectivement. L'anhydrite de Rus qui se trouve entre la Formation de Damman et la Formation d'Umm Al Radhuma se comporte comme un aquiclude. La charge hydraulique de celui-ci est plus élevée que celle de la Formation de Damman de l'ordre de 75 m environ dans l'aire sud-ouest.

Coupe NO-SE (Fig. 5-4)

Cette coupe montre les variations du gisement dans la direction presque perpendiculaire à celle du pendage sur une distance de 165 km environ. On y constate:

. La diminution de l'épaisseur totale et de l'épaisseur saturée du Groupe de Koweit vers le Sud-Est.

. Que la charge hydraulique de la Formation de Damman est plus élevée que celle du Groupe de Koweit de l'ordre de 10 m le long de la coupe, mais la différence entre elles augmente d'avantage dans le Sud Ouest au Wafra où elle atteint 50 m.

. La teneur en sels dissous augmente vers le Sud-Est, allant de 3 900 ppm à 10 000 ppm pour le Groupe de Koweit et de 3 200 à 6 000 ppm pour la Formation de Damman le long de la coupe.

Coupe SO (Fig. 5-5)

Cette coupe montre quelques détails sur la partie supérieure de la Formation d'Umm Al Radhuma ainsi que les couches sus-jacentes sur une distance de 100 km dans le Koweit Sud Ouest. On y constate que:

. La totalité du Groupe de Koweit ainsi que la partie supérieure de la Formation de Damman sont sèches (puits SW-4).

. L'épaisseur saturée du Groupe de Koweit augmente progressivement vers l'Est et le Sud-Est le long de la coupe avec un maximum de 100 m au centre de la cuvette entre les puits C-109 et GR-1.

. L'épaisseur moyenne de la Formation de Damman est de 215 m le long de la coupe.

. La Formation aquiclude de Rus a l'épaisseur moyenne de 160 m environ mais s'amincit jusqu'à 70 m aux environs du puits GR-1.

. La Formation d'Umm Al Radhuma (principalement calcaire avec des intercalations d'anhydrite et de gypse du Paléocène-Eocène inférieur) a été pénétrée partiellement dans sa partie supérieure avec une épaisseur de 254, 165 et 180 m dans les trois puits SW-4, SW-1 et GR-1 respectivement.

. Le niveau piézométrique de la Formation de Damman est plus élevé que celui du Groupe de Koweit de l'ordre de 10 à 15 m tandis que celui de la Formation d'Umm Al Radhuma est plus élevé que celui de Damman de l'ordre de 43 à 87 m.

. La teneur en sels dissous de l'eau de la Formation de Damman augmente de 2 900 ppm dans le puits SW-4 jusqu'à 3 900 ppm environ dans le puits SW-1 et GR-1. D'ailleurs, la teneur en sels de la Formation d'Umm Al Radhuma est plus élevée de 200 à 2 000 ppm que celle de la Formation de Damman aux mêmes emplacements. Elle varie entre 4 100 ppm au puits GR-1 et 4 600 et 4 900 ppm aux puits SW-1 et SW-4 respectivement.

Coupe O-E (Fig. 5-8)

Nous avons construit cette coupe pour montrer de façon un peu plus détaillée les subdivisions et les caractères des couches aquifères exploitées au Koweit sur une distance de 84 km environ. On y constate:

. La subdivision du Groupe de Koweit en deux aquifères (supérieur et inférieur) avec un aquitarde entre eux. Les deux aquifères ne sont pas bien développés dans la région ouest par suite de la faible épaisseur de la zone saturée. L'épaisseur saturée augmente généralement vers l'Est, mais elle diminue sur les anticlinaux (puits E-6). L'épaisseur moyenne de l'ensemble saturé de ce groupe est de 100 m environ.

. Que l'argile de base du Groupe de Koweit et les calcaires à silex du toit de la Formation de Damman forment une zone généralement semi-perméable.

. Que la Formation de Dammam est subdivisée en trois membres (III, II et I) d'épaisseur égale et dont l'épaisseur totale est de 230 m environ. Ces membres sont caractérisés par des couches de marnes ou d'argiles à leurs toits et murs.

. Qu'à l'Est de SW-25, la teneur en sels dissous de l'eau de la Formation de Dammam est toujours moins élevée que celle du Groupe de Koweit (de l'ordre de 1 000 à 1 500 ppm) tandis qu'à l'Ouest de SW-25 il en est autrement (puits E-3 et E-6) avec une différence de 1 200 à 2 800 ppm. Vraisemblablement, la valeur élevée de la teneur en sels dissous est due à la grande profondeur dans ces deux puits qui entraîne la contamination des eaux par celles des eaux anhydritiques de la Formation de Dammam inférieure. Plus loin, vers l'Est, au puits AB-1, la teneur en sels de l'ensemble du Groupe de Koweit est de 5 200 ppm, tandis que celle de l'ensemble de la Formation de Dammam est de 4 730 ppm. Plus loin, vers l'Est les deux puits J-3 et J-1 indiquent que les conditions topographiques permettent une alimentation par l'infiltration locale, ce qui est montré par la diminution de la teneur en sels dans les eaux du Groupe de Koweit qui est de 3 700 - 4 450 ppm. Dans ces deux puits, on constate l'augmentation de la teneur dans la Formation de Dammam à la fois en s'éloignant vers l'Est et avec l'accroissement de la profondeur jusqu'à 70 000 ppm environ, ce qu'on explique par la diminution de la transmissivité et donc, de la circulation de l'eau.

Coupe O-E (Fig. 5-18)

Nous présenterons cette coupe pour montrer la subdivision des couches aquifères. On y constate:

. La subdivision approximative des couches hydrostratigraphiques du Groupe de Koweit en une couche aquifère supérieure, une couche aquifère inférieure et une couche aquitarde qui s'intercale entre elles.

. La subdivision de la Formation de Dammam en trois membres.

. Les diagraphies de rayons gamma nous permettent d'identifier les zones d'argiles dans le Groupe de Koweit ainsi que les zones d'argiles et de marnes qui se trouvent à la base et au sommet du membre II de la Formation de Dammam. De plus, elles montrent clairement la faible activité des calcaires à silex qui se trouvent au toit de la Formation de Dammam ainsi que des calcaires qui se trouvent quelquefois dans le Groupe de Koweit.

. Les diagraphies de résistivité (grande normale) indiquent très clairement le toit de la Formation de Dammam, ainsi que les zones calcaires du Groupe de Koweit. Elles montrent également, le degré relatif de cimentation dans ce groupe.

. La diagraphie de polarisation spontanée est utile pour la détermination de façon relative de la qualité de l'eau ainsi que de façon indirecte de la perméabilité relative des diverses zones du Groupe de Koweit. Par exemple lorsqu'on a un pic prononcé de P.S. associé à une faible activité de rayons gamma et un pic important de résistivité par rapport à l'argile, on conclut que l'on a une zone relativement perméable en supposant avoir de l'eau de même qualité dans les diverses zones. Pour l'interprétation de la Formation de Dammam, la P.S. n'est pas très utile en raison du potentiel de diffusion créé par la différence en charge hydraulique des diverses zones.

Généralement, la valeur de la P.S. pour l'interprétation au Koweit ne présente guère d'avantages, car les fluides de forage et l'eau de la Formation ont des salinités presque identiques.

Schéma hydrogéologique général (Fig. 5-22)

A partir des coupes hydrogéologiques décrites ci-dessus ainsi que des conditions hydrogéologiques régionales, nous avons dessiné un schéma général montrant l'alimentation depuis l'Arabie et les échanges entre les aquifères par suite des différences de charges et des structures géologiques (Fig. 5-22). On y constate que:

. Les couches aquifères profondes de Koweit, c'est à dire des formations calcaires de Dammam et d'Umm Al Radhuma n'affleurent qu'en dehors de Koweit en Iraq et en Arabie vers l'Ouest et le Sud Ouest de Koweit. L'alimentation par infiltration directe s'y fait à une distance de 130 à 400 km environ à l'Ouest et au Sud Ouest de Koweit. Les affleurements sont quelquefois recouverts de dépôts Néogènes à travers lesquels l'infiltration peut se faire également.

. Dans ses aires d'affleurements, ces deux formations se comportent comme des aquifères libres. Peu à peu, vers le Nord Est elles se transforment en couches artésiennes par suite du développement de la couverture des dépôts Néogènes sur la Formation de Dammam d'une part, et de l'anhydrite de la Formation de Rus entre celle-ci et la Formation d'Umm Al Radhuma.

. Par suite de la différence de charges hydrauliques entre les trois aquifères, l'aquifère le plus profond ayant toujours une charge plus élevée que celle de l'aquifère qui le recouvre, il y a des transferts souterrains vers le haut dans les endroits où la séparation entre les aquifères n'est pas effective, en particulier près des sommets des anticlinaux ainsi que dans les localités où l'argile de base du Groupe de Koweit d'une part, et l'anhydrite de Rus d'autre part, sont soit semi-perméables soit absentes.

. On est tenté de considérer que la plupart de l'écoulement des eaux des systèmes aquifères vers le Golfe Arabique se fait par drainance vers le haut à travers le Groupe de Koweit et ensuite vers le Golfe à travers les parties supérieures de celui-ci. La teneur en sels très élevée (100 000 à 200 000 ppm) des eaux de la Formation de Dammam et des parties inférieures du Groupe de Koweit indique que ces eaux sont presque stagnantes.

. La teneur en sel augmente généralement vers l'Est et le Nord Est dans toutes les couches à l'exception de quelques petites lentilles d'eau douce qui flottent sur les eaux saumâtres ou salées par suite d'une infiltration locale dans les petites dépressions topographiques, telles que les dépressions d'Al Raudhatain, Umm Al Aish et Al Quashaniya au Koweit nord.

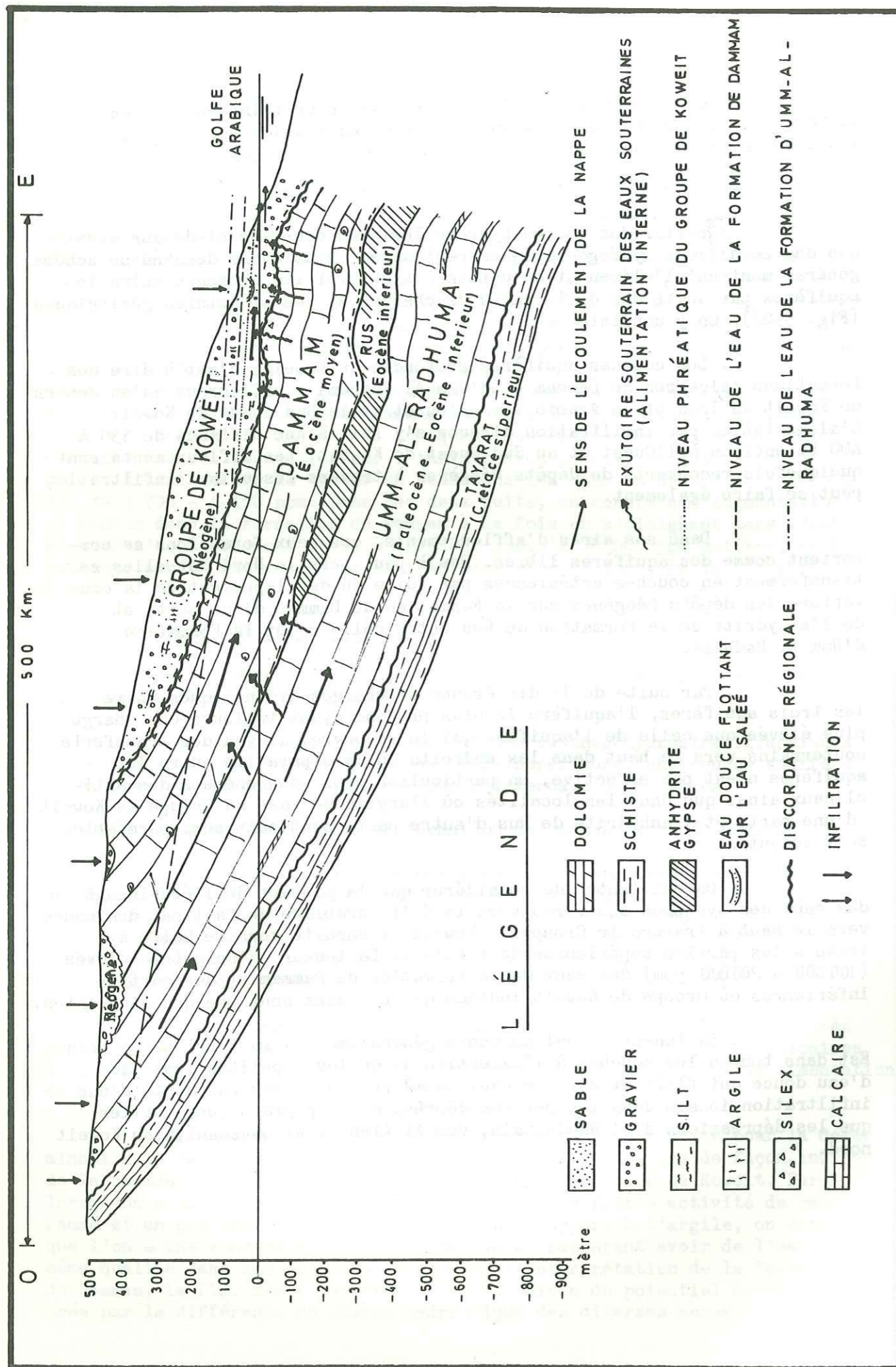


FIG. 5-22.—Coupe hydrogéologique schématique montrant l'alimentation depuis l'Arabie et les échanges entre les aquifères.

CHAPITRE VI - HYDROGEOCHIMIE

Dans le chapitre suivant, nous examinerons la qualité des eaux souterraines de Koweït d'après les analyses complètes faites par le Ministère de l'Electricité et de l'Eau, ainsi que par Parsons Corporation sur des échantillons pris dans quelques puits d'eau représentatifs de tous les champs de puits de Koweït. L'analyse complète comporte les éléments suivants:

- Anions en mé/l : HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{--}
- Cations en mé/l : Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+

6.1. RÉPARTITION HYDROGÉOCHIMIQUE DES EAUX SOUTERRAINES DE KOWEIT

6.1.1. CLASSIFICATION DES EAUX SOUTERRAINES DE KOWEIT SUR LA BASE DE LEUR MINÉRALISATION

Dans le Chapitre 5, on a déjà présenté, de façon très générale, la répartition de la salinité des eaux souterraines dans les couches aquifères diverses au Koweït. Selon la minéralisation de ces eaux on peut les diviser en quatre zones principales (Fig. 6-1).

6.1.1.1. ZONE DES EAUX DOUCES

Cette zone se limite à la partie supérieure de la Formation de Dibdiba du Groupe de Koweït dans la région de Koweït nord (Raudhatain, Umm Al Aish, Quashaniya).

La concentration totale dans cette zone varie entre 400 et 1 000 ppm. Les données hydrogéochimiques montrent que cette zone là est entourée d'eau à salinité plus élevée et qu'elle flotte sur des eaux salées ou très salées.

6.1.1.2. ZONE DES EAUX SAUMÂTRES

Cette zone couvre une aire large de Koweït s'étendant de Shigaya dans le Sud Ouest à Sulaibiya vers l'Est et de Wafra dans le Sud jusqu'à Liyah vers le Nord de Koweït. Dans cette zone la salinité des eaux souterraines de l'ensemble du Groupe de Koweït et de la Formation de Dammam varie entre 2 500 et 5 000 ppm. Les champs de puits des eaux saumâtres se trouvent dans cette zone là.

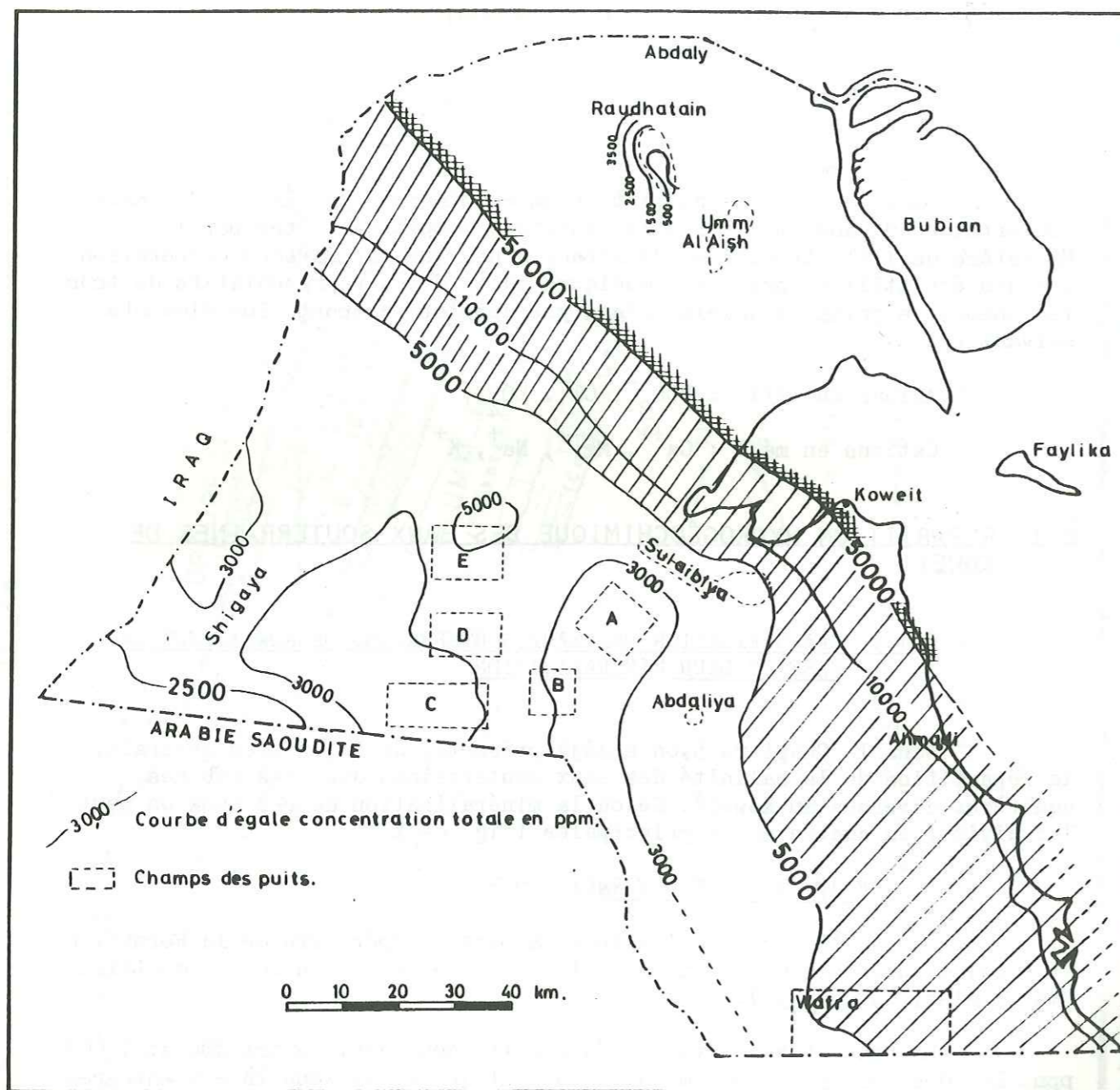


FIG. 6-1.— Carte des zones de salinité des eaux souterraines de Koweit.

En ce qui concerne la minéralisation des eaux souterraines de la Formation d'Umm Al Radhuma, il n'y a pas beaucoup de données pour établir sa répartition au Koweit. Les échantillons pris dans les puits de SW-4, SW-1 et GR-1 qui se trouvent au Sud-Ouest (voir la Fig. 5-5) montrent que la concentration totale y est de 4 100 à 4 600 ppm. Sur la Figure 6-2, on présente la répartition régionale de la salinité de cette Formation (OTKUN 1975). On y constate qu'il est exceptionnel de rencontrer de l'eau souterraine à concentration totale de moins de 5 000 ppm dans cette Formation au Koweit.

6.1.1.3. ZONE DES EAUX SOUTERRAINES SALEES

La salinité des eaux souterraines dans cette zone varie entre 5 000 et 50 000 ppm dans l'ensemble de la Formation de Damman et la plupart du Groupe de Koweit. Elle borde la zone des eaux souterraines saumâtres au Nord, au Nord-Est et à l'Est, et elle représente la limite entre les eaux souterraines d'origine météorique et les eaux souterraines marines récentes et anciennes.

6.1.1.4. ZONE DES EAUX SOUTERRAINES TRES SALEES

La salinité des eaux souterraines dans cette zone varie entre 50 000 et 200 000 ppm dans l'ensemble de la Formation de Damman et la plupart du Groupe de Koweit. Les Formations géologiques plus profondes contiennent vraisemblablement, des eaux de qualité semblable. Elle borde la zone précédente au Nord-Est et à l'Est. Les eaux souterraines contenues y sont des eaux marines anciennes.

Sur la Fig. 6-3, on présente la répartition de la salinité des eaux souterraines de la Formation de Damman. On y constate que la concentration totale en sels dissous augmente de 2 500 ppm dans le Sud-Ouest, à plus de 200 000 ppm dans le Nord-Est. Néanmoins, cette image est très générale et des irrégularités dans quelques puits sont possibles, ce qu'on peut expliquer par la dilution différente, par les eaux météoriques, de la couche aquifère le long des zones à perméabilité élevée (karst, failles etc.) et des zones à perméabilité faible. Selon BURDON et AL SHARHAN (1968, p. 391) "les eaux météoriques s'infiltrent vers le bas, en diluant la nappe aquifère de Damman jusqu'au niveau actuel de la mer. Au-delà, vers l'Est, la charge de la couche aquifère est presque égale à celle du niveau de la mer. Par conséquent, l'eau de celle-ci peut remplacer l'eau météorique de la nappe aquifère". Quand on examine cette hypothèse en utilisant notre coupe hydrogéologique SO-NE (Fig. 5-3), on constate que le lessivage de la couche aquifère de la Formation de Damman par les eaux météoriques infiltrées ne se fait au Koweit que, vraisemblablement, dans une petite aire au Koweit Sud-Ouest où la couche aquifère est libre. La plus grande part de l'infiltration doit avoir lieu en dehors de l'Etat de Koweit, vers le Sud-Ouest dans les régions d'affleurement de l'aquifère. Nous croyons que le lessivage de la couche aquifère de Damman, dans ses parties captives dans l'Etat de Koweit, se fait par transfert des eaux souterraines, vers le haut, par suite de la différence de charge entre la Formation de Damman et le Groupe de Koweit susjacent. Plus loin vers l'Est, la charge de la couche aquifère de Damman se réduit peu à peu et s'égalise apparemment avec celle de la mer. Dans cette zone là on constate l'augmentation considérable de la salinité de l'eau de la Formation de Damman.

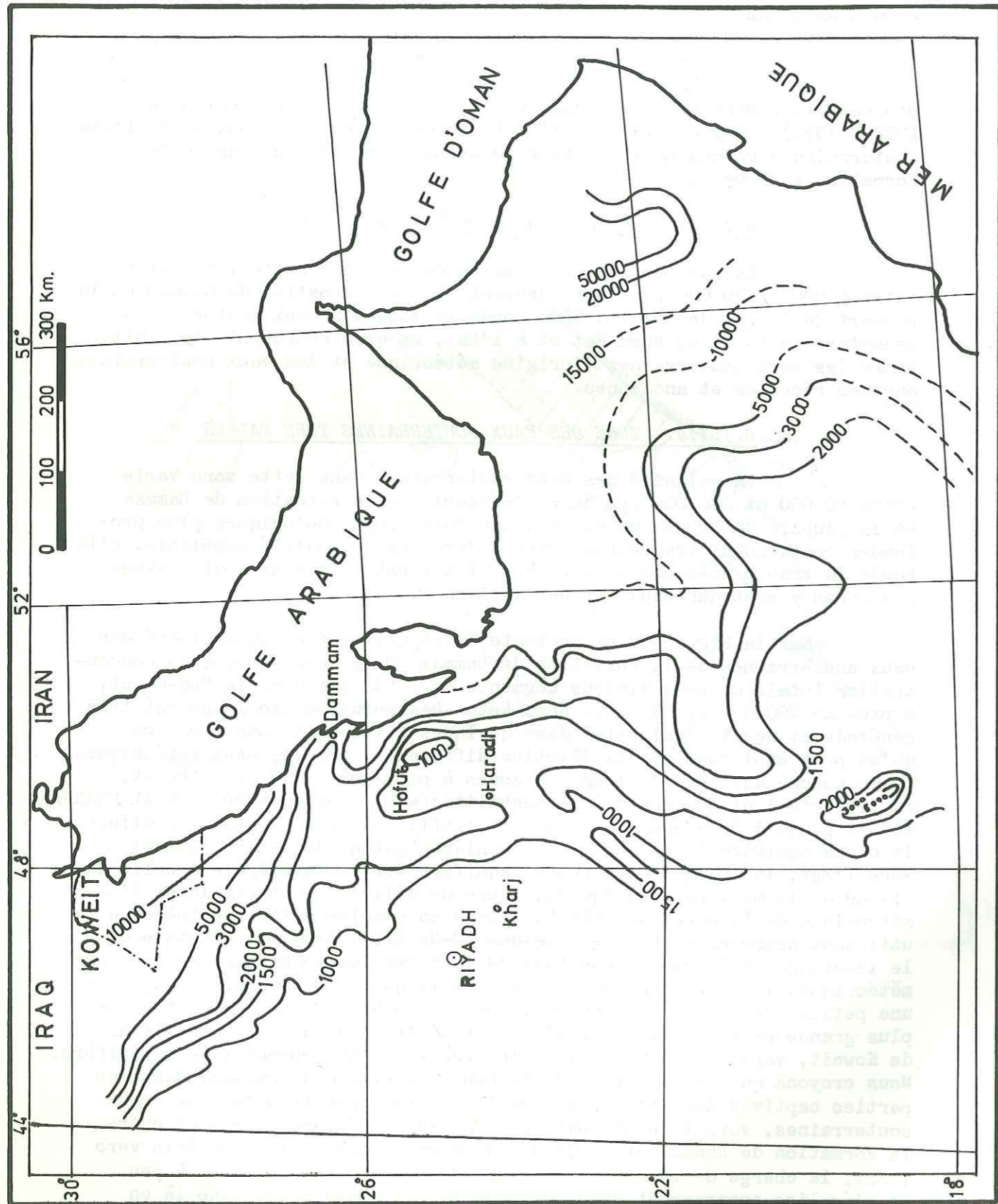


FIG. 6-2.—Carte de lisosalinite de la Formation d'Umm-Al-Radhuma
(d'apres Otkun 1975)

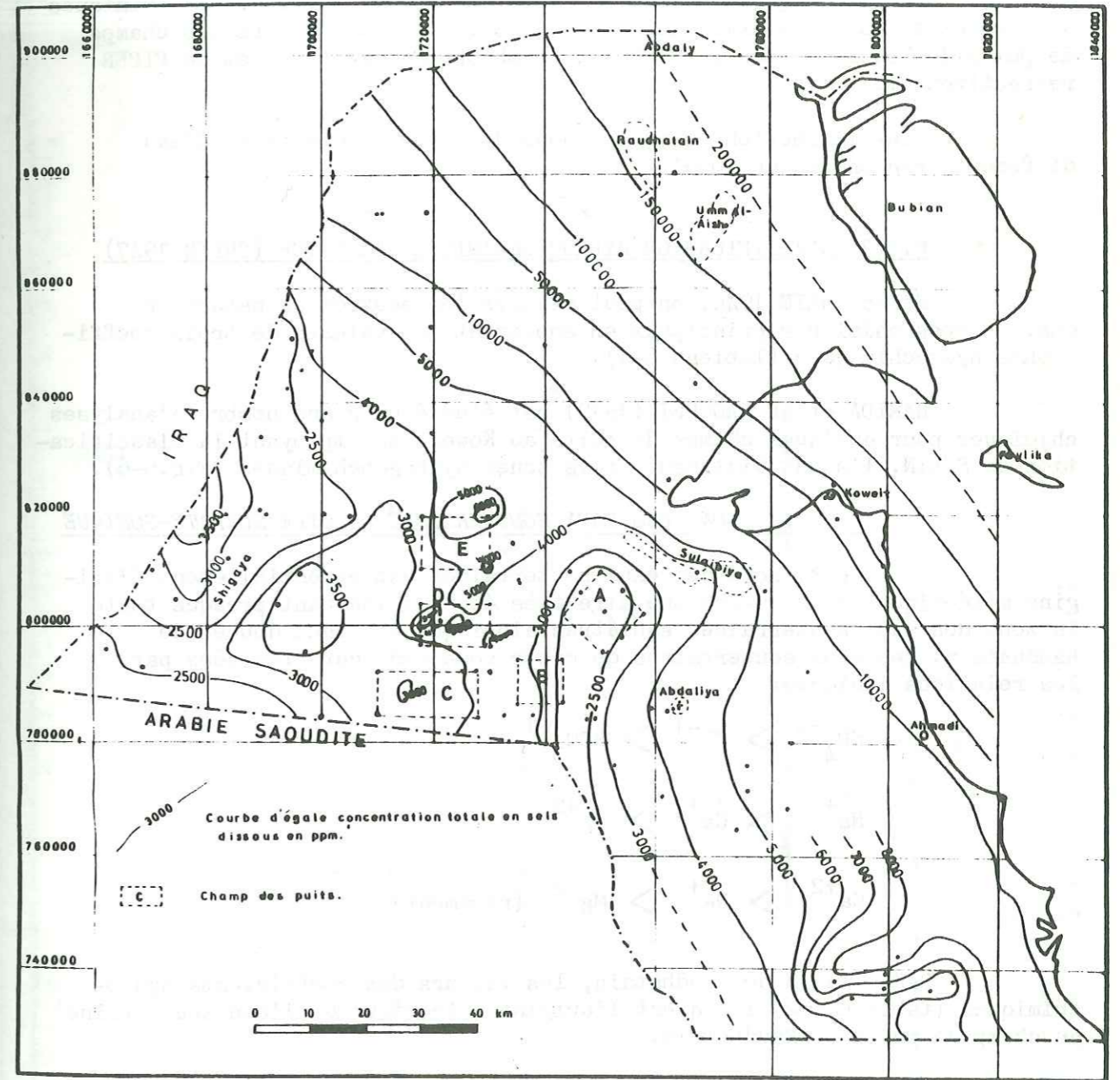


FIG. 6-3.—Carte d'egale concentration totale en sels dissous de la
Formation de Dammam (d'apres la carte de S.E.S.)

6.1.2. REPRESENTATION GRAPHIQUE DES ANALYSES D'EAU

Sur les Figures 6-4 et 6-5 nous présentons les analyses chimiques des échantillons d'eau pris dans quelques puits représentatifs des champs de puits de Koweït selon les méthodes de SCHOELLER-BERKALOFF et de PIPER respectivement.

Dans la section suivante, nous discuterons des types d'eau différents rencontrés au Koweït.

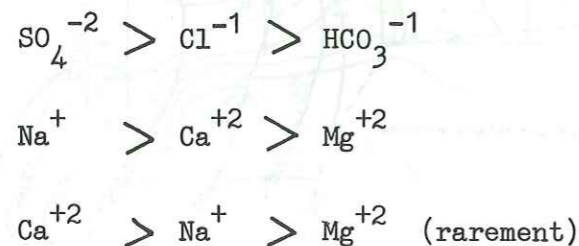
6.1.3. CLASSIFICATION HYDROGEOCHIMIQUE GENETIQUE (SULIN 1947)

Selon SULIN 1946, on peut classer les eaux de la nature en quatre types chimiques principaux en employant les valeurs de trois coefficients hydrochimiques (Tableau 6-1).

HAMIDA et AL YAQOUBI (1977) ont étudié un grand nombre d'analyses chimiques pour quelques champs de puits au Koweït en employant la classification de SULIN. Ils ont distingué trois zones hydrogéochimiques (Fig.6-6).

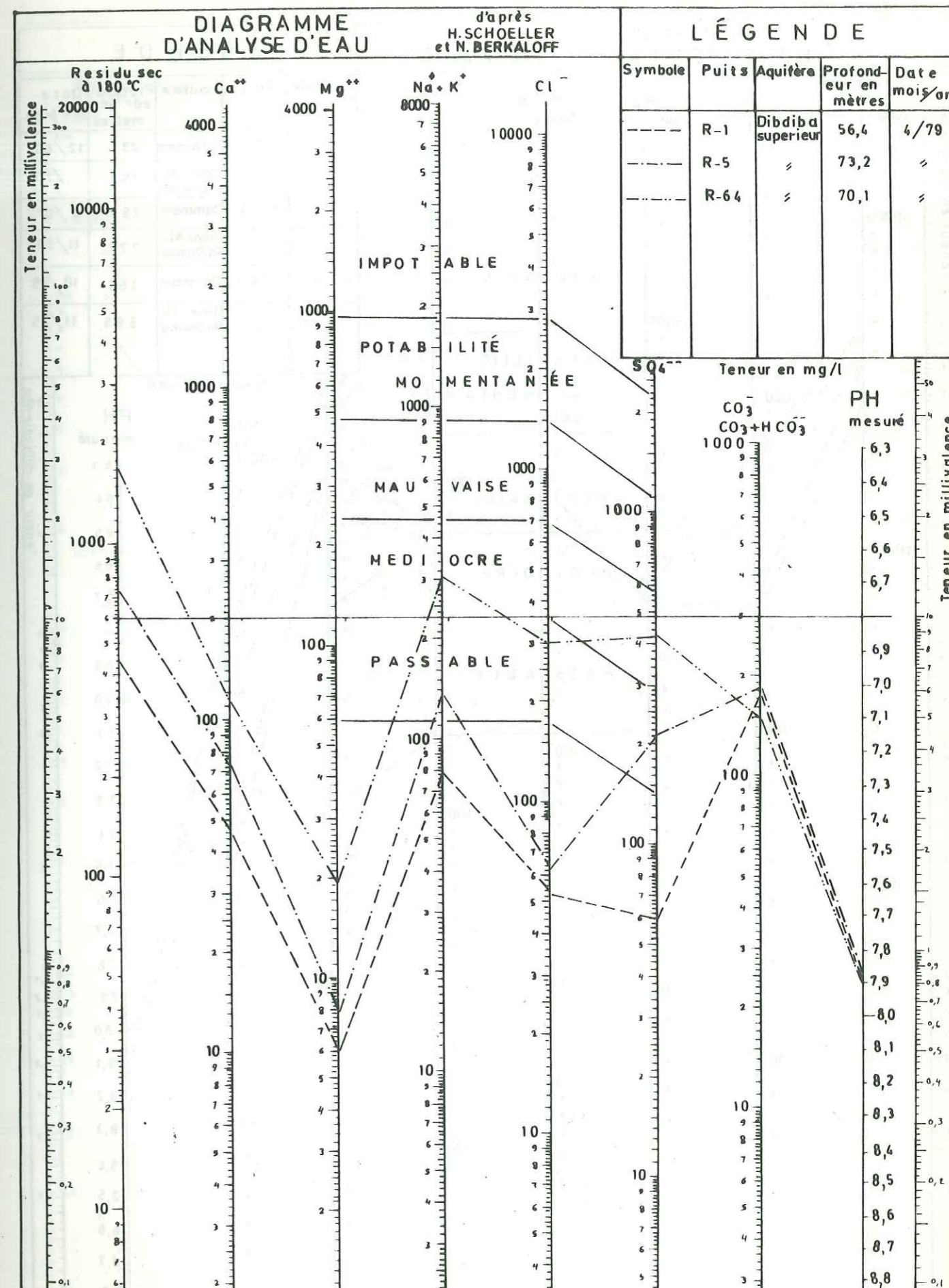
6.1.3.1. ZONE DES EAUX SOUTERRAINES DU TYPE SULFATE-SODIQUE

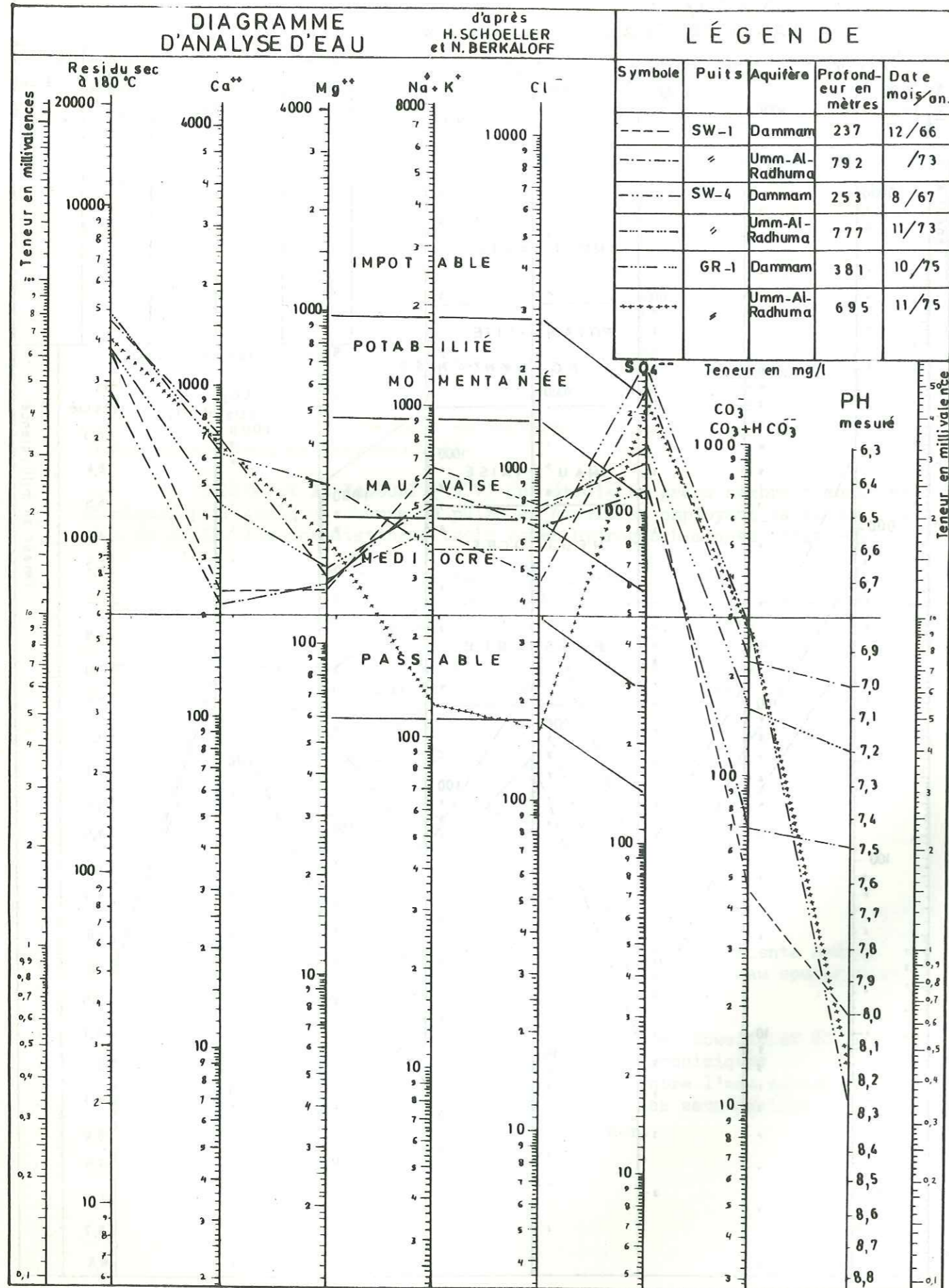
Cette zone des eaux souterraines est essentiellement d'origine météorique. Elle couvre une aire très étendue incluant presque toute la zone des eaux souterraines saumâtres ainsi que les eaux douces de Raudhatain. Les eaux souterraines de cette zone sont caractérisées par les relations ioniques:



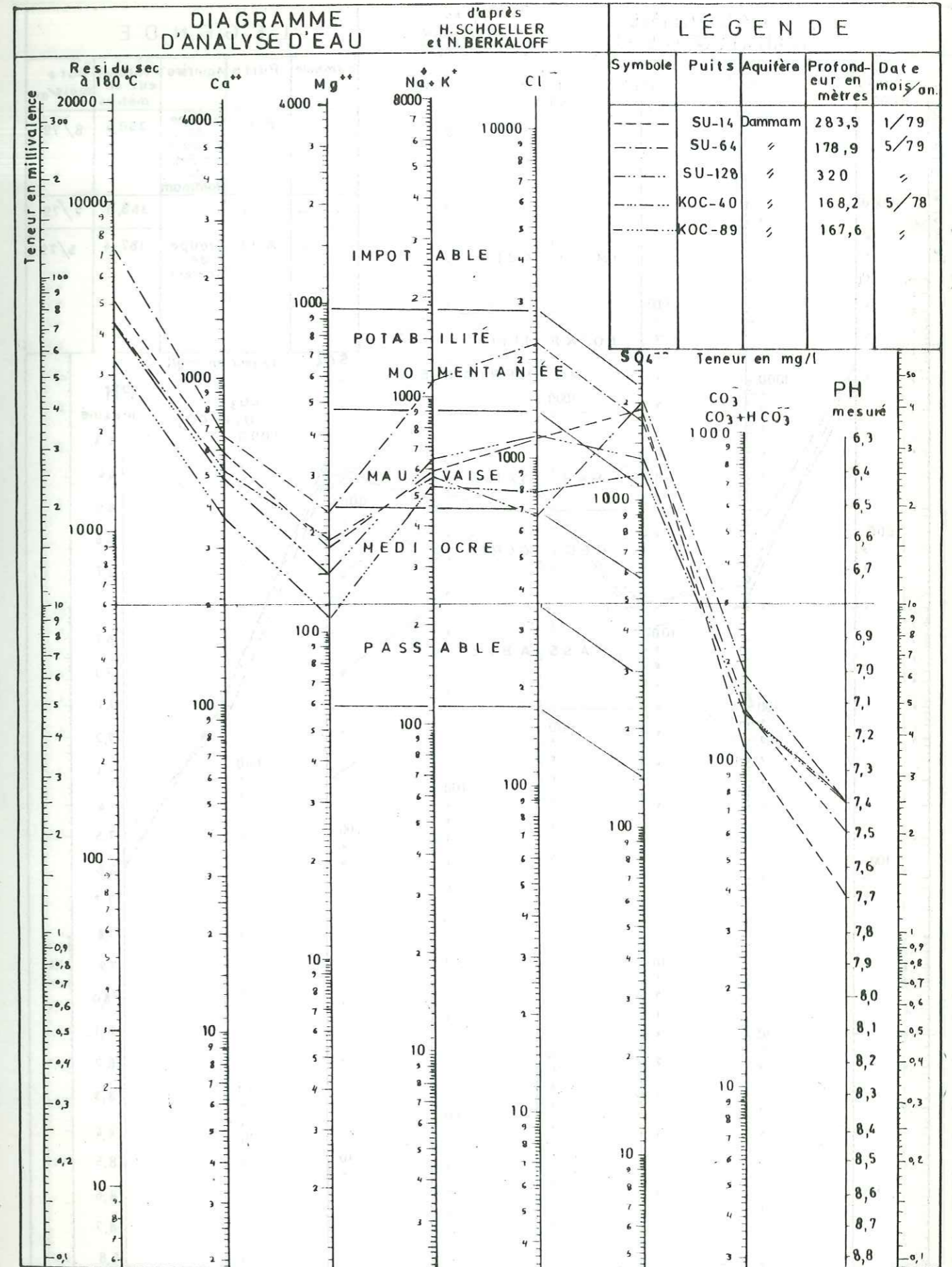
Dans l'aire de Raudhatain, les valeurs des coefficients hydrochimiques (tableau 6-2) indiquent l'origine météorique de l'eau souterraine du champ de puits de Raudhatain.

Dans l'aire entre Shigaya (coin Sud-Ouest de Koweït) et Al Sulaibiya, la gamme des valeurs des coefficients hydrochimiques (tableau 6-2) représente des étapes intermédiaires entre l'eau souterraine météorique qui est considérablement contaminée par des eaux marines récentes dans les secteurs est, et cette eau de mer.



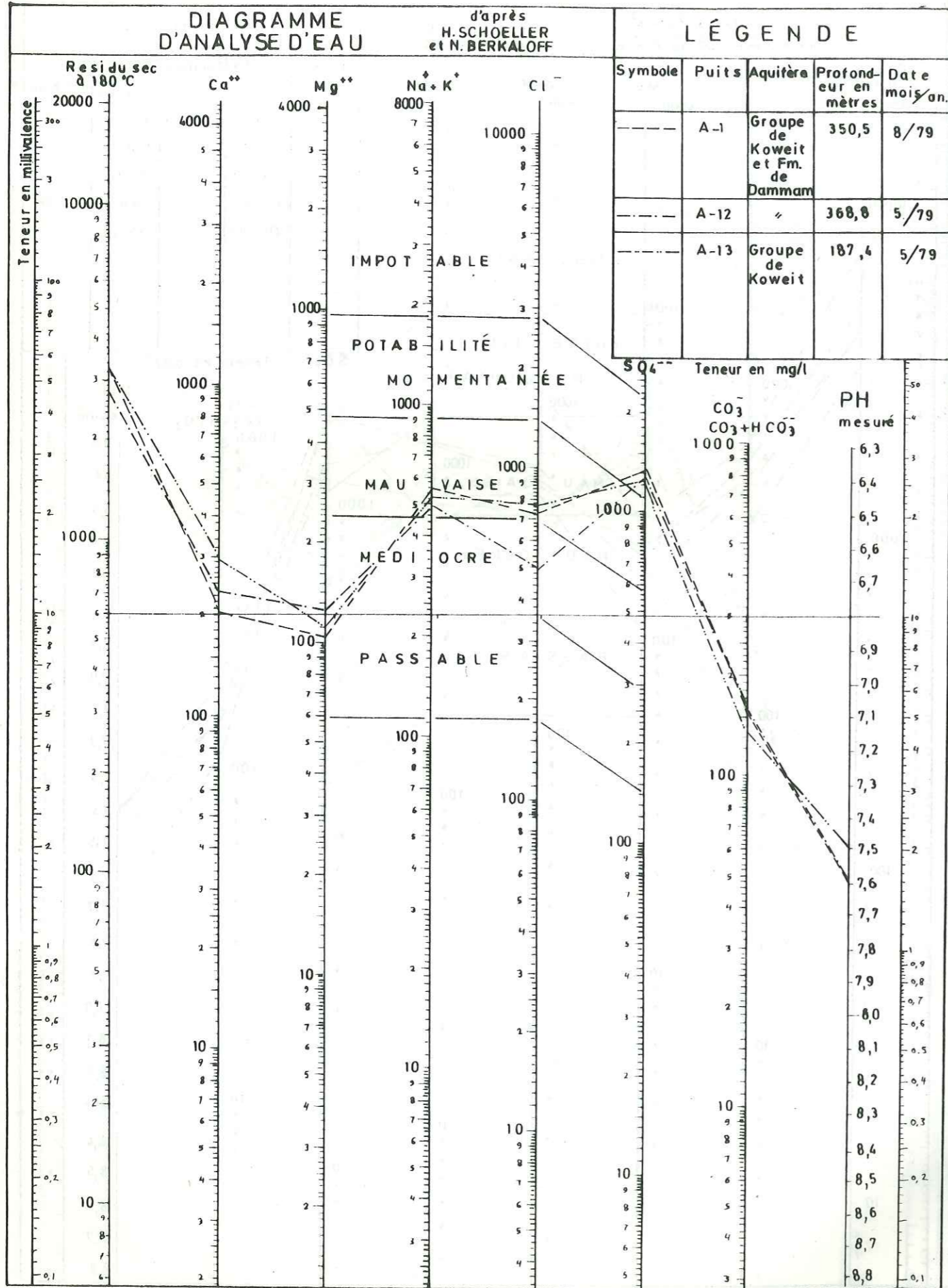


KOWEIT SUD-OUEST



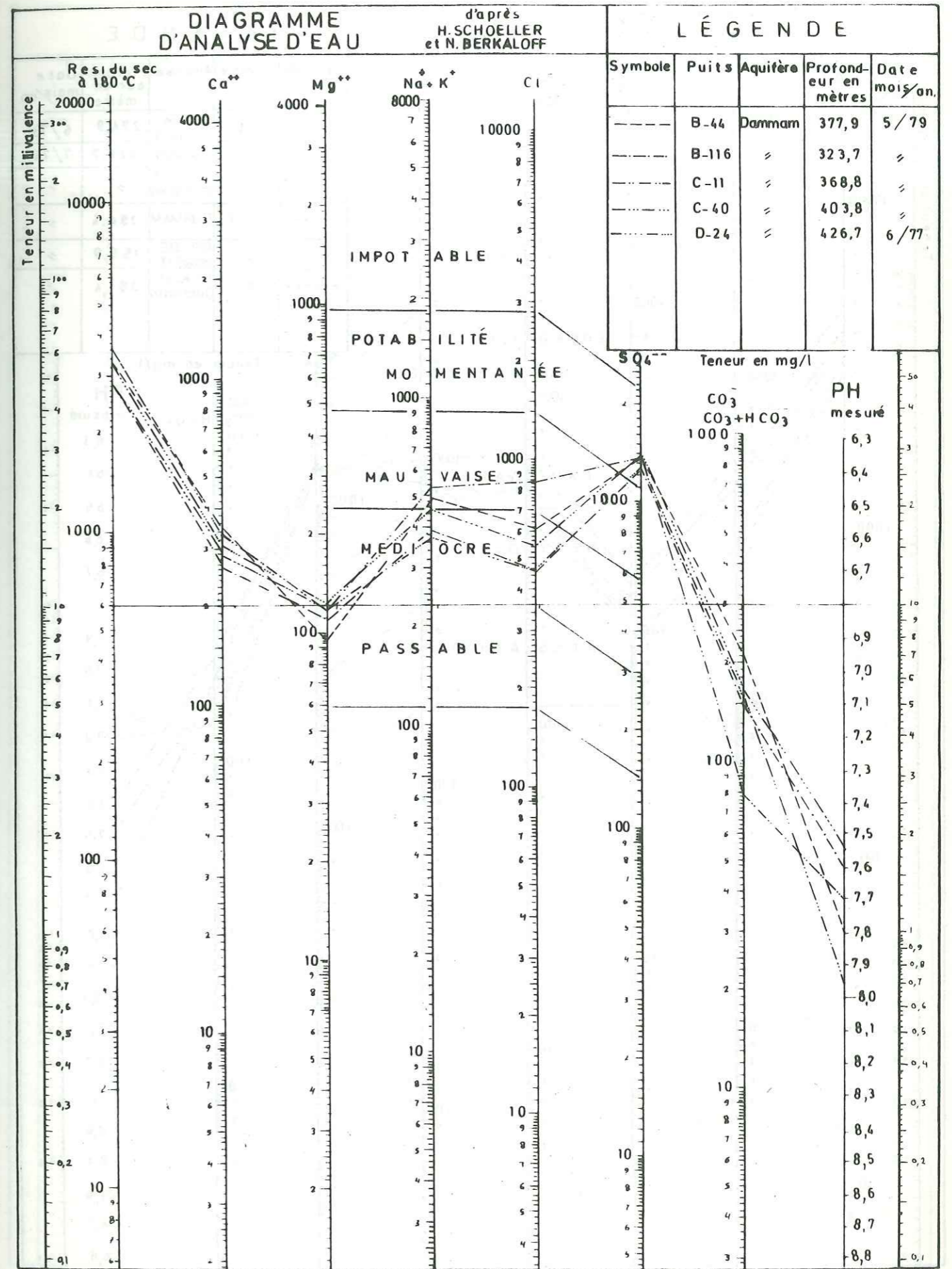
SULABIYA ET ABDALLIYA

FIG. 6-4 d.



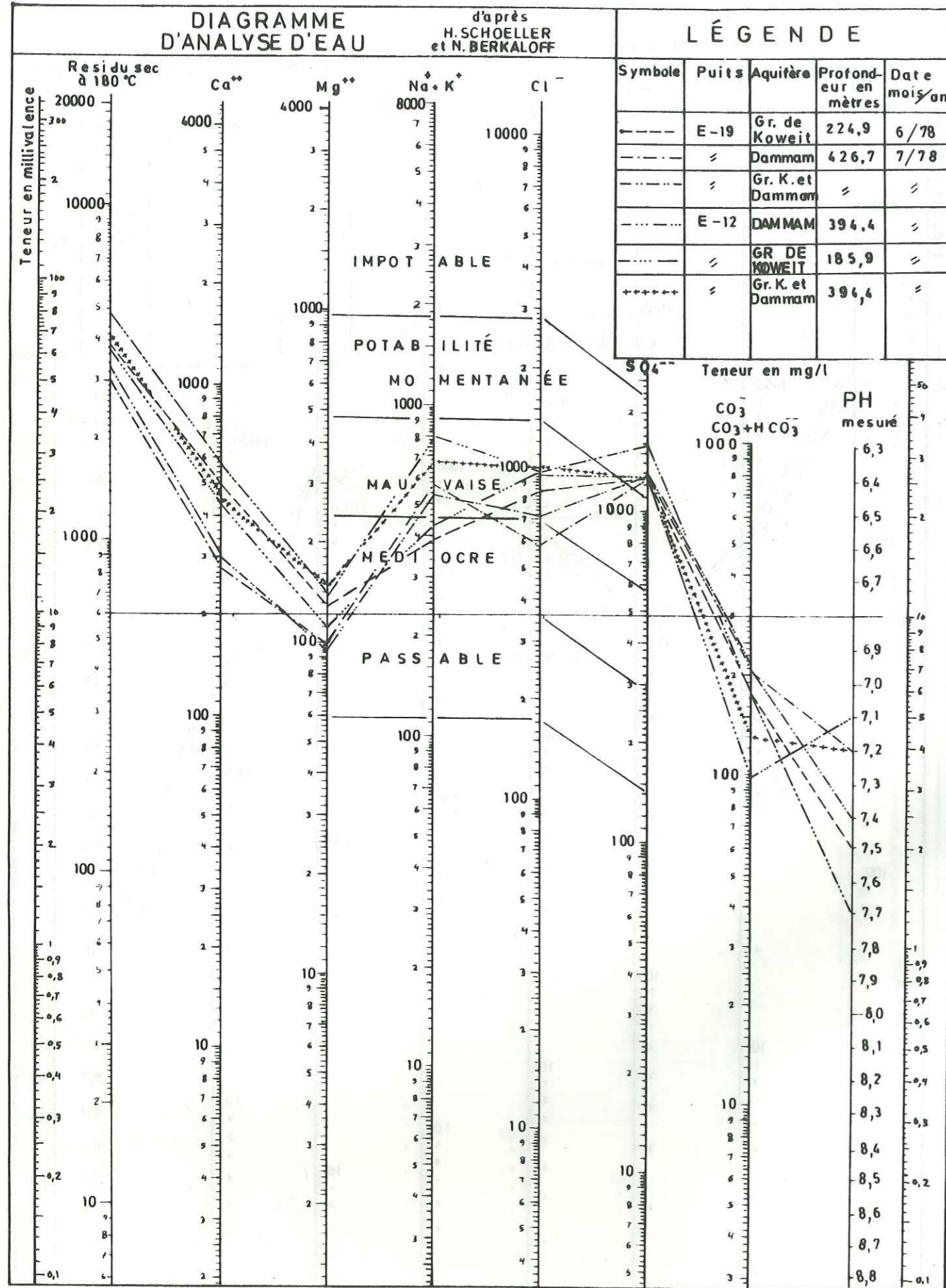
CHAMP "A"

FIG. 6-4 e



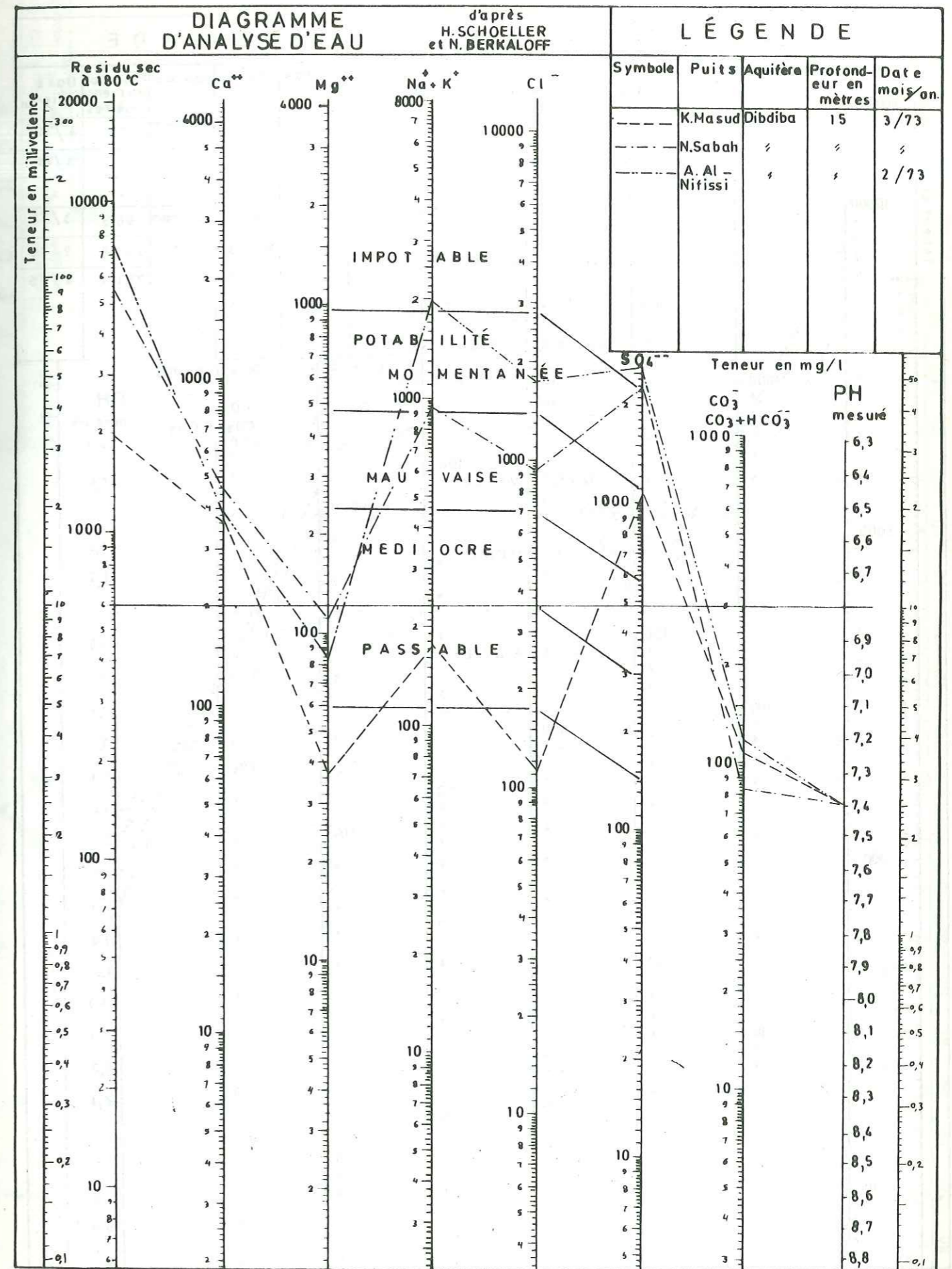
CHAMPS B, C & D

FIG. 6-4 f



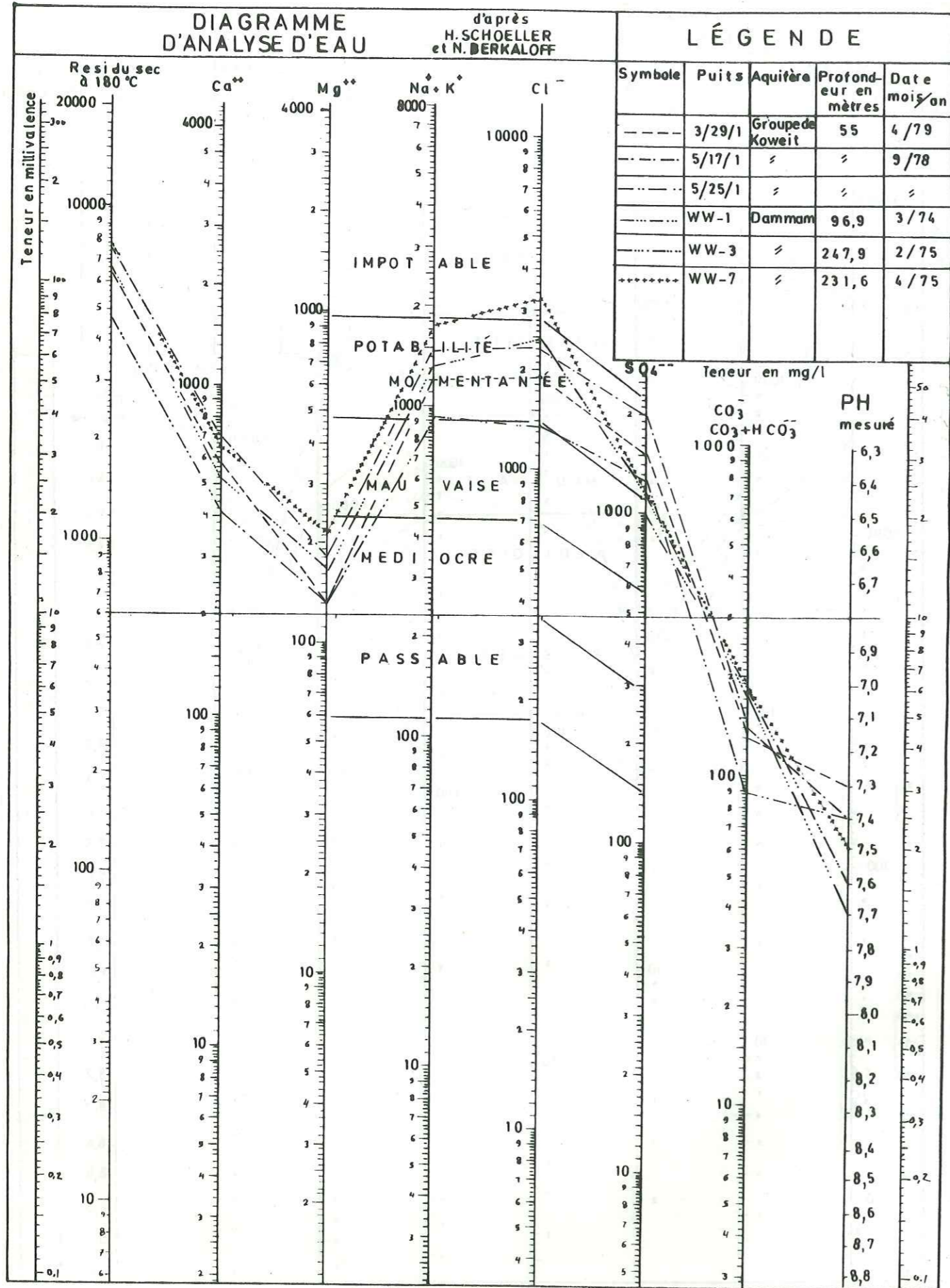
CHAMP "E"

FIG. 6-4g



REGION AGRICOLE D'AL-ABDALLY

FIG. 6-4 h



L É G E N D E

Point	Puits	Teneur en ppm	Aquifère	Profondeur en mètres	Date mois/an
1	R-1	400	DIBDIBA SUPERIEUR	56,4	5/64
2	∅	462	∅	∅	4/79
3	R-5	580	∅	73,2	5/64
4	∅	704	∅	∅	4/79
5	R-64	1085	∅	7,1	5/64
6	∅	1703	∅	∅	4/79
7	KOC-49	158686	DAMWAM	432,8	4/54

RAUDHATAIN

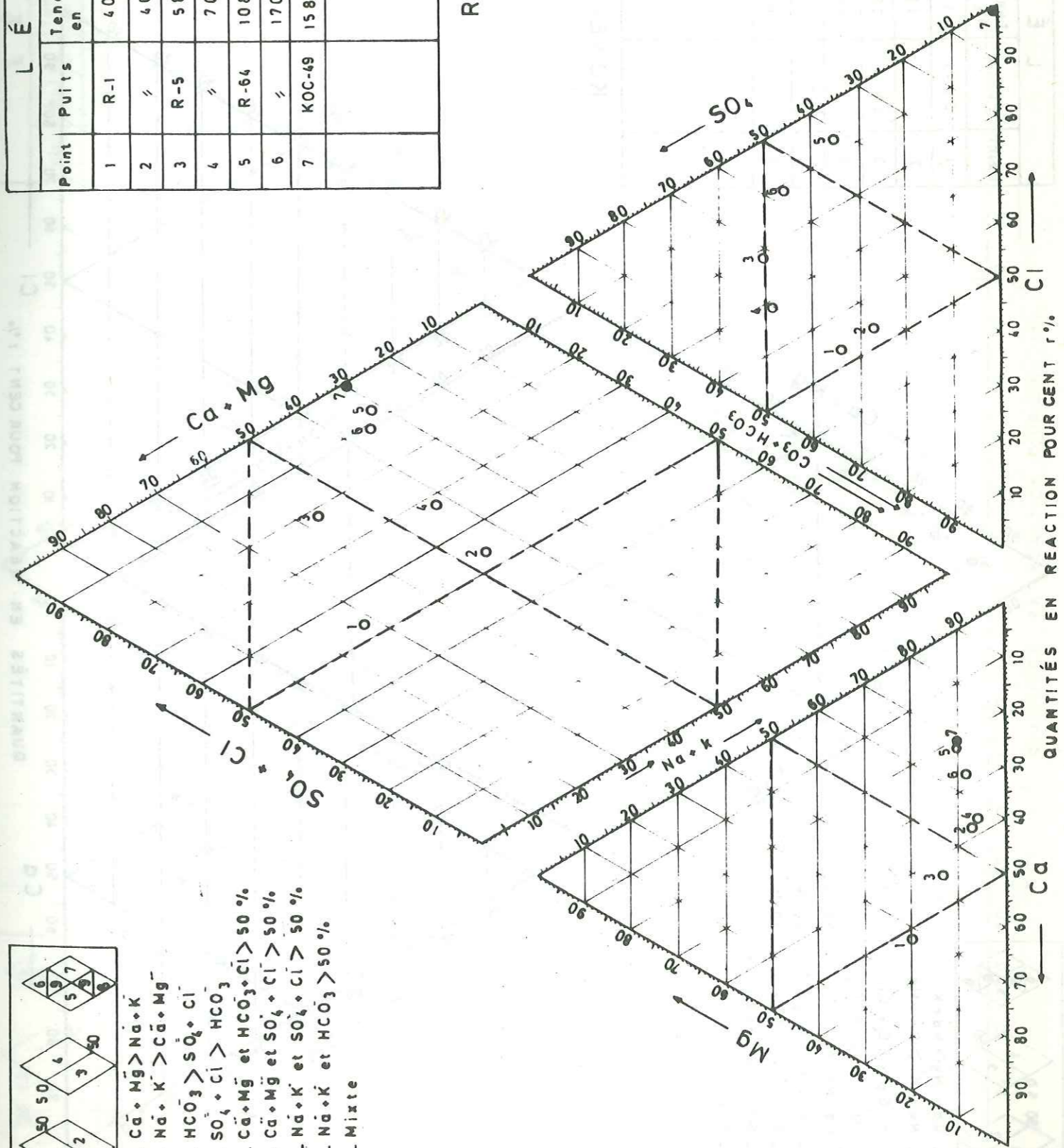
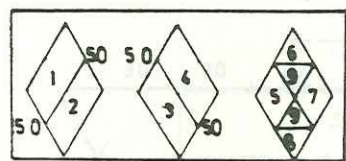


FIG. 6-5 a — Diagramme triangulaire (d'après Piper, 1953.)



1. $\text{Ca} + \text{Mg} > \text{Na} + \text{K}$
2. $\text{Na} + \text{K} > \text{Ca} + \text{Mg}$
3. $\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 + \text{Cl}$
4. $\text{SO}_4 + \text{Cl} > \text{HCO}_3$
5. $\text{Ca} + \text{Mg}$ et $\text{HCO}_3 + \text{Cl} > 50\%$
6. $\text{Ca} + \text{Mg}$ et $\text{SO}_4 + \text{Cl} > 50\%$
7. $\text{Na} + \text{K}$ et $\text{SO}_4 + \text{Cl} > 50\%$
8. $\text{Na} + \text{K}$ et $\text{HCO}_3 > 50\%$
9. Mixte

L É G E N D E					
Point	Puits	Teneur en ppm	Aquifère	Profondeur en mètres	Date mois/an
1	SW-1	3710	DAMMAM	237	12/66
2	∕	4632	UMM-AL-RADUMA	792	73
3	SW-4	2810	DAMMAM	253	8/67
4	∕	4899	UMM-AL-RADUMA	777	11/73
5	GR 1	3877	DAMMAM	381	10/75
6	∕	4109	UMM-AL-RADUMA	695	11/75

KOWEIT SUD-OUEST

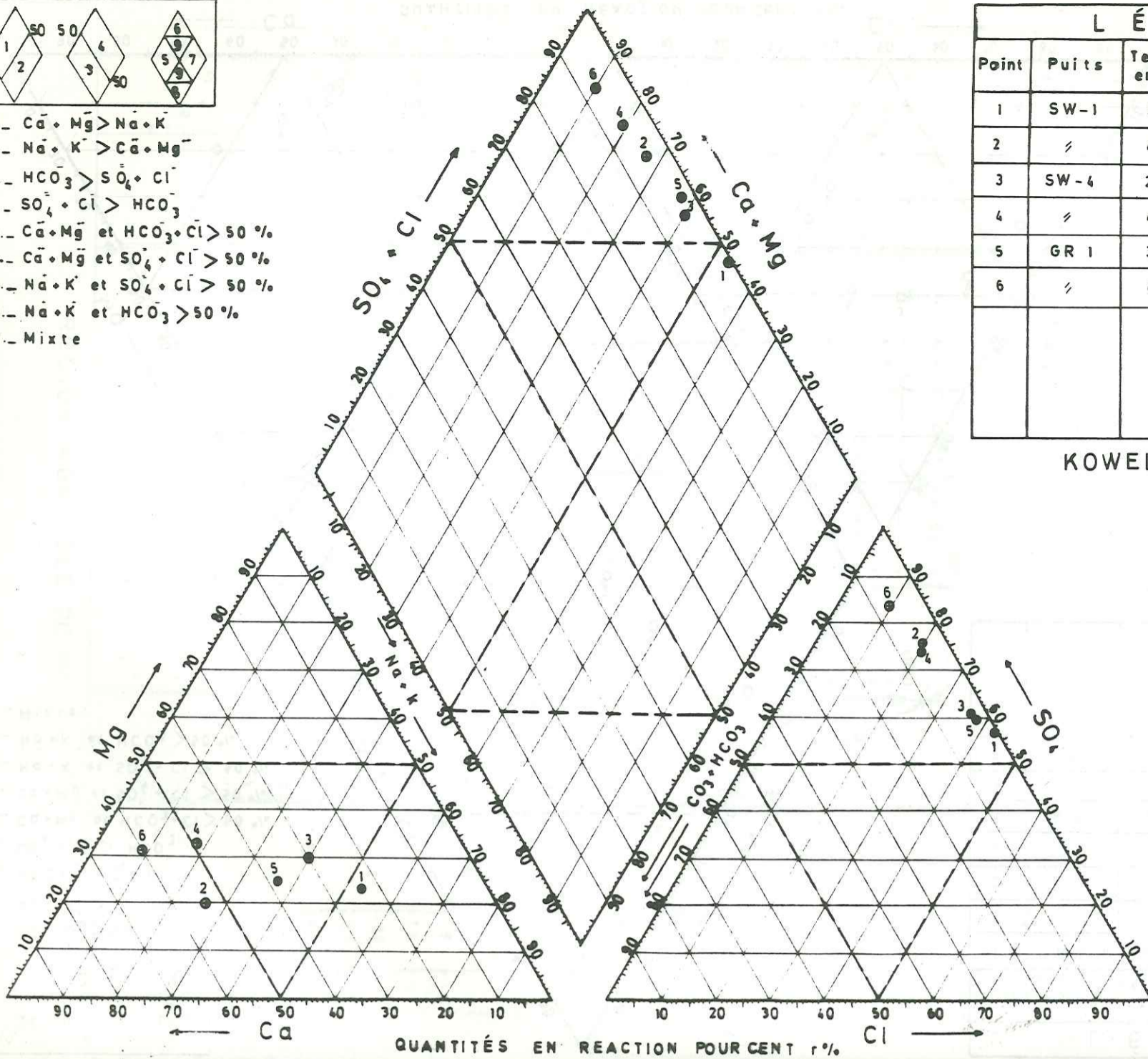
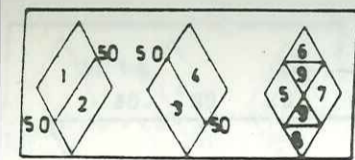


FIG. 6-5 b. —
Diagramme
triangulaire.
(d'après Piper, 1953.)

134



1. $\text{Ca} + \text{Mg} > \text{Na} + \text{K}$
2. $\text{Na} + \text{K} > \text{Ca} + \text{Mg}$
3. $\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 + \text{Cl}$
4. $\text{SO}_4 + \text{Cl} > \text{HCO}_3$
5. $\text{Ca} + \text{Mg}$ et $\text{HCO}_3 + \text{Cl} > 50\%$
6. $\text{Ca} + \text{Mg}$ et $\text{SO}_4 + \text{Cl} > 50\%$
7. $\text{Na} + \text{K}$ et $\text{SO}_4 + \text{Cl} > 50\%$
8. $\text{Na} + \text{K}$ et $\text{HCO}_3 > 50\%$
9. Mixte

L É G E N D E					
Point	Puits	Teneur en ppm	Aquifère	Profondeur en mètres	Date mois/an
1	SU-14	4155	DAMMAM	283,5	5/74
2	∕	5100	∕	∕	1/79
3	SU-64	6197	∕	178,9	12/75
4	∕	7445	∕	∕	5/79
5	SU 128	4420	∕	320	12/75
6	∕	4691	∕	∕	5/79
7	KOC 40	4400	∕	168,2	5/78
8	KOC 89	3375	∕	167,6	∕

SULAIBIYA ET ABDALLIYA

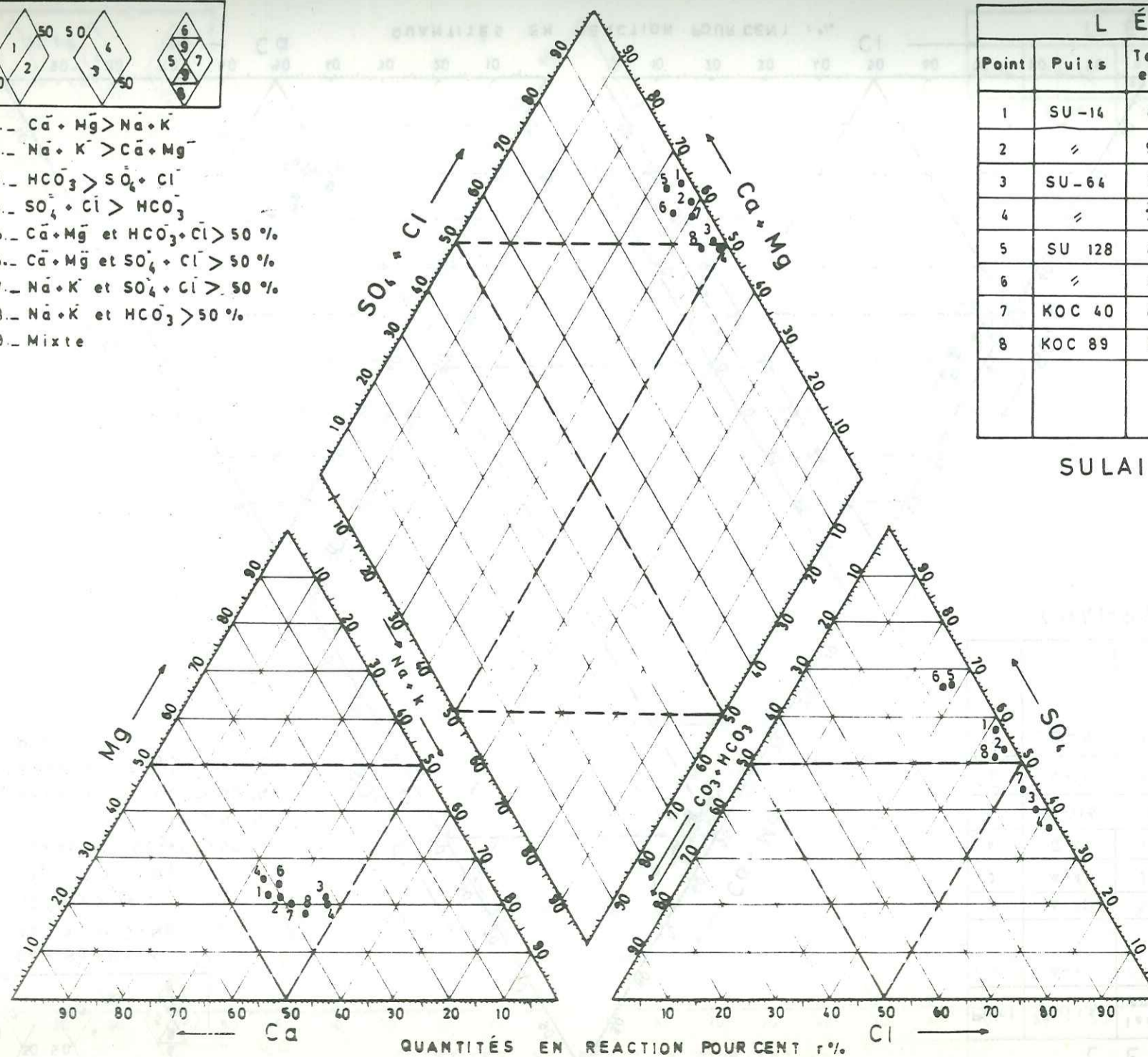
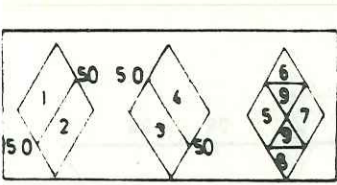
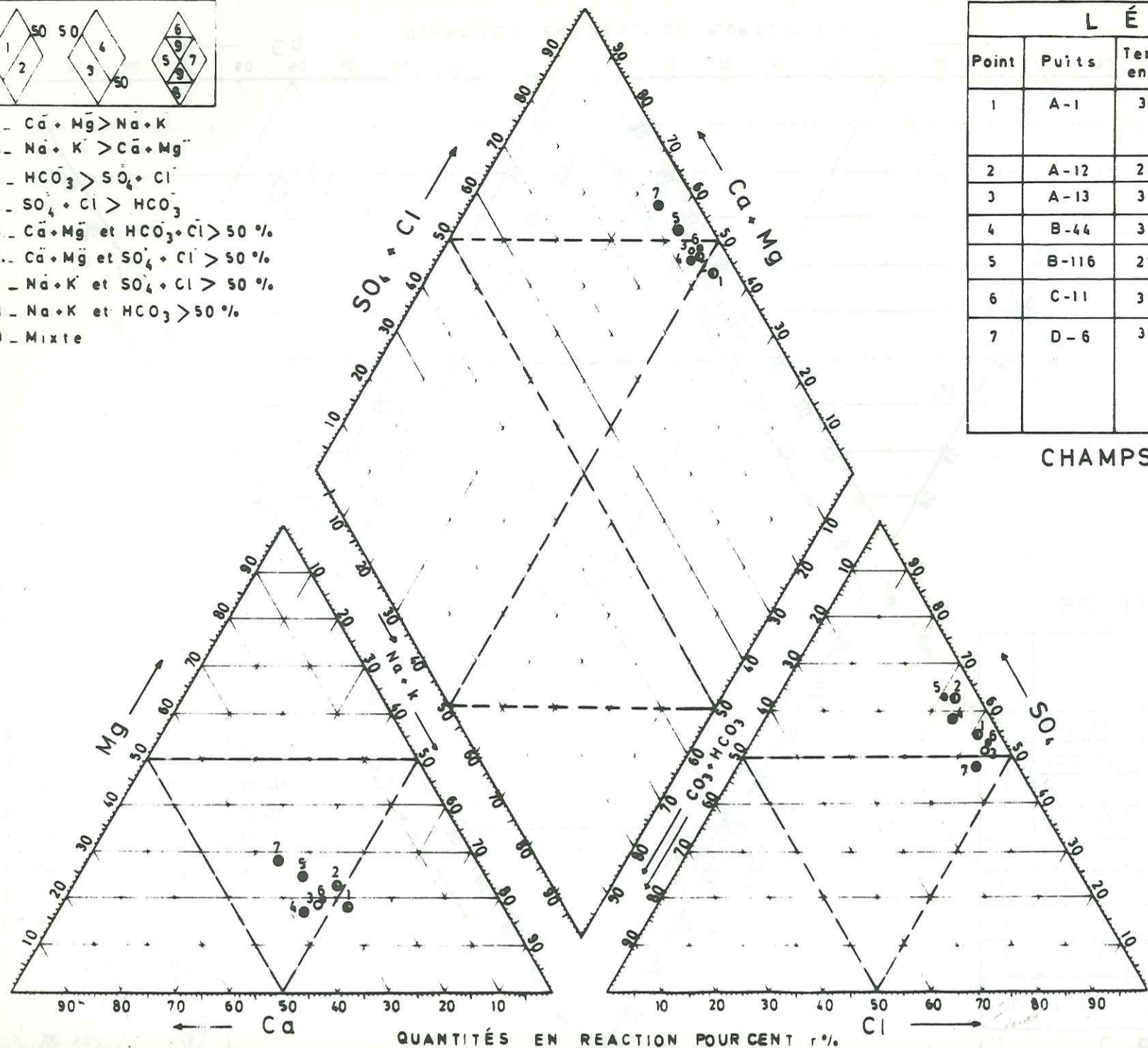


FIG. 6-5 c. —
Diagramme
triangulaire.
(d'après Piper, 1953.)

135



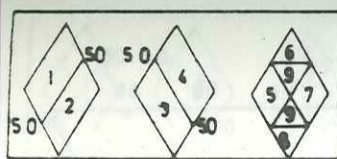
1. $Ca + Mg > Na + K$
2. $Na + K > Ca + Mg$
3. $HCO_3 > SO_4 + Cl$
4. $SO_4 + Cl > HCO_3$
5. $Ca + Mg$ et $HCO_3 + Cl > 50\%$
6. $Ca + Mg$ et $SO_4 + Cl > 50\%$
7. $Na + K$ et $SO_4 + Cl > 50\%$
8. $Na + K$ et $HCO_3 > 50\%$
9. Mixte



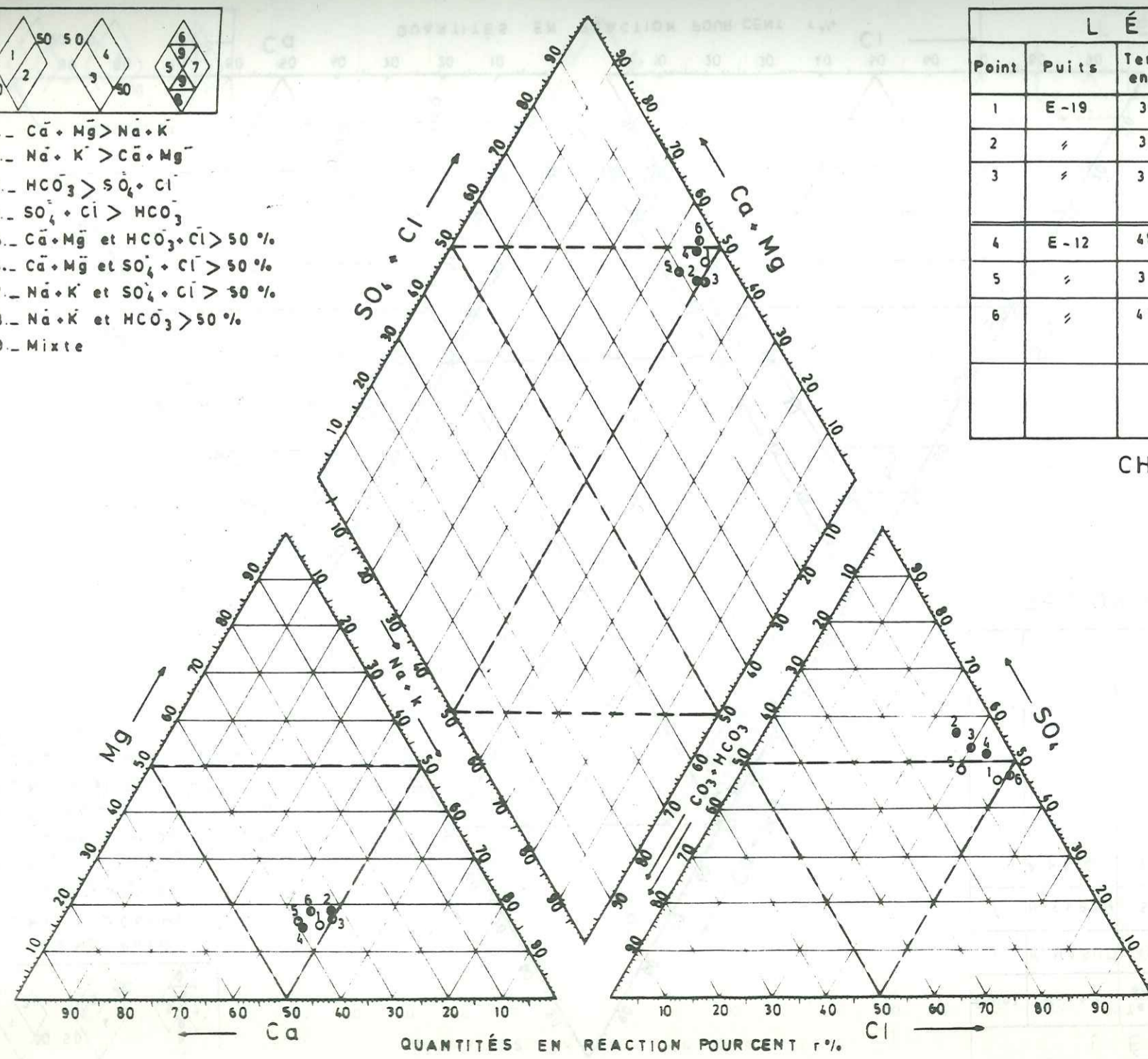
L É G E N D E					
Point	Puits	Teneur en ppm	Aquifère	Profondeur en mètres	Date mois/an
1	A-1	3305	GRUPE DE KOWEIT & FORMATION DE DAMMAM	350,5	8/79
2	A-12	2870	∕	368,8	5/79
3	A-13	3342	GRUPE DE KOWEIT	187,4	∕
4	B-44	3297	DAMMAM	377,9	5/79
5	B-116	2885	∕	323,7	∕
6	C-11	3610	∕	368,8	∕
7	D-6	3500	∕	426,7	7/77

CHAMPS A, B, C & D

FIG. 6-5 d —
Diagramme triangulaire.
(d'après Piper, 1953)



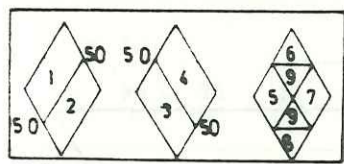
1. $Ca + Mg > Na + K$
2. $Na + K > Ca + Mg$
3. $HCO_3 > SO_4 + Cl$
4. $SO_4 + Cl > HCO_3$
5. $Ca + Mg$ et $HCO_3 + Cl > 50\%$
6. $Ca + Mg$ et $SO_4 + Cl > 50\%$
7. $Na + K$ et $SO_4 + Cl > 50\%$
8. $Na + K$ et $HCO_3 > 50\%$
9. Mixte



L É G E N D E					
Point	Puits	Teneur en ppm	Aquifère	Profondeur en mètres	Date mois/an
1	E-19	3825	GRUPE DE KOWEIT	224,9	6/78
2	∕	3000	DAMMAM	426,7	7/78
3	∕	3325	GRUPE DE KOWEIT & FORMATION DE DAMMAM	∕	∕
4	E-12	4808	DAMMAM	394,4	∕
5	∕	3680	GRUPE DE KOWEIT	185,9	∕
6	∕	4184	GRUPE DE KOWEIT & FORMATION DE DAMMAM	394,4	∕

CHAMP "E"

FIG. 6-5 e —
Diagramme triangulaire.
(d'après Piper, 1953)



1. $\text{Ca} + \text{Mg} > \text{Na} + \text{K}$
2. $\text{Na} + \text{K} > \text{Ca} + \text{Mg}$
3. $\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 + \text{Cl}$
4. $\text{SO}_4 + \text{Cl} > \text{HCO}_3$
5. $\text{Ca} + \text{Mg}$ et $\text{HCO}_3 + \text{Cl} > 50\%$
6. $\text{Ca} + \text{Mg}$ et $\text{SO}_4 + \text{Cl} > 50\%$
7. $\text{Na} + \text{K}$ et $\text{SO}_4 + \text{Cl} > 50\%$
8. $\text{Na} + \text{K}$ et $\text{HCO}_3 > 50\%$
9. Mixte

L É G E N D E					
Point	Puits	Teneur en ppm	Aquifère	Profondeur en mètres	Date mois/an
1	K. MASUD	1943	DIBDIBA SUPERIEUR	15	3/73
2	N. SABAH	5244	∕	∕	∕
3	A NIFISI	7400	∕	∕	2/73

REGION AGRICOLE D'AL-ABDALLY

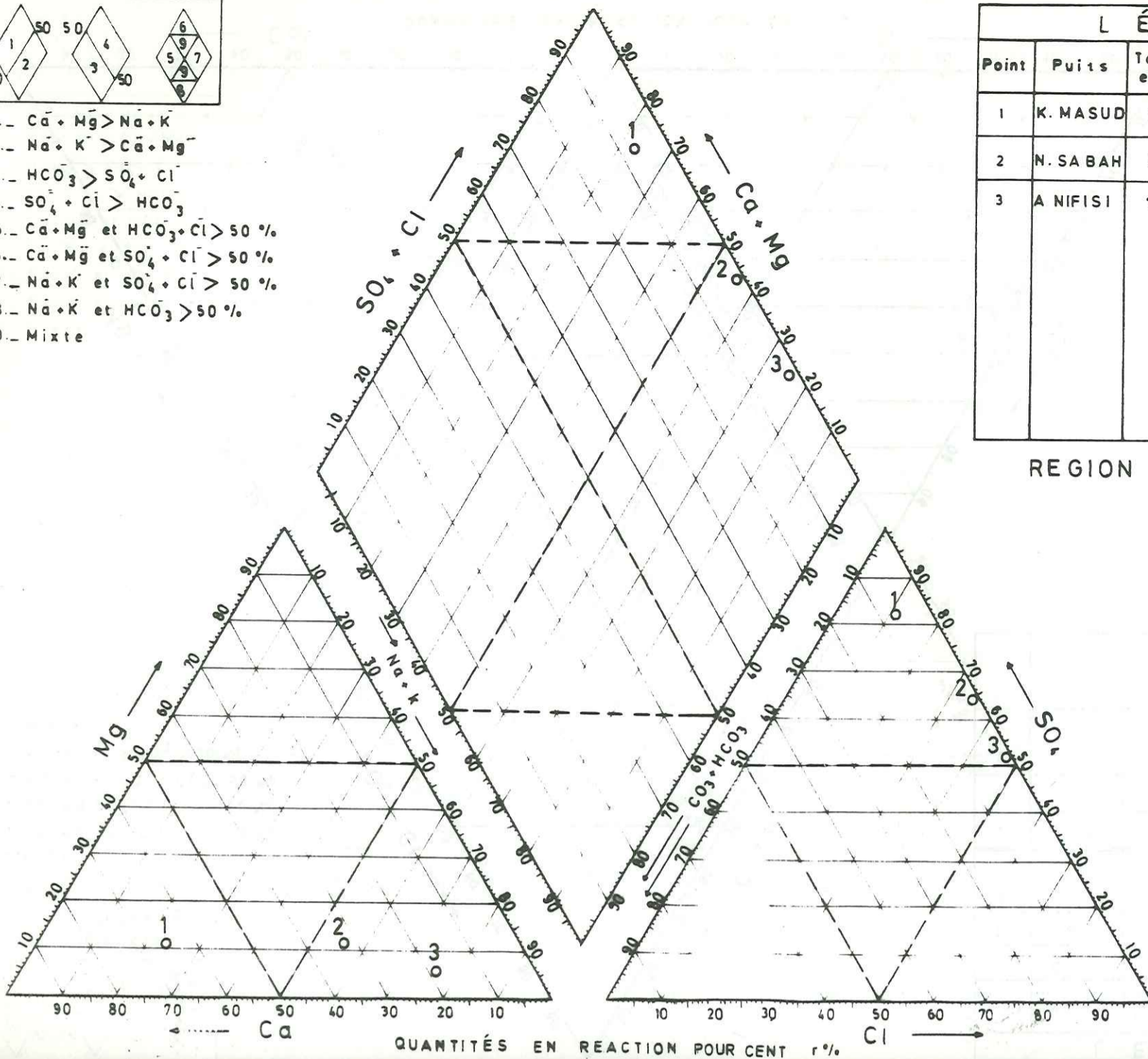
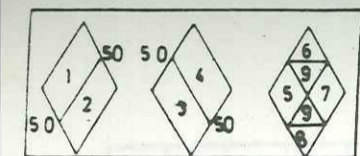


FIG. 6-5f —
Diagramme triangulaire.
(d'après Piper, 1953.)



1. $\text{Ca} + \text{Mg} > \text{Na} + \text{K}$
2. $\text{Na} + \text{K} > \text{Ca} + \text{Mg}$
3. $\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 + \text{Cl}$
4. $\text{SO}_4 + \text{Cl} > \text{HCO}_3$
5. $\text{Ca} + \text{Mg}$ et $\text{HCO}_3 + \text{Cl} > 50\%$
6. $\text{Ca} + \text{Mg}$ et $\text{SO}_4 + \text{Cl} > 50\%$
7. $\text{Na} + \text{K}$ et $\text{SO}_4 + \text{Cl} > 50\%$
8. $\text{Na} + \text{K}$ et $\text{HCO}_3 > 50\%$
9. Mixte

L É G E N D E					
Point	Puits	Teneur en ppm	Aquifère	Profondeur en mètres	Date mois/an
1	3/29/1	6388	GRUPE DE KOWEIT	55	4/79
2	5/17/1	7470	∕	∕	9/78
3	5/25/1	4670	∕	∕	∕
4	WW-1	5860	DAMMAM	96,9	3/74
5	WW-3	6661	∕	247,9	2/75
6	WW-7	7778	∕	231,6	4/75

REGION AGRICOLE DE WAFRA

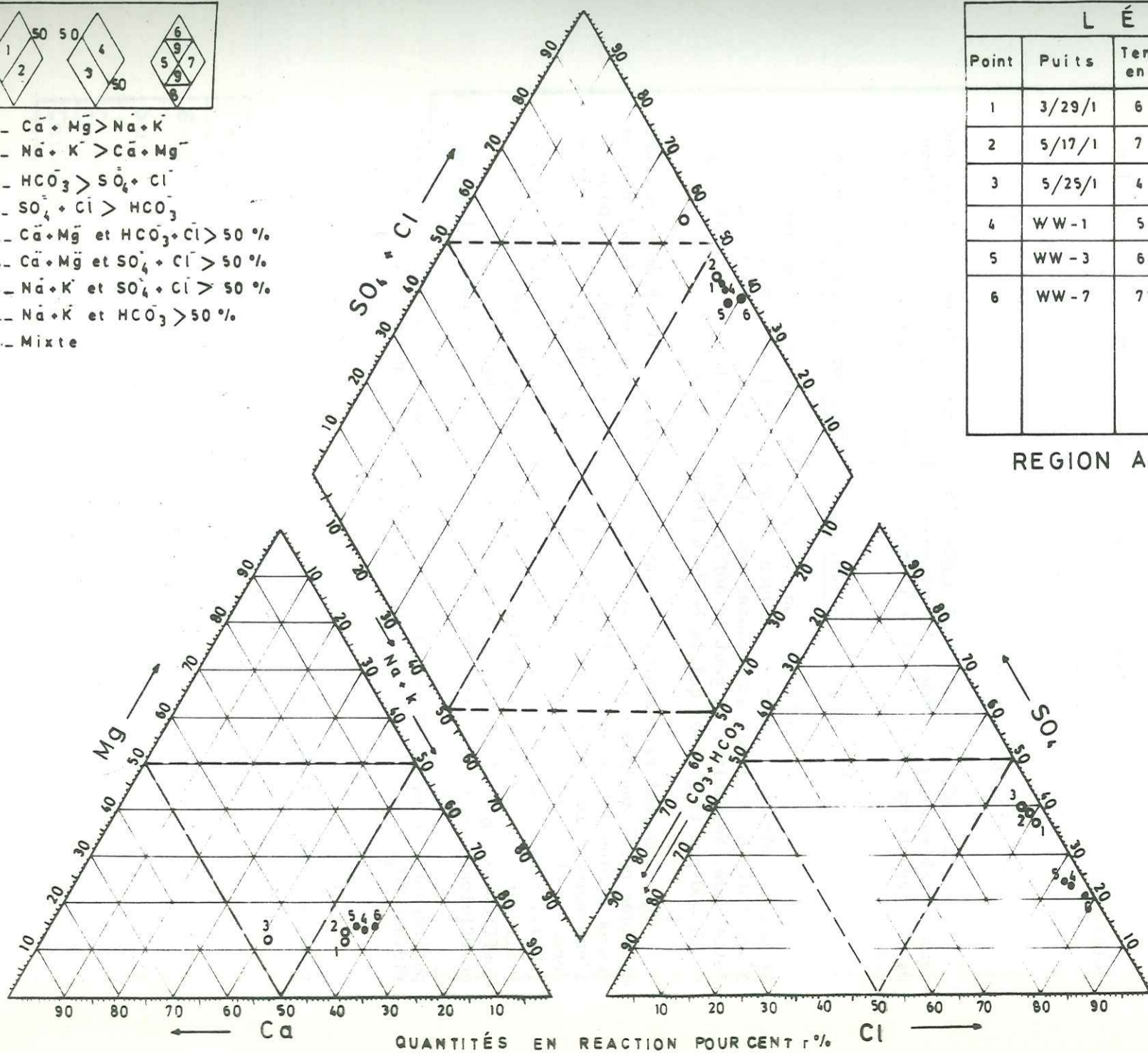
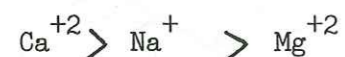
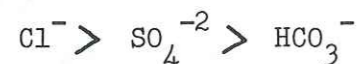


FIG. 6-5g —
Diagramme triangulaire.
(d'après Piper, 1953.)

6.1.3.2. ZONE DES EAUX SOUTERRAINES DU TYPE CHLORURE MAGNESIEN

Ce type chimique d'eau caractérise l'eau récente marine ainsi que l'eau souterraine considérablement influencée par l'eau marine récente. On peut distinguer de petites aires qui correspondent à cette zone dans les secteurs orientaux de l'aire de Shigaya-Sulaibiya (Fig. 6-6).

Les eaux souterraines de cette zone sont caractérisées par les relations ioniques:



La gamme des valeurs des coefficients hydrochimiques est montrée dans le tableau 6-2. Evidemment, ces valeurs là indiquent l'effet de l'eau marine récente sur la composition chimique des eaux souterraines de cette zone.

6.1.3.3. ZONE DES EAUX SOUTERRAINES CHLORUREES CALCIQUES

Dans cette zone on rencontre des eaux marines anciennes et transformées par échanges ioniques. Malheureusement, les données disponibles ne sont pas suffisantes pour établir la limite exacte de cette zone. Néanmoins, on peut la définir par la courbe d'isosalinité de 50 000 ppm (Fig. 6-6) qui la borde à l'Ouest.

On peut représenter les caractères chimiques de la zone chlorurée calcique par l'analyse chimique de l'eau souterraine du puits WW-49 dont la concentration totale en sels dissous est de 158 686 ppm qui correspond à l'ensemble de la Formation de Damman. La plupart des anions se trouve sous forme de chlorures (2 763,234 épm). La concentration en SO_4^{-2} est petite (24,171 épm) cependant qu'il n'y a que des traces de CO_3^{-2} (1,316 épm). D'ailleurs, la relation cationique est $\text{Na} > \text{Ca} > \text{Mg}$. Les valeurs des coefficients hydrochimiques sont présentées dans le tableau 6-2. Le coefficient $\frac{r_{\text{Ca}}}{r_{\text{Mg}}}$ est de 1.98 et indique la prédominance du calcium

par rapport au magnésium par suite de l'échange ionique. La valeur du coefficient $\frac{\text{SO}_4^{-2}}{\text{Cl}^-}$ est basse (0,01) par suite, vraisemblablement, de la

Cl^-

réduction de l'ion sulfate.

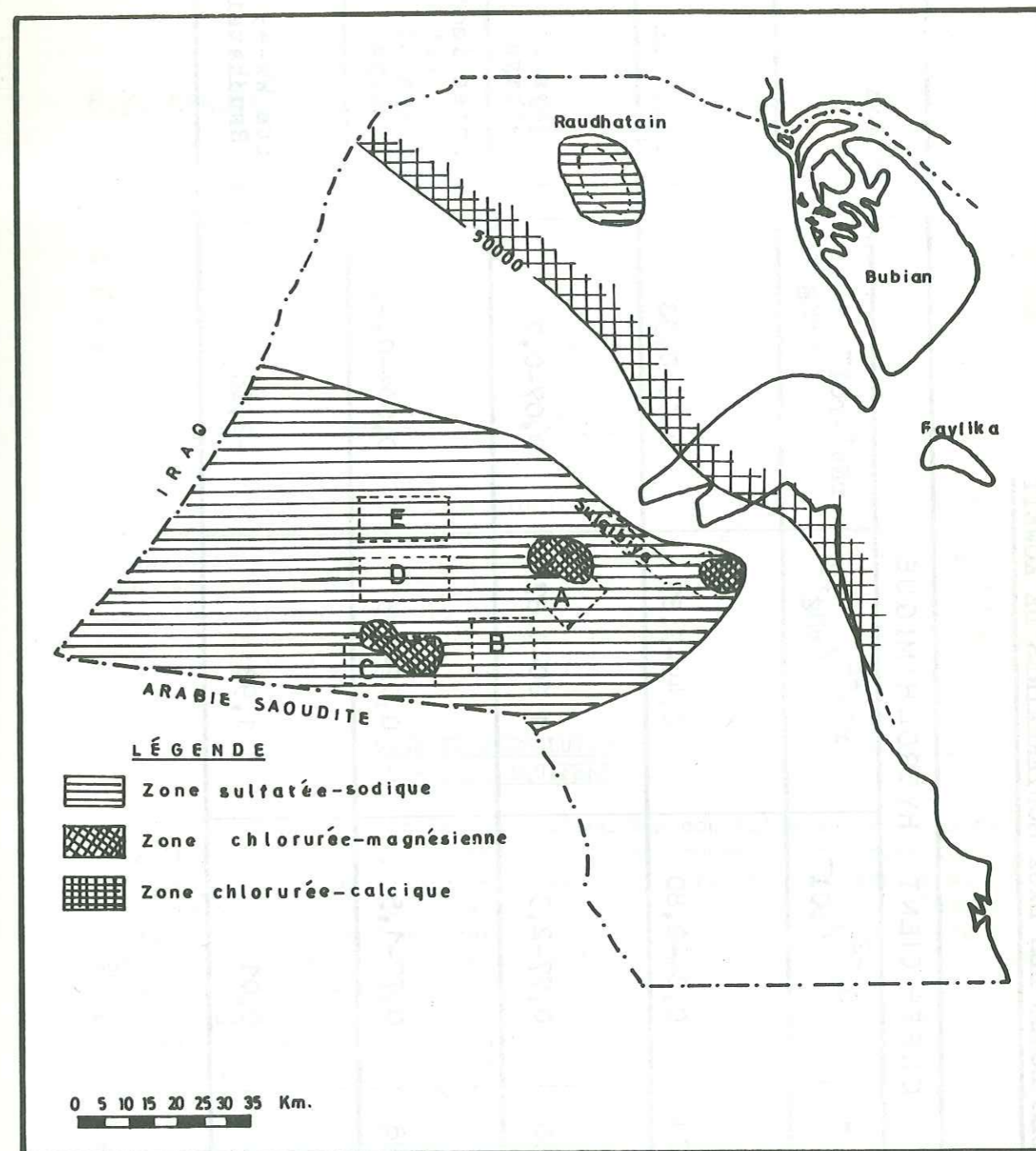


FIG. 6-6.- Zones chimiques des eaux souterraines selon la classification de Sulin (d'après Hamida et Al-Yaqubi, 1977).

TABLEAU 6-1

COEFFICIENTS CARACTERISANT LES TYPES GENETIQUES DES EAUX

Type de l'eau	Na^+/Cl^-	$\text{Na}^+ - \text{Cl}^- / \text{SO}_4^{-2}$	$\text{Cl}^- - \text{Na}^+ / \text{Mg}^{+2}$
Bicarbonaté-sodique	>1	>1	< 0
Sulfaté-sodique	>1	<1	< 0
Chloruré-magnésien	<1	<1	< 0
Chloruré-calcique	<1	<0	> 1

GAMME DES VALEURS DES COEFFICIENTS HYDROCHIMIQUES DE
QUELQUES ZONES DES EAUX SOUTERRAINES DE KOWEIT

Type chimique de l'eau	COEFFICIENT HYDROCHIMIQUE				Region
	rNa^+ / rCl^-	rSO_4^{-2} / rCl^-	rCa^{+2} / rMg^{+2}	$rNa^+ - rCl^- / rMg^{+2}$	
Sulfaté-sodique	1,22-3,20	0,84-2,80	2,49-7,67	0,15-0,98	Raudhatain
Sulfaté-sodique	0,8 -1,56	0,77-2,3	1,00-1,67	0,07-0,7	Shigaya et Sulaibiya
Chloruré-magnésien	0,79-0,98	0,77-1,5	0,72-1,3	0,004-0,49	Parties isol- ee a l'est de Shigaya et Sulaibiya
Chloruré-calcique	0,71	0,01	1,98	-2,88	Puits WW-49 au Raudhatain

6.2. GENÈSE DE LA MINÉRALISATION ET FACTEURS DE L'ENVIRONNEMENT
CONTROLANTS LE RÉGIME CHIMIQUE

Par suite de la répartition des zones hydrogéochimiques différentes, il est évident que les nappes aquifères du Groupe de Koweit et la Formation calcaire de Dammam contiennent des eaux souterraines d'origines différentes allant de l'eau presque purement météorique dans les régions ouest, de Koweit aux eaux marines anciennes ou fossiles dans le Nord Est.

6.2.1. CONDITIONS CLIMATOLOGIQUES

Les conditions climatologiques, en particulier, la pluie annuelle et l'évaporation contrôlent généralement, le régime hydrogéochimique des accumulations peu profondes d'eaux souterraines ce qui entraîne une variation saisonnière de la composition chimique de l'eau souterraine. Aucune variation chimique sensible n'a par contre été constatée dans les eaux souterraines des nappes aquifères de la Formation de Dammam et du Groupe de Koweit (HAMIDA et AL YAGHOUBI 1977).

6.2.2. LESSIVAGE ET DISSOLUTION DES CONSTITUANTS SOLUBLES
DANS LE MILIEU AQUIFERE

Le lessivage et la dissolution des constituants solubles dans le milieu aquifère sont, généralement, des processus principaux qui sont responsables de la minéralisation primaire des eaux souterraines. La salinité des eaux souterraines de la Formation calcaire de Dammam et du Groupe de Koweit augmente progressivement, du Sud Ouest vers le Nord Est selon le sens d'écoulement des eaux souterraines. Cette augmentation de la salinité est principalement due au lessivage progressif du milieu aquifère et à la dissolution des constituants solubles par l'eau s'écoulant à travers les couches aquifères. La dissolution de quantités abondantes de gypse et d'anhydrite qui se trouvent disséminés dans le Groupe de Koweit, la Formation de Dammam et les évaporites de la Formation sous-jacente de Rus est le processus principal qui contrôle le type chimique de presque toutes les eaux souterraines au Koweit.

6.2.3. ACTION RECIPROQUE ENTRE LES EAUX METEORIQUES DOUCES
ET LES EAUX MARINES RECENTES ET ANCIENNES

L'interaction entre l'eau continentale météorique et l'eau marine récente ou ancienne peut généralement intervenir pendant les phases de transgression et régression de la mer. Pendant la phase de transgression les couches aquifères d'eau souterraine douce peuvent être contaminées par l'eau marine salée. Par ailleurs, la phase de régression est toujours caractérisée par le lessivage actif des couches aquifères et le remplacement de l'eau marine salée par l'eau météorique douce.

Dans les couches aquifères du Groupe de Koweit et de la Formation de Dammam, les parties qui contiennent des eaux souterraines douces et saumâtres représentent la zone dans laquelle l'eau marine originelle a été remplacée complètement par l'eau souterraine météorique à la suite de l'infiltration.

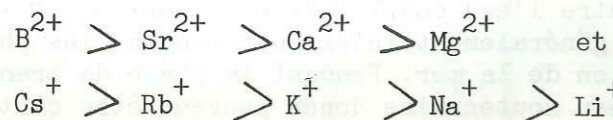
Dans le Nord - Nord-Est et l'Est de cette zone là, il se trouve une zone d'eaux souterraines qui s'échelonnent entre les eaux saumâtres d'une part et les eaux salées d'autre part, ce qu'indique l'interaction entre les eaux météoriques et marines. Cette zone représente l'étape la moins développée dans le processus de remplacement de l'eau de mer par l'eau douce d'infiltration. Plus loin vers la mer, il y a une zone d'eaux souterraines et de saumures très salées dont la composition chimique n'est pas influencée par l'infiltration d'eau météorique.

6.2.4. LE ROLE DES ARGILES ET DES ECHANGES DE BASES ENTRE L'EAU SOUTERRAINE ET LE MILIEU AQUIFERE

Bien que ce processus ne puisse pas expliquer la minéralisation primaire des eaux souterraines, il peut conduire à sa transformation. Sous ce rapport, on ne peut expliquer l'existence de CaCl_2 dans les zones d'eaux souterraines très salées et saumures que par l'échange ionique entre les ions sodium des eaux marines anciennes et les ions calcium du milieu aquifère. Egalement, on peut expliquer l'existence de sels tels que NaHCO_3 , Na_2SO_4 et MgCl_2 dans quelques types d'eaux souterraines par l'échange entre les ions sodium et l'ensemble du calcium et du magnésium.

Les schistes et les argiles, à cause de leur porosité élevée, contiennent de grandes quantités d'eau. La plupart des schistes sont d'origine marine. Néanmoins, par suite de leur faible perméabilité, l'eau originelle ne quitte vraisemblablement la formation que lentement. Dès que l'eau de l'aquifère adjacent a une composition chimique différente (souvent de l'eau douce), la diffusion amène un changement graduel de la composition de l'eau qui reste dans le schiste. Evidemment, ces processus augmentent la concentration totale en sels dissous dans l'aquifère adjacent, ce qui se fait très lentement au cours des temps géologiques et influencent donc la chimie de l'eau de l'aquifère.

Tous les minéraux argileux ont la capacité de participer au phénomène d'échanges ioniques qui se produit le plus souvent à partir d'une solution dont les ions sont adsorbés sur un solide. Cette capacité est particulièrement élevée dans les argiles parce que leurs particules ont une grande superficie par unité de volume ainsi qu'une forte charge électrique négative. Les argiles ont une préférence sélective pour certains ions. L'ordre de préférence pour la plupart des argiles est selon KELLY W.P. 1948 et GRIM R.G. 1953:



Les cations bivalents étant préférés aux cations monovalents. Le résultat de cette préférence de cations bivalents par les minéraux argileux est l'adoucissement naturel de l'eau par l'échange ionique. Néanmoins, si les ions monovalents sont en grande abondance, ils tendent à déplacer

les ions bivalents. En effet, l'action d'échange est réversible. Par exemple, le calcium, normalement, sera retenu plus fortement que le sodium, mais si une solution de forte concentration en ions sodium, telle que l'eau de mer passe à travers une substance contenant du calcium adsorbé, le sodium tend à déplacer le calcium.

Dans les eaux souterraines de Koweit, nous constatons une diminution de concentration en calcium et une augmentation de concentration en sodium à l'aval des nappes, c'est à dire vers l'Est et le Nord-Est, en s'éloignant des zones d'alimentation qui se trouvent à l'Ouest et au Sud-Ouest. Par exemple, le rapport Na/Ca dans les eaux de la Formation de Dammam dans la région de Koweit sud-ouest est de 1 à 2,5 tandis que vers le Koweit nord-est, ce rapport augmente progressivement jusqu'à 40 (puits KOC-49 au Raudhatain).

Malheureusement, nous ne disposons pas de données nécessaires pour établir la liaison entre l'échange ionique et le temps de séjour. Néanmoins la diminution de la perméabilité vers le Nord-Est ainsi que le parcours plus long de l'eau souterraine donne lieu à un temps de séjour très long, et on constate une augmentation du rapport Na/Ca qu'on attribue partiellement au phénomène d'échange de base.

Un autre phénomène relié à la présence d'argiles et de schistes est le phénomène de membrane. Selon BASK W. et HAUSHAW B.B. 1965, des recherches récentes indiquent que les argiles compactées peuvent fonctionner comme des membranes semi-perméables. La membrane semi-perméable est définie comme un milieu qui restreint ou empêche le passage des espèces chargées tandis qu'elle permet l'écoulement, relativement facile des espèces neutres ce qui aboutit à une ultrafiltration par ces membranes et au développement de pressions osmotiques ainsi que de différences de potentiel électrique de part et d'autre des membranes. L'ultrafiltration se fait quand une solution d'électrolyte s'écoule à travers une membrane semi-perméable. En effet, l'effluent devient moins concentré que la solution originelle. Le mouvement de l'eau à travers une membrane semi-perméable, en l'absence de différence de pression appliquée de l'extérieur, peut provenir de l'existence de concentrations différentes en sels sur les faces opposées de la membrane (osmose chimique), de l'existence d'un potentiel électrique à travers la membrane (osmose électrique), ou, vraisemblablement de l'existence de niveaux différents d'énergie chimique de chaque côté de la membrane (osmose thermique). Les différences de pression peuvent être produites à travers la membrane par n'importe quel phénomène ou par l'ensemble des phénomènes mentionnés ci-dessus. La pression que l'on doit appliquer sur la face la plus salée de la membrane pour qu'on obtienne un transfert équilibré de l'eau à travers la membrane est appelée pression osmotique.

Si la pression appliquée du côté plus salée de la membrane excède la pression osmotique, l'eau la plus salée devient encore plus salée par suite de l'infiltration de sels ou d'ultrafiltration.

Plusieurs chercheurs ont suggéré d'après des investigations expérimentales au Laboratoire sur les argiles compactées, que l'ultrafiltration par les membranes d'argile et de schistes peut expliquer la formation des saumures dont la teneur en sels excède beaucoup celle de l'eau de mer (MICKELVEY et MILNE, 1960, HANSHAW B.B. 1962).

Du point de vue géologique, les caractères de membranes des schistes ont été étudiés largement par BERRY et HANSHAW 1960; géologiquement, les anomalies de pression et de salinité reliées au phénomène de membrane sont constatables dans les roches à faible transmissivité ou dans les unités dont la transmissivité est moyenne mais qui sont entourées par des unités à faible transmissivité.

En utilisant des hypothèses sur le phénomène de membrane présentées ci-dessus dans le cadre des conditions de circulation de l'eau souterraine au Koweit nord-est où la transmissivité est très basse et les argiles abondantes, on peut expliquer l'existence de saumures très salées dans la Formation de Dammam (teneurs de plus de 200 000 ppm) et la diminution relative de la salinité vers le haut dans le Groupe de Koweit sus-jacent par le phénomène de membrane (voir la figure 5-3). Pour avoir transfert d'eau vers le haut et simultanément ultrafiltration à travers les argiles, on doit avoir une pression élevée dans la Formation de Dammam par rapport à celle du Groupe de Koweit. Malheureusement, il n'y a pas beaucoup de données pour établir les relations de charges entre ces deux unités lithologiques. La plupart des mesures du niveau de l'eau dans le Groupe de Koweit ne concernent que 60 m environ de la partie supérieure de ce groupe dans cette région. La teneur en sels dans cette partie limitée est de 5 000 à 10 000 ppm. Les données sur les parties plus profondes sont rares. Si l'on compare les niveaux piézométriques de la Formation de Dammam et du Groupe de Koweit (Fig. 7-1 et 7-2) on constate que le niveau mesuré dans la partie supérieure du Groupe de Koweit est plus élevé que celui de la Formation de Dammam. Généralement, l'eau de l'ensemble du Groupe de Koweit est moins salée que celle de la Formation de Dammam car la salinité augmente avec la profondeur comme l'indique le puits K-49 de Dammam et le puits K-54 du Groupe de Koweit.

Pour le moment, il n'y a pas les données exactes sur la salinité, la piézométrie et les profondeurs des couches différentes dans un seul site pour qu'on puisse calculer les charges hydrauliques de façon satisfaisante dans la région de Koweit nord-est. Néanmoins, selon les données disponibles et par extrapolation, on peut avoir l'exemple suivant:

- . Teneur en sels de l'eau du Groupe de Koweit : 128 500 ppm
- . Teneur en sels de la Formation de Dammam : 153 000 ppm
- . Niveau de l'eau du Groupe de Koweit: 4,61 m au dessus de la mer
- . Niveau piézométrique de la Formation de Dammam: 0
- . Altitude du toit de la Formation de Dammam: 250,23 m.

Au paragraphe 7.6., nous présenterons une méthode pour calculer les charges hydrauliques véritables en utilisant les données présentées ci-dessus. A partir du tableau 7-12 nous avons les poids spécifiques suivants qui correspondent aux teneurs en sels dissous

$$P. \text{ sp. Gr.K.} = 1,116$$

$$P. \text{ sp. Dammam} = 1,146$$

En effet, la pression exercée par la colonne d'eau du Groupe de Koweit sur le toit de la Formation de Dammam, estimée comme une hauteur d'eau douce est de

$$(4.61 \text{ m} + 250.33 \text{ m}) 1.116 = 284.4 \text{ m}$$

La pression de la Formation de Dammam est capable de supporter une colonne d'eau douce, au-dessus de son toit, d'une hauteur de

$$250.33 \times 1.146 = 286.76 \text{ m}$$

Il y a donc une différence de 2.36 m de charge hydraulique entre la Formation de Dammam et le Groupe de Koweit au site considéré, qui favorise la fuite de l'eau vers le haut, de la première vers le second, bien que les valeurs mesurées des niveaux de l'eau non corrigés laissent prévoir le phénomène inverse.

De plus, il est possible qu'au cours des temps géologiques, en particulier pendant le Pléistocène, cette différence de charge ait été plus grande qu'aujourd'hui par suite d'une alimentation beaucoup plus forte et d'un gradient hydraulique plus grand dans la Formation de Dammam, ce qui aurait augmenté la possibilité d'ultrafiltration et le développement de saumures très salées dans la Formation de Dammam.

6.2.5. FACTEURS ARTIFICIELS

En plus des facteurs naturels mentionnés ci-dessus, il y a des facteurs artificiels qui certainement affectent la perméabilité ainsi que la qualité de l'eau du milieu aquifère tels que le pompage intensif et l'alimentation artificielle qui peuvent perturber l'équilibre naturel de l'eau souterraine.

L'envahissement d'eau salée dans un aquifère calcaire peut changer la répartition de la perméabilité. L'eau salée peut dissoudre plus de calcaire que l'eau douce, car la concentration en sels dissous influence l'activité de chaque ion dans la solution. Par exemple, si on ajoute du NaCl dans une solution saturée en calcite, la force ionique augmentera en diminuant le coefficient d'activité. Pour que l'activité puisse demeurer à la valeur nécessaire pour la saturation, la molalité de Ca^{+2} doit augmenter par la dissolution de plus de calcaire. L'envahissement d'eau salée pourrait donc aboutir à avoir une perméabilité plus grande dans le calcaire.

Par ailleurs on peut avoir des précipitations de calcite ou d'autres minéraux par suite de mélanges de deux types d'eau qui, ni l'un ni l'autre ne donnaient de précipités avant le mélange. Par exemple, dans certaines conditions le mélange d'eau salée, devenue saturée en calcite par suite de son cheminement à travers l'aquifère, avec une eau douce également saturée en calcite formerait une solution saturée à partir de laquelle le calcite précipiterait, ce qui aboutirait à la diminution de la perméabilité.

Généralement des changements de perméabilité et de qualité de l'eau peuvent se produire lorsque l'eau d'un certain environnement hydrologique vient en contact avec l'eau d'un autre environnement hydrologique, ce qui peut arriver, soit par une action délibérée, telle que les dispositifs d'alimentation artificielle, soit par inadvertance par exemple lors d'un pompage entraînant l'alimentation à partir des formations adjacentes. Un autre cas simple est celui où une eau à potentiel d'oxydation élevé pénètre dans un aquifère dont l'eau contient du Fer dissous et entraîne une précipitation pouvant diminuer la perméabilité, même si l'eau introduite est aussi pure que de l'eau distillée. Les caractères chimiques de l'eau d'alimentation et celles de l'eau originelle doivent donc être compatibles si l'on désire empêcher la précipitation des composants tels que le fer ou des minéraux tels que le calcite, le gypse et la dolomie (BACK et HANSHAW 1965).

6.3. - HYDROISOTOPES

6.3.1. GENERALITES

Les rapports des teneurs entre les isotopes naturels contenus dans l'eau peuvent changer en fonction du temps et des processus auxquels ces éléments sont soumis dans l'environnement. Les isotopes stables de l'environnement qui sont utilisés en hydrogéologie, ^1H , ^2H , ^{12}C , ^{13}C , ^{16}O et ^{18}O

s'y trouvent de façon naturelle. Les isotopes radioactifs ^3H et ^{14}C de l'environnement existent également de façon naturelle. Ceux-ci sont produits par l'interaction entre les radiations cosmiques et l'atmosphère ainsi que par les explosions nucléaires. Les isotopes de l'oxygène et de l'hydrogène sont des traceurs presque idéaux de l'eau en raison de leurs concentrations qui ne subissent pas de changements ou d'interactions dans le milieu aquifère. Par contre, les composés du carbone dans les eaux souterraines se comportent différemment, ce qui complique l'interprétation des données du ^{14}C . Dans le tableau 6-3, on présente quelques données sur les isotopes naturels utilisés en hydrologie (BROWN et al. 1975).

Plusieurs facteurs naturels provoquent des variations de composition isotopique dans les eaux tels que l'évaporation, la condensation qui varient en fonction de la température et donc de la latitude et de l'altitude. Lorsque la pluie s'infiltré et alimente les eaux souterraines, le mélange des eaux se fait dans la zone non saturée, ce qui tend à alterner les variations isotopiques. Ainsi, l'eau dans la zone non saturée a la composition qui correspond à la composition isotopique moyenne des eaux infiltrées de la région. Dans la couche aquifère, la composition isotopique de l'eau ne change plus sauf au cas où un échange se fait avec l'oxygène des roches. Cet échange n'est important que pour les eaux thermales à température élevée (SARROT REYNAULD et al. 1978). La composition isotopique des eaux souterraines est, en effet, reliée à la pluie dans la région d'alimentation de l'aquifère à l'époque de cette alimentation (BROWN et al. etc. 1975).

6.3.2. LES DONNEES ISOTOPIQUES DE KOWEIT

La datation des eaux souterraines du champ des puits de Raudhatain (eaux douces de la partie supérieure de la Formation pléistocène de Dibdiba) a été commencée par BERGSTROM en 1965 en employant les isotopes ^3H et ^{14}C . On a fait les analyses isotopiques à l'Université de Californie. Selon le rapport de Bergstrom, l'analyse ^{14}C montre que l'âge de l'eau ne dépasse pas 500 ans. La valeur de 11 U.T. de l'eau du puits R-3B implique d'ailleurs que quelque tritium, produit par les explosions nucléaires est déjà arrivé dans cette couche aquifère. La valeur de 0 U.T. au puits R-16 A indique par contre que l'eau y a plus de 30-40 ans d'âge.

TABIEAU 6-3

ISOTOPES PRINCIPAUX DE L' ENVIRONNEMENT UTILISÉS EN HYDROLOGIE

Isotope	Abondance Relative dans la nature (%)	Decroissance	Demie vie	Energie maximum (KeV)
^1H	99,985	Stable		
^2H	0,015	Stable		
^3H	$10^{-5} - 10^{-12}^*$	β^-	12.26 ans	18.1
^{12}C	98,89	Stable		
^{13}C	1,11	Stable		
^{14}C	$1,2 \times 10^{-10}^{**}$	β^-	5730 ans	156
^{16}O	99,76	Stable		
^{17}O	0,04	Stable		
^{18}O	0,20	Stable		

* Le chiffre plus bas se réfère au contenu du tritium dans les pluies avant 1952. Le chiffre plus haut se réfère à la valeur atteinte dans les pluies en 1963 dans l'hémisphère nord.

** Dans le carbone moderne avant 1950.

En 1968, Dr. M. AHMAD et Dr. BRYAN R. PAYNE ont commencé quelques analyses isotopiques pour dater les eaux souterraines des couches aquifères du Groupe de Koweït et de la Formation calcaire de Dammam dans le Sud Ouest de Koweït. Dans le tableau 6-4, on présente les résultats de ces analyses. On y constate que:

. Tous les échantillons ont des teneurs insignifiantes en tritium. Ils ont donc plus de 50 ans;

. La concentration en ^{14}C des bicarbonates des eaux prélevées dans la Formation de Dammam est pratiquement nulle. Les âges apparents, ou maximums, sont donc, au moins de 40 000 ans. On peut également constater que la correction de ces âges, pour tenir compte de la dilution de carbone non biogénique est insignifiante. Néanmoins, selon les concentrations en ^{13}C , la correction semble être vraisemblablement, de l'ordre de -5 à 6 000 ans, ce qui ne change pas l'image générale obtenue à partir des données du ^{14}C ;

. Le contenu en ^2H et ^{18}O dans tous les échantillons des eaux de la Formation calcaire de Dammam varie aux environs de -34 ‰ et de -4,2 ‰ respectivement, ce qui confirme que l'on a affaire à un seul système hydraulique.

. Les données sur les analyses des isotopes stables des eaux souterraines du Groupe de Koweït sont très peu nombreuses (puits SW32PW1K et SW25P2K). Dr PAYNE propose qu'on y voit un mélange d'eaux de la Formation de Dammam et d'eaux d'infiltration enrichies en isotopes stables par évaporation. S'il en est ainsi, le composant majeur vient vraisemblablement de l'eau de la Formation de Dammam sous-jacente, puisque la composition en isotopes stables du puits SW25 n'est pas éloignée de celle de l'eau de la Formation de Dammam.

. La concentration en ^{14}C des échantillons d'eaux des puits SW25PW2K et SW31PW1K est faible mais non négligeable. L'âge non corrigé, ou maximum de l'eau du puits SW25 est de 19 500 ans, mais avec une erreur de $\pm 3 500$ ans en raison de la petite quantité de carbone dans l'échantillon. La valeur correspondant au puits SW31 est de 27 900 ans. Les teneurs en ^{13}C de ces deux échantillons correspondent à un $\delta \text{‰} = -8,5 \text{‰}$. Les données limitées dont on dispose dans les régions arides nous montrent que le $\delta \text{‰} \text{ }^{13}\text{C}$

dans le CO_2 du sol est de -17 à -18 ‰ environ. En employant cette valeur, Dr PAYNE propose que les âges ajustés sont de 14 000 et 22 000 ans pour les puits SW25 et SW31 respectivement.

6.3.3. INTERPRÉTATION DES TENEURS ISOTOPIQUES EN DENTÉRIUM ET ^{18}O

Dans chaque million de molécules d'eau naturelle, dont la composition isotopique est normale (c.a.d. H_2^{16}O), il y a 2 000 molécules environ de H_2^{18}O contenant l'isotope lourd de ^{18}O , et 320 molécules environ de HD^{16}O dans lesquelles l'un des deux atomes ordinaires de l'hydrogène est remplacé par le deutérium ($^2\text{H}, \text{D}$). On a constaté que l'eau de mer contient plus de molécules dont les isotopes sont plus lourds que l'eau douce. Les investigations systématiques pendant les 20 dernières années ont révélé que les rapports en H_2^{18}O et HD^{16}O fluctuent de 1880 à 2010 et de 180 à 340 ppm respectivement (S. EPSTEIN, T. MAYEDA, 1953). Ceci provient essentiellement

TABIEAU 6-4
ANALYSES ISOTOPIQUES DES ÉCHANTILLONS DES EAUX SOUTERRAINES PRIS
DANS QUELQUES PUIITS AU SUD-OUEST DE KOWEIT

No.	Puits	Date d'échantillonnage	Couche Aquifère	U.T.	D	^{18}O	^{14}C	^{13}C ‰
1	SW 2PW1	23.07.68	Dammam	$0,5 \pm 0,3$	-33,6	-4,22	$0,5 \pm 0,5$	-6,7
2	SW 2PW2	23.07.68	"	$0,5 \pm 0,4$	-34,6	-3,96	$0,8 \pm 0,4$	-8,0
3	SW16PW1	23.07.68	"	$0,1 \pm 0,3$	-36,1	-4,45	$0,4 \pm 0,4$	-6,9
4	SW14PW1	7.08.68	"				$0,1 \pm 0,4$	
5	SW19PW1	7.09.68	"				$0,4 \pm 0,5$	-6,6
6	SW17PW1	16.10.68	"	$2,2 \pm 0,3$	-34,4	-4,84	$0,4 \pm 0,6$	-8,9
7	SW15PW1	29.10.68	"	$0,5 \pm 0,2$	-33,4	-4,1		
8	SW11	22.11.68	"	$0,3 \pm 0,3$		-4,2		
9	SW11PW1	28.11.68	"				$0,1 \pm 0,5$	-9,8
10	SW 2PW2	4.12.68	"				$1,4 \pm 0,5$	-7,9
11	SW18	15.12.68	"	$0,7 \pm 0,3$	-34,7	-4,16	$1,0 \pm 0,6$	-7,6
12	SW21	16.12.68	"	$0,2 \pm 0,2$	-34,5	-4,22	$0,7 \pm 0,6$	-7,6
13	SW 3 PW1	18.01.69	"	$0,5 \pm 0,3$	-31,0	-3,99		-6,0
14	SW25PW2K	10.03.69	Groupe de "Koweït	$1,1 \pm 0,3$	-33	-3,2	$8,8 \pm 3,2^*$	-8,4
15	SW31PW1K	2.06.69	"	$0,9 \pm 0,3$	-32,1	-4,9	$3,1 \pm 1,2$	-8,5

* La mesure n'est pas précise du fait de la petite quantité de carbone dans l'échantillon.

** Exprimé comme déviation en ‰ par rapport au standard P.D.B.

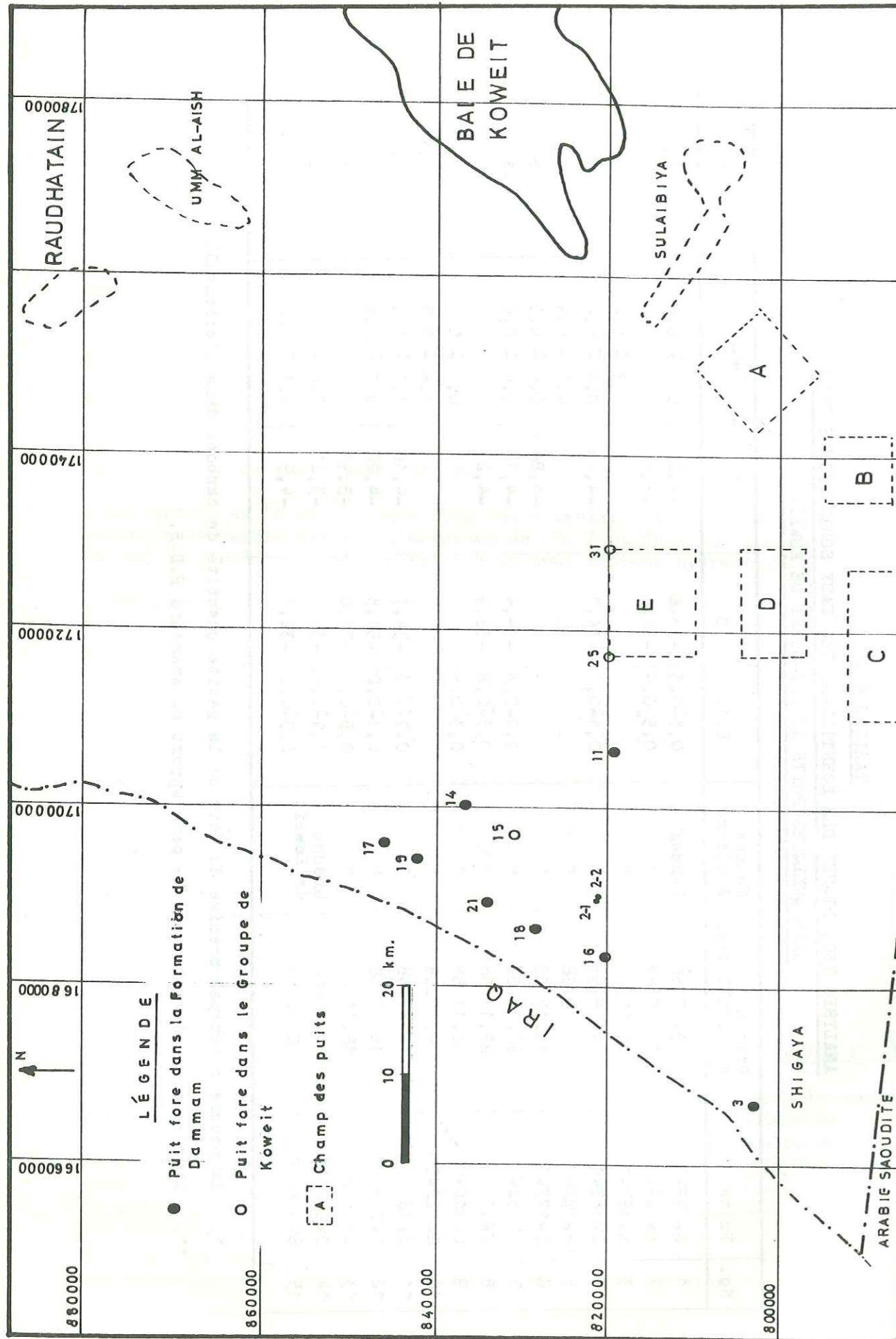


FIG. 6-7.—Situation des puits de l'échantillonnage isotopique.

de la pression de la vapeur plus basse de $H_2^{18}O$ et $HD^{16}O$. En effet, le fractionnement isotopique se fait pendant chaque phase de transformation, par exemple, pendant la condensation et l'évaporation. L'échange isotopique diffusion et dispersion garantit que les fractionnements isotopiques, qui se font initialement aux limites de phases deviennent des effets volumétriques mesurables dans un échantillon d'eau.

Il est d'usage de déterminer la teneur en deuterium et ^{18}O comme une déviation relative par rapport à un standard, dit SMOW (Standard Mean Ocean Water):

$$\delta D, \delta^{18}O \text{ respectivement} = \left(\frac{R_{\text{échantillon}} - R_{\text{Standard}}}{R_{\text{standard}}} \right) \cdot 1000$$

où R sont les rapports isotopiques D/H et

$$^{18}O/^{16}O$$

dans l'échantillon en cours d'étude et le standard respectivement.

La précision (2 σ - critérium) des mesures au spectrographe de masse des teneurs en δD et $\delta^{18}O$ est de ± 1 pour mille et de $\pm 0,2$ pour mille respectivement. En ce qui concerne le fractionnement isotopique dans le cycle naturel, la composition isotopique de l'eau est déterminée par les facteurs physiques suivants:

a) au cours de l'évaporation, il y a de l'enrichissement en isotopes lourds dans l'eau tandis que au cours de la condensation, il y a épuisement en isotopes lourds de la vapeur d'eau;

b) Toutes choses étant égales, le fractionnement isotopiques augmente avec la diminution de la température.

c) La teneur en deuterium par rapport à celle du ^{18}O est influencée par la cinématique de la transformation de phase. L'enrichissement en ^{18}O est plus marqué que celui en deuterium, en particulier avec l'augmentation du taux d'évaporation. Sous certaines conditions, on pourrait avoir une variation dans ce rapport par suite de l'échange isotopique spécifique (par exemple avec l'aquifère).

La vapeur de l'eau de mer et des lacs a une teneur en isotopes lourds, plus basse que celle de l'eau du sol. Dans les précipitations, la teneur en isotopes lourds diminue avec l'augmentation de la distance depuis la côte (effet de continentalité); par ailleurs, il y a diminution de la teneur en isotopes lourds avec l'augmentation des quantités de pluie (effet de quantité). Finalement, la teneur en isotopes lourds dans les précipitations diminue également dans les localités où une masse d'air humide d'élève par suite des reliefs topographiques (effet d'altitude); là les nuages déjà appauvris en isotopes lourds subissent un abaissement encore plus marqué de leur teneur en isotope du fait de la diminution de la température de condensation avec l'altitude. L'effet de la température dans le fractionnement isotopique provoque l'apparition de variations des teneurs isotopiques, en fonction des saisons mais aussi de la latitude (effet de latitude).

La relation entre les valeurs de δD et de $\delta^{18}O$ a été beaucoup discutée (H. CRAIG, 1961; W. DANSGAARD, 1964). Si les valeurs moyennes annuelles de δD et $\delta^{18}O$ dans les précipitations des aires continentales de l'hémisphère nord sont reportées sur un graphique, la relation linéaire satisfait l'équation

$$\delta D = 8 \cdot \delta^{18}O + 10 \text{ (voir la fig. 6-8).}$$

Dans l'équation $\delta D = m \delta^{18}O + t$ concernant les précipitations, m et t sont essentiellement déterminées par les conditions météorologiques dominantes lors de la formation de la vapeur d'eau au cours du cycle hydrologique. La valeur de t dépend essentiellement de la situation thermodynamique et du phénomène de transport pendant l'évaporation primaire à partir de la surface de la mer. La valeur de (m) dépend elle de la cinétique de l'évaporation secondaire de l'eau de la précipitation. Sa valeur diminue avec l'augmentation des taux d'évaporation.

A. MARCE (dans W.J. SHAMPINE et al. 1978) a montré que dans les aquifères de l'Arabie Saoudite orientale, il y a une différence énorme du rapport $^{18}O/D$ entre les eaux récentes, qu'elles soient tritiées ou non tritiées, et les eaux anciennes non tritiées. Les eaux récentes ont toujours des concentrations en ^{14}C plus élevées que 15 % de carbone moderne et les points représentatifs se situent sur la droite $\delta D \text{ ‰} = 6 \delta^{18}O \text{ ‰} + 10$ comme cela a été établi à partir des données isotopiques des précipitations dans l'île de Bahrain et confirmé par les données isotopiques des pluies enregistrées à Riyadh et à Hofuf. D'autre part, les eaux anciennes non tritiées ont toujours des concentrations en ^{14}C plus faible que 15 % de carbone moderne et leurs rapports en isotopes stables s'alignent sur une droite d'équation

$$\delta D \text{ ‰} = 8 \delta^{18}O \text{ ‰} + 3 \text{ (valeurs appauvries en isotopes, inférieures}$$

$$\text{à } -3,5 \text{ ‰} \delta^{18}O \text{ et à } -20 \text{ ‰} \delta D)$$

Selon J. SARROT REYNAULD, l'équation de A. MARCE pour les eaux récentes de l'Arabie orientale caractériserait des précipitations à partir de vapeurs ayant subi plusieurs épisodes de condensations et d'évaporations avant leur arrivée au sol, ce qui peut les appauvrir en isotopes stables et réduire la valeur de m dans l'équation :

$$\delta D \text{ ‰} = m \delta^{18}O \text{ ‰} + t$$

YURTSEVER et PAYNE (1978) ont exclu les données des mois dont les précipitations étaient inférieures à 10 mm pour réduire l'effet d'évaporation secondaire. Ainsi, en prenant la valeur de 8 comme pente supposée a priori, ils ont établi la droite

$\delta D \text{ ‰} = 8 \delta^{18}O + 10,9$ qui représente les données des précipitations dans l'île de Bahrain selon la méthode des moindres carrés. La valeur réduite de t dans cette équation pourrait être due à l'influence de l'Océan Indien sur la région du Golfe Arabique. Cette explication est en accord avec la climatologie régionale de la région du Golfe Arabique, où les pluies de la fin du printemps peuvent être attribuées à la Mousson du Sud-Est (voir section 4-1). Il nous semble donc que l'équation

$\delta D \text{ ‰} = 8 \delta^{18}O + 22$ établie par NIR pour la partie orientale de la Méditerranée et une bonne partie du Moyen Orient où l'influence des mers fermées est importante, ne correspond pas aux données des précipitations de Bahrain, Hofuf et Riyadh en Arabie Orientale.

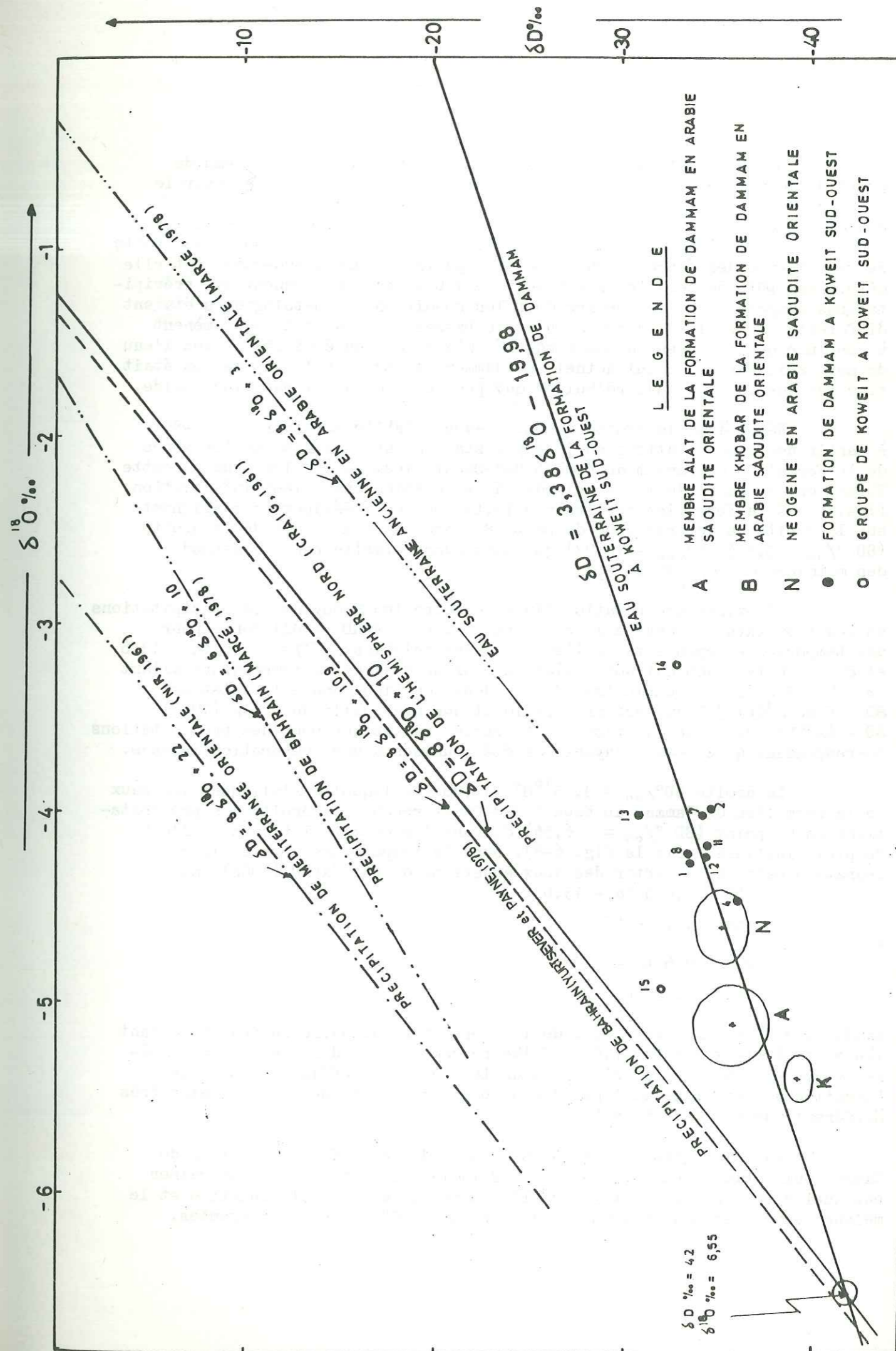


FIG. 6-8.— Concentration en ^{18}O et deuterium dans les eaux souterraines des aquifères du Groupe de Koweït et formation de Dammam à Koweït sud-ouest.

En regardant la relation de $\delta D - \delta^{18}O$ des échantillons d'eau de puits de Koweït sud-ouest, pris entre Juillet 1968 et Juin 1969 (voir le tableau 6-4 et la figure 6-8), on constate que les concentrations se situent au-dessous de la droite $\delta D/\text{‰} = 8\delta^{18}O/\text{‰} + 10$, qui est valable pour les climats tempérés, par exemple Europe centrale. Sans doute, la droite représentative des échantillons d'eau des puits de Koweït Sud-Ouest est elle déterminée par des effets climatologiques? Ces eaux proviennent de précipitations évaporées depuis une mer dont les conditions climatologiques étaient différentes de celles d'aujourd'hui. Les basses valeurs de t nous amènent à conclure que la vapeur d'eau condensée était dans un équilibre, avec l'eau de mer, meilleur que celui actuel. Evidemment le taux de l'évaporation était plus bas que celui d'aujourd'hui ce qui peut être dû au climat plus humide.

Néanmoins, la droite que nous avons établie sur la figure 6-8, à partir des concentrations en isotopes stables dans les eaux souterraines de la Formation de Dammam au Koweït Sud-Ouest, indique que les eaux de cette Formation ont subi plusieurs épisodes d'évaporation avant leur infiltration finale dans la Formation car les précipitations non réévaporées s'alignent sur la droite caractéristique de pente 8, tandis que la pente de la droite ($\delta D/\text{‰} = 3,33\delta^{18}O/\text{‰} - 19,93$) que nous avons établie par la méthode des moindres carrés est de 3,38.

Il existe une relation linéaire entre les S moyens des précipitations et les températures lors de la condensation. DANSGAARD (1964) donne pour une température moyenne t_a en lieu donné les relations $\delta^{18}O = 0,695 t_a - 13,6$ et $\delta D = 5,6 t_a - 100$ qui sont valables pour un domaine de température allant de -50 à $+20^\circ\text{C}$. La combinaison de ces deux équations donne la relation $\delta D = 8,06 \delta^{18}O + 9,6$ qui est presque identique avec celle de Craig (1961) $\delta D = 8\delta^{18}O + 10$. Cette équation n'est représentative que pour des précipitations correspondant à des eaux n'ayant pas été soumises à une évaporation intense.

La droite $\delta D/\text{‰} = 3,33\delta^{18}O/\text{‰} - 19,98$ sur laquelle s'alignent les eaux de la Formation de Dammam au Koweït Sud-Ouest recoupe la droite des précipitations en un point ($\delta D/\text{‰} = -6,55$) donnant les caractéristiques de l'eau de pluie initiale (voir la fig. 6-8). Donc la température lors de la condensation calculée à partir des deux équations de DANSGAARD (1964) est:

$$-6,55 = 0,695 t_a - 13,6$$

$$t_a = 10,144^\circ\text{C}$$

et

$$-42 = 9,6 t_a - 100$$

$$t_a = 10,36^\circ\text{C}$$

tandis que la moyenne mensuelle de la température actuelle au Koweït pendant les mois pluvieux est de $17,6^\circ\text{C}$. Malheureusement, les données sur la température moyenne mensuelle actuelle dans les régions d'affleurement de la Formation de Dammam ne sont pas disponibles, mais elle ne doit pas être très différente de celle de Koweït.

La large gamme des valeurs de $\delta^{18}O$ des eaux de la Formation de Dammam qui varie entre $-4,84$ et $-3,99$ indique que ces eaux souterraines ont subi divers processus tels que l'évaporation avant l'alimentation et le mélange entre des masses dont les valeurs de $\delta^{18}O/\text{‰}$ sont différentes.

Les valeurs observées ne sont pas très différentes de celles relevées au Qatar Sud (Y. YURTSEVER et B.R. PAYNE 1978), où elles varient entre $-5,2$ et $-3,8$.

Les valeurs des concentrations moyennes en isotopes stables des aquifères ALat et Khobar (Eocène) et Néogène en Arabie Saoudite orientale ($\delta D/\text{‰}$: de $-5,4$ à $-5,1$ et $\delta^{18}O/\text{‰}$: de $-39,5$ à $-35,8$) se situent également presque dans le même domaine et elles s'alignent bien sur la droite $\delta D/\text{‰} = 3,38 \delta^{18}O/\text{‰} - 19,98$ que nous avons établie pour les eaux de la Formation de Dammam au Koweït Sud-Ouest.

Les teneurs en isotopes stables des échantillons d'eau du Groupe de Koweït pris dans les deux puits SW25PW2K et SW3PW1K indiquent que les eaux de ce Groupe au Koweït Sud Ouest sont également appauvries ($D/\text{‰} = -33$ à $-32,1$ et $\delta^{18}O/\text{‰} = -4,9$ à $-3,2$) par rapport aux proportions actuelles. Elles ne sont pas très différentes de celles de la Formation de Dammam, et ceci pourrait confirmer l'existence d'une drainance vers le haut à partir de celle-ci qui est la source principale de l'alimentation du Groupe de Koweït.

6.4. EVALUATION DE LA QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES DE KOWEIT

On s'occupe ici de la classification et de l'évaluation de la qualité des eaux souterraines de Koweit pour des usages agricoles et domestiques. Notre étude est basée sur les résultats des analyses chimiques des eaux d'un nombre sélectionné de puits qui représentent les divers champs de puits.

6.4.1. CLASSIFICATION ET EVALUATION DES EAUX POUR L'IRRIGATION

Plusieurs tentatives ont été faites pour classer et évaluer les eaux employées pour l'irrigation. La plupart de ces tentatives prennent en compte un ou plusieurs des facteurs suivants:

- . Concentration totale en sels dissous (ou la conductivité électrique)
- . Pourcentage de sodium par rapport au total des cations
- . Concentration du Bore (en ppm)
- . Concentration des chlorures et sulfates (m.éq./l).

Les classifications les plus connues sont celles de WILCOX (1949) et DONEEN (1961) que nous utiliserons dans notre étude.

6.4.1.1. METHODE DE WILCOX (1948)

La méthode de WILCOX pour la classification des eaux d'irrigation utilise la relation entre la concentration totale en sels dissous en épm (équivalent par mille en mille équivalent) et le pourcentage du sodium (fig. 6-9). On y subdivise les eaux d'irrigation en cinq classes qui s'échelonnent entre excellente et non convenable.

Dans les régions de tous les champs des puits de Koweit, à l'exception du champs de Raudhatain, aucun échantillon parmi les échantillons étudiés n'est représenté sur le diagramme de WILCOX (Fig. 6-9) à cause de la concentration totale élevée (plus de 35 épm). Donc les eaux souterraines de ces champs là ne sont pas convenables pour l'irrigation selon la classification de WILCOX.

La plupart des eaux souterraines produites dans le champs de puits de Raudhatain sont représentées sur le diagramme de WILCOX en s'échelonnant entre excellentes et non convenables.

6.4.1.2. METHODE DE DONEEN (1961)

Bien que la classification de WILCOX soit largement acceptée, elle a quelques désavantages. Par exemple, une eau ayant une conductivité électrique basse et un pourcentage élevé en sodium est considérée, selon cette classification comme excellente à bonne, alors que cette eau peut être nuisible pour les plantes.

6.4.1.2.2. Indice de la perméabilité (Sodium)

L'indice de la perméabilité est estimé comme suit:

$$\text{Indice de perméabilité: } \frac{\text{Na}^+ + \sqrt{\text{HCO}_3^-}}{\text{Na}^+ + \text{Mg}^{+2} + \text{Ca}^{+2}} \times 100$$

En 1961, DONEEN construisait un diagramme pour classer les eaux d'irrigation selon l'indice de perméabilité (Fig.6-10). Sur ce diagramme la valeur de l'indice de perméabilité est déterminée en fonction de la concentration totale en cations en épm. Le diagramme est subdivisé par deux courbes en trois aires correspondant aux trois classes. DONEEN construisit trois types de ce diagramme correspondant aux trois types différents de sol.

Les eaux souterraines produites dans tous les champs de puits, à l'exception du champ de Raudhatain, sont caractérisées par une concentration totale élevée, c'est-à-dire, plus de 20 épm. Par conséquent, elles ne sont pas représentées sur le diagramme de DONEEN (Fig.6-10), et elles sont non convenables pour l'irrigation selon cette classification.

Dans la région de Raudhatain, la plupart des eaux souterraines sont caractérisées par la concentration totale élevée en sels dissous, c'est-à-dire, plus de 20 épm. Parmi les 21 échantillons des eaux pris dans 21 puits différents, on trouve qu'il n'y a que 15 échantillons qui sont représentables sur le diagramme de DONEEN comme suit:

Classe I : 33%
Classe II : 29%
Classe III: 14%

6.4.1.2.3. Bore

Plusieurs chercheurs ont prouvé que le bore est l'élément le plus important dont la concentration élevée dans les eaux d'irrigation aurait des effets toxiques sérieux sur les plantes. La classification suivante est la plus connue (WILCOX & MAGISTAD 1943).

Tableau 6-6: Classification des eaux d'irrigation selon leur contenu en Bore

CLASSE	I	II	III
Concentration en Bore	0.5 ppm	0.5 - 2.0 ppm	2.0 ppm

Les données disponibles (dossiers du Ministère de l'Electricité et de l'eau) sur les analyses chimiques des eaux souterraines produites dans les champs de puits différents au Koweit montrent que:

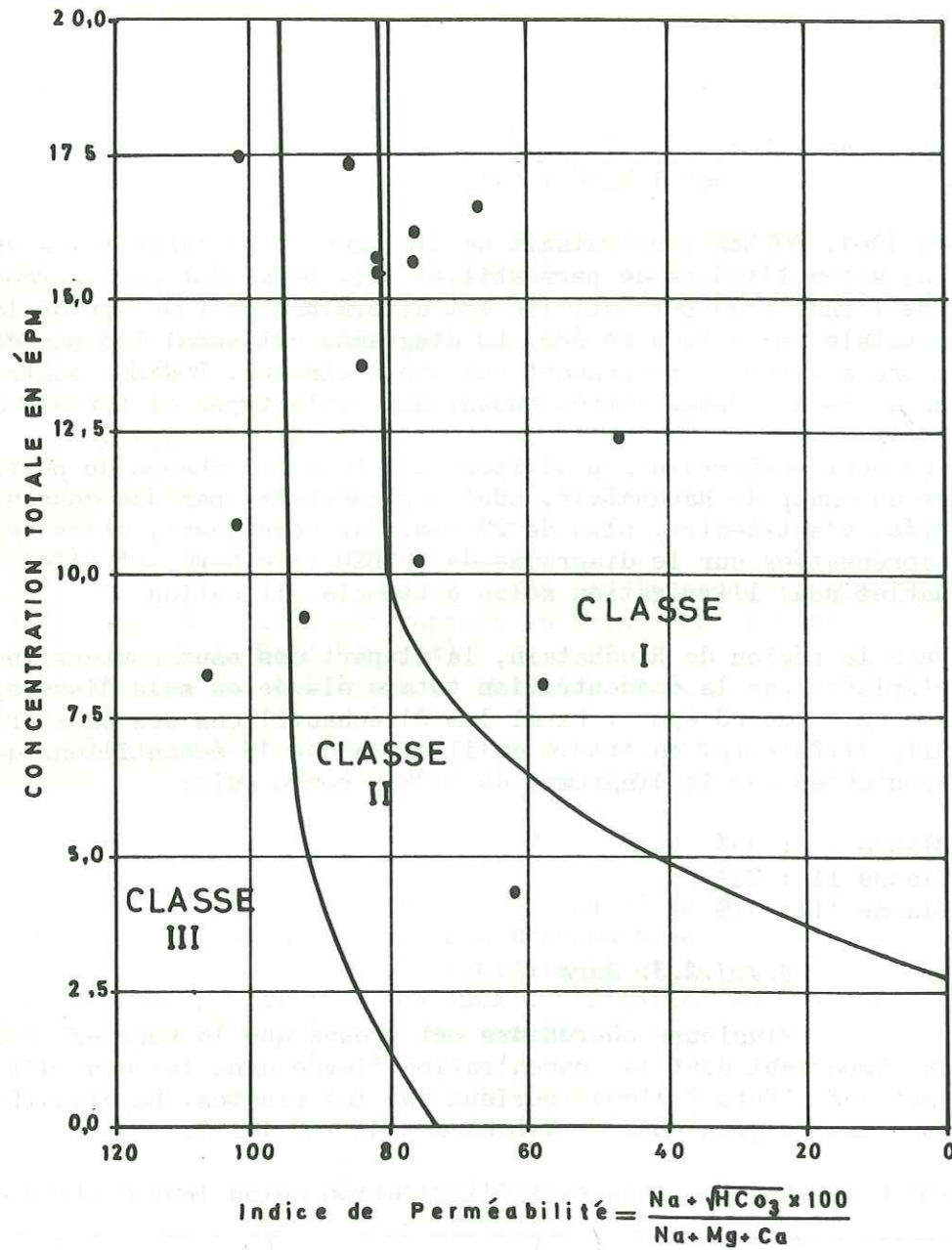


FIG.6-10- Classification des eaux pour l'irrigation du sol a permeabilite moyenne (d'après Doneen,1961)

6.4.1.2.2. Indice de la perméabilité (Sodium)

L'indice de la perméabilité est estimé comme suit:

Indice de perméabilité: $\frac{Na^+ + \sqrt{HCO_3^-} \times 100}{Na^+ + Mg^{+2} + Ca^{+2}}$

En 1961, DONEEN construisait un diagramme pour classer les eaux d'irrigation selon l'indice de perméabilité (Fig.6-10). Sur ce diagramme la valeur de l'indice de perméabilité est déterminée en fonction de la concentration totale en cations en épm. Le diagramme est subdivisé par deux courbes en trois aires correspondant aux trois classes. DONEEN construisit trois types de ce diagramme correspondant aux trois types différents de sol.

Les eaux souterraines produites dans tous les champs de puits, à l'exception du champ de Raudhatain, sont caractérisées par une concentration totale élevée, c'est-à-dire, plus de 20 épm. Par conséquent, elles ne sont pas représentées sur le diagramme de DONEEN (Fig.6-10), et elles sont non convenables pour l'irrigation selon cette classification.

Dans la région de Raudhatain, la plupart des eaux souterraines sont caractérisées par la concentration totale élevée en sels dissous, c'est-à-dire, plus de 20 épm. Parmi les 21 échantillons des eaux pris dans 21 puits différents, on trouve qu'il n'y a que 15 échantillons qui sont représentables sur le diagramme de DONEEN comme suit:

- Classe I : 33%
- Classe II : 29%
- Classe III: 14%

6.4.1.2.3. Bore

Plusieurs chercheurs ont prouvé que le bore est l'élément le plus important dont la concentration élevée dans les eaux d'irrigation aurait des effets toxiques sérieux sur les plantes. La classification suivante est la plus connue (WILCOX & MAGISTAD 1943).

Tableau 6-6: Classification des eaux d'irrigation selon leur contenu en Bore

CLASSE	I	II	III
Concentration en Bore	0.5 ppm	0.5 - 2.0 ppm	2.0 ppm

Les données disponibles (dossiers du Ministère de l'Electricité et de l'eau) sur les analyses chimiques des eaux souterraines produites dans les champs de puits différents au Koweit montrent que:

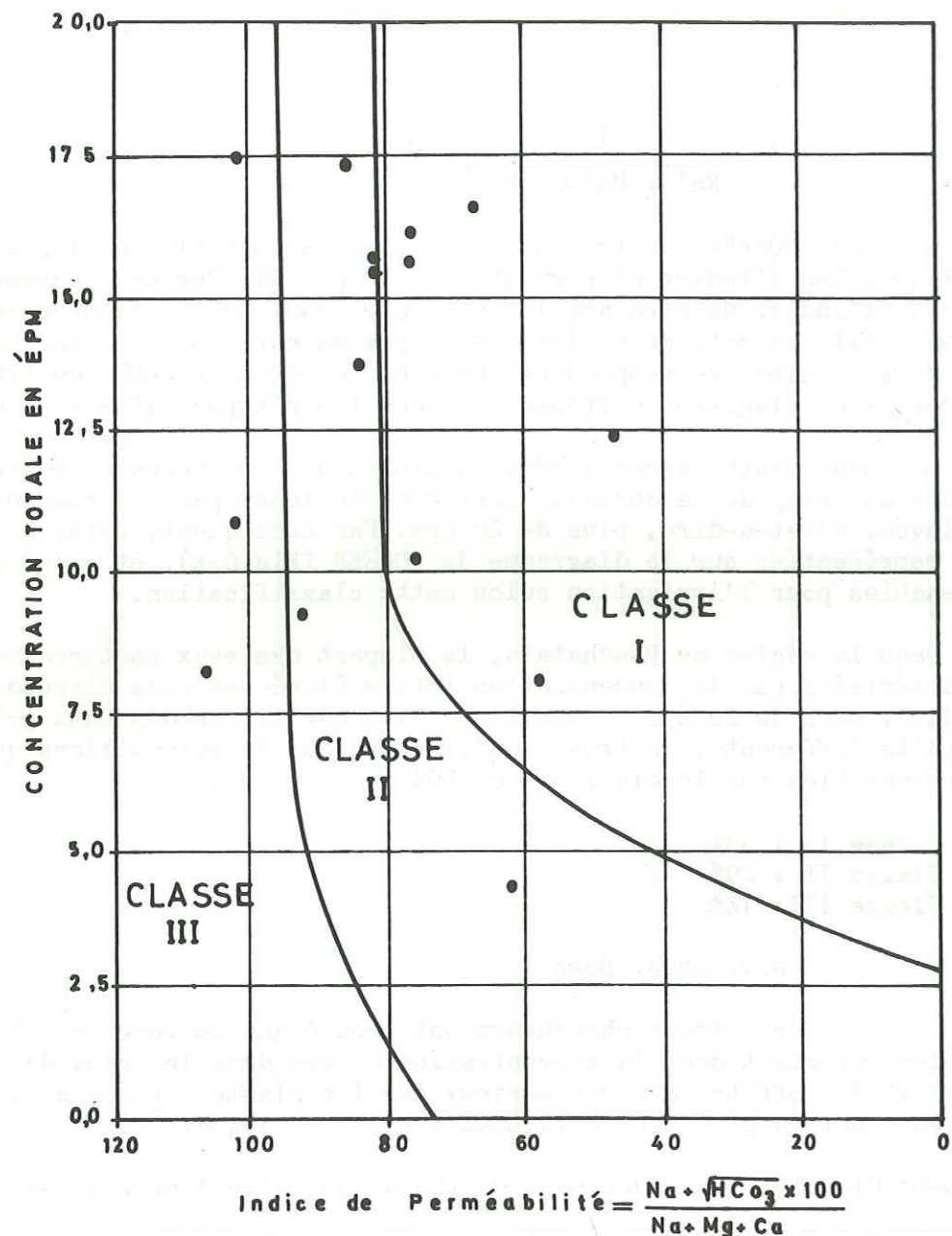


FIG. 6-10- Classification des eaux pour l'irrigation du sol à perméabilité moyenne (d'après Doneen, 1961)

. au Koweit sud-ouest, le contenu en bore dans les eaux souterraines de la Formation de Dammam varie entre 0,8 et 1,7 ppm;

. au Koweit nord dans la région d'Al-Abdally, le contenu en bore, dans les eaux souterraines que l'on extrait de la partie supérieure du Groupe de Koweit, varie entre 2,3 et 5,15 ppm;

. au Koweit sud, dans la région de Wafra, le contenu en bore dans les eaux souterraines produites par l'irrigation à partir du Groupe de Koweit varie de 1,2 à 4,55 ppm. La concentration du bore dans les eaux souterraines de la Formation de Dammam dans la même région varie de 1,4 à 2,6 ppm.

. La concentration du bore dans les eaux souterraines douces des champs de puits de Raudhatain varie elle entre 1 et 2,9 ppm.

6.4.2. EVALUATION DES EAUX SOUTERRAINES POUR LES USAGES DOMESTIQUES

Pour que l'eau soit convenable pour les usages domestiques, elle doit avoir des caractères bactériologiques, physiques et chimiques particuliers. Les eaux doivent être débarrassées de bactéries malfaisantes et de microbes. Physiquement, l'eau utilisée pour des buts domestiques doit être incolore et avoir un goût acceptable. La plupart des eaux souterraines de Koweit ont un goût inhabituel par suite de l'existence de sulfates, chlorures et sodium en concentrations élevées. Chimiquement, l'eau ne doit pas contenir de quantités excessives en certains éléments. Selon les standards des Etats Unis, l'eau pour les usages domestiques ne doit pas contenir certains ingrédients en excès des limites suivantes (U.S. Public Health Dept., 1962):

Alkylbenzene sulfonate :	0.5 ppm
Arsenic (As) :	0.01 ppm
Chlore (Cl) :	250
Cuivre (Cu) :	1.0
Cyanure (Cn) :	0.01
Fer (Fe) :	0.3
Manganèse (Mn) :	0.05
Nitrate (NO ₃) :	45
Sulfate (SO ₄) :	250
Concentration totale :	500
Zinc (Zn) :	5

On présente dans les tableaux 6-7 et 6-8 deux classifications qui sont employées dans les régions désertiques d'U.R.S.S. (KAMENSKY 1947).

Selon les standards mentionnés ci-dessus, il est évident que la plupart des eaux souterraines de Koweit ne sont pas convenables.

. Concentration totale

La concentration totale en sels dissous dans les eaux souterraines saumâtres produites dans les champs de puits divers au Koweit varie entre 2 400 et 7 500 ppm. Donc ces eaux là varient selon les deux standards mentionnés ci-dessus, de bonnes à non convenables. Les eaux souterraines produites dans le champ des puits de Raudhatain sont soit bonnes, soit acceptables.

CLASSIFICATION DES EAUX DE LA REGION CAUCASIENNE

Caractères des eaux	Concentration totale en ppm	Concentration des ions en ppm		Dureté Totale
		Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	
Bonne	500-1000	8 - 200	180-480	20-30
Acceptable	1000-2000	200 - 300	480-720	30-40
Possible	2000-2500	300 - 400	720-960	40-50
Non convenable	2500-3000	400 - 500	960-1200	50-60

TABLEAU 6-8

CLASSIFICATION DES EAUX DE L' ASIE CENTRALE (URSS)

Caractères des eaux	Concentration Totale en ppm	Concentrations des ions en ppm					Dureté Totale
		Na	Ca	Mg	Cl	SO ₄	
Bonne	1500	400	150	75	600	600	30
Acceptable	2000	500	250	100	700	800	45
Possible	2500	700	300	125	800	900	60
Non convenable	3000	800	350	150	900	1000	80

. Sodium

La concentration en sodium dans les eaux souterraines saumâtres varie entre 300 ppm au Koweit sud-ouest et plus de 1 000 ppm au Sulaibiya est, Wafra et Abdally. Donc ces eaux correspondent aux qualités bonne, acceptable, possible ou non convenable.

. Calcium

La plupart des eaux souterraines saumâtres de Koweit contiennent plus de 300 ppm de calcium. Cette concentration augmente à Sulaibiya, Wafra et Abdally jusqu'à 600 ppm environ. Donc, elle sont utilisables, soit non convenables. Les eaux souterraines douces de Raudhatain sont bonnes puisque leur concentration en calcium varie entre 10 et 170 ppm.

. Magnésium

La concentration en magnésium dans les eaux souterraines saumâtres varie de 130 à 250 ppm. Donc, celles-ci ne sont pas convenables. Les eaux souterraines douces des champs de puits de Raudhatain sont bonnes puisque leur concentration moyenne en Mg est de 15 ppm.

. Chlorures

La concentration en chlorures dans les eaux souterraines saumâtres produites dans les divers champs de puits de Koweit a des valeurs de 450 ppm au Koweit sud-ouest, et plus de 2 000 ppm à Sulaibiya est, Wafra et Abdally. Donc sur la base de la classification du tableau 6-7 (région caucasienne de l'U.R.S.S., ces eaux ne sont pas convenables. Par contre, la qualité de celles-ci s'échelonne entre acceptable et non convenable selon la classification employée en Asie centrale de l'U.R.S.S. (tableau 6-8). Les eaux souterraines douces produites dans le champ de puits de Raudhatain sont de bonne qualité puisque leur concentration en chlorures est de 50 à 300 ppm avec une moyenne de 150 ppm.

. Sulfates

La concentration en sulfates dans les eaux souterraines saumâtres produites dans les champs de puits divers de Koweit est d'environ 1 000 ppm au Koweit sud-ouest et elle peut atteindre la valeur de 2 000 ppm environ à Sulaibiya est, Wafra et Al-Abdally. Donc ces concentration rendent les eaux produites non convenables. Au champ de puits de Raudhatain, les eaux souterraines produites sont de bonne qualité parce que leur concentration varie de 70 à 450 ppm.

6.4.3. CONCLUSION

On a montré, dans le cadre de l'évaluation de la qualité des eaux souterraines de Koweit, que la plupart de celles-ci ne sont convenables, ni pour l'irrigation, ni pour les usages domestiques. Néanmoins, il y a des considérations locales qui les rendent très utiles pour Koweit.

Les eaux souterraines saumâtres dont la concentration totale en sels dissous atteint jusqu'à 8 000 ppm environ ont été utilisées au Koweit pour l'irrigation depuis longtemps. La plupart des jardins publics et privés sont arrosés par cette catégorie d'eau. Il y a plus de 400 fermes qui s'en servent depuis plus de 20 ans. Donc, il y a un besoin pour étudier les circonstances locales afin qu'on puisse établir des standards de classification convenables pour Koweit.

On a mentionné déjà dans le Chapitre 1 que les eaux souterraines saumâtres sont mélangées avec les eaux distillées de la mer à raison de 10 à 20 % pour rendre celles-ci propres à la consommation humaine. Dans le tableau 6-9, on présente un exemple des analyses chimiques des eaux qu'on mélange pour produire les eaux potables (AL QUISI 1979).

De plus on y présente les standards des eaux potables de l'organisation mondiale de la santé (1958).

TABLEAU 6-9
ANALYSES CHIMIQUES DES ÉCHANTILLONS DES EAUX FRISES DANS LA ZONE
DE SHUAIBA LE 21 FEVRIER 1979 ET STANDARDS DES EAUX POTABLES D'O.M.S. (1958)

COMPOSANTS CHIMIQUES	CONCENTRATION EN PPM			CONCENTRATIONS EN PPM SELON LES STANDARDS D' O.M.S.(1958)		
	Distillée	Saumâtre	Potable	Limite permise	Limite Excessive	Maximum permis
Ammoniaque (NH ₄)	0,65		0,03	-	-	-
Arsenic (AS)				-	-	0,2
Cadmium (cd)				-	-	-
Calcium (Ca)		380	46	75	200	-
Chlorure (Cl)		940	120	200	600	-
Chrome (Cr ⁺⁶)				-	-	0,05
Cuivre (Cu)				1,0	1,5	-
Cyanure (CN)				-	-	0,01
Fluorure (F)		1,9	0,33	-	-	-
Fer (Fe)			0,03	0,3	1,0	-
Plomb (pb)				-	-	0,1
Magnesium (Mg)		138	16	50	150	-
Magnesium + Sulfates de sodium				500	1000	-
Manganese (Mn)				0,1	0,5	-
Nitrate (NO ₃)				-	-	-
Oxygene (O), dissous (Minimum)				-	-	-
Composés phénoliques (phenols)				0,001	0,002	-
Selenium (Se)				-	-	0,05
Sulfate (SO ₄)		1275	148	200	400	-
Zinc (Zn)		4487	718	5,0	15	-
Conductivité électrique (Mmho/cm)	32					
Concentration totale en sels dissous	32	4032	510	500	1500	-
PH	6,5	7,6	7,6	-	-	-
Potassium (K)		18,0	2,3	-	-	-
Bicarbonate (HCO ₃)		142	20,6	-	-	-
Sodium (Na)		530	66	-	-	-

CHAPITRE VII

PROPRIETES HYDRODYNAMIQUES DES TERRAINS

Il est en dehors du but de notre étude de présenter une étude hydraulique complète des couches aquifères de Koweït, car celle-ci est digne d'un travail spécial. On se contentera donc de présenter dans ce chapitre la répartition générale des caractères hydrodynamiques déterminés à partir de l'interprétation des pompages d'essai conduits par le Ministère de l'Electricité et de l'Eau. De plus on a choisi le champ de puits "B" pour calculer le rabattement du niveau de l'eau provoqué par la production continue à partir de ces puits pour des durées différentes.

7.1. - GROUPE DE KOWEIT

Sur la Figure 1-7, on présente la carte piézométrique du Groupe de Koweït. On y constate que la charge diminue vers le Nord-Est, ce qui montre que le sens de l'écoulement est généralement dans la même direction.

Bien qu'il y ait plus de 500 puits de production construits dans le Groupe de Koweït, nous ne pouvons pas présenter dans notre étude les caractères hydrodynamiques des nappes aquifères de ce Groupe de façon très détaillée car, ils sont très dispersés dans les petites aires de Wafra, Al-Abdally et Raudhatain, et la plupart des puits ne sont pas contrôlés par l'Etat et sont peu profonds et de grand diamètre (2 - 3 m).

Au Raudhatain quelques essais de pompage ont été effectués par PARSONS (1963), le tableau 7-1 contient quelques valeurs des coefficients hydrauliques déterminés à partir de l'interprétation de ces essais. On y constate que la transmissivité varie entre $0,27 \cdot 10^{-2}$ et $3,62 \cdot 10^{-2}$ m²/s. Le coefficient d'emmagasinement varie entre $2 \cdot 10^{-5}$ et $1 \cdot 10^{-2}$. On constate que les valeurs de transmissivité calculées par PARSONS sont très exagérées car la transmissivité effective évaluée par YELDER SHENAY (SES 1977) à partir des essais de pompage et des données accumulées au cours des 14 dernières années est de $0,95 \cdot 10^{-2}$ m²/s au total ($T_1 = 0,69 \cdot 10^{-2}$ m²/s est la transmissivité de l'ensemble des aquifères supérieur et moyen et $T_2 = 0,17 \cdot 10^{-2}$ m²/s la transmissivité de l'aquifère inférieur).

Au Koweït sud-ouest, quelques pompages d'essai ont été effectués en plusieurs emplacements. Le tableau 7-2 contient les valeurs des coefficients hydrauliques des couches aquifères déterminés par des méthodes différentes. On y constate que:

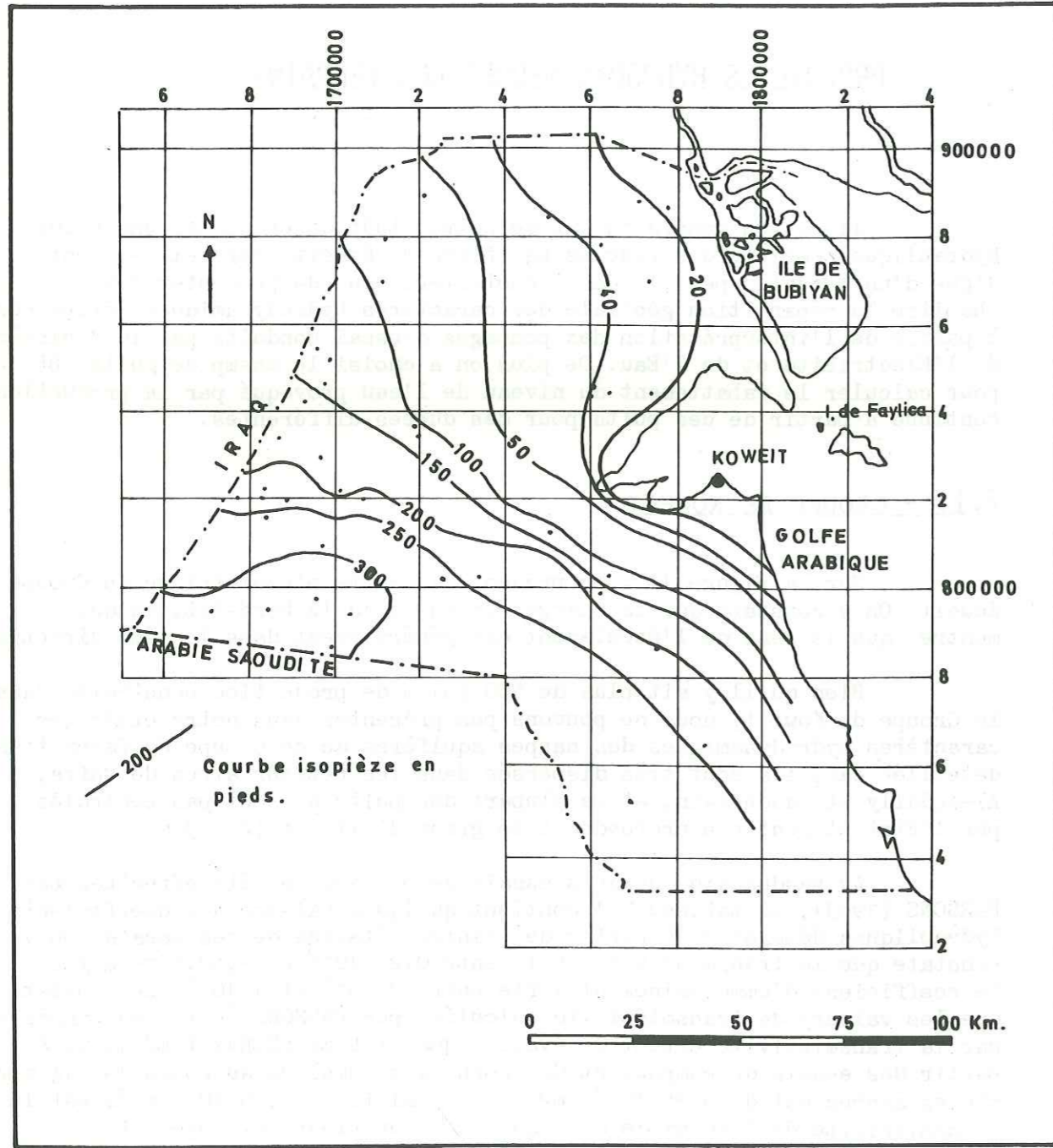


FIG. 7-1- Carte piézométrique du Groupe de Koweït
(d'après Y. AL-Hajji, 1976)

TABLEAU 7-1
COEFFICIENTS HYDRAULIQUES DES NAPPES AQUIFERES AU RAUDHATAIN

SITUATION	DUREE D'ESSAIS EN HEURES	EPAISSEUR CREPINEE EN METRES	COEFFICIENTS		METHODE
			TRANSMISSIVITE m ² /sec	EMMAGASINEMENT	
R-1	4,4	18,3	2,3 · 10 ⁻² 2,73 · 10 ⁻² 1,39 · 10 ⁻² 1,75 · 10 ⁻²	3 · 10 ⁻⁴ 2 · 10 ⁻⁴ 3 · 10 ⁻⁴	REGIME TRANSITOIRE, COURBE STANDARD THEIS. DIAGRAMME Δs/Log t, PUIITS D'OBSERVATION "R-1A" "R-1B" REMONTÉE APRES POMPAGE, JACOB.
R-3	2	16,8	1,90 · 10 ⁻²	2 · 10 ⁻²	R.T., C.S. THEIS.
R-5	1	24,4	3,54 · 10 ⁻² 2,70 · 10 ⁻²	1 · 10 ⁻² 1 · 10 ⁻²	Δs/Log t R.T., C.S. THEIS.
R-6	2	17,4	2,33 · 10 ⁻² 2,07 · 10 ⁻² 2,52 · 10 ⁻²	1 · 10 ⁻⁴ 2 · 10 ⁻⁵	" Δs/Log t " , PUIT DE POMPAGE
R-7	1	13,7	3,23 · 10 ⁻² 3,62 · 10 ⁻²	1,6 · 10 ⁻³ 1,2 · 10 ⁻³	R.T., C.S. THEIS. Δs/Log t
R-16	2	12,2	2,26 · 10 ⁻² 2,52 · 10 ⁻²	4 · 10 ⁻⁴	R.T., C.S. THEIS. Δs/Log t PUIITS DE POMPAGE
R-20	1	6,6	5,49 · 10 ⁻²	3 · 10 ⁻³	R.T., C.S. THEIS
R-22	1	15,2	0,25 · 10 ⁻² 0,37 · 10 ⁻²	1 · 10 ⁻⁴ 7 · 10 ⁻⁴	" Δs/Log t
R-27	1	12,2	1,92 · 10 ⁻² 2,31 · 10 ⁻²	9 · 10 ⁻⁵	R.T., C.S. THEIS Δs/Log t PUIITS DE POMPAGE

COEFFICIENTS HYDRAULIQUES DES COUCHES AQUIFERES DU GROUPE DE KOWEIT
DANS LE KOWEIT SUD-OUEST

SITUATION	PUITS	COUCHE AQUIFERE	DEBIT m ³ /sec	DUREE EN MINUTES	DATE	TRANSMISSIVITE EN m ² /sec	COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT	FACTEUR DE DRAINANCE	EPAISSEUR DE LA CREPEE EN m.	METHODE
SW-25	PW 2 KS	GROUPE DE KOWEIT SUPERIEUR	11,37 · 10 ⁻³	1000	25/4/70	5,7 · 10 ⁻³			35	As / Log t
	PW 1 KS	"	"	"	"	"			"	"
	OW 3 K	"	"	"	"	"	3,3 · 10 ⁻³		"	SUPERPOSITION H(u,ρ), WALTON HANTUSH
	PW 2 K	GROUPE DE KOWEIT SUPERIEUR + INFERIEUR	22,73 · 10 ⁻³	20 000	6/5/69	7,93 · 10 ⁻³			74,7	As / Log t
SW-26	PW 3 K	"	37,87 · 10 ⁻³		4/3/70	1,9 · 10 ⁻³			69,9	REMONTEE DE THEIS
SW-28	PW 2 K	SUPERIEUR	11,37 · 10 ⁻³	33 000	11/10/69	5,35 · 10 ⁻⁴			18,3	As / Log t
	SU-137	"	"	"	"	5,32 · 10 ⁻⁴	2,9 · 10 ⁻⁴	152	17,4	SUPERPOSITION W(u,r/β), WALTON HANTUSH
	PW 1 K	INFERIEUR	18,94 · 10 ⁻³	7 500	23/9/69	1,14 · 10 ⁻³			27,4	As / Log t
	OW 1 K	"	"	"	"	1,14 · 10 ⁻³	1,7 · 10 ⁻⁴	870	35,1	"
	OW 1 K	"	"	"	"	1,12 · 10 ⁻³	2,2 · 10 ⁻⁴	762	"	SUPERPOSITION W(u,r/β), WALTON HANTUSH
E-100	PW 1 K	SUPERIEUR ET INFERIEUR	15,12 · 10 ⁻³	3000	28/5/69	2,03 · 10 ⁻³			36,6	As / Log t
E-97	E-97	"	6,82 · 10 ⁻³	21 680	30/9/70	4,28 · 10 ⁻³			56,4	"
	E-97	"	"	"	"	4,18 · 10 ⁻³			"	REMONTEE DE THEIS
A-13	A-13	"	26,52 · 10 ⁻³	6000	15/7/70	1,73 · 10 ⁻³			41,15	As / Log t
	A-13	"	"	4500	"	"			"	REMONTEE DE THEIS

. la transmissivité de la couche aquifère supérieure varie entre $5,32 \cdot 10^{-4}$ m²/s (puits SU-137) et $5,70 \cdot 10^{-3}$ m²/s (puits SW25).

. la transmissivité de la couche aquifère inférieure est de l'ordre de $1,12 - 1,14 \cdot 10^{-3}$ m²/sec (puits SW280WIK)

. la transmissivité de l'ensemble du Groupe de Koweit varie entre $1,73 \cdot 10^{-3}$ (puits A-13) et $7,94 \cdot 10^{-3}$ (puits SW250W3K)

. la valeur du coefficient d'emmaganement de la couche aquifère supérieure varie entre $2,9 \cdot 10^{-4}$ (puits SU 137) et $3,3 \cdot 10^{-3}$ (puits SW250W3K).

. la valeur du coefficient d'emmaganement de la couche aquifère inférieure est de l'ordre de $1,7 - 2,2 \cdot 10^{-4}$ (puits SW280W1K).

7.2. FORMATION DE DAMMAM

7.2.1. CARTE PIEZOMETRIQUE

La Fig. 7-2 représente la carte piézométrique de la Formation de Dammam. On y constate, comme c'est le cas dans le Groupe de Koweit que la charge diminue vers le Nord-Est, ce qui montre que le sens de l'écoulement des eaux souterraines dans cette Formation est dans la même direction. Cette image de l'écoulement est générale, mais on peut avoir des variations locales par suite de différences de perméabilité.

Dans l'état initial, c'est à dire en dehors des influences induites par l'exploitation des eaux souterraines, la surface piézométrique de la Formation de Dammam est généralement plus élevée que celle du Groupe de Koweit. Néanmoins, il y a des aires où le phénomène est inversé. Dans les aires où la zone siliceuse du toit de la Formation de Dammam est absente ou fracturée, l'eau souterraine peut s'infiltrer, vers le haut, de la Formation de Dammam au Groupe de Koweit susjacent. Quand la charge de la Formation de Dammam est suffisamment réduite par le pompage de l'exploitation, le sens de l'écoulement est inversé.

7.2.2. TRANSMISSIVITE

La Formation de Dammam, étant un milieu aquifère calcaire karstifié, montre des variations considérables de transmissivité. Dans le tableau 7-3, on présente les valeurs de la transmissivité déterminées à partir des essais de pompage interprétés en employant des méthodes différentes. On y constate que la gamme des valeurs de la transmissivité varie entre $0,32 \cdot 10^{-3}$ (puits SW5 au Koweit sud-ouest) et $29,19 \cdot 10^{-3}$ m²/s au Wafra (puits WW1). Il va de soi que ces valeurs de la transmissivité ne concernent que l'épaisseur pénétrée par le forage. Sur la Figure 7-3, on présente la carte de la transmissivité effective (YILDER SHENAY 1979) qui représente de façon très générale la répartition de la transmissivité de l'épaisseur totale de la Formation de Dammam dans la plus grande partie du Sud Ouest de Koweit.

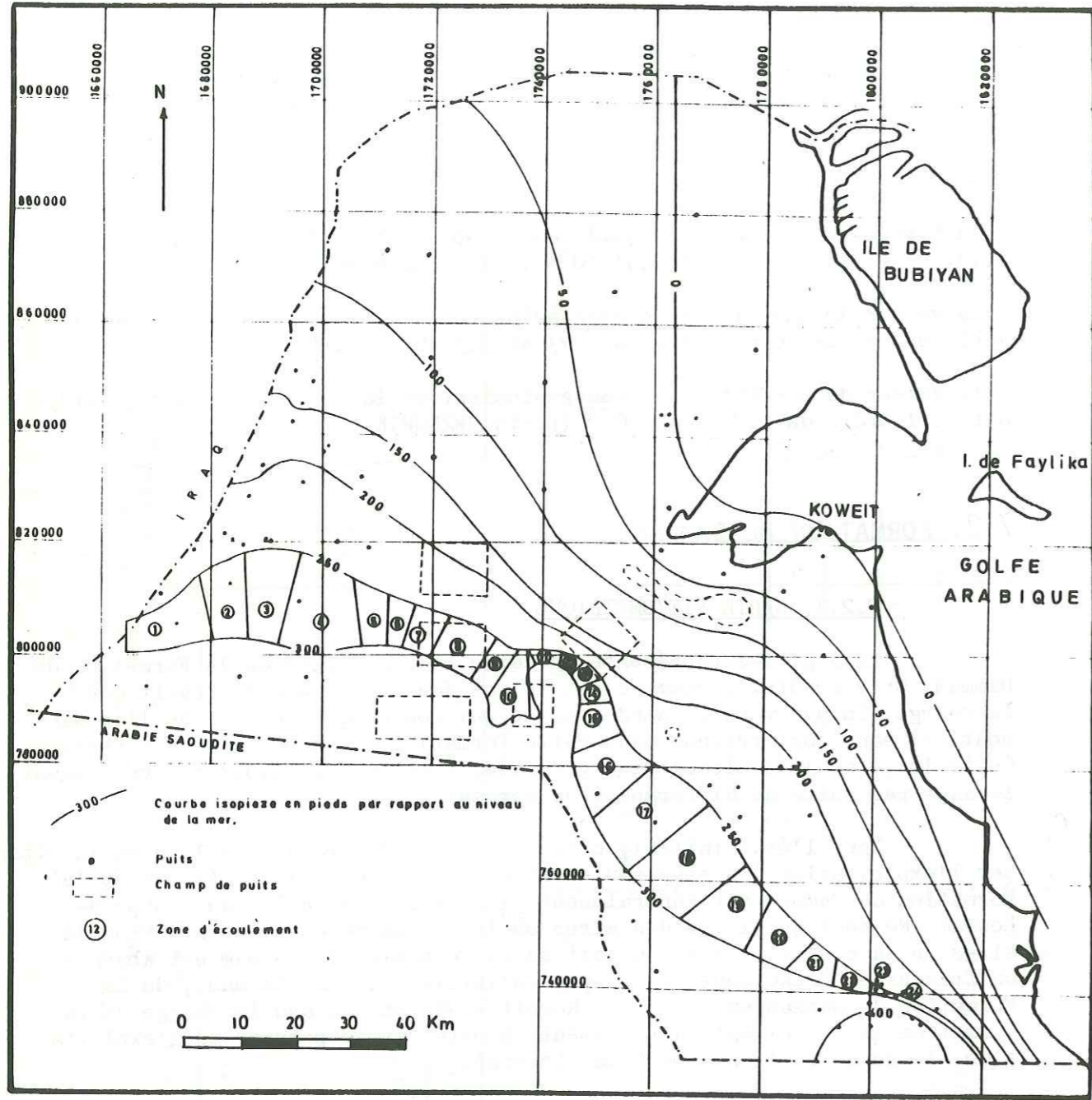


FIG. 7-2- Carte piézométrique de la Formation de Dammam (D'après la carte du S.E.S. 1972).

TABLEAU 7-3
COEFFICIENTS HYDRAULIQUES DE LA FORMATION DE DAMMAM
KOWEIT SUD OUEST

SITUATION	PUITS	COUCHE AQUIFERE	DEBIT $\frac{m^3}{sec} \times 10^3$	DUREE D'ESSAI EN MINUTES	DATE	TRANSMISSIVITE $\frac{m^2}{sec} \times 10^{-3}$	COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT $\times 10^4$	COEFFICIENT EPAISS EUR LIBRE EN METRES	METHODE
SW-2	PW 1	MEMBRE III	8,87	16000	11/2/69	1,18		54,0	DROITE $\Delta s / \text{Log } t$, JACOB
	OW 1	"				1,21		58,5	
SW-3	PW 1	"	11,37	20000	13/1/69	5,26		54,9	REMONTÉE DE THEIS
	"	"				"		"	$\Delta s / \text{Log } t$, JACOB
SW-5	PW 1	"	7,58	3000	29/7/67	0,32		61,0	REMONTÉE DE THEIS
	OW 1	"		"		"		"	$\Delta s / \text{Log } t$, JACOB
	"	"		"		0,33	3,4	"	REMONTÉE DE THEIS
SW-6	PW 1	"	9,62	"	6/7/67	0,41		84,9	SUPERPOSITION H(U, ρ), HANTUSH
	OW 1	"		"		"		42,7	$\Delta s / \text{Log } t$, JACOBI
SW-7	PW 1	MEMBRES III & II	9,24	600	18/2/62	1,73		112,8	"
	"	"		"		"		"	"
SW-8	PW 1	"	8,49	2000	10/6/67			61,0	REMONTÉE DE THEIS
	OW 1	"		"		0,79		"	$\Delta s / \text{Log } t$ JACOBI
SW-11	PW 1	"	15,31	15 430	18/11/68	1,05		126,5	"
	"	"		"		"		"	REMONTÉE DE THEIS

SITUATION	PUITS	COUCHES AQUIFERES	DEBIT m ³ /sec x 10 ³	DUREE D'ESSAI EN MINUTES	DATE	TRANSMISSIVITE m ² /sec x 10 ⁻³	COEFFICIENT D'EMMAGA- SINEMENT x 10 ⁴	EPAISS- EUR LIBRE EN METRES	METHODE
SW-13	PW 1	MEMBRES III, II & I	30,31	10500	2/1/69	2,61		171,6	Δs / Log t, JACOB REMONTEE DE THEIS
SW-15	∕	MEMBRES III & II	∕	2150	2/11/69	1,30		128,0	Δs / Log t JACOBI REMONTEE DE THEIS
SW-16	∕	∕ ∕ ∕	∕	3700	29/6/68	T ₁ = 2,64 T ₂ = 1,52		158,8	Δs / Log t, JACOBI REMONTEE DE THEIS
SW-18	∕	∕ ∕ ∕	∕	15330	3/2/69	T ₁ = 2,64 T ₂ = 1,47		145,7	Δs / Log t, JACOB REMONTEE DE THEIS
SW-19	∕ OW 1 PW1 & OW1	∕ ∕ ∕ ∕ ∕ ∕ ∕ ∕ ∕	31,83	10000	17/8/69	1,64	60	149,3 163,1	Δs / Log t, JACOB ∕ ∕ ∕ REMONTEE DE THEIS
SW-20	PW 1	MEMBRES III, II & I	13,26	∕	9/1/69	T ₁ = 2,66, T ₂ = 1,33		178,9	Δs / Log t, JACOB REMONTEE DE THEIS
SW-24	PW 1 L PW 1L, OW1L, OW2L & OW3L OW 1 L OW 2 L OW 3 L	MEMBRES III & II ∕ ∕ ∕ ∕ ∕ ∕ ∕ ∕ ∕ ∕ ∕ ∕	5,84	14500	19/1/69	T _e = 0,47 ∕ 0,5 0,49	432 547 890	160 ∕ ∕ ∕	Δs / Log t JACOBI REMONTEE DE THEIS Δs / Log t JACOBI ∕ ∕ ∕ ∕ ∕ ∕
SW-25	PW1 L OW1 L OW2 L OW3 L	∕ ∕ ∕ ∕ ∕ ∕ ∕ ∕ ∕ ∕ ∕ ∕	15,16	20000	7/4/69	T _e = 0,61 ∕ ∕ 0,63	7,0 6,1 5,7	152,4 ∕ 153,9 155,4	Δs / Log t, JACOB ∕ ∕ ∕ ∕ ∕ ∕ ∕ ∕ ∕
SW-26	PW1L & OWL	∕ ∕ ∕	30,31	6000	2/5/69	2,74		134	REMONTEE DE THEIS

175

SITUATION	PUITS	COUCHES AQUIFERES	DEBIT m ³ /sec x 10 ³	DUREE D'ESSAI x 10 ³ MINUTES	DATE	TRANSMISSIVITE m ² /sec x 10 ³	EPPAISSEUR LIBRE EN METRES	METHODE (1) Δs / Log t JACOB (2) REMONTEE DE THEIS
F-15	PW	MEMBRE III & II	28,04	2	13/11/71	16,83	130,4	(1) (2)
B-16	∕	∕ ∕ ∕	11,37	1,4	13/12/70	0,45	109,7	(1) (2)
B-27	∕	∕ ∕ ∕	13,87	11	10/9/71	2,14	114	(1) (2)
B-44	∕	∕ ∕ ∕	18,94	20	19/10/71	1,75	∕	(1) (2)
B-45	∕	∕ ∕ ∕	45,45	17	19/4/71	4,28	109,7	(1) (2)
B-104	∕	MEMBRES III, II & I	30,31	15	∕	1,73	158,5	(1) (2)
B-114	∕	∕ ∕ ∕	26,52	14	18/12/71	2,28	153,6	(1) (2)
B-117	∕	∕ ∕ ∕	34,55	12,5	5/11/71	20,71	142,3	(1) (2)
C-19	∕	MEMBRES III & II	41,68	11	1/6/71	5,70	102,7	(1)
C-29	∕	∕ ∕ ∕	45,46	20	28/4/71	62,14	128,0	(1) (2)
C-30	∕	∕ ∕ ∕	30,31	8,5	8/9/71	2,47	108,2	(1) (2)
C-32	∕	∕ ∕ ∕	45,46	14	25/4/70	12,95	88,39	(1) (2)
C-105	∕	∕ ∕ ∕	24,25	8,5	26/12/71	7,68	131,1	(1)
C-112	∕	∕ ∕ ∕	22,73	5	20/1/72	4,71	161,5	(1)

176

SITUATION	PUITS	COUCHES AQUIFERES	DEBIT $m^3/sec \times 10^3$	DUREE DESSAI $x 10^3$ MINUTES	DATE	TRANSMISSIVITE $m^2/sec \times 10^{-3}$	EPAISSEUR LIBRE EN METRE	METHODE (1) $\Delta s / \log t$, JACOB. (2) REMONTEE DE THEIS (3) JACOB LOHMAN, PUIITS JAISSANT
WAFRA	WW 1	MEMBRES III et II	295,55	10	19/5/74	19,33	32,0	(3)
	WW 2	"	"	"	"	20,19	"	(2)
	WW 3	"	318,25	24,2	2/1/75	18,30	97,2	(3)
	WW 4	"	"	"	"	19,50	"	(2)
	WW 7	MEMBRES III II & I	20,45	12	29/1/75	1,62	172,8	(1)
	GR 1	MEMBRES III & 2	27,88	"	19/2/75	1,59	199,0	(1)
	GR 2	MEMBRES III, II & I	11,37	0,33	28/4/75	0,80	179,8	(1)
GRAYA	GR 1	"	9,85	1,46	13/10/75	21,06	178,3	(1)
	GR 2	"	7,20	1,9	24/12/75	16,92	"	(2)
	GR 3	"	6,24	2,5	17/1/76	1,45	166,7	(1)
	"	"	"	"	"	1,44	"	(2)
	"	"	"	"	"	3,37	156,1	(1)
	"	"	"	"	"	"	"	(2)

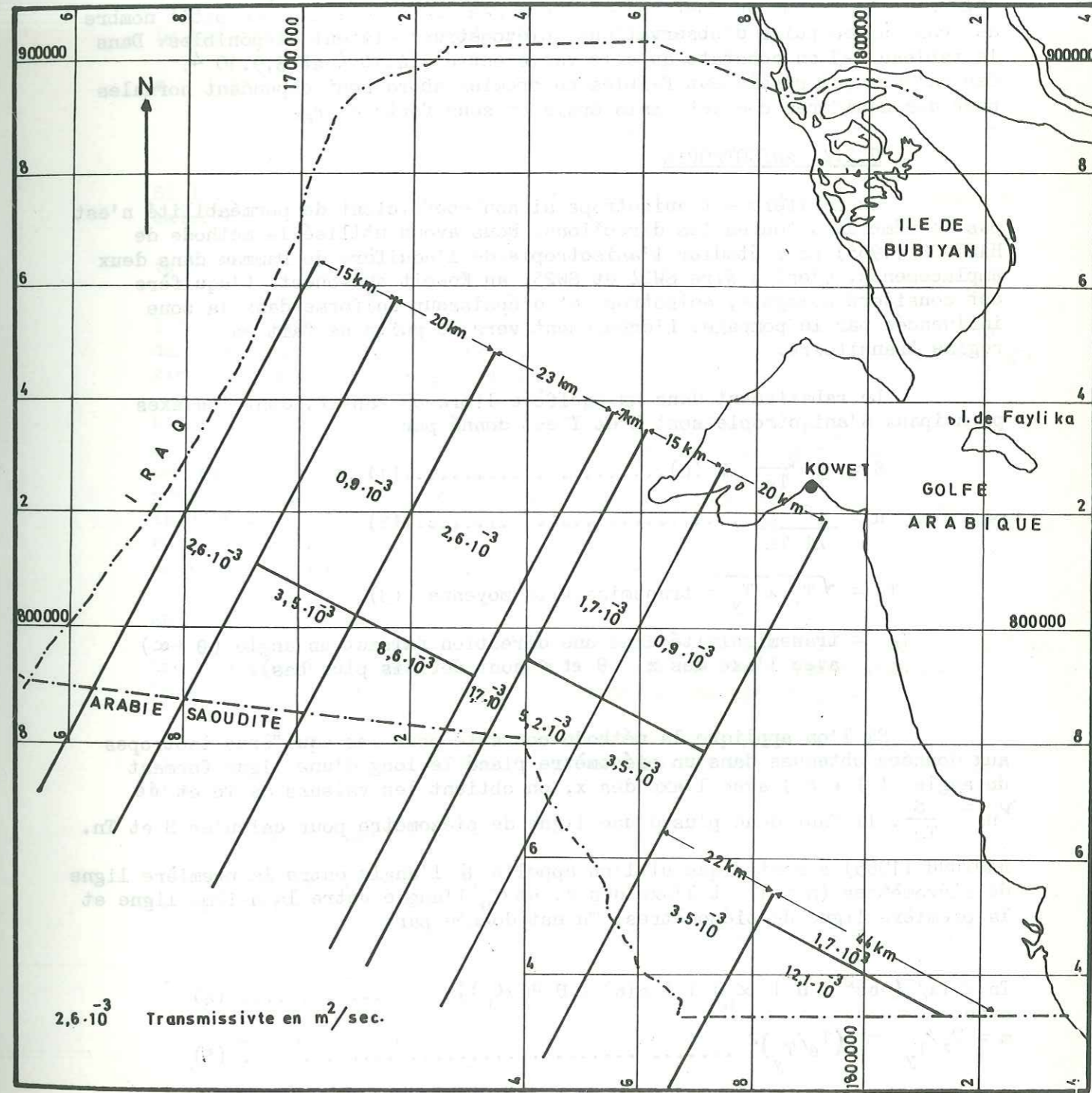


FIG.73-Zones de transmissivité moyenne de la Formation de Dammam
(D'après Dr. Yilder Shenay, 1979)

7.2.3. COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT

Parceque la plupart des mesures du rabattement et de la remontée des pompages d'essai a été effectuée dans les puits de pompage, on n'a déterminé la valeur du coefficient d'emmagasinement que dans un petit nombre de cas où des puits d'observations (piézomètres) étaient disponibles. Dans le tableau 7-3 on constate qu'elle varie entre $2,4 \cdot 10^{-4}$ et $8,9 \cdot 10^{-4}$. Ces valeurs qui paraissent faibles au premier abord sont cependant normales pour des aquifères compacts mais épais et sous forte charge.

7.2.4. ANISOTROPIE

Un aquifère est anisotrope si son coefficient de perméabilité n'est pas le même dans toutes les directions. Nous avons utilisé la méthode de HANTUSH (1965) pour étudier l'anisotropie de l'aquifère de Dammam dans deux emplacements, c'est à dire SW24 et SW25, au Koweit sud-ouest. L'aquifère est considéré homogène, anisotrope et d'épaisseur uniforme dans la zone influencée par le pompage. L'écoulement vers le puits se fait en régime transitoire.

Le rabattement dans un aquifère libre où captif, dont les axes principaux d'anisotropie sont X et Y est donné par

$$S = \frac{Q}{4 T_e} W(u) \dots \dots \dots (1)$$

où $u = \frac{r^2 S}{4t T_n} \dots \dots \dots (2)$

$$T_e = \sqrt{T_x \times T_y} = \text{transmissivité moyenne} \quad (3)$$

T_n = transmissivité dans une direction faisant un angle $(\theta + \alpha)$ avec l'axe des x (θ et α sont définis plus bas).

Si l'on applique la méthode courante pour les aquifères isotropes aux données obtenues dans un piézomètre placé le long d'une ligne formant un angle $(\theta + \alpha)$ avec l'axe des x, on obtient les valeurs de T_e et de $\nu_n = \frac{S}{T_n}$. Il faut donc plus d'une ligne de piézomètre pour calculer S et T_n .

HAUTUSH (1965) a montré que si l'on appelle θ l'angle entre la première ligne de piézomètres ($n = 1$) et l'axe des x, et α_n l'angle entre la n-ième ligne et la première ligne de piézomètres, T_n est donnée par:

$$T_n = T_x / (\cos^2(\theta + \alpha_n) + m \sin^2(\theta + \alpha_n)) \dots \dots \dots (4)$$

avec $m = T_x / T_y = (T_e / T_y)^2 \dots \dots \dots (5)$

comme $\alpha_1 = 0$ pour la première ligne de piézomètres, l'équation (4) se

réduit dans ce cas à

$$T_1 = T_x / (\cos^2 \theta + m \sin^2 \theta) \dots \dots \dots (6)$$

et par conséquent

$$a_n = \frac{T_1}{T_n} = \frac{\cos^2(\theta + \alpha_n) + m \sin^2(\theta + \alpha_n)}{\cos^2 \theta + m \sin^2 \theta} \dots \dots \dots (7)$$

Il va sans dire que $a_1 = 1$

La combinaison des équations (5) et (7) donne:

$$m = \left(\frac{T_e}{T_y}\right)^2 = \frac{a_n \cos^2 \theta - \cos^2(\theta + \alpha_n)}{\sin^2(\theta + \alpha_n) - a_n \sin^2 \theta} \dots \dots \dots (8)$$

Si l'on dispose de trois lignes de piézomètres, l'équation (7) permet de calculer

$$\text{tg}(2\theta) = \frac{-2(a_3 - 1) \sin^2 \alpha_2 - (a_2 - 1) \sin^2 \alpha_3}{(a_3 - 1) \sin^2 \alpha_2 - (a_2 - 1) \sin^2 \alpha_3} \dots \dots \dots (9)$$

L'équation (9) a deux solutions pour 2θ , comprises entre 0 et 2π dans le plan xy. Si l'une des solutions vaut δ , l'autre vaudra $(\delta + \pi)$. Ainsi θ a deux valeurs possibles: $\delta/2$ et $\delta + \pi/2$.

L'une des deux valeurs correspond à $m < 1$, l'autre à $m > 1$. Puisqu'on a supposé que l'axe des x était celui de la plus grande transmissivité la valeur de θ correspondant à $m = T_x / T_y > 1$ donne la position de la première ligne par rapport à l'axe des x, tandis que l'autre valeur donnera elle par rapport à l'axe des y, correspondant à la plus faible transmissivité. Une valeur négative de θ indique que l'axe des x positifs se trouve à gauche de la première ligne de piézomètres.

Anisotropie au SW24

A l'emplacement de SW24, nous avons un puits de pompage (PWIL) et trois piézomètres (OWIL, OW2L, OW3L) qui se trouvent aux distances de 188, 122 et 61 m respectivement du puits de pompage (Fig.7-4).

Nous avons utilisé la méthode de JACOB pour calculer T_e dans chaque piézomètre. Ainsi on a obtenu trois valeurs qui sont à peu près identiques (fig. 7-4)

$$T_e = 0,49 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec.}$$

E galement, nous avons employé la méthode de JACOB pour calculer la valeur de

$$\nu_n = \frac{T_n}{S} \text{ dans chaque piézomètre en employant la formule}$$

$$\nu = r^2 / 2.25 t_0. \text{ Ainsi on a obtenu les valeurs}$$

- $\nu_1 = 1.16 \text{ m}^2/\text{s}$
- $\nu_2 = 0.90 \text{ "}$
- $\nu_3 = 0.55 \text{ "}$

A l'aide de ces valeurs, on a calculé les rapports $a_2 = 1.29$ et $a_3 = 2.1$. Connaissant $\alpha_2 = 45^\circ$ et $\alpha_3 = 90^\circ$, on a calculé $\theta = -12,65^\circ$

avec l'équation (9). Donc l'axe des x positifs se trouve dans la direction N $32,35^\circ$ E.

Nous avons porté les valeurs de $\theta = 12.65^\circ$, $T_e = 0,49 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, $x_2 = 45$ et $a_2 = 1.29$ dans l'équation (8). Ainsi on a obtenu la valeur de $m = 1.46$.

A l'aide de l'équation (5) on a calculé les valeurs de $T_x = 0,59 \cdot 10^{-3}$ et $T_y = 0,40 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$.

En portant des valeurs de T_x , m et θ ainsi que des valeurs de $\alpha_1 = 0$, $\alpha_2 = 45^\circ$ et $\alpha_3 = 90^\circ$ dans l'équation (4) on a calculé

$$T_1 = 0,58 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}.$$

$$T_2 = 0,33 \cdot 10^{-3} \text{ "}$$

$$T_3 = 0,41 \cdot 10^{-3} \text{ "}$$

En combinant ces résultats avec les valeurs de ν_1 , ν_2 et ν_3 on a déduit trois valeurs de S (4,8, 3,6 et $7,2 \cdot 10^{-4}$) qui donnent la valeur moyenne de $S = 5,2 \cdot 10^{-4}$.

Anisotropie au SW 25

A cet emplacement nous avons un puits de pompage (PW 1L) et trois piézomètres (OW1L, OW2L, et OW3L) qui sont répartis dans trois directions aux distances 187,87, 121,91 et 60.96 m respectivement du puits de pompage (Fig. 7-5). En employant la même technique ci-dessus, on déduit:

$$T_e = 0,61 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}.$$

$$V_1 = 1,94 \text{ m}^2/\text{sec}.$$

$$V_2 = 1,00 \text{ m}^2/\text{sec}.$$

$$V_3 = 1,10 \text{ m}^2/\text{sec}.$$

$$a_1 = 1$$

$$a_2 = 1,93 \text{ m}^2/\text{sec}.$$

$$a_3 = 1,76 \text{ m}^2/\text{sec}.$$

$$\theta = 17.95^\circ \text{ (c'est à dire que la direction des x positifs se trouve dans la direction N } 12.05^\circ\text{W).}$$

$$\alpha_1 = 0$$

$$\alpha_2 = 45^\circ$$

$$\alpha_3 = 90^\circ$$

$$m = 2.50$$

$$T_x = 0,97 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}.$$

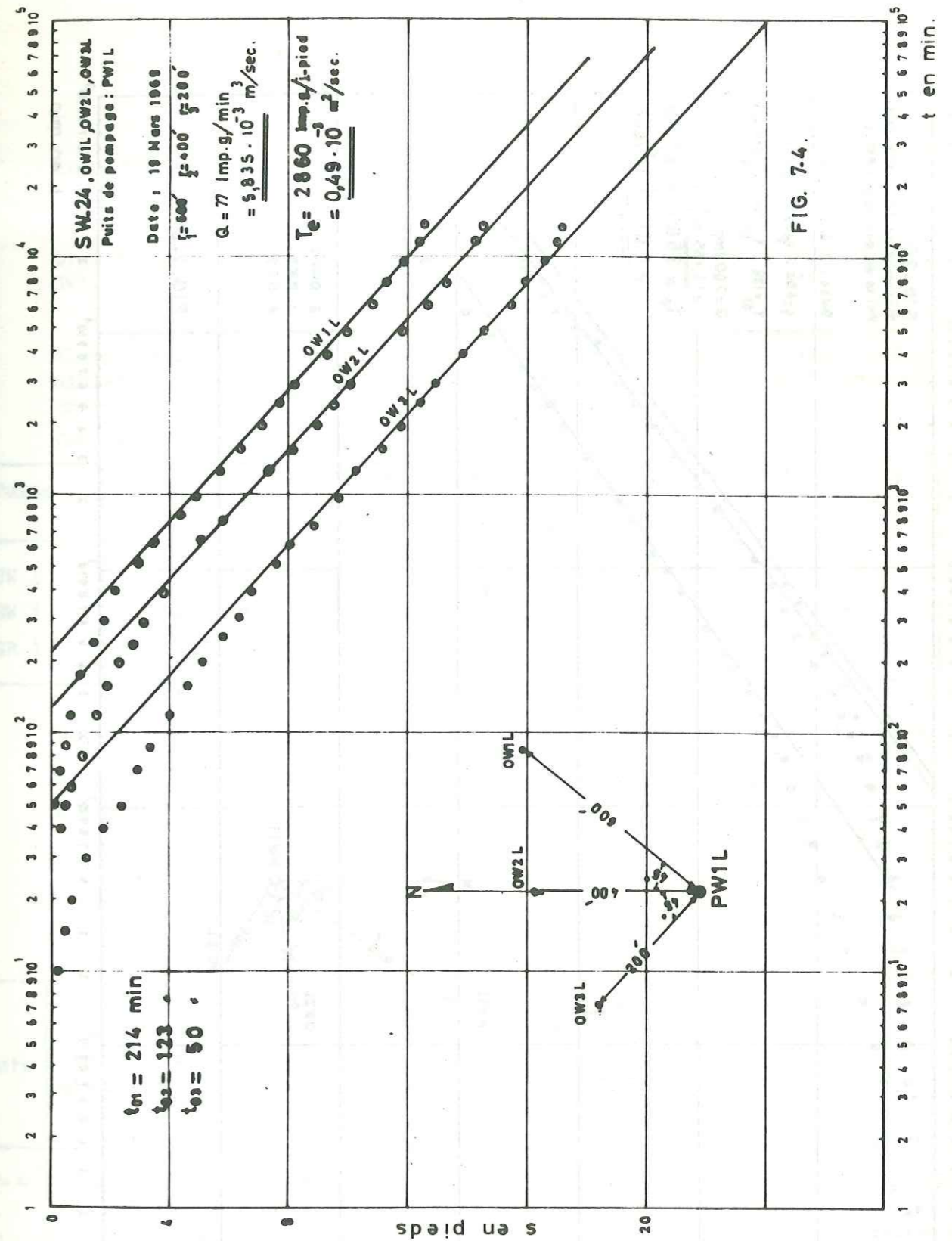
$$T_y = 0,39 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}.$$

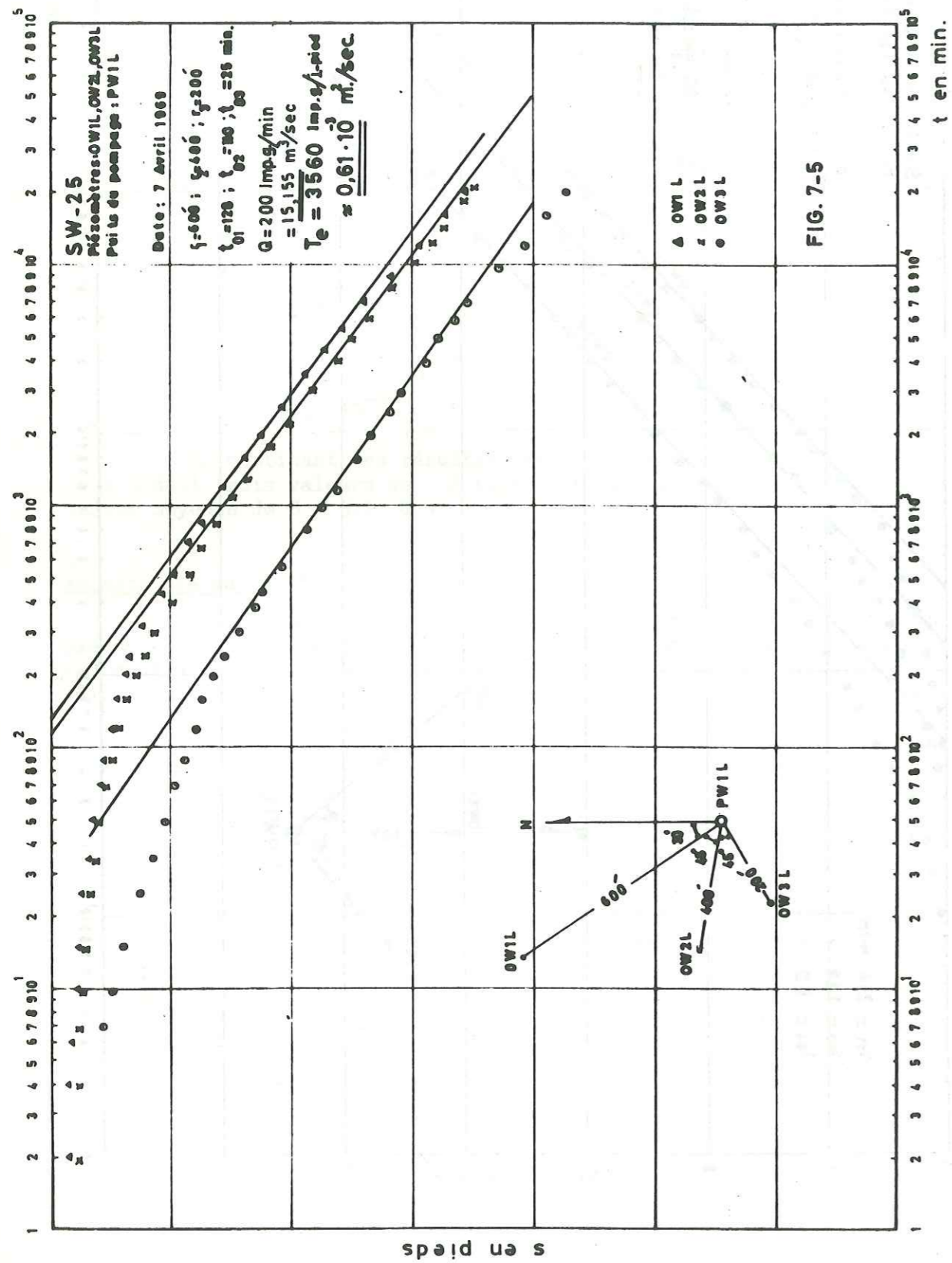
$$T_1 = 1,03 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}.$$

$$T_2 = 0,44 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}.$$

$$T_3 = 0,41 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}.$$

$$S = 3,41 \cdot 10^{-4}$$





7.3. FORMATION D'UMM AL RADHUMA

Les données disponibles sur les caractères hydrauliques de la Formation d'Umm-Al-Radhuma sont celles qu'on a obtenues à partir des forages SW1, SW4 et GR1 (Fig.5-5) au Koweït Sud.Ouest.

Le niveau piézométrique de la Formation d'Umm Al Radhuma est plus élevé que celui de la Formation de Dammam (Tableau 7-4). Les données disponibles ne permettent pas d'établir la direction de l'écoulement, mais on croit que celle-ci doit être également vers le Nord-Est.

Tableau 7-4

Puits	Altitude du sol en m.	Niveau piézométrique au-dessus du niveau de la mer en m.		Différence du niveau en m.
		Dammam	Umm-Al-Radhuma	
SW 4	278.88	101.12	182.57	81.45
SW 1	257.49	95.66	182.63	86.97
GR 1	197.90	89.29	132.06	42.77

Dans le tableau 7-5, on présente les données des pompages d'essai à débit constant qu'on a effectués dans les trois puits. Les valeurs des coefficients d'emménagement n'ont pas été déterminées à cause de l'absence de piézomètres.

Tableau 7-5

Puits	Débit en m ³ /sec · 10 ⁻³	Durée d'essai en minutes · 10 ³	date	Transmissivité en m ² /sec · 10 ⁻³	Profondeur de la zone essayée en m. au dessous du sol	Epaisseur en mètres	Méthode
SW-4	5,3	4	15/11/73	0,16	595 - 777	182	Δs / Logt Jacob, rabattem.
∕	∕	5,94	∕	∕	∕	∕	∕ ∕ ,remontée
∕	∕	∕	∕	∕	∕	∕	Theis ∕
SW-1	5,3	2,4	7/7/73	0 11	599 792	193	Δs / Logt de Jacob
GR-1	2,43	2 23	15 11 75	0 10	543 695	152	∕ ∕ ∕ ∕ rabt
∕	∕	∕	∕	∕	∕	∕	Remontée de Theis

7.4. CALCUL DE LA MIGRATION DE L'EAU SOUTERRAINE DANS LA FORMATION DE DAMMAM

A partir de la carte piézométrique de la Formation de Dammam (Fig.7-2) et de la carte des zones de transmissivité (Fig.7-3), nous avons essayé d'estimer approximativement la quantité d'eau souterraine qui traverse latéralement la Formation de Dammam le long du côté sud-ouest de Koweït. Dans ce but, nous avons utilisé les deux courbes isopièzes de 300 et de 250 pieds. On a subdivisé l'aire entre ces deux courbes en petites zones. Pour chaque zone, on a déterminé un gradient hydraulique moyen et une largeur moyenne (voir la Fig. 7-2 et le tableau 7-6).

Nous avons calculé la quantité totale de la migration latérale par l'équation

$$Q_T = \sum_{n=1}^{n=24} Q_n = \sum_{n=1}^{n=24} L_n T_n \frac{dh_n}{dx_n} \dots\dots\dots (10)$$

où Q_T = Quantité totale de la migration latérale des eaux souterraines à travers la Formation de Dammam.

Q_n = Quantité de la migration latérale à travers la n-ième zone.

L_n = Largeur de la n-ième zone.

$\frac{dh_n}{dx_n}$ = Gradient hydraulique de la n-ième zone.

En conséquence(voir tableau 7-6):

$$Q_T = 168\,838 \text{ m}^3/\text{jour} \approx 169\,000 \text{ m}^3/\text{jour}$$

Il faut noter que notre estimation de Q_T est très approximative en raison de l'absence de données dans plusieurs aires. De plus, on croit qu'elle est un peu basse, car nous avons utilisé dans notre calcul un gradient hydraulique un peu réduit par suite de la drainance qui se fait vers le haut depuis la Formation de Dammam vers le Groupe de Koweït à travers les couches semi-perméables qui se trouvent entre les deux aquifères.

Tableau 7-6

ZOné n	Gradient hydraulique x10 ⁻³	Largeur en m.	Transmissivité en m ² /Jour	Qn en m ³ / Jour
1	1,93	15 450	298.20	8 911
2	1,12	7 580	"	2 526
3	0,91	7 730	"	2 089
4	0,99	12 420	"	3 652
5	1,46	5 455	"	2 371
6	1,77	3 939	"	2 074
7	1,93	6 061	372.75	4 370
8	1,73	8 788	"	5 681
9	1,80	4 545	149.10	1 217
10	1,17	5 455	"	951
11	8,38	5 455	223,65	33 550
12	5,59	3 788	"	4 734
13	4,57	3 485	"	3 563
14	6,29	3 636	"	5 112
15	2,29	7 273	298.2	4 958
16	1,36	9 697	"	3 930
17	0,87	11 520	"	2 979
18	0,85	12 727	"	3 235
19	1,23	9 697	223.65	2 660
20	1,68	9 394	"	3 522
21	2,65	6 818	"	4 036
22	4,57	7 121	149.10	4 854
23	10,06	2 727	"	4 089
24	16,76	21 515	"	53 774
			Qn	168 838

7.5. ETUDE QUANTITATIVE DU CHAMP DE PUIITS "B"

Dans le but de présenter un exemple d'étude quantitative des champs de puits de Koweït, nous avons choisi le champ B qui représente assez bien le système aquifère au Koweït Sud-Ouest où un grand projet d'exploitation des eaux souterraines a été entrepris par l'Etat de Koweït.

Le champ de puits "B" se trouve sur une aire carrée de $7,5 \times 7,5 = 56,5 \text{ km}^2$. Il est avoisiné par les champs de puits "C" à l'Ouest, "A" au Nord-Est et "D" et "E" au Nord Ouest (Fig. 7-6). Le centre de champ "B" se trouve au point E 1 735 750, N 790 125 (Coordonnées Lambert). Il consiste en 16 puits qui sont répartis en carrés à $2,5 \text{ km}$ l'un de l'autre. Quatorze de ces puits sont construits dans la Formation de Dammam et forés jusqu'au membre I de celle-ci. Les deux autres puits, c'est à dire B-26 et B-35 sont construits dans l'ensemble du Groupe de Koweït et la Formation de Dammam sous-jacente, avec des crépines en face des zones perméables dans le Groupe de Koweït et un trou ouvert dans la Formation de Dammam (Tableau 7-7).

7.5.1. SYSTEME AQUIFERE

Sur la Figure 5-18, les quatre puits B-44, B-45, F-15 et B-115 fournissent une coupe hydrologique représentant le système aquifère du champ "B". On y constate que le Groupe de Koweït se divise en deux couches aquifères (supérieure et inférieure) séparée par une couche semi-perméable (aquitarde). Des couches perméables ou semipermeables d'épaisseur variée se trouvent dans n'importe laquelle de ces couches aquifères ou aquitarde. L'ensemble de l'argile sableuse, de la base du Groupe de Koweït et la zone siliceuse du toit de la Formation de Dammam forment une zone qui est relativement semipermeable. De plus, le niveau piézométrique montré est celui de la Formation de Dammam. Le niveau piézométrique du Groupe de Koweït est généralement moins haut que celui de la Formation de Dammam d'environ 6 à 12 mètres. Sur la Figure 7-7 on présente un dessin de la construction d'un puits typique du champ "B".

7.5.2. POMPAGES D'ESSAI ET COEFFICIENTS HYDRAULIQUES

Parceque tous les puits dans le champ "B" ont été prévus comme puits de pompage pour l'exploitation, sans avoir aucun piézomètre, on a été obligé de prendre les mesures de rabattement et de la remontée dans les puits de pompage. Ces mesures ne sont pas généralement bonnes pour déterminer les coefficients hydrauliques des couches aquifères. Néanmoins, les mesures de la remontée qu'on a prises après les pompages d'essai dans quelques puits nous ont permis de calculer des valeurs suffisantes de la transmissivité.

Sur la Figure 7-8, nous présentons la courbe de remontée du puits B-27 à partir de laquelle on a calculé la transmissivité = $2,14 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$. en employant la méthode de Remontée de Theis. Dans le tableau 7-3, nous avons présenté les valeurs de la transmissivité de la Formation de Dammam pour quelques puits du champ "B". Les courbes correspondant au rabattement et à la remontée sont présentées dans l'annexe III. Par conséquent on considère que la valeur de $3,45 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$ représente assez bien la transmissivité de la Formation de Dammam au champ "B". On doit signaler ici que

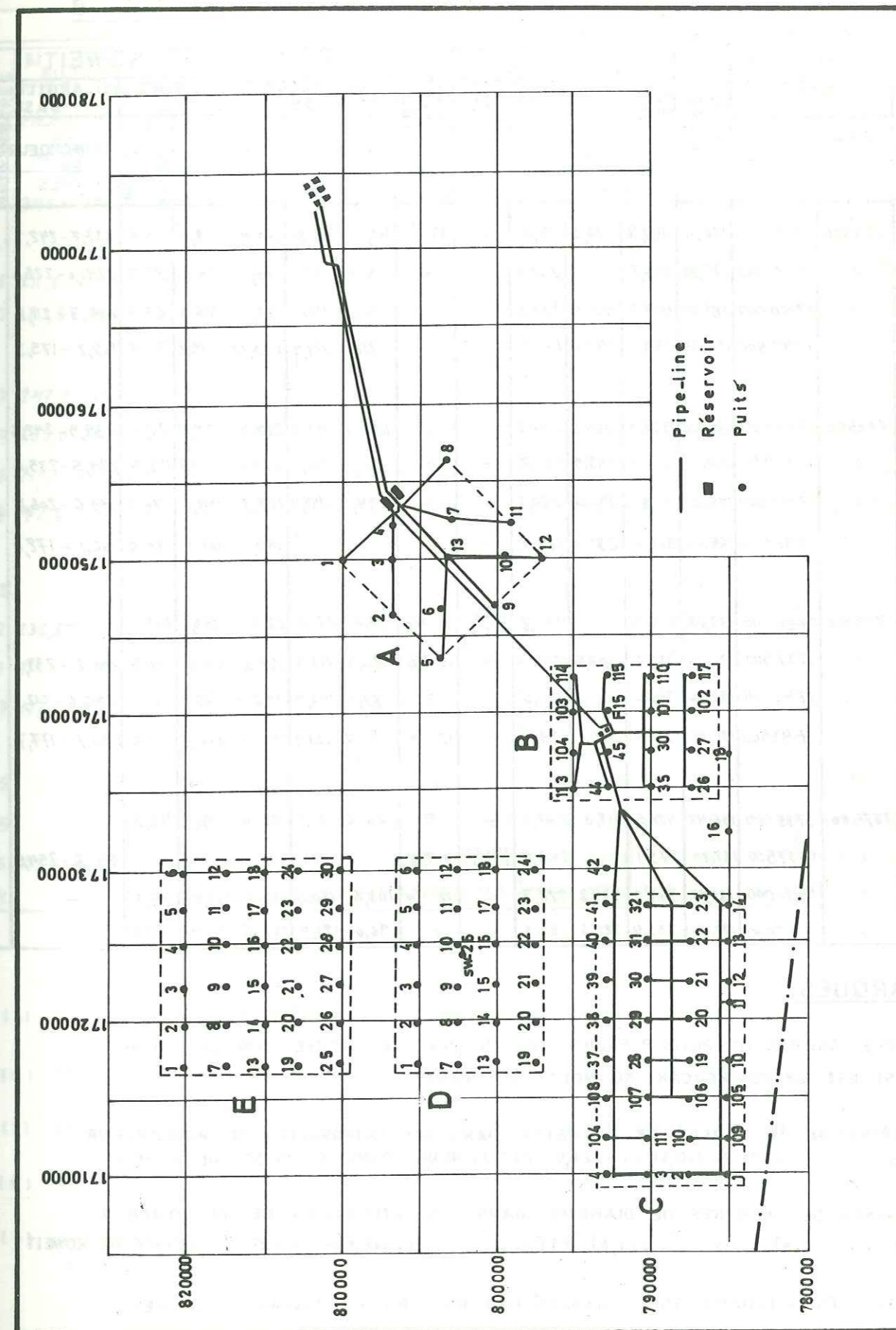


FIG. 7-6. — Disposition générale du projet de Shigaya au Koweït sud-ouest.

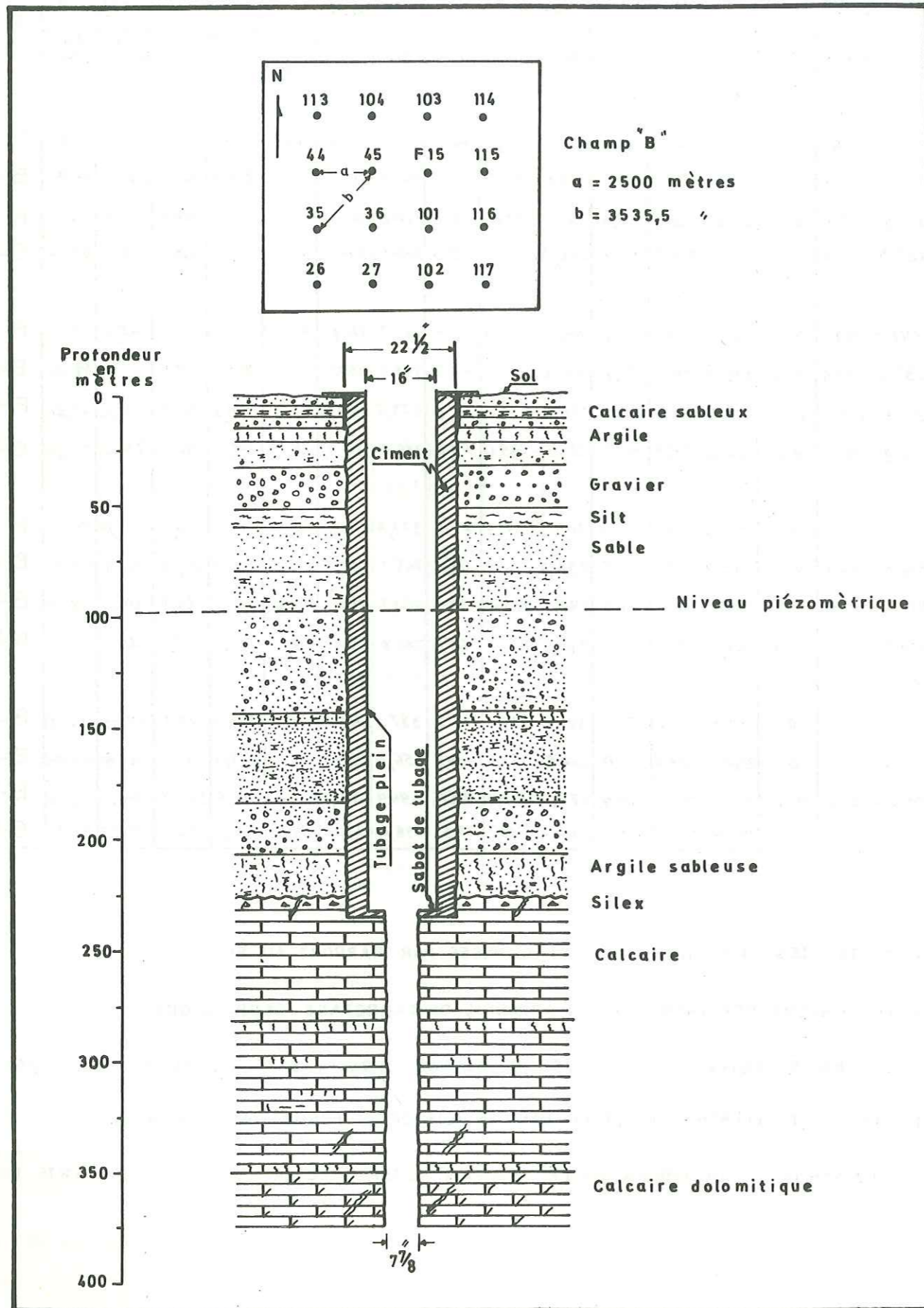
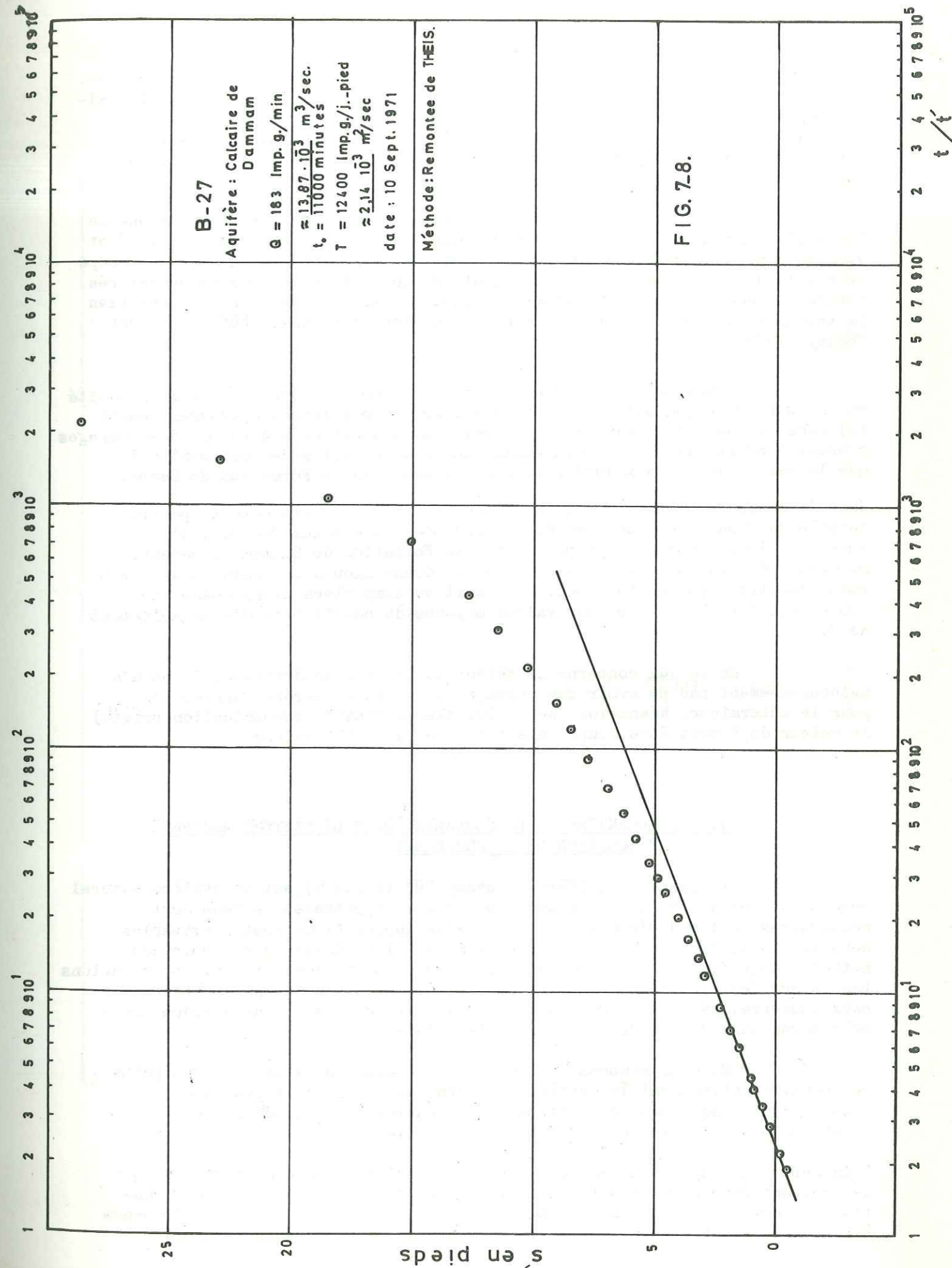


FIG.7-7. Dessin et construction d'un puits typique du champ "B".



quelques courbes des essais présentées dans l'annexe III ont plusieurs pentes. Par exemple, les courbes du puits B-117 (Figs.III-15 et III-16) indiquent clairement un adoucissement de la pente au milieu de la courbe, ce que nous interprétons comme une drainance depuis les blocs de calcaires fissurés pendant l'essai de pompage (Fig.III-15) et comme le remplissage des fissures pendant la remontée.

En ce qui concerne la transmissivité de l'ensemble du Groupe de Koweït, on constate dans le tableau 7-2 que celle-ci varie entre $1,73 \cdot 10^{-3}$ et $7,94 \cdot 10^{-3}$ m²/sec au Koweït sud-ouest. Comme les zones crépinées dans le Groupe de Koweït dans ces puits ne représentent que 40-60 % de son épaisseur saturée totale, on considère que la valeur de $3,45 \cdot 10^{-3}$ m²/sec. représente assez bien la transmissivité de l'ensemble du Groupe de Koweït au champ "B" (Dr Yilder Shenay, 1979).

Sans piézomètres dans le champ "B" nous n'avons pas la possibilité de calculer de façon satisfaisante la valeur du coefficient d'emmagasinement (S) dans ce champ là. Néanmoins, les valeurs de S obtenues à partir des pompages d'essai conduits dans plusieurs emplacements au Koweït sud-ouest montrent que la valeur de $S = 5 \times 10^{-4}$ représente assez bien la Formation de Damman

dans le champ "B". D'ailleurs, la valeur de $S \approx 10^{-3}$ représente la partie captive du Groupe de Koweït au Koweït sud-ouest (tableaux 7-2 et 7-3). Après une longue durée de pompage dans la Formation de Damman, l'ensemble du Groupe de Koweït sera influencé, ce qui donne lieu à un drainage de l'eau vers l'aquifère pompé. Le Groupe de Koweït se comportera alors comme une couche aquifère libre avec une valeur moyenne du coefficient d'emmagasinement de 0.01.

En ce qui concerne la valeur du facteur de drainance B, on n'a malheureusement pas pu avoir des pompages d'essais de durées suffisantes pour le déterminer. Néanmoins, selon Dr. YILDER SHENAY (communication privée) la valeur de B peut être comprise entre 1 500 et 4 500 mètres.

7.5.3. MECANISME DE L'ECOULEMENT DANS LE SYSTEME AQUIFERE ET EQUATION DE L'ECOULEMENT

Le système aquifère du champ "B" (Fig.7-9) est un système naturel complexe. Pour qu'on puisse le décrire, quelques hypothèses de base sont nécessaires. Selon HANTUSH (1970), de telles suppositions sont inévitables dans les investigations des eaux souterraines si on désire développer des méthodes pour faire des estimations, calculs et prévisions utiles. Des solutions basées sur des hypothèses simplificatives ont, dans plusieurs situations des eaux souterraines fait la preuve de leur valeur dans les mains d'hydrologues et d'ingénieurs du métier des eaux souterraines.

Si nous pompions de l'eau à débit constant à partir d'un puits qui pénètre entièrement le système aquifère, mais qui n'est pas ouvert dans la couche aquifère de la Formation de Damman, ce qui est le cas dans le champ "B", les phénomènes suivants auront lieu:

. Au début du pompage, l'eau pompée vient à partir des zones fracturées qui se trouvent généralement entre les milieux des membres I et II de la Formation de Damman. Ensuite, l'eau emmagasinée dans les blocs calcaires commence à fuir vers les fractures par suite de différence de charge entre eux;

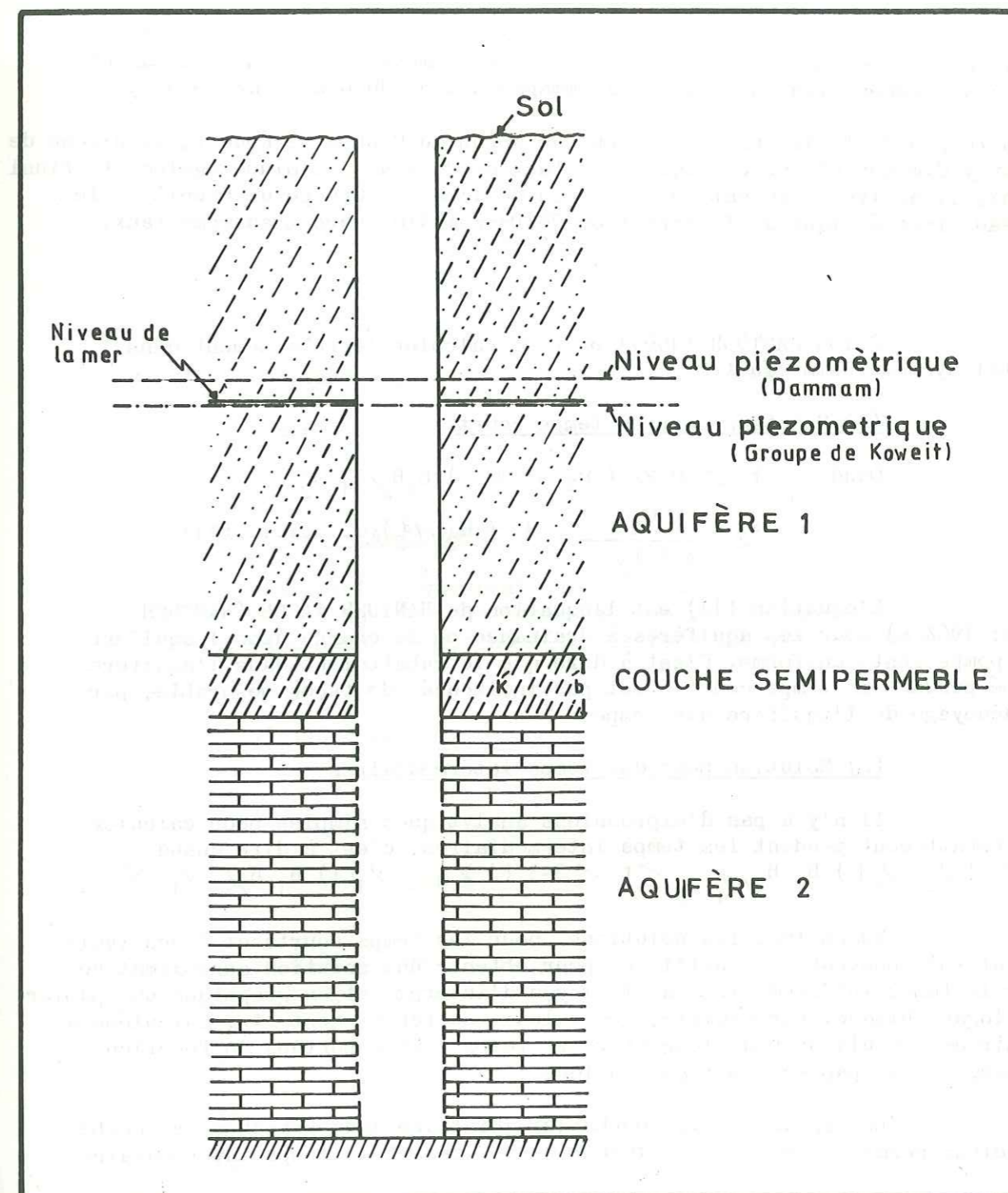


FIG. 7-9.— Schéma du système aquifère du champ "B"

. Quand le niveau de l'eau dans le Groupe de Koweit sera influencé, à cause du pompage à partir de la Formation de Damman, il y aura drainage de l'eau vers la Formation de Damman. L'eau pompée viendra alors de l'eau emmagasinée dans celle-ci et partiellement de la drainage du Groupe de Koweit à travers le milieu semiperméable situé entre eux;

. Quand le cône de dépression s'élargit, le taux de drainage augmentera et il arrive un moment où le régime de l'écoulement sera pseudo-permanent et l'eau pompée viendra alors de l'emmagasinement du Groupe de Koweit;

. En raison de la drainage continue de l'eau du Groupe de Koweit, le niveau de l'eau y diminue et par conséquent le taux de drainage diminue également. Ainsi, il arrive un moment où le niveau de l'eau du Groupe de Koweit et le niveau piézométrique de la Formation de Damman diminueront au même taux;

Selon HANTUSH (1967) on peut calculer le rabattement dans un tel système comme suit:

(1) Solution pour un temps court

Quand $t \leq 0,22 (\nu_2 - \nu_1) B_1 B_2 / \nu_1 \nu_2$

$$s_2 = \frac{Q_2}{4 \pi T_2} W (u_2, \beta_2) \dots\dots\dots (11)$$

L'équation (11) est l'équation de HANTUSH JACOB (HANTUSH 1956; 1964 a) pour les aquifères à drainage où la charge dans l'aquifère non pompé reste uniforme. C'est à dire que le rabattement dans l'aquifère pompé pendant un temps court n'est pas influencé, de façon mesurable, par le dénoyage de l'aquifère non pompé.

(2) Solution pour des temps intermédiaires

Il n'y a pas d'expressions analytiques simples pour calculer le rabattement pendant les temps intermédiaires, c'est à dire quand $0,22 (| \nu_2 - \nu_1 |) B_1 B_2 / \nu_1 \nu_2 < t < 3.3 (| \nu_2 - \nu_1 |) B_1 B_2 / \nu_1 \nu_2$

Néanmoins, les solutions pour les temps courts et longs (voir (1) et (3)) peuvent être utilisées pour obtenir une solution approximative pour le temps intermédiaire par le moyen d'interpolation graphique sur papier semilogarithmique. Par exemple, les valeurs de rabattement s_2 , calculées à partir des solutions pour long et court temps sont reportées en fonction du temps t sur papier semilogarithmique.

Le lissage de la courbe qui joint les deux branches de courbe calculées permet d'obtenir les valeur de s_2 pendant le temps intermédiaire.

(3) Solution pour un temps long

Quant $t > 3.3 (| \nu_2 - \nu_1 |) B_1 B_2 / \nu_1 \nu_2$

on peut calculer le rabattement par l'équation/

$$s_2 = \frac{Q_2}{2 \pi (T_1 + T_2)} \left[\ln (re/r) + \delta_1 Ko (\beta) \right] \dots\dots\dots (12)$$

avec

$$re = 1,5 \sqrt{\nu_1 t} \quad ; \quad \nu_2 = 2 \nu_1 \nu_2 / (\nu_1 + \nu_2)$$

ln = logarithme naturel

Ko = fonction de Bessel d'ordre zéro de type deux.

$$\delta_1 = T_1 / T_2$$

$$\beta = r/B$$

$$B = B_1 B_2 / \sqrt{B_1^2 + B_2^2}$$

r = distance radiale entre le centre du puits de pompage et n'importe quel point dans l'aire environnante.

t = temps depuis le commencement du pompage.

s_2 = rabattement induit dans l'aquifère de Damman.

Q_2 = débit constant à partir de l'aquifère de Damman.

T_1 et T_2 = transmissivité du Groupe de Koweit et de la Formation de Damman respectivement.

7.5.4. RABATTEMENT

Du point de vue pratique, il nous intéresse de calculer le rabattement dans l'aquifère de Damman au centre du Champ "B" après un long temps de pompage. Dans ce but nous utiliserons les valeurs suivantes:

$$Q = 2,65 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{sec.}$$

$$T_1 = T_2 = 0,35 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{sec.}$$

$$S_1 = 0.01$$

$$S_2 = 5 \times 10^{-4}$$

$$B = B_1 = B_2 = 1\ 500; 3\ 000; 4\ 500 \text{ m}$$

$$\nu_1 = T_1 / S_1 = 0,35 \text{ m}^2/\text{sec.}$$

$$\nu_2 = T_2 / S_2 = 7 \text{ m}^2/\text{sec.}$$

$$\delta_1 = T_1 / T_2 = 1$$

$$rw = \text{rayon du puits} = 0,15 \text{ m}$$

L'équation (12) est applicable à notre système aquifère quand

$$t \leq \frac{3.3 (| \nu_2 - \nu_1 |) B_1 B_2}{\nu_1 \nu_2}$$

Selon la valeur de B, t peut être comme suit:

B en mètre	t en an
1 500	0,64
3 000	2,56
4 500	5,75

Le rabattement dans n'importe quel puits du champ "B" se compose du rabattement théorique, perte de charge dans le puits central et du rabattement induit par l'interférence due aux pompages dans les puits environnants.

7.5.4.1. RABATTEMENT THEORIQUE

En utilisant l'équation (12)

$$s_2 = \frac{Q}{2 \pi (T_1 + T_2)} \left[\ln \left(\frac{r_e}{r_w} \right) + S_1 K_o (\beta) \right] \dots (12)$$

avec

r=rw = rayon du puits = 0,15 m
 re = 1.5 √D_vt
 ν_v = 2 ν₁ ν₂ / (ν₁ + ν₂) = 0,67 m²/s.
 β = rw/B

$$B = \frac{B_1 B_2}{\sqrt{B_1^2 + B_2^2}} = \frac{B^2}{\sqrt{2} B} = \frac{B}{\sqrt{2}}$$

$$\frac{Q}{2 \pi (T_1 + T_2)} = 0,60 \text{ m} \cdot \text{sec.}$$

nous avons calculé le rabattement théorique, c'est à dire le rabattement induit à la paroi du puits à cause du pompage à partir du puits lui-même pour des valeurs différentes du temps et de B. Dans le tableau suivant, on présente les résultats de nos calculs:

t en an	ln (re/rw)	K _o (β)			Rabattement en mètre		
		B= 1500 m	B= 3000 m	B= 4500 m	B= 1500 m	B= 3000 m	B= 4500 m
10	11,98	8,98	9,67	10,10	12,57	12,99	13,25
20	12,23	"	"	"	12,78	13,20	13,45
50	12,69	"	"	"	13,06	13,47	13,73

7.5.4.2. PERTES DE CHARGE

Pour calculer les pertes de charge dans le puits de pompage, nous avons utilisé deux méthodes: la méthode JACOB et la méthode de la capacité spécifique.

Méthode de JACOB

JACOB (1947) a développé l'équation suivante pour calculer les pertes de charge dans le puits de pompage à partir d'un pompage d'essai par paliers.

$$S_p = C Q^2 \dots (13)$$

avec

- S_p = rabattement dû aux pertes du puits
- C = constante de perte de charge du puits
- Q = débit

Le pompage d'essai par paliers (Fig. 7-10 et (Fig.7-11) conduit au puits B-27 nous a permis de calculer la valeur de

$$C = 34,007 \cdot 10^3 \text{ sec}^2 \text{ m}^{-5}$$

les pertes de charge dans ce puits sont:

$$S_p = 23,9 \text{ mètres}$$

Dans le tableau 7-8 on présente les valeurs des pertes de charge de quelques puits du champ "B" calculées par la méthode JACOB

Tableau 7-8

Puits	Perte de charge (C) en pied/(Imp.Gal/min) ²	Débit en Imp.gal./min	Pertes de charge (s _p) en	
			pied	mètre
B 27	6,40 · 10 ⁻⁴	350	78,40	23,90
B 36	8,0 · 10 ⁻⁵	"	9,80	2,99
B 44	4,30 · 10 ⁻⁴	"	55,13	16,80
B 104	1,30 · 10 ⁻⁴	"	15,93	4,86
B 114	1,92 · 10 ⁻⁴	"	23,53	7,17

Méthode de la capacité spécifique

Une autre méthode pour calculer les pertes de charge dans le puits pompé est celle dans laquelle on compare la capacité spécifique réelle d'un puits pompé jusqu'à un certain temps avec sa capacité spécifique théorique (basée sur 100% efficacité du puits). La capacité spécifique réelle peut être calculée à partir du pompage d'essai. La capacité spécifique théorique peut être calculée en utilisant l'équation de Theis.

$$\frac{Q}{S} = \frac{4 \pi T}{W(u)}$$

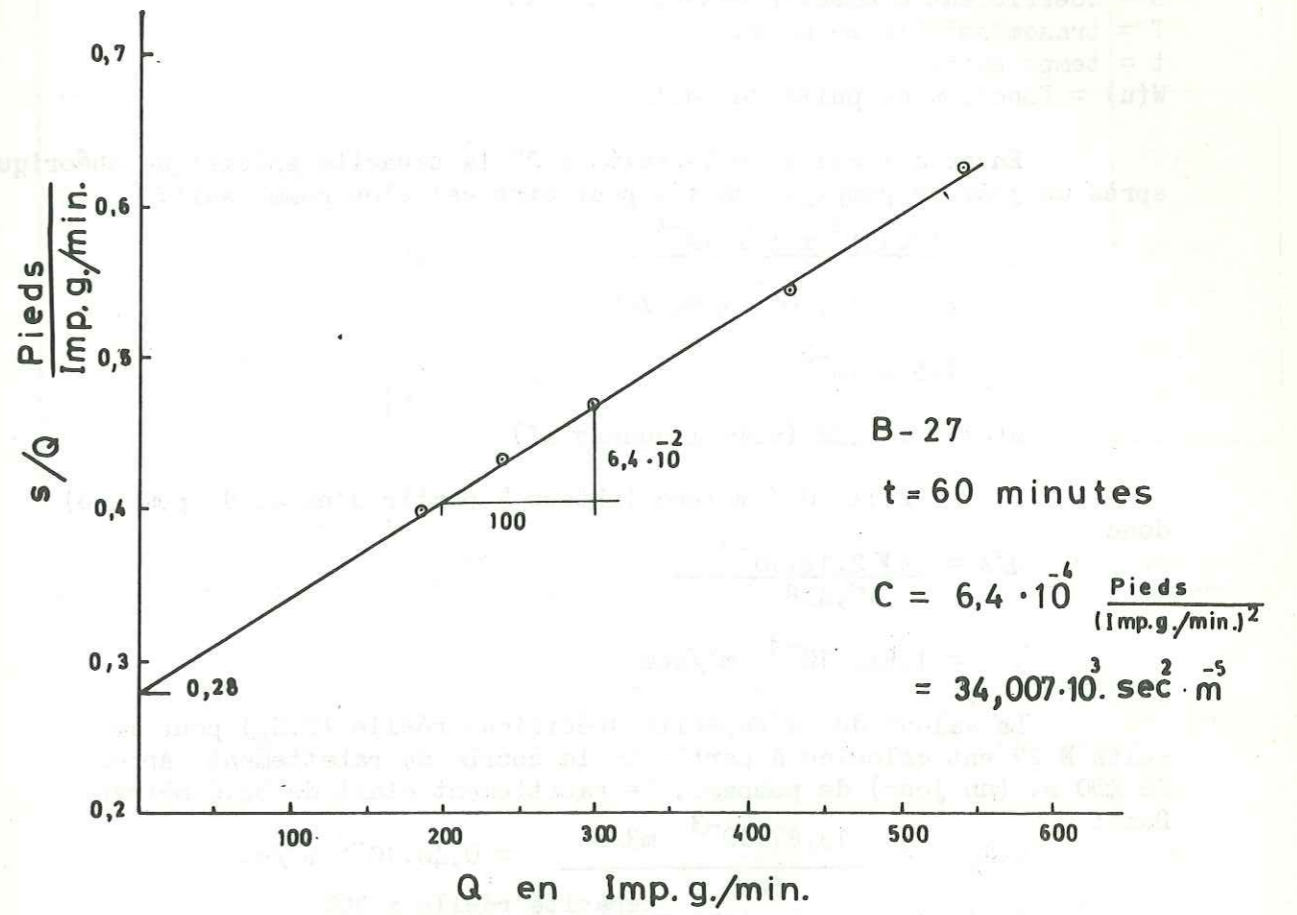
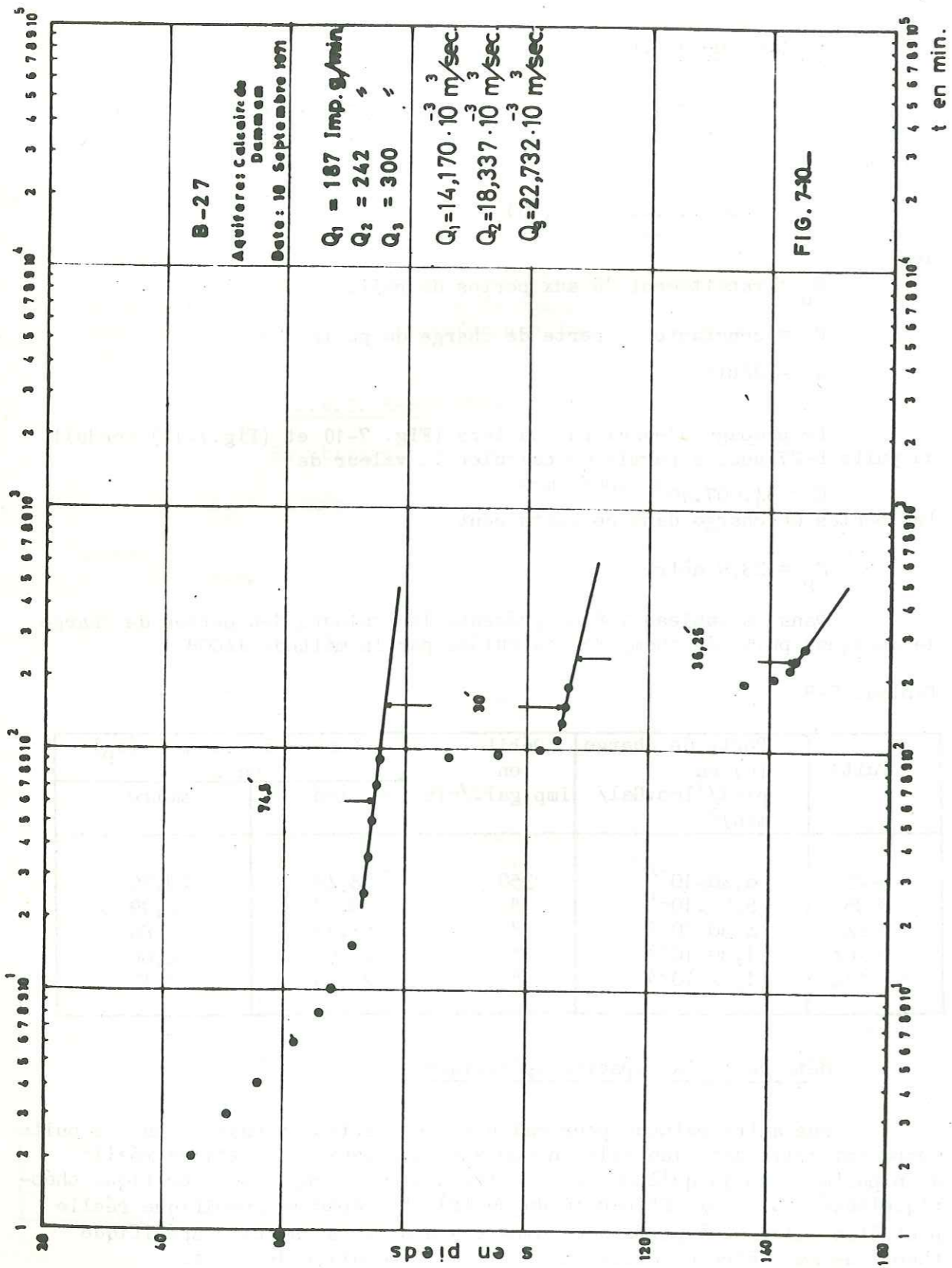


FIG. 7-11— Droite de perte de charge du puits B-27

$$u = \frac{r^2 S}{4 T t}$$

avec

Q = Débit constant en m³/s.

r = rayon du puits = 0,15 m.

s = rabattement théorique en m.

S = coefficient d'emménagement = s x 10⁻⁴T = transmissivité en m²/s.

t = temps en sec.

W(u) = fonction du puits de Theis.

En ce qui concerne le puits B 27 la capacité spécifique théorique après un jour de pompage continu peut être calculée comme suit:

$$u = \frac{(0,15)^2 \times 5 \times 10^{-4}}{4 \times 2,14 \cdot 10^{-3} \times 86\,400}$$

$$= 1,5 \times 10^{-8}$$

$$W(u) = 17,438 \text{ (voir l'annexe II)}$$

$$T = 2,14 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec} \text{ (obtenu à partir d'essai de pompage)}$$

donc

$$Q/s = \frac{4 \pi 2,14 \cdot 10^{-3}}{17,438}$$

$$= 1,542 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec.}$$

La valeur de la capacité spécifique réelle (C.S_R) pour le puits B 27 est calculée à partir de la courbe de rabattement. Après 86 400 s. (un jour) de pompage, le rabattement était de 34,6 mètres.

Donc:

$$C.S_R = \frac{13,87 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}}{34,6 \text{ m}} = 0,40 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s.}$$

$$\text{Efficacité du puits} = \frac{\text{capacité réelle} \times 100}{\text{capacité spécifique théorique}}$$

$$= \frac{0,40 \cdot 10^{-3} \times 100}{1,542 \cdot 10^{-3}}$$

$$= 25,94 \%$$

De plus

$$\text{Efficacité du puits} = \frac{\text{Rabattement théorique}}{\text{rabattement réel}}$$

$$\text{Rabattement théorique} = 0,259 \times 34,6$$

$$= 8,97 \text{ m}$$

$$\text{Rabattement réel} = 34,60 \text{ m}$$

$$\text{Perte de charge} = \text{rabattement réel} - \text{rabattement théorique}$$

$$= 34,60 - 8,97 \text{ m}$$

$$= 25,62 \text{ m}$$

Dans le tableau 7-9, on présente les valeurs des pertes de charge dans quelques puits du champ "B", qu'on a calculées en utilisant la méthode de capacité spécifique.

Tableau 7.9

Puits	Capacité spécifique théorique en m ² /s.	Capacité spécifique réelle en m ² /s.	Efficacité du puits en %	Rabattement théorique en m	Rabattement réel en m	Perte de charge en m
B-27	1,54.10 ⁻³	0,40.10 ⁻³	25,94%	8,97	34,60	25,63
F-15	10,84.10 ⁻³	2,97.10 ⁻³	24,91%	2,35	9,45	7,10
B-16	0,36.10 ⁻³	0,23.10 ⁻³	63,89%	31,63	49,51	17,88
B-44	1,28.10 ⁻³	0,93.10 ⁻³	72,66%	14,79	20,36	5,57
B-104	1,26.10 ⁻³	0,60.10 ⁻³	47,62%	24,24	50,90	26,66
B-114	1,64.10 ⁻³	0,78.10 ⁻³	47,56%	16,10	33,86	17,76

En comparant les valeurs des pertes de charge calculées par les deux méthodes, on constate que la méthode de la capacité spécifique nous donne des valeurs plus élevées que celle de la méthode de JACOB à l'exception du puits B-44.

Puits	Pertes de charge en mètres	
	JACOB	Capacité spécifique
B-27	23,90	25,63
B-44	16,18	5,57
B-104	4,85	26,66
B-114	7,17	17,76

7.5.4.3. INTERFERENCE

On peut calculer les valeurs de l'interférence des puits dans le champ "B", après un certain temps de pompage, à partir de l'équation (11) et (12) selon la valeur du temps (t) (voir 7.5.3.). Par exemple, le rabattement induit dans le puits B-36 à la suite du pompage continu pendant 10 ans au débit constant de 2,65x10⁻⁴ m³/s. dans le puits B-27 peut être calculé en utilisant l'équation (12) comme suit:

$$s = \frac{Q}{2 \pi (T_1 + T_2)} \left[\ln\left(\frac{r_e}{r}\right) + S_1 K_0\left(\frac{r}{B}\right) \right] \dots (12)$$

$$Q = 2,65 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{sec.}$$

$$T_1 = T_2 = 3,45 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$$

$$r_e = 1,5 \sqrt{2} r = 1,5 \sqrt{0,67 \times 10 \times 3,1536 \times 10^8} \text{ m}$$

$$r = \text{distance entre les deux puits} = 2\,500 \text{ m}$$

$$B = \text{facteur de drainance} = \frac{4\,500 \text{ m}}{\sqrt{2}}$$

$$s = \frac{2,65 \cdot 10^{-2}}{4 \pi \cdot 0,35 \cdot 10^{-2}} (3.320 + 0.574)$$

$$= 3,894 \approx 4 \text{ m}$$

7.5.4.4. RABATEMENT AU CENTRE DU CHAMP B

Pour avoir une idée sur le rabattement aux environs du centre du champ "B" après 50 ans de pompage continu au débit constant de $2,65 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$. à partir de chaque puits du champ "B", nous avons calculé le rabattement dans un puits imaginaire au centre du champ comme suit:

La distance entre les puits pompés et le centre du champ est:

- 1 770 m pour 4 puits : c.a.d. B-45, F-15, B-36, et B-101)
- 5 300 m pour 4 puits : c.a.d. B-113, B-26, B-117 et B-114)
- 3 950 m pour 8 puits : c.a.d. B-35, B-44, B-104, B-103, B-115, B-116, B-102 et B-27).

Donc le rabattement induit par l'effet de l'interférence au centre du champ est:

$$s_2 = 4 \times 0,6 \left[\ln \left(\frac{1,5 \sqrt{0,67 \times 50 \times 3,153 \times 10^8}}{1\ 770} \right) + K_0 \left(\frac{1\ 770 \sqrt{2}}{4\ 500} \right) \right]$$

$$+ 4 \times 0,6 \left[\ln \left(\frac{1,5 \sqrt{0,67 \times 50 \times 3,153 \times 10^8}}{5\ 300} \right) + K_0 \left(\frac{5\ 300 \sqrt{2}}{4\ 500} \right) \right]$$

$$+ 8 \times 0,6 \left[\ln \left(\frac{1,5 \sqrt{0,67 \times 50 \times 3,153 \times 10^8}}{3\ 950} \right) + K_0 \left(\frac{3\ 950 \sqrt{2}}{4\ 500} \right) \right]$$

$$= 2,4 \quad ((4,47) + (0,83))$$

$$+ 2,4 \quad ((3,37) + (0,17))$$

$$+ 4,8 \quad ((3,66) + (0,30))$$

$$= 12,00 + 8,50 + 19,01$$

$$= 39,51 \text{ m.}$$

Quand on ajoute la valeur moyenne des pertes de charge de 16,77 m (voir tableau 7-8) à celle du rabattement induit par l'interférence, on obtient la valeur de 56,28 m comme valeur du rabattement total au centre du champ "B" après 50 ans de pompage continu au débit constant de $2,65 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$. à partir de chaque puits de ce champ.

Le rabattement calculé ci-dessus n'inclut pas les effets d'interférence induite par les champs de puits avoisinants. Donc la valeur de 56 m environ du rabattement au centre du champ "B" s'accorde bien avec la gamme de rabattement de 60 à 90 m calculée à priori par le Professeur M.S. HANTUSH pour l'ensemble des champs de puits de Shigaya. Il nous reste à l'avenir de vérifier ces calculs d'après l'opération du champ et le forage des piézomètres au centre et autour du champ, ce qui est en cours d'exécution à l'heure actuelle.

7.5.5. CALCUL APPROXIMATIF DU COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT

Ne disposant pas de piézomètres dans le champ "B", nous avons essayé de calculer le coefficient d'emmagasinement de la Formation de Damman de façon approximative en utilisant les données de pompage et du rabattement dans les puits de pompage.

Dans l'équation

$$s = \frac{2,30 Q}{4 \pi T} \log \frac{2,25 Tt}{r^2 S} \dots \dots \dots (14)$$

nous avons

$$R = \frac{2,30 Q}{4 \pi T} = \text{rabattement par cycle logarithmique du temps.}$$

Si du fait que l'on a affaire à une nappe en charge et des essais de pompage de longue durée, on suppose que (r) est égal à 1 m ou à 0,3 m, ce qui est admissible si le rabattement n'est pas trop important, nous obtiendrions les équations:

$$\frac{s}{\Delta s} = \log \frac{2,25 Tt}{r^2 S} \dots \dots \dots (15)$$

$$\log S_1 = \log 2,25 Tt - \frac{s}{\Delta s} \dots \dots \dots (16)$$

$$\log S_2 = \log 24,22 Tt - \frac{s}{\Delta s} \dots \dots \dots (17)$$

Dans un puits de pompage, la valeur de s qu'on y mesure est

$$s = BQ + CQ^2$$

Donc le rabattement dans un piézomètre imaginaire à une distance de 1 m ou de 0,3 m du centre du puits de pompage est

$$s - CQ^2.$$

Donc les équations (16) et (17) deviendront:

$$\log S_1 = \log 2,25 Tt - \frac{(s-CQ^2)}{\Delta s} \dots\dots (18)$$

$$\log S_2 = \log 24,22 Tt - \frac{(s-CQ^2)}{\Delta s} \dots\dots (19)$$

Dans le tableau 7-10, nous présentons les résultats des calculs en employant les équations (16), (17), (18) et (19). On y constate que dans les puits où le rabattement (s) est grand et/ou la valeur (Δs) est petite, on a des valeurs de S trop petites, puisque de l'ordre de 10⁻¹⁰ à 10⁻²⁸ (puits B-27, B-104, B-114 et B-F-14).

Dans ces puits, les valeurs de S restent trop petites, même quand on a soustrait les pertes de charge du puits déterminées à partir d'essai de pompage par paliers. En admettant, une valeur du rayon effectif du puits r = 0,3 m au lieu de r = 1 m, on n'augmente la valeur de S que très légèrement.

Par ailleurs, les données des puits B-44, B-45 et B-117 nous ont permis de calculer des valeurs S assez raisonnables qui sont de l'ordre de 10⁻⁶ à 10⁻⁴ et s'accordent assez bien avec la valeur moyenne de S = 5 x 10⁻⁴ adoptée au Koweit comme valeur représentative du coefficient d'emménagement de la Formation de Damman au Koweit. Ces puits là ont une valeur de s/Δs variant entre 2 et 9.

Ce n'est donc que dans quelques cas particuliers que la méthode que nous avons utilisée peut fournir des résultats apparemment valables, mais il était tout de même intéressant d'essayer de connaître la valeur du coefficient d'emménagement dans le champ "B" et de tester la méthode proposée.

TABLEAU 7-10
CALCUL APPROXIMATIF DU COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT A PARTIR DES DONNEES DU RABATTEMENT DANS LE PUITTS DU POMPAGE

PUITS		B-27	B-44	B-104	B-114	B-F-15	B-45	B-117
Q · 10 ³ m ³ /sec		13,866	18,943	30,709	26,52	28,036	45,464	34,552
T · 10 ³ m ³ /sec		2,140	1,752	1,726	2,278	16,829	4,280	20,712
C · 10 ³ sec ² m ³		34,007	22,848	6,908	10,202			
CQ ²		6,54	8,2	6,35	7,18			
Δs		1,19	1,98	3,2	2,13	0,3	1,95	0,3
S en mètres	10 ¹	31,4	16,2	45,4	30,9	9,1	9,14	1,87
	10 ²	34,3	18,3	50,3	33,5	9,4	11,43	2,04
	10 ⁴	35,5	20,7	54,5	35,8	9,6	13,26	2,29
Log 225Tt	10 ¹	1,46	1,37	1,37	1,49	2,36	1,76	2,45
	10 ²	2,46	2,37	2,37	2,49	3,36	2,76	3,45
	10 ⁴	3,46	3,37	3,37	3,49	4,35	3,76	4,45
Log 24,22Tt	10 ¹	2,49	2,41	2,4	2,52	3,39	2,79	3,48
	10 ²	3,49	3,41	3,4	3,52	4,39	3,79	4,48
	10 ⁴	4,49	4,41	4,4	4,52	5,39	4,79	5,48
s - CQ ²	10 ¹	24,86	8,00	39,05	23,72			
	10 ²	27,76	10,10	34,95	26,32			
	10 ⁴	28,96	12,50	48,15	28,62			
s/Δs	10 ¹	26,39	8,18	14,19	14,51	30,3	4,69	6,13
	10 ²	28,82	9,14	15,72	15,72	31,33	5,86	6,8
	10 ⁴	29,83	10,45	17,03	16,8	32,0	6,8	7,63
s - CQ ² / Δs	10 ¹	20,89	4,05	12,2	11,14			
	10 ²	23,76	5,1	13,73	12,36			
	10 ⁴	24,35	6,31	15,05	13,44			
(1) S ₁	10 ¹	1,2 · 10 ⁻²⁵	1,5 · 10 ⁻⁷	15,0 · 10 ⁻¹⁴	9,5 · 10 ⁻¹⁹	1,1 · 10 ⁻²⁸	11,8 · 10 ⁻⁴	2,05 · 10 ⁻⁴
	10 ²	4,4 · 10 ⁻²⁷	1,3 · 10 ⁻⁷	4,46 · 10 ⁻¹⁴	5,75 · 10 ⁻¹⁹	1,1 · 10 ⁻²⁸	7,94 · 10 ⁻⁴	4,47 · 10 ⁻⁴
	10 ⁴	4,3 · 10 ⁻²⁷	0,35 · 10 ⁻⁷	2,18 · 10 ⁻¹⁴	4,89 · 10 ⁻¹⁹	2,2 · 10 ⁻²⁸	9,12 · 10 ⁻⁴	6,61 · 10 ⁻⁴
(2) S ₂	10 ¹	3,7 · 10 ⁻²⁸	1,7 · 10 ⁻⁶	16,20 · 10 ⁻¹³	10,23 · 10 ⁻¹³	0,12 · 10 ⁻²⁶	12,59 · 10 ⁻³	2,24 · 10 ⁻³
	10 ²	5,0 · 10 ⁻²²	1,5 · 10 ⁻⁶	4,39 · 10 ⁻¹³	6,166 · 10 ⁻¹³	0,11 · 10 ⁻²⁶	8,5 · 10 ⁻³	4,79 · 10 ⁻³
	10 ⁴	13,0 · 10 ⁻²²	0,91 · 10 ⁻⁶	2,34 · 10 ⁻¹³	5,25 · 10 ⁻¹³	0,19 · 10 ⁻²⁶	9,77 · 10 ⁻³	7,08 · 10 ⁻³
(3) S ₁	10 ¹	1,3 · 10 ⁻²⁴	21,38 · 10 ⁻⁴	14,2 · 10 ⁻¹²	2,24 · 10 ⁻¹⁰			
	10 ²	4,7 · 10 ⁻²⁶	18,62 · 10 ⁻⁴	4,36 · 10 ⁻¹²	1,35 · 10 ⁻¹⁰			
	10 ⁴	4,6 · 10 ⁻²⁶	11,48 · 10 ⁻⁴	2,09 · 10 ⁻¹²	1,12 · 10 ⁻¹⁰			
(4) S ₂	10 ¹	40,0 · 10 ⁻²⁰	23,44 · 10 ⁻³	15,8 · 10 ⁻¹¹	2,39 · 10 ⁻⁹			
	10 ²	0,54 · 10 ⁻²⁰	20,42 · 10 ⁻³	1,47 · 10 ⁻¹¹	1,44 · 10 ⁻⁹			
	10 ⁴	1,4 · 10 ⁻²⁰	12,59 · 10 ⁻³	2,24 · 10 ⁻¹¹	1,20 · 10 ⁻⁹			

- (1) Log S₁ = Log 2,25 Tt - s/Δs
- (2) Log S₂ = Log(2,25 Tt)/(0,3)² - s/Δs
- (3) Log S₁ = Log 2,25 Tt - (s - CQ²)/Δs
- (4) Log S₂ = Log 24,22 Tt - (s - CQ²)/Δs

7.6. CORRECTION DE CHARGE HYDRAULIQUE SELON LA TENEUR EN SELS DISSOUS

7.6.1. GENERALITES

Dans les environnements hydrogéologiques, où des saumures des eaux souterraines très salées à concentrations différentes en sels dissous sont contenues dans des couches sédimentaires interstratifiées, la valeur de la charge hydraulique en un point du milieu aquifère mesurée sur le terrain dans un piézomètre représente la hauteur de la colonne d'eau correspondante en ce point. Afin de pouvoir utiliser de telles mesures pour la compréhension des relations hydrodynamiques entre les couches contenant des eaux à salinité variable et/ou entre les faciès hydrogéochimiques différents dans la même couche, on doit appliquer une correction à ces mesures par suite de la différence de poids spécifique des eaux des différentes couches. En conséquence, nous présenterons un procédé pour faire une telle correction en utilisant les valeurs de concentration en sels dissous.

Dans les régions côtières, telles que dans le Koweït nord-est, des saumures peuvent exister dans une couche profonde, tandis que des eaux moins salées peuvent se trouver dans la couche susjacent. Les deux couches peuvent être séparées l'une de l'autre par une couche semi-perméable (voir la figure 7-12).

Par suite de la différence de densité des eaux contenues dans ces deux couches, la mesure de charge hydraulique de la couche I qui contient de l'eau plus salée peut représenter une pression hydrostatique véritable plus élevée que celle de la Formation susjacente qui contient de l'eau moins salée. Faute de faire la correction nécessaire, les mesures de charge hydraulique que l'on fait sur le terrain peuvent indiquer le contraire si les mesures, dans des piézomètres situés au même emplacement, sont données par rapport au même plan de comparaison (Fig.7-12).

7.6.2. FORMULES DE CORRECTION

La charge hydraulique corrigée au point 1 dans la couche I (Fig. 7-12) peut être exprimée comme suit:

$$h_1 = [(B + b) - d_1] r_1 \dots\dots\dots(20)$$

ou

h_1 = charge hydraulique corrigée au point 1 dans la couche I exprimée comme hauteur de l'eau douce (dont le poids spécifique est 1) dans le piézomètre n°1;

B = profondeur du mur de la couche II par rapport au point de repère sur le sol;

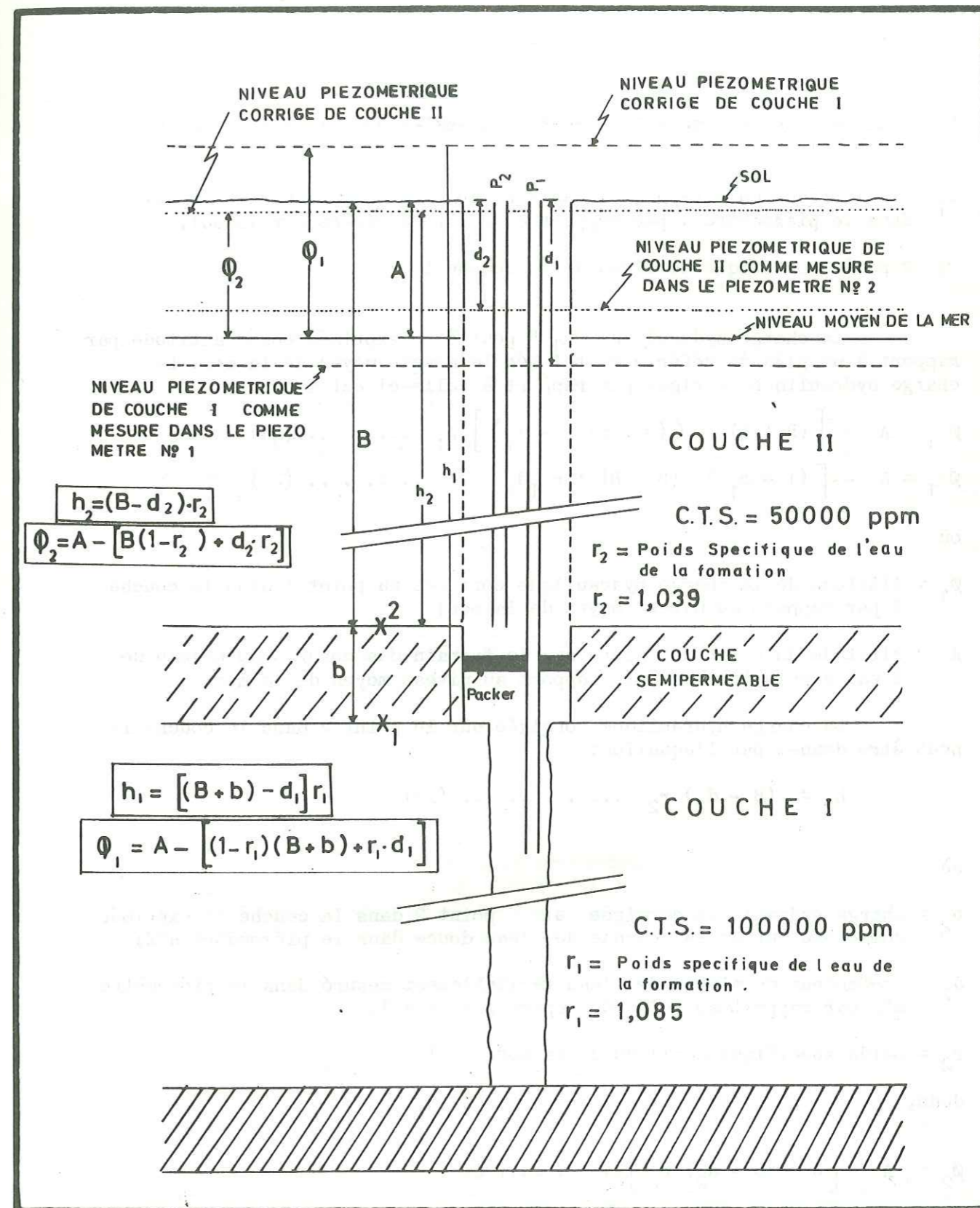


FIG. 7-12.— Correction des charges hydrauliques des couches interstratifiées contenant des eaux salées.

b = épaisseur de la couche imperméable ou semi-perméable entre les deux couches I et II;

d_1 = profondeur du niveau de l'eau véritablement mesuré sur le terrain dans le piézomètre 1 par rapport au point de repère sur le sol;

r_1 = poids spécifique de l'eau de la couche I.

La charge hydraulique " h_1 " peut être exprimée comme altitude par rapport à un plan de référence, tel que le niveau moyen de la mer. La charge hydraulique corrigée par rapport à celle-ci est donc:

$$\phi_1 = A - \left[(B + b) - \left((B + b) - d_1 \right) \right] r_1 \dots\dots\dots(21)$$

$$\phi_1 = A - \left[(1 - r_1) (B + b) + r_1 d_1 \right] \dots\dots\dots(22)$$

où

ϕ_1 = Altitude de la charge hydraulique corrigée au point 1 dans la couche I par rapport au niveau moyen de la mer;

A = Altitude du point de repère sur le terrain des mesures du niveau de l'eau sur le terrain, par rapport au niveau moyen de la mer.

La charge hydraulique corrigée sur le point 2 dans la couche II peut être donnée par l'équation:

$$h_2 = (B - d_2) r_2 \dots\dots\dots(23)$$

où

h_2 = charge hydraulique corrigée au point 2 dans la couche II exprimée comme hauteur de la colonne de l'eau douce dans le piézomètre n°2;

d_2 = profondeur du niveau de l'eau véritablement mesuré dans le piézomètre n°2 par rapport au point de repère sur le sol;

r_2 = poids spécifique de l'eau de la couche II.

donc,

$$\phi_2 = A - \left[B - (B - d_2) r_2 \right] \dots\dots\dots(24)$$

$$= A - \left[B (1 - r_2) + d_2 r_2 \right] \dots\dots\dots(25)$$

où

ϕ_2 = Altitude de la charge hydraulique corrigée au point n°2 dans la couche II par rapport au niveau moyen de la mer;

7.6.3. DETERMINATION DU POIDS SPECIFIQUE DE L'EAU DE LA FORMATION A PARTIR DES CONCENTRATION EN SELS DISSOUS

Pour qu'on puisse faire la correction nécessaire sur les charges hydrauliques mesurées en utilisant les équations (20) et (22) ou (23) et (25), on doit savoir le poids spécifique de l'eau de la Formation correspondante. Malheureusement la plus grande partie des analyses d'eau ne le contient pas.

Néanmoins, la relation entre le poids spécifique de l'eau et sa teneur en sels dissous exprimée en mg/l, a été calculée approximativement (COLLINS, 1975) comme on le montre dans le tableau 7-11.

A Koweit, les teneurs en sels dissous sont normalement données en ppm. Généralement, les valeurs des ppm et mg/l pour la même eau sont égales lorsque la valeur de mg/l ou ppm est basse (moins de 8 300 ppm).

Pour qu'on puisse utiliser des données en ppm pour la détermination du poids spécifique de l'eau nous avons utilisé la relation

$$\text{ppm} = \frac{\text{mg/l}}{\text{poids spécifique}} \dots\dots\dots(26)$$

pour établir le tableau 7-12.

7.6.4. EXEMPLE

Sur la figure 7-12, la profondeur du niveau de l'eau dans le piézomètre n°1, qui n'est ouvert que dans la couche I, est de 18 m. La profondeur du toit de la couche I est de 305 m. La teneur en sels dissous de l'eau de la couche I est de 100 000 ppm. Sur la même figure la profondeur du niveau de l'eau dans le piézomètre n°2, qui n'est ouvert que le long de la partie saturée de la couche II est de 12 m. La profondeur du mur de la couche II est de 296 m. La teneur en sels dissous dans l'eau de la couche II est de 50 000 ppm. Si toutes les profondeurs sont données par rapport du sol, et si l'altitude du sol par rapport au niveau de la mer est de 15 m :

. Quelles sont les altitudes des niveaux de l'eau dans les piézomètres 1 et 2 (c.a.d. les couches I et II) ?

. Quelles seraient les altitudes de ces niveaux si l'eau contenue était de l'eau dont la teneur en sels dissous est inférieure à 8 000 ppm ?

. Si la couche séparant les couches I et II est semi-perméable, quelle est la direction de drainage par suite de la différence de charge hydraulique entre les deux couches, et comment se compare-t-elle avec celle que l'on déduit des mesures non corrigées des niveaux de l'eau dans les deux piézomètres ?

Les altitudes des niveaux de l'eau dans les deux piézomètres n°1 et 2 sont respectivement 15 et 16 = -3 m et 15-12 = 3 m.

Si l'eau douce au lieu de l'eau salée occupe les deux couches I et II, les altitudes des niveaux de l'eau dans les piézomètres n° 1 et 2 sont calculées à partir des équations (22) et (25) comme suit:

$$\phi_1 = A - \left[(1 - r_1) (B + b) + r_1 d_1 \right] \dots\dots (22)$$

où

A = 15 m, B = 296 m, b = 9 m, d₁ = 18 m et r₁ = 1, 085 (voir tableau 7-12).

Donc, l'altitude corrigée du niveau de l'eau dans le piézomètre n° 1 est de :

$$\phi_1 = 15 - \left[(1 - 1,085) (296 + 9) + 1,085 \cdot 18 \right]$$

= 21,40 m au dessus du niveau moyen de la mer.

$$\phi_2 = A - \left[B (1 - r_2) + d_2 r_2 \right] \dots\dots\dots (25)$$

où

d₂ = 12 m, r₂ = 1, 039 (voir tableau 7-12).

Donc l'altitude corrigée du niveau de l'eau dans le piézomètre n°2 est de

$$\phi_2 = 15 - \left[296 (1 - 1,039) + 12 \cdot 1,039 \right]$$

= 14,08 m

Sur la figure 7-12, les niveaux mesurés de l'eau dans les piézomètres n° 1 et 2 indiquent de façon éronnée que la drainance à travers la couche semi-perméable séparant les couches I et II a lieu à partir de la couche II vers la couche I par suite de la différence de charge hydraulique mesurée dans les deux couches.

Cependant, après avoir fait la correction de la charge hydraulique selon les poids spécifiques des eaux concernées on constate que la direction de drainance est inverse de ce qu'indiquent les mesures non corrigées.

7.6.5. CONCLUSION

Dans cette section, nous avons présenté une méthode pour la correction des mesures de charge hydraulique effectuées sur le terrain dans les couches contenant les eaux à salinité variable. Une telle correction est une nécessité pour bien comprendre les vraies relations hydrodynamiques entre les couches interstratifiées et/ou entre les différents faciès hydrochimiques d'une même couche. Les tableaux 7-11 et 7-12 nous permettent de déterminer le poids spécifique de l'eau à partir de sa teneur en sels dissous.

TABLE 7-11
Approximate relation of specific gravity (Sp. gr.) to mg/l of dissolved solids (DS). (After Collins, A. G., 1975)

Sp. gr.	DS	Sp. gr.	DS	Sp. gr.	DS	Sp. gr.	DS	Sp. gr.	DS
1.000	0	1.038	50,800	1.076	97,400	1.114	141,200	1.152	182,100
1.001	1,400	1.039	52,000	1.077	98,700	1.116	142,300	1.153	183,200
1.002	2,800	1.040	53,300	1.078	99,800	1.116	143,400	1.154	184,200
1.003	4,200	1.041	54,600	1.079	101,000	1.117	144,500	1.155	185,300
1.004	5,600	1.042	55,900	1.080	102,200	1.118	145,600	1.156	186,300
1.005	7,000	1.043	57,100	1.081	103,400	1.119	146,700	1.157	187,400
1.006	8,300	1.044	58,300	1.082	104,600	1.120	147,900	1.158	188,400
1.007	9,700	1.045	59,600	1.083	105,800	1.121	148,900	1.159	189,500
1.008	11,100	1.046	60,900	1.084	106,900	1.122	150,000	1.160	190,500
1.009	12,400	1.047	62,100	1.085	108,100	1.123	151,100	1.161	191,600
1.010	13,700	1.048	63,400	1.086	109,300	1.124	152,100	1.162	192,600
1.011	15,200	1.049	64,600	1.087	110,400	1.125	153,200	1.163	193,600
1.012	16,600	1.050	65,900	1.088	111,600	1.126	154,400	1.164	194,700
1.013	17,800	1.051	67,100	1.089	112,800	1.127	155,500	1.165	195,700
1.014	19,100	1.052	68,400	1.090	114,000	1.128	156,600	1.166	196,700
1.015	20,500	1.053	69,600	1.091	115,100	1.129	157,700	1.167	197,800
1.016	21,900	1.054	70,900	1.092	116,200	1.130	158,800	1.168	198,800
1.017	23,200	1.055	72,000	1.093	117,400	1.131	159,900	1.169	199,800
1.018	24,500	1.056	73,300	1.094	118,600	1.132	161,000	1.170	200,900
1.019	25,900	1.057	74,600	1.095	119,800	1.133	162,000	1.171	201,900
1.020	27,300	1.058	75,800	1.096	120,800	1.134	163,100	1.172	202,900
1.021	28,500	1.059	77,100	1.097	122,000	1.135	164,100	1.173	203,900
1.022	29,800	1.060	78,200	1.098	123,100	1.136	165,200	1.174	204,900
1.023	31,000	1.061	79,400	1.099	124,400	1.137	166,200	1.175	206,000
1.024	32,400	1.062	80,600	1.100	125,500	1.138	167,300	1.176	207,000
1.025	33,900	1.063	81,800	1.101	126,700	1.139	168,400	1.177	208,000
1.026	35,100	1.064	83,100	1.102	127,800	1.140	169,400	1.178	209,000
1.027	36,400	1.065	84,300	1.103	128,800	1.141	170,400	1.179	210,000
1.028	37,700	1.066	85,600	1.104	130,000	1.142	171,500	1.180	211,000
1.029	39,100	1.067	86,700	1.105	131,100	1.143	172,500	1.181	212,000
1.030	40,400	1.068	87,800	1.106	132,300	1.144	173,600	1.182	213,000
1.031	41,700	1.069	89,100	1.107	133,400	1.145	174,700	1.183	214,000
1.032	43,000	1.070	90,300	1.108	134,500	1.146	175,700	1.184	215,000
1.033	44,300	1.071	91,500	1.109	135,600	1.147	176,800	1.185	216,000
1.034	45,600	1.072	92,700	1.110	136,800	1.148	177,900	1.186	217,000
1.035	46,900	1.073	93,900	1.111	137,900	1.149	178,900	1.187	218,000
1.036	48,300	1.074	95,100	1.112	139,100	1.150	180,000	1.188	219,000
1.037	49,500	1.075	96,200	1.113	140,100	1.151	181,100	1.189	220,000

TABLE 7-12
APPROXIMATE RELATION OF SPECIFIC GRAVITY (SP.GR.) TO PPM OF TOTAL DISSOLVED SOLIDS

Sp.Gr.	TDS	Sp.Gr.	TDS	Sp.Gr.	TDS	Sp.Gr.	TDS	Sp.Gr.	TDS	Sp.Gr.	TDS	Sp.Gr.	TDS	Sp.Gr.	TDS
1.000	0	1.026	34200	1.052	65000	1.078	92600	1.104	117800	1.130	140500	1.156	161200	1.182	180200
1.001	1400	1.027	35400	1.053	66100	1.079	93600	1.105	118600	1.131	141400	1.157	162000	1.183	180900
1.002	2800	1.028	36700	1.054	67300	1.080	94600	1.106	119600	1.132	142200	1.158	162700	1.184	181600
1.003	4200	1.029	38000	1.055	68700	1.081	95700	1.107	120500	1.133	143000	1.159	163500	1.185	182300
1.004	5600	1.030	39200	1.056	69400	1.082	96700	1.108	121400	1.134	143800	1.160	164200	1.186	183000
1.005	7000	1.031	40400	1.057	70600	1.083	97700	1.109	122300	1.135	144600	1.161	165000	1.187	183700
1.006	8300	1.032	41700	1.058	71600	1.084	98600	1.110	123200	1.136	145400	1.162	165700	1.188	184300
1.007	9600	1.033	42900	1.059	72800	1.085	99600	1.111	124100	1.137	146200	1.163	166500	1.189	185000
1.008	11000	1.034	44100	1.060	73800	1.086	100600	1.112	125100	1.138	147000	1.164	167300	1.190	185700
1.009	12300	1.035	45300	1.061	74800	1.087	101600	1.113	125900	1.139	147800	1.165	168000	1.191	186400
1.010	13600	1.036	46600	1.062	75900	1.088	102600	1.114	126800	1.140	148600	1.166	168700	1.192	187100
1.011	15000	1.037	47700	1.063	77000	1.089	103600	1.115	127600	1.141	149300	1.167	169500	1.193	187800
1.012	16400	1.038	48900	1.064	78100	1.090	104600	1.116	128500	1.142	150200	1.168	170200	1.194	188400
1.013	17600	1.039	50000	1.065	79200	1.091	105500	1.117	129400	1.143	150900	1.169	170900	1.195	189100
1.014	18800	1.040	51300	1.066	80300	1.092	106400	1.118	130200	1.144	151700	1.170	171700	1.196	189800
1.015	20200	1.041	52400	1.067	81300	1.093	107400	1.119	131100	1.145	152600	1.171	172400	1.197	190500
1.016	21600	1.042	53600	1.068	82200	1.094	108400	1.120	132100	1.146	153300	1.172	173100	1.198	191200
1.017	22800	1.043	54700	1.069	83300	1.095	109200	1.121	132800	1.147	154100	1.173	173800	1.199	191800
1.018	24100	1.044	55800	1.070	84400	1.096	110200	1.122	133700	1.148	155000	1.174	174500	1.200	192300
1.019	25400	1.045	57000	1.071	85400	1.097	111200	1.123	134600	1.149	155700	1.175	175300	1.201	193000
1.020	26800	1.046	58200	1.072	86500	1.098	112100	1.124	135300	1.150	156500	1.176	176000	1.202	193700
1.021	27900	1.047	59300	1.073	87500	1.099	113200	1.125	136200	1.151	157300	1.177	176700	1.203	194300
1.022	29200	1.048	60500	1.074	88500	1.100	114100	1.126	137300	1.152	158100	1.178	177400	1.204	194900
1.023	30300	1.049	61600	1.075	89500	1.101	115100	1.127	138000	1.153	158900	1.179	178100	1.205	195600
1.024	31600	1.050	62800	1.076	90500	1.102	116000	1.128	138800	1.154	159600	1.180	178800	1.206	196300
1.025	33100	1.051	63800	1.077	91600	1.103	116800	1.129	139700	1.155	160400	1.181	179500	1.207	196900

CHAPITRE VIII

EXPLOITATION ET ALIMENTATION ARTIFICIELLE DES NAPPES SOUTERRAINES

8.1. GÉNÉRALITÉS

L'alimentation naturelle des couches aquifères de Koweït provient du sous-écoulement venant de l'Arabie Saoudite d'une part, et de l'infiltration locale depuis les oueds et les dépressions dispersées sur le territoire Koweïtien. ATEN et BERSTROM (1965), en supposant que le Groupe de Koweït et la Formation de Dammam se comportent comme un seul aquifère, mentionnent que la capacité de production du système est de 189, 3 millions de litres par jour. Dans leurs évaluations ils supposent que l'infiltration est de 10 % des précipitations et ils ne considèrent pas la part véritable des précipitations qui effectivement arrive au niveau de la nappe. THOMAS (1966) a recommandé de supposer que l'alimentation naturelle au Koweït était négligeable dans les calculs des eaux souterraines. Dr. M. HANTUSH (1969) recommande que le plan d'exploitation des eaux souterraines au Koweït soit basé sur l'épuisement progressif des nappes puisque l'alimentation naturelle n'est pas facile à déterminer au Koweït, et que dans tous les cas elle est inférieure à ce qu'il est prévu d'exploiter dans le projet de SHIGAYA (227.13 millions l/j). Si les études futures montrent une alimentation naturelle d'importance on augmentera l'extraction de l'eau et on prolongera l'espérance de vie des champs de puits.

D'ailleurs, tous les sols, à l'exception des sols les plus perméables, cessent de permettre le passage de l'eau d'alimentation quand les précipitations sont inférieures à 130-250 mm/jour. La quantité exacte dépend de la perméabilité du sol, de sa capacité de rétention et de la répartition des précipitations par rapport à la température. Par exemple, un sol dont la capacité de rétention est de 15 % et qui est vidé de son humidité jusqu'à la profondeur de 0,6 m pendant la chaleur de l'été, exigera une quantité de pluie de 90 mm simplement pour compenser le déficit en humidité du sol. Si la pluie tombe par intermittence pendant l'année, les périodes de temps sec qui interviendront causeront des pertes d'eau à partir du sol de telle sorte qu'on a besoin d'une quantité de pluie qui dépasse 90 mm pour qu'on puisse avoir un commencement d'alimentation (S.N. DAVIS et R.J.M. DEWIEST 1966).

Dans les zones d'affleurements en Arabie Saoudite, la moyenne des précipitations annuelle est basse (puisqu'inférieure à 50 mm) et souvent, il n'y a pas de pluies pendant de longues périodes. Bien que les données disponibles sur les précipitations et l'alimentation soient limitées, il est évident que l'alimentation directe est faible. Sans doute, par suite de la nature aride du climat, les événements orageux et de ruissellement majeurs produisent une alimentation indirecte par intermittence dans tous les bassins.

Malheureusement, de tels cas ne sont pas bien répertoriés mais il est probable qu'ils sont peu nombreux. L'alimentation qui en résulte ne constitue donc qu'une petite proportion de l'écoulement de l'eau souterraine dans plusieurs aires.

Les données isotopiques en Jordanie sud (HOWARD HUMPHRIES and SONS 1977) et en Algérie (CONRAD et al. 1975) montrent la présence de quelque alimentation moderne dans les zones d'affleurement des aquifères gréseux. Néanmoins, loin des affleurements, les données du radiocarbone d'un bout à l'autre de la plupart de l'Arabie et de l'Afrique du Nord indiquent que la masse des eaux souterraine est ancienne, jusqu'à plus de 35 000 ans. Même dans les zones d'affleurement le contrôle sur le gradient hydraulique, uniquement par l'alimentation moderne peut être contestable. Par exemple, en Jordanie, les hydrogrammes des pluies dans les aires fertiles près des zones d'affleurement à alimentation potentielle ne montrent pas toujours des fluctuations saisonnières du niveau de l'eau (J.W. LLOYD et M.H. FARAG 1979). De telles fluctuations manquent également en Arabie centrale (CLARK 1977).

BURDON (1977) suppose toute une série de mécanismes autres que l'alimentation moderne pour rendre compte des gradients des eaux souterraines rencontrées dans les zones arides.

Il discute les effets possibles de l'abaissement préférentiel des zones d'exutoires, la compaction des sédiments, la surcharge des plateaux de basalte et l'action de la température et des gaz sur les niveaux régionaux des eaux souterraines. De plus, il considère que l'action tectonique et l'évaporation des "Sabkha" peuvent également maintenir des gradients de l'eau souterraine. L'hypothèse qu'on puisse attribuer les gradients à l'apparition de surélévations du niveau piézométrique pendant les périodes pluvieuses du Pleistocène et leur décroissance progressive ultérieure du fait de l'écoulement graduel de l'eau vers les exutoires lointains, semble plausible.

Bien qu'il soit vrai que les bassins des eaux souterraines même les plus grands, dans les régions arides sont destinés à l'épuisement ultime en raison de l'extraction de l'eau, à l'exception des extractions les plus prudentes, le fait que l'agriculture et l'industrie pourraient prospérer pendant plusieurs décennies est d'importance économique et sociale.

La surface de Koweït sous laquelle se trouvent les eaux souterraines dont la concentration totale en sels dissous est inférieure à 4 500 ppm est de 9 190 km² environ. Si l'on présume que 10% de la pluie (115 mm/an) s'infiltré à travers le sol et rejoint la nappe aquifère, on aura donc une quantité de 290 millions de l/j. à partir de l'infiltration. Par ailleurs, la quantité du sous-écoulement latéral à travers la Formation de Damman est de 169 millions de litres/jour, ce qui fait 460 millions de litres d'alimentation journalière moyenne. Donc, selon le taux d'exploitation actuel des eaux souterraines au Koweït, nous avons un déficit de 280 millions de litres par jour environ. Nous voyons donc que même dans l'hypothèse très optimiste et peu vraisemblable où l'infiltration serait de 10 % des précipitations, celle-ci ne peut compenser les quantités d'eau véritablement exploitées.

8.2. EXPLOITATION DES EAUX SOUTERRAINES

8.2.1. EXPLOITATION ACTUELLE

L'exploitation actuelle des eaux souterraines du Koweït peut être subdivisée en deux catégories principales.

- 1 - l'exploitation privée
- 2 - l'exploitation publique.

Nous avons déjà présenté une idée générale sur les champs des puits de Koweït (voir le chapitre 1, fig. 1-4 et le tableau 1-2).

On discutera ici de façon générale l'exploitation des eaux souterraines dans les champs de puits privés et de façon un peu détaillée l'exploitation des eaux souterraines dans les champs publics, c'est à dire les champs développés et dirigés par le Ministère de l'Electricité et de l'Eau.

8.2.1.1. CHAMPS DE PUIITS PRIVÉS

Il y a trois champs principaux de puits privés au Koweït:

- 1) champ de puits d'AL ABDALLY
- 2) champ de puits de Wafra
- 3) champ de puits de Al Abdalliya

Ils sont privés dans le sens qu'ils sont exploités par des citoyens comme c'est le cas au Wafra et Al Abdally, pour l'irrigation de leurs fermes, ou par des sociétés, comme c'est le cas au champ de puits d'Al Abdalliya qui est exploité par la Société du Pétrole du Koweït (KOC). En dehors de ces champs, il y a un certain nombre de puits répartis sur l'Etat de Koweït. La totalité de l'extraction de l'eau dans les puits

privés est de 370 millions de l/j. environ.

8.2.1.1.1. Champ de puits d'Al Abdally

On a déjà présenté le gisement des eaux souterraines dans la région agricole d'Al Abdally qui comprend les dépressions de Hannabiya, Quashaniya, et Umm Nigga (voir le chapitre 5, figure 5-16).

Sur la figure 8-1 on présente la situation de cette région dont la superficie est de 140 km² environ. L'eau souterraine exploitable dans cette région (de 2 000 - 7 500 ppm) se trouve dans les parties saturées de la Formation de Dibdiba supérieure. La profondeur du niveau de l'eau est de quelques dix mètres. L'épaisseur de la zone de l'eau exploitable est de quelques trente mètres. Elle est subdivisée en deux zones perméables séparées par une couche semi-perméable (YILDER SENAY 1975). La salinité de l'eau dans la zone supérieure est de 2 000 à 3 500 ppm. La zone inférieure est semi-captive avec une gamme de salinité de 4 000 à 7 500 ppm. (voir la figure 8-2).

L'extraction de l'eau souterraine dans la région agricole d'Al Abdally a été commencée en 1960 environ. Aujourd'hui, il y a approximativement deux cent puits à partir desquels on extrait de 90 à 140 millions de litres/j. La plupart de ces puits sont peu profonds, forés à la main, de grand diamètre (2-4 m). La profondeur moyenne des puits est de 15 m. La concentration totale de l'eau extraite en 1975 est de 4 000 ppm. Selon YILDER SENAY (1975), la salinité de l'eau se détériore avec l'extraction jusqu'à 6 000 ppm en 1980 à cause du suintement de l'eau salée à partir des zones inférieures sous l'influence du pompage dans les zones supérieures dans lesquelles les puits sont ouverts. Il est prévu que la salinité de l'eau se détériore jusqu'à 8 000 ppm en 1990 si l'exploitation pratiquée aujourd'hui continue.

Pour la conservation des eaux souterraines de notre région, nous avons recommandé (ABUSADA 1973 et YILDER SENAY 1975) de :

- boucher tous les puits qui ont été abandonnés par suite de la mauvaise qualité de l'eau;
- boucher tous les puits qui produisent de l'eau à salinité élevée (plus de 7 500 ppm);
- selon le cas, on peut boucher la partie inférieure du puits;
- réduire l'extraction de l'eau à partir de chaque puits pour ne pas dépasser la limite de 680 l/mn (YILDER SENAY 1975);

Par ailleurs, la distance entre puits voisins ne doit pas être inférieure à 400 m (YILDER SENAY 1975), et les puits peu profonds de grand diamètre forés à la main sont considérés comme le moyen le plus convenable pour l'exploitation des eaux souterraines dans cette région.

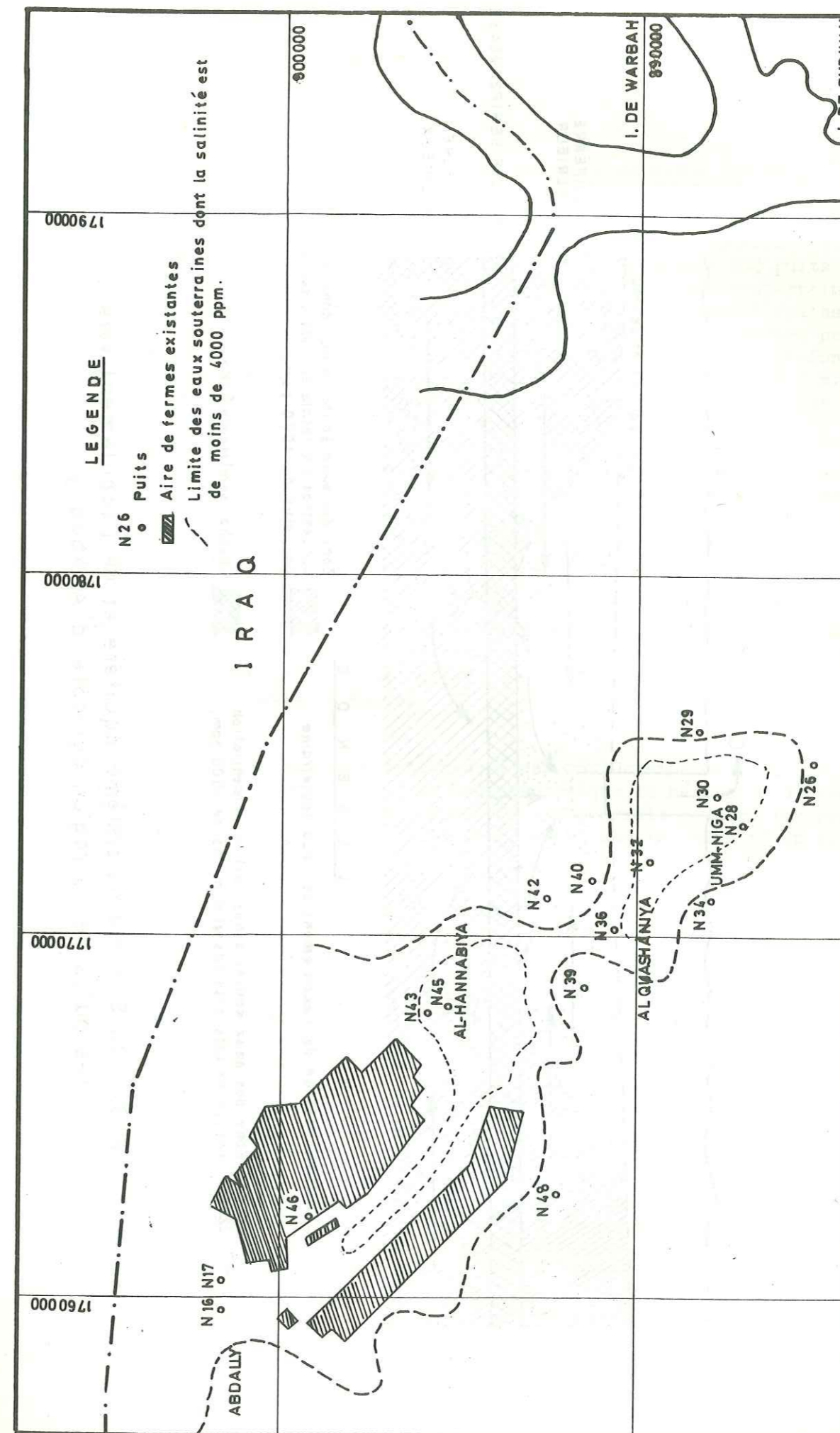


FIG. 8-1.— Situation de la région agricole d'Al-Abdally

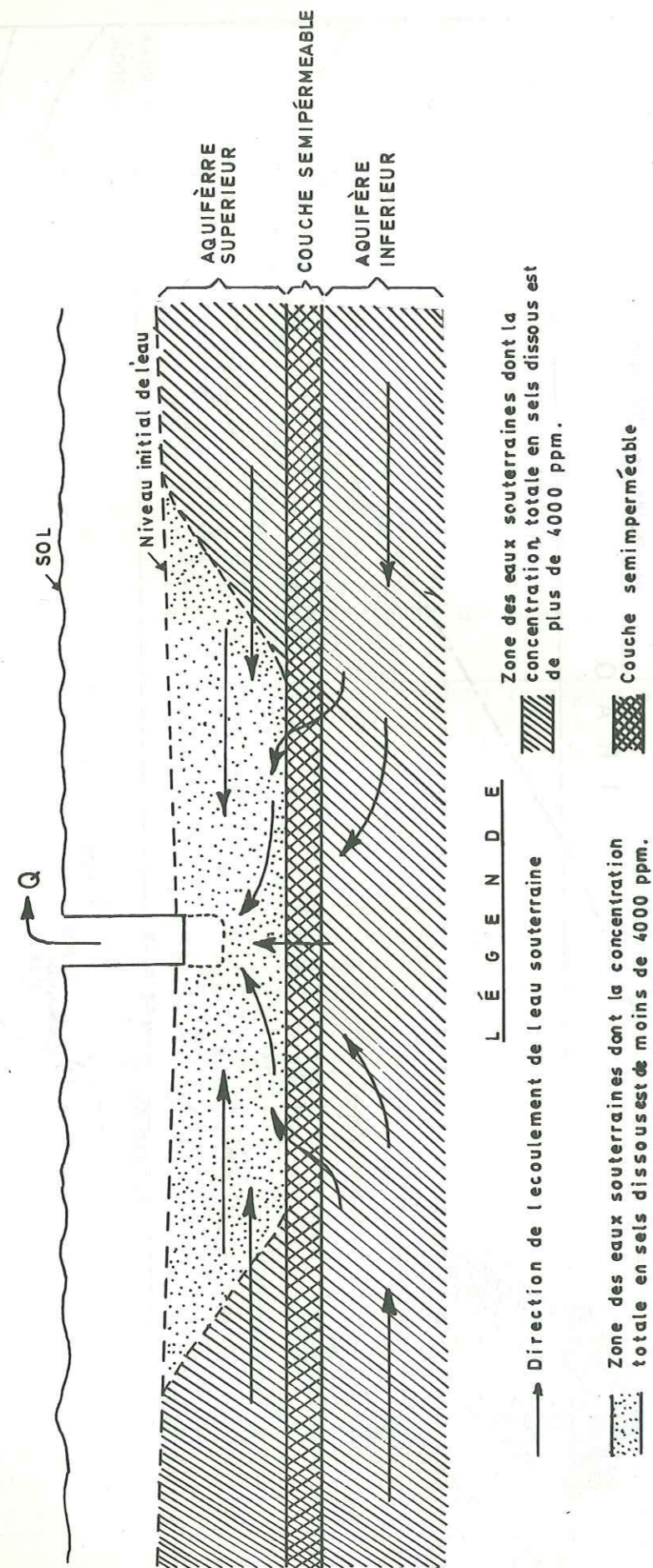


FIG. 8-2.— Schéma du système aquifère et de l'écoulement vers les puits de la région agricole d'Al-Abdally

8.2.1.1.2. Champ de puits de Wafra

Dans la région de Wafra, dont la superficie est de 60 km² environ, au Koweït sud (voir le fig.1-4), il y a 300 puits environ desquels on extrait de 136 à 205 millions de l/j. d'eau souterraine saumâtre à partir de l'ensemble du Groupe de Koweït, dont l'épaisseur est de 60 m environ dans cette région, pour l'irrigation des fermes privées. Approximativement, le quart de ces puits sont des puits peu profonds dont la profondeur est de 10 à 20 m et dont le diamètre est de 2 à 4 m. Les 3/4 restants sont des puits forés soit par battage, soit par rotation. Leur profondeur moyenne est de 55 m et leur diamètre moyen est de 12 pouces. La concentration totale en sels dissous dans les eaux est de 5 000 à 8 000 ppm. Les plantes cultivées au Wafra ainsi qu'Al Abdally sont les luzernes (*Médicago sativa* l.) les tomates (*Lycopersica esculentum*), les melons (*Cucumis melo*), les poireaux (*Alliumporrum*) et le persil (*Petroselinum*) etc.... (voir G. Al. NAKSHABANDI et al. 1978).

En considération de la grande quantité d'eau souterraine extraite dans la région de Wafra et des cultures réussies depuis 1960, le Ministère de l'Electricité et de l'Eau a commencé en 1979 un programme de ramassage des données des puits comme prélude à une étude hydrogéologique complète de Groupe de Koweït au Wafra.

Pour la conservation de l'eau souterraine de cette région, nous soulignons, en outre de l'étude hydrogéologique, la nécessité de dessiner et d'appliquer un système d'irrigation qui pourrait réduire les pertes d'eau par évaporation et infiltration, ainsi que la salinité du sol (ABUSADA 1979).

8.2.1.1.3. Champ de puits d'Al Abdalliya

Le champ de puits d'Al Abdalliya appartient à la Société de Pétrole de Koweït (KOC). Il a été mis en production en 1941 pour fournir de l'eau souterraine saumâtre de la Formation de DAMMAM pour l'irrigation des jardins, ainsi que pour faire face aux besoins industriels et municipaux. Le nombre total des puits dans le champ est de 27, mais l'extraction actuelle ne se fait que sur 10 puits. Les puits restants sont abandonnés par suite de rabattement du niveau dynamique de l'eau qui est le résultat du mauvais dessin de l'espacement des puits. La profondeur moyenne du toit de la Formation de Dammam dans l'aire de champ d'Al Abdalliya est de 120 m environ. La profondeur totale moyenne des puits est de 160 m., c'est à dire que le puits ne pénètre que 20 % environ de l'épaisseur totale de la Formation de Dammam dans cette région. La capacité de production du champ est de 27,25 millions de litres/j. d'eau saumâtre dont la concentration totale en sels dissous est de 3 500 à 4 500 ppm. L'insuffisance de la capacité de production du champ pour faire face aux besoins croissants a conduit le KOC à envisager la possibilité d'augmenter la capacité de production jusqu'à 56,75 millions de litres/j.

Les recommandations générales présentées par le Ministère de l'Electricité et de l'Eau (M.E.E., S.E.S. 1977) pour l'augmentation de la capacité de production sont les suivantes:

- le dessin de puits nouveaux devra être conforme à la figure 8-3. Ce dessin proposé par le Ministère de l'Electricité et de l'Eau diminuera le coût de la construction, par rapport au dessin proposé par le "K.O.C.", de 10 000 à 20 000 K.D. (14 5000 à 290000 FF) environ pour chaque puits. En plus, il diminuera les travaux de développement et d'entretien des puits;

- approfondir les puits existants jusqu'à la profondeur de 305 m environ pour qu'on puisse pénétrer au minimum de 30 m dans le membre I de la Formation de Dammam;

- surveiller le changement de la qualité de l'eau en fonction de la profondeur pendant les travaux d'approfondissement proposés dans quelques puits. Le contenu en H_2S doit être observé en particulier;

- le nombre des puits nécessaires pour l'extraction d'une quantité de 56,75 millions de litres/jour, ainsi que la répartition des puits seront précisés après l'analyse des données accumulées à la lumière de la quantité requise et du rabattement permis.

8.2.1.1.4. Exploitation privée dispersée

Outre les quantités d'eau extraites dans les champs privés mentionnés ci-dessus, une quantité de 45 millions de litres/jour environ d'eau souterraine saumâtre est extraite de puits dispersés, en particulier le long de la côte sud et dans les aires entourant les champs de puits existants.

8.2.1.2. CHAMPS DE PUIITS PUBLICS

Le Ministère de l'Electricité et de l'Eau extrait de l'eau souterraine dans 8 champs de puits d'où l'on extrait de l'eau saumâtre à l'exception du champ de Raudhatain duquel on extrait de l'eau douce.

On discutera ici quelques aspects de l'exploitation dans chacun des champs.

8.2.1.2.1. Champ de puits de Raudhatain

Nous avons déjà présenté le gisement des eaux souterraines dans la région de Raudhatain (voir le chapitre 5, section 5.5.2.(1) et les figures 5-12 et 5-13). Le champ de puits de Raudhatain a été dessiné et construit par PARSONS Corporation. Il a été mis en fonctionnement en 1963. Dans le tableau 8-1, on présente les évaluations des quantités d'eau souterraine de différentes qualités, emmagasinées et extractibles selon PARSONS Corporation (1963) et les Experts Arabes (1964).

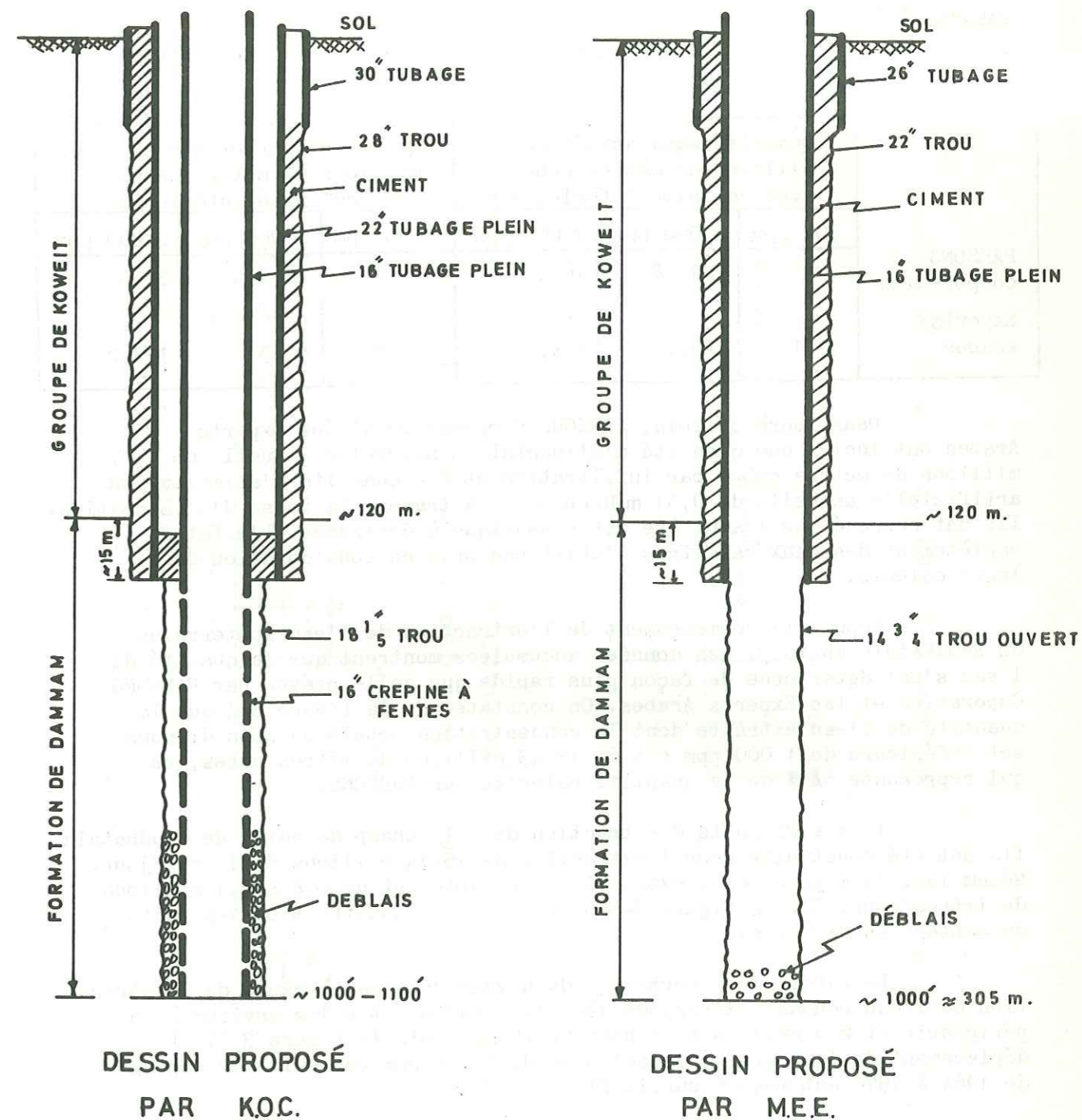


FIG. 8-3. — Dessins de puits proposés par la Société de pétrole de Koweït "K.O.C." et le Ministère de l'Électricité et de l'Eau pour le champ de puits d'Al-Abdalliya

Tableau 8-1

Evaluation des quantités d'eau souterraine emmagasinées et extractibles de la dépression de Raudhatain

	Quantité emmagasinée en millions de mètres cubes avec salinité inférieure à			Quantité extractible en millions de mètres cubes avec salinité inférieure à		
	700 ppm	1 000 ppm	2 000 ppm	700 ppm	1 000 ppm	2 000 ppm
PARSONS corporation		81,8	163,6		40,9	86,3
Experts Arabes	39,1	72,7	194,0	26,8	51,3	132,2

Dans leurs calculs, PARSONS Corporation et les Experts Arabes ont inclus une quantité d'alimentation naturelle annuelle de 0,97 millions de mètres cubes par infiltration et une quantité d'alimentation artificielle annuelle de 0,51 million m³ à travers la fosse d'alimentation. Ils ont supposé que l'aquifère est phréatique à drainance. L'effet de l'empiètement des eaux saumâtres n'était pas pris en considération dans leurs calculs.

Depuis le commencement de l'extraction de l'eau souterraine de Raudhatain en 1963, les données accumulées montrent que la qualité de l'eau s'est détériorée de façon plus rapide que celle prévue par PARSONS Coporation et les Experts Arabes. On constate sur la figure 8-4 que la quantité de l'eau extraite dont la concentration totale en sels dissous est inférieure de 1 000 ppm est de 18,43 millions de mètres cubes, ce qui représente 54 % de la quantité calculée par PARSONS.

Il y a 26 puits d'extraction dans le champ de puits de Raudhatain. Ils ont été construits pour l'extraction de 15,14 millions de litres/jour. Néanmoins, la moyenne de l'extraction véritable est de 6,8 à 9,1 millions de litres/jour. Sur la figure 8-5 on présente la construction des puits de captage au Raudhatain.

Le rabattement permanent du niveau de l'eau à cause de l'extraction de l'eau pendant la période 1963-1973 varie entre 1 m environ à la périphérie et 2 m environ au centre du champ (voir la figure 8-6). Le déplacement de la courbe d'isosalinité de 1 000 ppm par suite du captage de 1964 à 1976 est montré sur la figure 8-7.

Selon YILDER SENAY (1973), l'augmentation de la salinité a été exagérée par :

- 1) quelques puits du captage qui sont trop près de l'interface eau-douce, eau-salée et
- 2) quelques puits dont les crépines mises contre les parties inférieures de la zone des eaux douces, sont trop proches des zones sousjacentes dont l'eau est salée.

Par conséquent 12 puits du captage ont été stoppés en 1977. Les 14 puits restants sont utilisés pour l'extraction de 6,8 millions de litres/jour de l'eau, dont la concentration totale en sels dissous est de moins de 1 000 ppm, pour approvisionnement le village de Jahra ou la région agricole d'Al Abdally en eau douce.

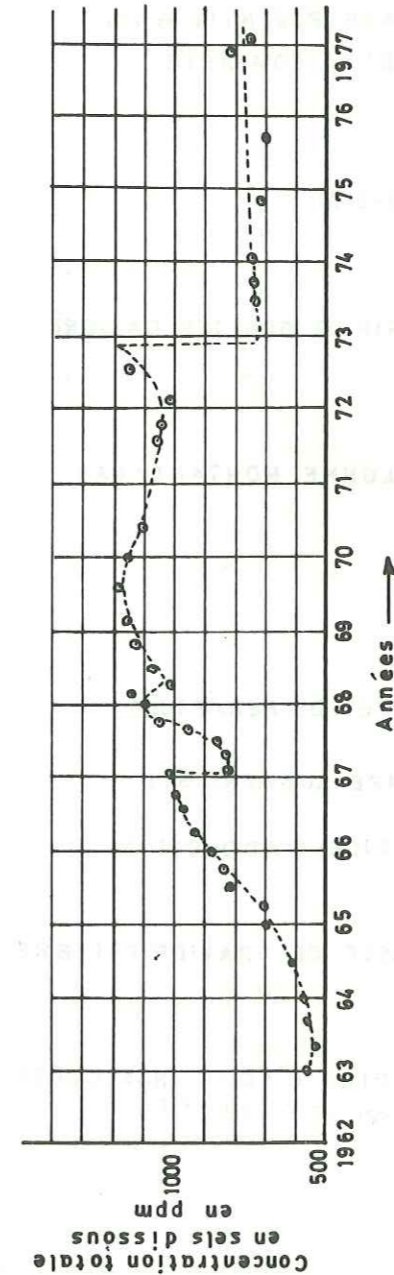


FIG. 8-4 a.— Changement de la qualité de l'eau extraite du champ de puits de Raudhatain en fonction du temps d'extraction.

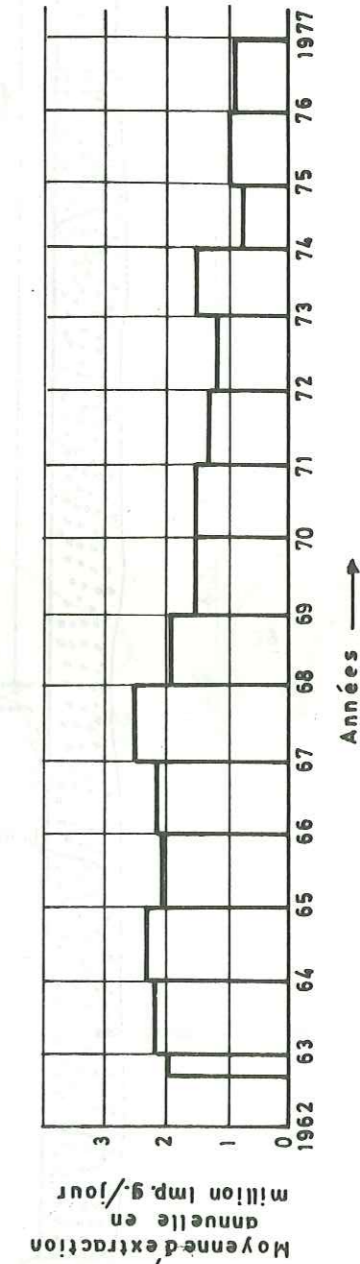


FIG. 8-4 b.— Extraction moyenne annuelle du champ de puits de Raudhatain.

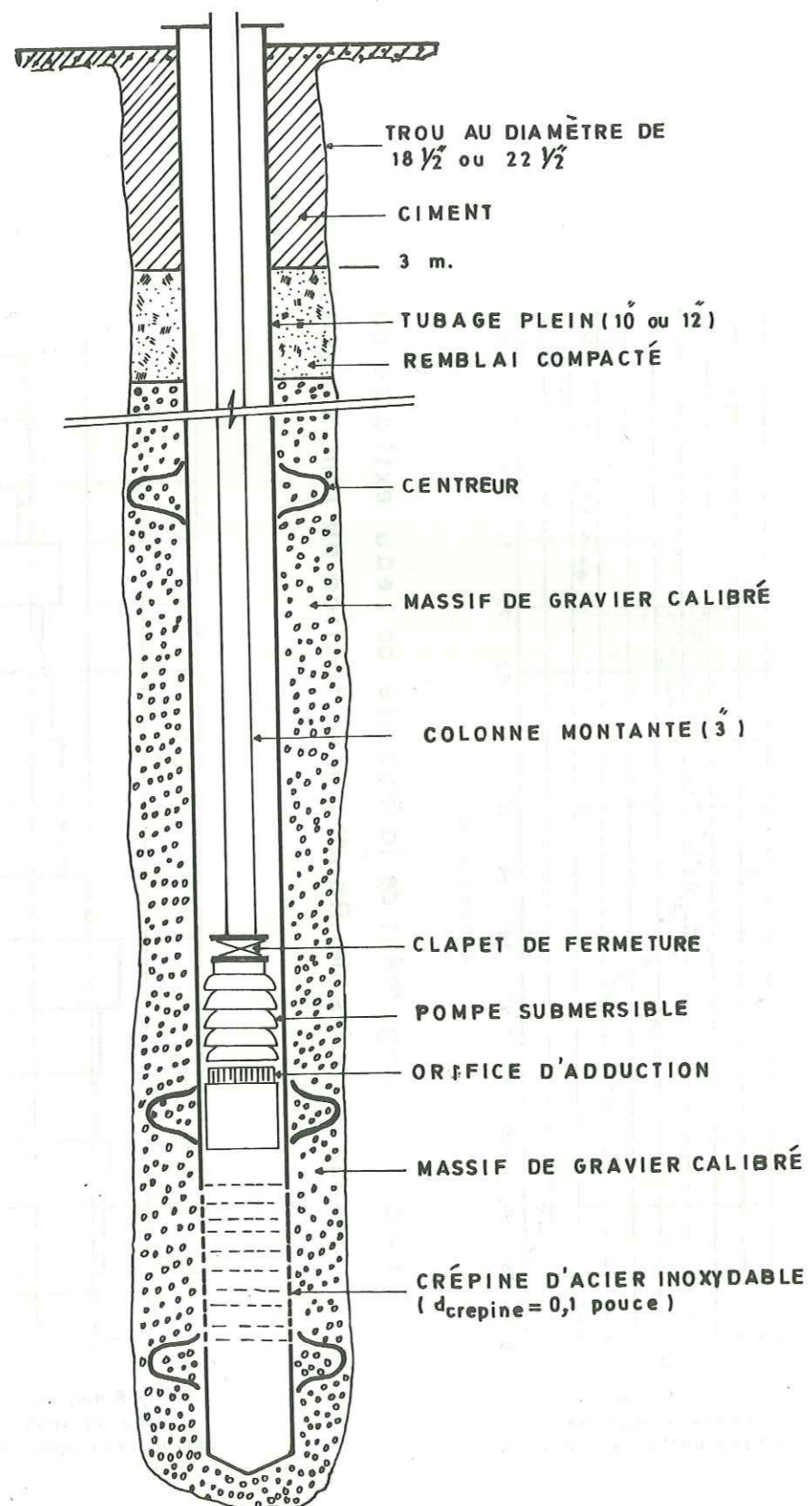


FIG. 8-5. — Type de puits de Raudhatin.

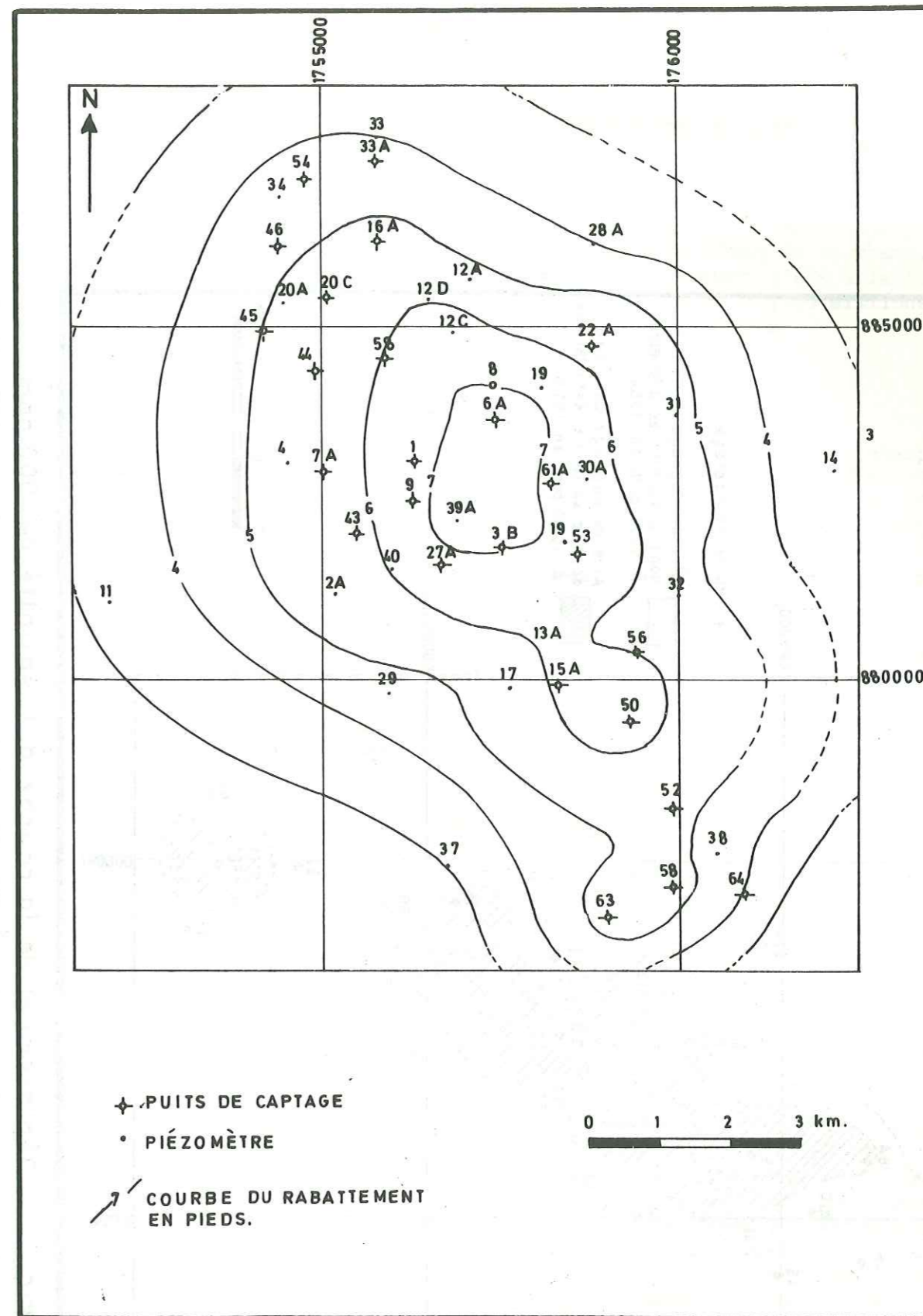


FIG. 8-6. — Rabattement permanent du niveau piézométrique dû aux captages à Raudhatin entre 1963 et 1973.

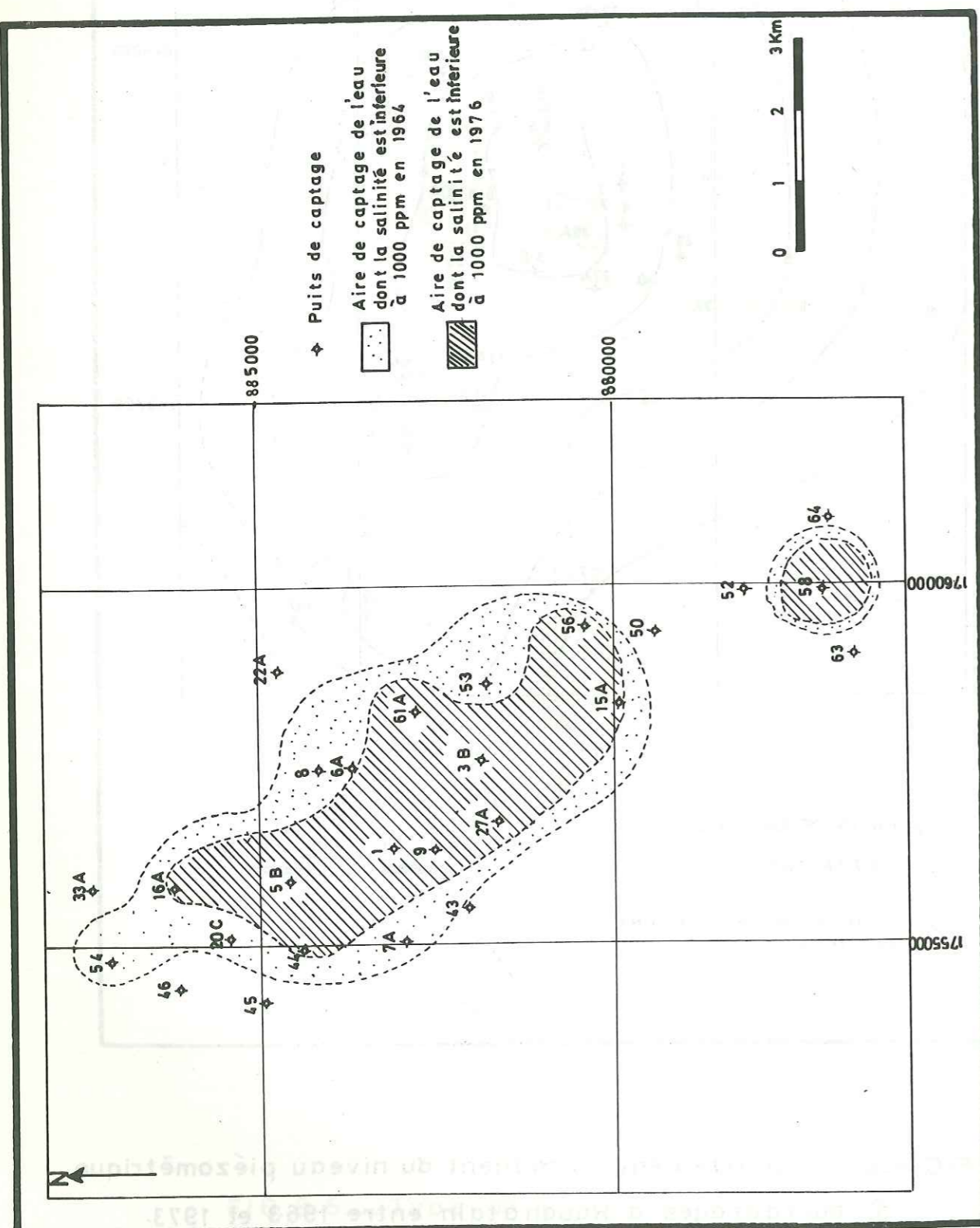


FIG.8-7. — Déplacement de la courbe d'isosalinité de 1000 ppm par suite des captages à Raudhatain pendant la période 1964-1976

8.2.1.2.2. *Champ de puits d'Umm Al Aish*

Il y a 26 puits de captage au champ de puits d'Umm Al Aish où la concentration en sels dissous est de 35 à 1 900 ppm. La construction de puits est de même type qu'au champ de Raudhatain, montré sur la figure 8-5. Par suite de la salinité élevée de l'eau de ce champ, il n'est mis en fonctionnement qu'en cas d'urgence pendant l'été à la fois avec le champ de Raudhatain pour l'extraction maximum de 15, 90 millions de litres/ jour d'eau dont la salinité moyenne est de 1 200 ppm.

8.2.1.2.3. *Champ de puits de Sulaiibiya*

Sur la figure 1-4 on présente la situation du champ de puits de Sulaiibiya. L'extraction de l'eau dans ce champ a commencé en 1951 avec 3 puits dont la capacité de production était de 2, 1 millions de litres/jour. Le nombre de puits a été augmenté pour devenir de 138 puits en 1969 dont la capacité de production est de 54,5 à 90,9 millions de litres/jour. L'aquifère dont on extrait l'eau est la Formation calcaire de Dammam dont le toit se trouve à la profondeur de 116 m environ. Jadis, la profondeur moyenne des puits était de 152 à 183 m. Récemment, la plupart des puits ont été approfondis jusqu'à la profondeur de 275 à 305 m. La concentration en sels de l'eau des puits est de 4 000 à 7 000 ppm, mais celle de l'eau véritablement produite est de 4 500 ppm environ. L'extraction continue de l'eau de ce champ a amené un rabattement de 46 m, au centre du champ et l'invasion d'eau plus salée par le côté est du champ.

8.2.1.2.4. *Les champs de puits du projet de Shigaya*

Le projet de Shigaya dans le Koweït sud-ouest consiste en 5 champs de puits, c'est à dire les champs A (13 puits), B (16 puits), C (32 puits), D (24 puits) et E (30 puits). Leur situation est présentée sur les figures 1-4 et 7-6. Elle a été dessinée par Dr. M.S. HANTUSH en 1969 pour l'extraction de 227 millions de litres/jour pour 50 années avec un rabattement du niveau de l'eau de 60 à 90 mètres. La concentration en sels dissous des eaux de ces champs varie entre 3 000 et 5 000 ppm. L'extraction de l'eau a commencé en 1972 au champ A, et en 1975 aux champs B et C. L'extraction de l'eau aux champs D et E commencera pendant l'été de 1980.

On présentera les détails de construction des puits du projet de Shigaya dans la section suivante (8.2.1.3.). Sur la figure 7-7, on présente la construction d'un puits dans la Formation de Dammam qui représente également les puits des champs B, C et D. D'ailleurs, nous présentons sur la figure 8-8 la construction d'un puits dans le Groupe de Koweït-Dammam qui représente généralement la construction des puits des champs A et E. Les tubes et crépines, jusqu'au calcaire de Dammam ont un diamètre de 16 pouces. Les trous ouverts (sans tubes) dans le calcaire de la Formation de Dammam ont un diamètre de 7 1/8 pouces. La longueur totale des crépines contre les zones perméables du Groupe de Koweït est de 30 m environ. La moyenne de la profondeur totale des puits est de 350m pour le champ A, 375m pour les champs B et C et 425 m pour les champs D et E.

Selon M.S. HANTUSH (1969), le choix des emplacements d'extraction de l'eau a été fait pour obtenir des débits raisonnablement élevés d'eau utilisable et assurer une espérance de vie du puits suffisante pour justifier le développement de l'approvisionnement en eau. Les facteurs impliqués dans le choix de la situation des champs de puits du projet de Shigaya sont les suivants:

- rabattement possible;
- épaisseur saturée des sédiments du Groupe de Koweit;
- caractères hydrauliques du système aquifère;
- proximité relative des emplacements d'extraction par rapport aux points de consommation, champs de puits existants, front d'eau salée, entre autres considérations.

8.2.1.3. CONSTRUCTION ET DEVELOPPEMENT DE PUIITS DU PROJET DE SHIGAYA

Nous présenterons ici quelques détails et constatations sur les techniques de construction et de développement des deux types de puits, c'est-à-dire de Dammam et puits à objectif double (Groupe de Koweit et Formation de Dammam) qui sont construits dans les champs de puits de Shigaya.

8.2.1.3.1. Puits de Dammam

Ce type de puits représente les puits des champs B, C et D (voir la figure 7-6 pour la situation de ces champs) dans le projet de Shigaya au Koweit sud-ouest. Sur la figure 7-7, on présente la construction générale de ce type de puits. Dans l'annexe IV, on présente le programme général du forage d'un puits de Dammam dans le champ D.

Les problèmes les plus prononcés dans la construction d'un puits de Dammam sont le choix du sabot de tubage, la perte de circulation du fluide de forage et le développement de la couche aquifère (c.a.d. le calcaire de Dammam).

Le choix du point de sabot de tubage est fondamental dans la construction des puits de Dammam, ainsi que des puits à objectif double, car un mauvais choix peut exiger des réparations très coûteuses. Le mauvais positionnement du sabot de tubage peut être le résultat de la confusion entre une des couches calcaires du Groupe de Koweit avec le calcaire de la Formation de Dammam, ce qui peut aboutir à remplir le trou libre dans la Formation de Dammam par les sables et la terre meuble du Groupe de Koweit.

Généralement, la perte de circulation de l'eau de forage a lieu à partir de la moitié inférieure du membre II de la Formation de Dammam. Cette perte est généralement de 30 à 100 %. L'expérience du forage au Koweit a montré qu'un foreur expérimenté peut forer, sans avoir de circulation, plus de 90 mètres dans la Formation calcaire de Dammam. On croit que la technique de "forage aveugle" est meilleure que le forage avec la boue de forage ou les graines de coton, car celles-ci peuvent endommager irrémédiablement la perméabilité de l'aquifère.

Malheureusement, les processus différents de développement des puits ne sont pas assez bien répertoriés pour qu'on puisse les classer de façon raisonnable. Néanmoins, l'exemple suivant sur le développement du puits D-7 indique que l'acidification par jet rotatif en particulier, donne de bons résultats:

Premier développement

- curage en employant une cuillère jusqu'à la profondeur totale de 427 mètres;
- pompage à débit varié de 7,58 à $37,89 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$. (8 heures);
- curage;
- acidification avec HCl de concentration 15 % (12 m³);
- développement par pompage (3 heures);
- pompages d'essai par paliers ($Q_1 = 7,58 \cdot 10^{-3}$, $Q_2 = 15,16 \cdot 10^{-3}$, $Q_3 = 22,73 \cdot 10^{-3}$, $Q_4 = 30,31 \cdot 10^{-3}$, $Q_5 = 37,89 \cdot 10^{-3}$ mètres cubes/seconde, $t = 90$ minutes). La valeur de la constante (C) obtenue à partir de cet essai est de $C = 18 \cdot 10^{-3} \text{ pied (Imp. g./min.)}^2 \approx 9,565 \cdot 10^3 \text{ sec}^2 \text{ m}^{-5}$ (voir la figure 8-9).

le puits, car la valeur de la constante C était supérieure à $5 \cdot 10^{-5} \text{ pied/ (Imp. g./min.)}^2 \approx 2,657 \cdot 10^3 \text{ sec}^2 \text{ m}^{-5}$

Deuxième développement

- pistonage rapide (3 heures);
- curage avec une cuillère de la profondeur de 419 m jusqu'à la profondeur totale du puits qui est de 427 m;
- acidification avec 9 m³ de HCl, dont la concentration est de 16,5 % au jet rotatif;
- pistonage lent pendant 2 heures;
- curage avec cuillère de 412,7 à 427 m de profondeur;
- pompage pour nettoyage;
- remontée pendant deux heures;
- pompage d'essai par paliers ($Q_1 = 2,65 \cdot 10^{-3}$, $Q_2 = 11,37 \cdot 10^{-3}$, $Q_3 = 17,05 \cdot 10^{-3}$, $Q_4 = 21,73 \cdot 10^{-3}$ Imp.g./min. $t = 90$ minutes). La valeur de la constante de perte de charge du puits calculée à partir du deuxième pompage d'essai est de

$$5.10^{-5} \text{ pied/ (Imp.G./min) }^2 \quad 2,657.10^3 \frac{\text{sec}^2}{\text{m}^5}$$

Par conséquent le puits est accepté (voir la figure 8-9).

8.2.1.3.2. Puits à objectif double (Groupe de Koweït et Formation de Damman)

Le type de puits à objectif double représente les puits des champs "A" et "E" du projet de Shigaya (voir la figure 8-8). Dans l'annexe IV on présente le programme de forage de ce type de puits.

En plus des problèmes de forage qu'on rencontre quant on fore un puits de Damman, on rencontre les problèmes suivants dans le forage d'un puits de Damman - Groupe de Koweït.

(1) Choix de la dimension de la fente de la crépine et dessin du filtre-gravier

D'après les diagraphies diverses (rayons gamma, polarisation spontanée, résistivité) et l'examen préliminaire des échantillons lithologiques de forage, on précise les zones les plus perméables. Par conséquent, des analyses détaillées sont faites pour les échantillons lithologiques de chacune des zones.

Les dimensions des fentes des crépines et du filtre-gravier sont précisées d'après la zone de granulométrie la plus fine qu'on trouve convenable pour être crépinée. Selon les pratiques courantes (JOHNSON 1966), on a trouvé que la crépine à fente continue en forme de V de type JOHNSON (fente = 0,04 ≈ 1mm, surface ouverte de la totalité de la crépine = 20 % environ) et le filtre gravier dont la granulométrie est de 2 - 5 mm feront l'affaire dans les champs de "E" "A", ce qui nous donne la possibilité de crépiner 30 mètres environ dans chaque puits.

La réalisation de puits à filtre-gravier est choisie pour le Groupe de Koweït, car celui-ci comporte des sables fins ainsi que des grès à ciment désagrégé. Donc, le filtre-gravier donne la possibilité d'utiliser des crépines dont la dimension de la fente et le pourcentage de la surface ouverte sont relativement larges. D'ailleurs, le filtre-gravier soutient le mur du trou de forage ainsi que la crépine. De plus, le Groupe de Koweït consiste en un ensemble de couches aquifères minces et dont la granulométrie est alternativement fine, moyenne et grossière, et dont la situation et l'épaisseur sont difficiles à préciser.

(2) Développement des zones crépinées

Le but des processus divers du développement est d'enlever les matières fines de l'aquifère, ainsi que celles du filtre gravier. La partie la plus difficile à enlever est la boue de forage. La présence du filtre gravier entre l'aquifère et la face de la crépine aggrave cette difficulté. Les méthodes de développement employées au Koweït sont le pistonnage, l'air comprimé, le pompage intermittent et le développement au jet rotatif.

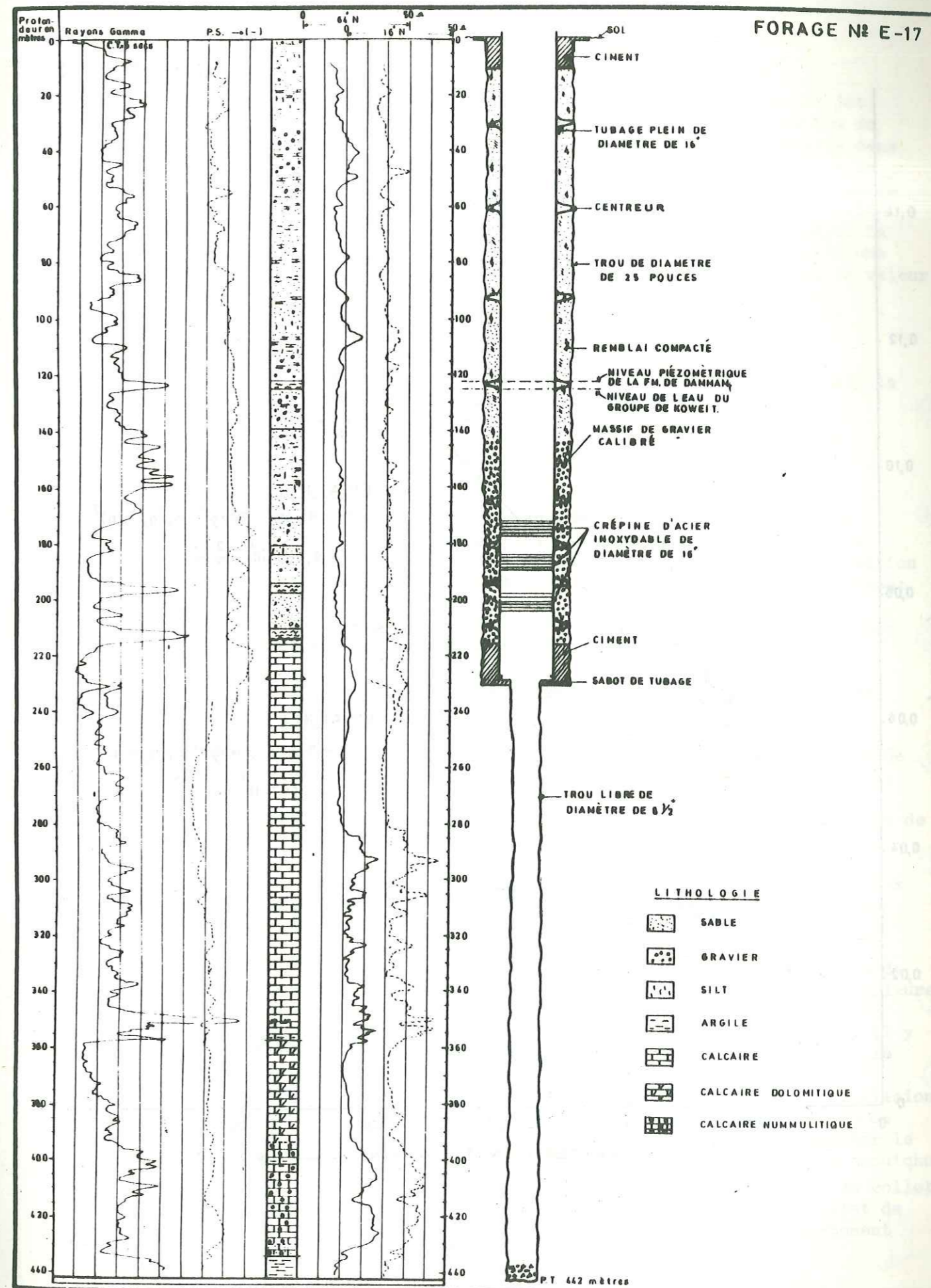


FIG. 8-8. - Type de construction de puits à objectif double dans les champs "A" et "E".

FORAGE N° D-7

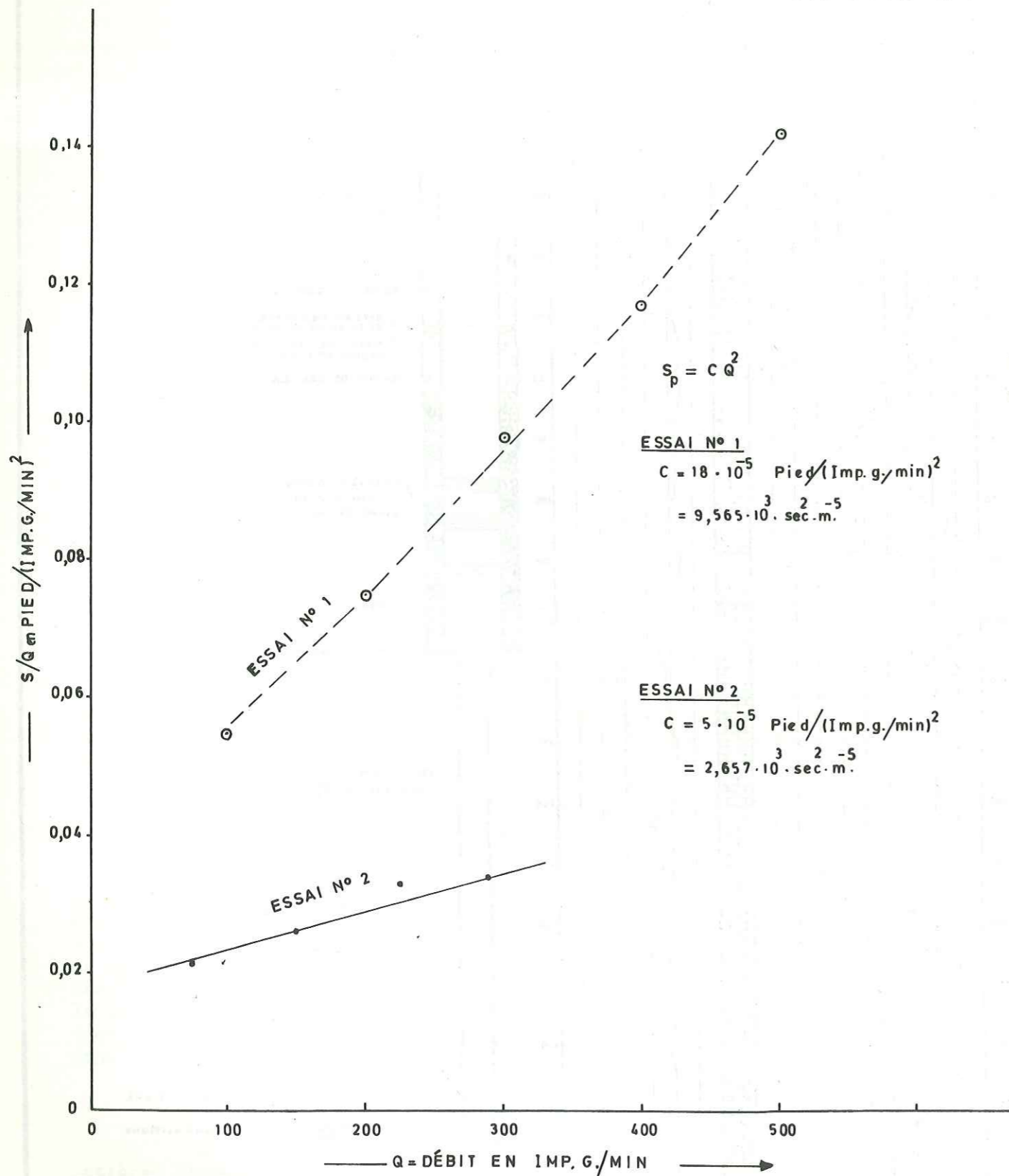


FIG. 8-9.— Influence du développement par l'acidification au jet rotatif sur la valeur de la constante de perte de charge du puits dans le puits de Damman n° D-7.

Ceci nous a donné de bons résultats quand on utilise le jet avec de l'acide HCl de concentration de 15 %. De plus, l'utilisation du polymère organique "Revert" (JOHNSON UOP, 1975) au lieu de bentonite dans le fluide de forage a amélioré d'avantage l'efficacité du puits, car le "Revert" a le caractère de l'auto-désintégration. Au site de E-22 dans le champ "E" on a employé, pour le forage du Groupe de Koweït, la bentonite au puits E-22 d'une part, et le "Revert" au puits E-22a d'autre part. La distance entre les deux puits est de 15 mètres. Au puits E-22, après une période de 46 jours de développement par les différentes méthodes, la valeur de la capacité spécifique obtenue, après un pompage d'essai à débit constant de $7,58 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ pour une période de 100 minutes, est de $2,49 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$.

Au puits E-22 après huit jours de travaux de développement, la valeur de la capacité spécifique obtenue est de $10,37 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ sous les mêmes conditions de pompage d'essai mentionnées ci-dessus.

(3) Forage dans la Formation calcaire de Damman

Pendant le processus de forage de la Formation calcaire de Damman, dans un puits à objectif double, il est nécessaire d'avoir une séparation hermétique entre le Groupe de Koweït d'une part, et la Formation de Damman d'autre part. Cette séparation est nécessaire pour qu'on puisse:

- protéger les zones perméables crépinées dans le Groupe de Koweït contre les déblais de forage de la Formation de Damman;
- empêcher la perte de circulation de l'eau de forage dans le Groupe de Koweït;
- collecter des échantillons d'eau véritablement représentatifs de l'eau de la Formation de Damman sans aucun mélange avec l'eau du Groupe de Koweït;
- conduire un pompage d'essai pour déterminer les caractères hydrauliques de la Formation de Damman séparément.
- protéger les crépines, dont la construction est délicate par rapport aux tubes, contre le mouvement rotatif des tiges de forage pendant le forage de la Formation de Damman sous-jacente.

Pour avoir la séparation nécessaire, nous utilisons un train de tubes de diamètre de 8 5/8 pouces muni d'un packer à son extrémité inférieure (voir la figure 8-10). A la surface intérieure du tubage de diamètre de 16 pouces, au niveau de 6 mètres environ au-dessus du sabot de tubage, il y a quatre saillies d'acier fortement soudées pour fournir un siège pour le packer. En faisant descendre le train de tubes de diamètre de 8 5/8" dans le puits, le collet "E" se glisse vers le haut au moment de la collision de celui-ci avec les saillies "G" par suite de la rupture des clavettes de cisaillement "F". Les clavettes de cisaillement ne servent qu'à empêcher le glissement, vers le haut, de l'assemblage du collet "E" et du bloc de caoutchouc "C", avant d'avoir la collision mentionnée ci-dessus. Le glissement du collet "E" vers le haut achève le scellement hermétique désiré avec le collet de laiton de forme conique "B", car le collet d'acier "A" est fixé fortement au tube-chemise de diamètre de 8 5/8 pouces.

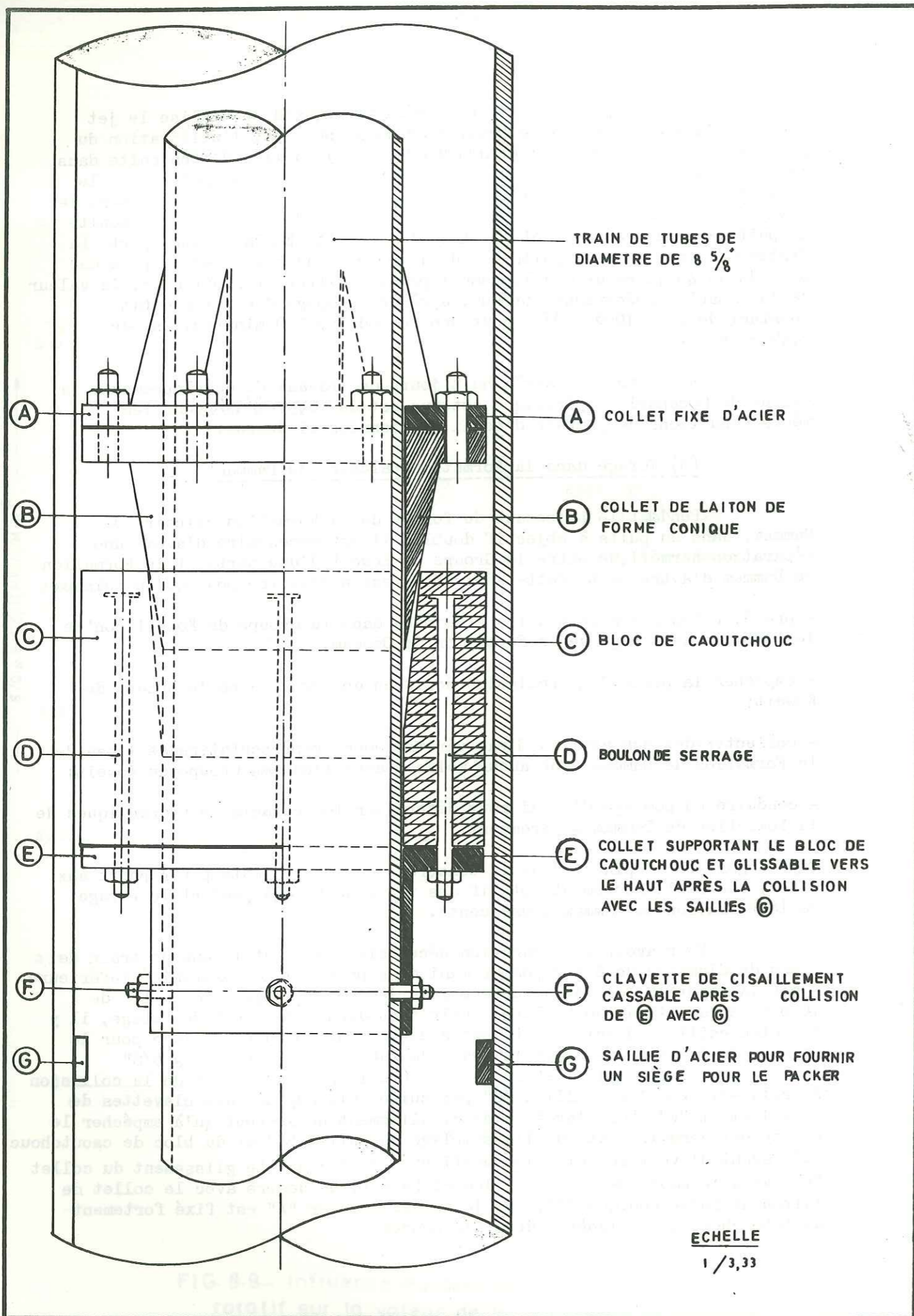


FIG. 8-10. — Dessin du packer utilisé pour la séparation des aquifères (D'après S.E.S., 1979)

8.2.1.4. UNE METHODE POUR LA DETERMINATION DU NOMBRE ET DE L'ESPACEMENT DES FENTES DANS LES CREPINES A FENTES

Il arrive souvent que la crépine toute faite ne soit pas disponible sur le marché local ou qu'elle soit trop chère à acheter, ce qui force les investisseurs à faire leurs crépines localement en taillant des fentes dans les tubes. Bien que généralement, il vaille mieux que les crépines soient faites correctement avec le pourcentage le plus grand possible de surface ouverte, on croit que, dans plusieurs cas, les crépines à fentes qu'on fait localement en taillant les fentes dans les tubes sont utiles. La plupart des puits privés au Koweït sont crépinés par ce type de crépines. Les fentes sont faites à l'aveuglette.

Nous avons essayé de développer une méthode pour déterminer le nombre et l'espacement qu'on doit avoir dans un tel type de crépine, du point de vue hydraulique.

La vitesse d'entrée de l'eau à travers les fentes de la crépine doit être préférablement de 0,1 ht/s. 0,0305 m/s. (JOHNSON 1966). Donc la surface ouverte dans la totalité de la crépine d'un puits est:

$$A = \frac{Q}{V} \dots\dots\dots (27)$$

$$A = 32,81 Q \dots\dots (28)$$

où

V = vitesse d'entrée de l'eau à travers les fentes de la crépine = 0,0305 m/s.;

Q = débit du puits en m³/s.;

A = totalité de la surface ouverte dans la crépine d'un puits en m²;

Le nombre des fentes dans un mètre de tube est donné par l'équation:

$$Y = \frac{A}{ZLW} \dots\dots\dots (29)$$

$$= \frac{32,81 \cdot 10^6 Q}{ZLW} \dots\dots (30)$$

où

Y = nombre de fentes dans un mètre du tubage à fentes;

Z = longueur totale de la crépine dans le puits en m.;

L = longueur de la fente en mm.;

W = largeur de la fente en mm.;

En supposant que les fentes par mètre de tube à fentes soient réparties de telle façon qu'on ait un nombre n de rangs de fente dans chaque mètre de tube à fentes, chaque rang contenant le même nombre de

fentes, l'espacement (S) entre les fentes adjacentes dans le même rang, étant toujours constant, est donné par l'équation (31), pourvu que la longueur de fente soit parallèle à l'axe du tubage:

$$(S + W) \frac{Y}{n} = \frac{(D/12) \pi}{3,281} \times 1\,000 \dots\dots\dots (31)$$

$$S = 79,793 \frac{Dn}{Y} - W \dots\dots\dots (32)$$

où

S = espacement entre les fentes adjacentes en mm.;

D = diamètre du tube à fentes en pouces.

n = nombre de rangs de fentes dans un mètre de tube à fentes.

A partir des équations (30) et (32) on aura:

$$S = \frac{79,793 \ nD}{32,81 \cdot 10^6 \ \frac{Q}{ZLW}} - W \dots\dots\dots (33)$$

$$W \left[\frac{2,432 \cdot 10^{-6} \ n \ DZL}{Q} - 1 \right] \dots\dots\dots (34)$$

Exemple:

Un puits sera crépiné par un tube à fentes dont la longueur (Z) = 30 m, le diamètre D = 12 pouces, et le débit = 15,15 m³/s. Les dimensions des fentes sont de 50 mm x 1 mm. Les fentes seront réparties sur 9 rangées de cercles. La longueur de la fente sera parallèle à l'axe du tubage. Combien de fentes aurons nous dans une longueur d'un mètre de tube, et calculer l'espacement, c.-à.-d. la distance entre les fentes adjacentes ?

A partir de l'équation (30) nous aurons:

$$Y = \frac{32,81 \cdot 10^6 \ Q}{Z \cdot L \cdot W}$$

$$= \frac{32,81 \cdot 10^6 \cdot 15,15 \cdot 10^{-3}}{30 \cdot 50 \cdot 1}$$

= 331,38 ≈ 330 fentes dans chaque mètre de tubage à fente.

A partir de l'équation (34), nous avons:

$$S = W \left[\frac{2,432 \cdot 10^{-6} \ n \ DZL}{Q} - 1 \right]$$

$$= 1 \left[\frac{2,432 \cdot 10^{-6} \ 9 \cdot 12 \cdot 30 \cdot 50}{15,15 \cdot 10^{-3}} - 1 \right]$$

$$= 25,005 \approx 25 \text{ mm}$$

A partir des équations (30) et (34) que nous avons développées, on peut calculer le nombre des fentes et l'espacement entre les fentes adjacentes pour n'importe quels D, Q, Z, L et n pourvu que ceux-ci soient spécifiés raisonnablement.

8.2.2. EXPLOITATION POTENTIELLE

En plus des champs de puits privés et publics qui existent véritablement, il y a trois régions principales au Koweït où l'on peut exploiter des quantités supplémentaires et qui constituent des réserves pour l'avenir (voir la figure 1-4 et le tableau 1-3). Les évaluations suivantes se basent sur un rabattement de 60 - 90 mètres pour plus de 25 années d'extraction continue dans les trois régions.

8.2.2.1. REGION I

Dans la région de Koweït sud-ouest, on peut exploiter de 160 à 180 millions de litres/jour d'eau souterraine à partir des Groupes de Koweït et de la Formation de Dammam, dont la concentration en sels dissous sera de 3 500 à 5 000 ppm (HANTUSH 1969).

8.2.2.2. REGION II

Dans cette région, selon HANTUSH 1969, on peut exploiter 136 millions de litres/jour d'eau à partir de la Formation de Dammam dont la qualité sera de 3 600 à 6 000 ppm.

8.2.2.3. REGION DE WAFRA

Selon le rapport de S.E.S. 1975, on peut exploiter une quantité de 136 à 182 millions de litres/ jour d'eau à partir de la Formation de Dammam.

8.2.3. EXPLOITATION DES EAUX SOUTERRAINES A LA LUMIERE DU DESSALEMENT

Nous présenterons ici un exemple de l'application de différentes méthodes de dessalement des eaux souterraines saumâtres ou salées dans trois emplacements au Koweït.

Le Ministère de la Défense de Koweït a des plans pour la construction de trois campements militaires. Les emplacements proposés pour ces campements n'ont pas d'accès aux réseaux existants du système d'approvisionnement de l'eau. Par conséquent, le Ministère de la Défense s'est adressé au Ministère de l'Electricité et de l'Eau (M.E.E.) pour étudier les possibilités d'approvisionner une quantité de 1/2 millions Imp.g/jour ≈ 2,27 millions litres/jour d'eau douce pour chaque campement.

L'étude conduite par le M.E.E. indique que l'approvisionnement demandé à partir du réseau existant exige l'expansion de celui-ci et l'installation d'une station additionnelle de pompage, ce qui coûtera une somme de 3 millions K.D. = 44 millions F.F. environ. De plus les travaux nécessaires pour l'approvisionnement ne seront pas achevés avant 1982.

L'auteur étant un géologue au service du M.E.E. a été chargé d'étudier les possibilités d'exploitation des eaux souterraines dans les trois campements. Les résultats de son étude indiquent que la concentration en sels de celles-la varie entre 3 000 et 12 500 (voir le tableau 8-2).

Tableau 8-2

Analyses chimiques représentatives des eaux souterraines des trois campements

Paramètres	A	B	C
PH	7,1	7,2	8,2
Ca ppm	827	318	600
Mg "	373	118	135
Na "	3 100	355	
K "	57	-	-
Fe "	11,35	-	-
SO ₄ "	2 476	1 070	840
Cl "	4 752	667	3 370
HCO ₃ "	210	159	60
F "	-	2,1	-
B "	-	0,8	-
Cond: Elect. en u. mmo/cm	13 615	5 284	11 000
Concentration totale	12 500	2 885	7 975

Evidemment les analyses présentées ci-dessus indiquent que les eaux souterraines dans les trois campements ne conviennent pas pour la consommation humaine. Par conséquent, l'auteur a proposé de charger le Centre de Recherche et de Développement de Ressources en Eau (C.R.D.R.E.) du M.E.E. d'étudier les possibilités de dessalement de ce type d'eau par les différentes techniques de dessalement.

8.2.3.1. TECHNIQUES DE DESSALEMENT CONSIDEREES

Le C.R.D.R.E. a considéré les techniques suivantes dans son étude.

8.2.3.1.1. Dessalement par vaporisation instantanée à étages multiples

La méthode de V.I.E.M. est la seule méthode dans laquelle Koweit a une expérience étendue. Elle consiste à faire passer l'eau salée préchauffée à travers une série d'étages ou enceintes, avec à chaque étage successif une pression plus basse pour qu'une part de l'eau salée puisse se transformer en vapeur dans chaque étage (Office of Saline Water 1970, J.R. VAILLANT 1970).

Néanmoins, cette méthode n'est pas faisable pour les trois campements parceque:

- (1) elle exige une chaudière à vapeur de capacité de 12 tonnes/heure, ce qui rend une usine très chère à acheter et à faire marcher;
- (2) une usine de capacité de 1/2 million Imp.g./jour 2,27 l/jour exigera de 3,25 millions Imp.g./jour \approx 14,76 litres/jour environ d'eau saumâtre pour l'alimentation et le refroidissement. En plus, une quantité de 4,5 millions de litres/jour de saumâtre sera produite comme déchet.

8.2.3.1.2. Méthode de compression de vapeur (C.V.)

Cette méthode se base sur le recyclage de l'énergie de condensation. La vapeur fournie par l'eau salée a une température t se trouve à une pression p inférieure à la pression de vapeur saturante de l'eau pure; cette vapeur ne peut donc se condenser qu'à une température inférieure à t , et l'eau salée ne peut servir de fluide de refroidissement pour obtenir la condensation de cette vapeur. Mais supposons qu'on comprime la vapeur fournie par l'eau salée, pour faire passer sa pression de la valeur p à la valeur p_0 pression de vapeur saturante en présence d'eau pure à la température t_0 ; cette vapeur ainsi légèrement surchauffée, peut alors se condenser dans un échangeur de chaleur placé au sein de l'eau salée. La chaleur libérée par cette condensation servira ensuite à évaporer une nouvelle quantité de vapeur à partir de l'eau salée. Théoriquement, le cycle pourrait se poursuivre indéfiniment, à condition qu'on fournisse l'énergie nécessaire pour comprimer la vapeur (J.R. VAILLANT 1970).

Les unités de C.V. sont les plus chères à acheter et à faire fonctionner. Néanmoins, leur coût est insensible à la salinité de l'eau saumâtre d'alimentation. A l'exception du coût de l'acide qui est fonction de l'alcalinité de l'eau d'alimentation, les différents composants du coût de fonctionnement sont également insensibles à la salinité de l'eau d'alimentation. La méthode de C.V. est généralement considérée comme éprouvée.

8.2.3.1.3. Méthode de l'électrodialyse (E.D.)

La méthode de l'Electrodialyse est un processus de dessalement dans lequel un courant continu force les ions du sel à travers une membrane perméable sélective pendant que l'eau s'écoule entre des membranes plates et parallèles qui sont électriquement chargées. L'enlèvement des ions du sel laisse de l'eau dessalée et relativement pure (Office of Saline Water, 1970).

Les unités de E.D. sont les moins chères à acheter et à faire fonctionner. Elles sont simples à entretenir. Par cette méthode, on peut anlever les sels jusqu'à la limite désirée. Ainsi, on ne doit pas remplacer quelques minéraux, ni pour le rehaussement du goût, ni pour le contrôle de la corrosion, comme c'est le cas dans les processus de distillation.

8.2.3.1.4. Dessalement par la méthode de l'osmose inverse (O.I.)

L'osmose inverse est une méthode de dessalement dans laquelle l'eau salée, sous pression, est forcée à travers une membrane qui ne permet pas au sel de passer aussi rapidement que l'eau, ce qui réduit la concentration en sels dans l'eau produite (O.S.W. 1970).

Tandis que les coûts des unités d'O.I. sont fortement proportionnels à la salinité de l'eau d'alimentation, les coûts de fonctionnement semblent en dehors de la salinité, dépendre assez fortement de la teneur en bicarbonates et en sulfates de l'eau d'alimentation. Les unités d'O.I. impliquent un système extensif de prétraitement, tel que la préchloration, injection de sulfate de sodium, injection d'acide et injection d'un additif désincrustant.

8.2.3.2. LES METHODES DE DESSALEMENT CHOISIES POUR LES TROIS CAMPEMENTS

Selon le rapport du C.R.D.R.E. 1979, les méthodes choisies pour les trois campements sont comme suit:

Campement A (12 500 ppm)

Les méthodes d'E.D. et O.I. sont très compliquées. La concentration totale en sels dissous et le contenu en sulfates semblent être les problèmes principaux. Donc la méthode de C.V. a été recommandée par le C.R.R.E. pour le campement "A".

Campement B (3 000 ppm)

Pour le campement B, les trois usines de dessalement dessaleront de façon satisfaisante. L'usine de C.V. est beaucoup plus chère que celles de E.D. et O.I., mais les coûts de fonctionnement sont moins élevés et le dessin est relativement plus simple que ceux de l'usine de O.I.

Campement C (8 000 ppm)

Pour le campement C, l'usine de C.V. est bonne mais très chère. L'usine de E.D. est simple et la moins chère, mais il n'y a pas de renseignements concrets sur son fonctionnement avec de l'eau comparable à celle du campement C.

En ce qui concerne l'usine de O.I., le fournisseur de ce type d'usine fournira le type de membrane que le C.R.R.E. croit convenable pour l'eau dont la concentration totale en sels dissous est de 8 000 ppm. Un rapport du Bureau de Recherche et de Technologie de l'Eau des Etats Unis, sur le fonctionnement d'une usine de O.I. dont la capacité est de 1/2 million gallons, et dans laquelle on utilise le même type de membrane que le fournisseur a recommandé pour le campement C, présente le cas

d'une usine qui fonctionne de façon satisfaisante avec une eau saumâtre dont la concentration en sels est de 6 500 ppm. Par conséquent, le C.R.R.E. incline à recommander le système de O.I. pour le campement C.

8.2.3.3. SYSTEME DE PRISE D'EAU

Le système de prise d'eau et de décharge dans chaque campement consistera en deux ou trois puits et un réseau de capacité de 1,25, 0,714 et 1,111 millions Imp.g./jour dans les trois campements A, B, et C respectivement. Chaque puits aura une pompe immergée qui déverse dans un réservoir souterrain d'une capacité de 0,5 million Imp.g. d'eau saumâtre. Deux pompes seront utilisées pour alimenter les unités de dessalement. L'eau douce produite s'écoulera par gravité vers un réservoir souterrain dont la capacité est de 2 millions Imp.g.. Les eaux de saumâtre qui résultent du dessalement, seront disposées dans un puits foré à la main au campement "A", dans un puits profond d'injection au campement "C". Au campement "B" l'eau saumâtre produite pourra être utilisée pour l'arrosage des jardins.

8.2.3.4. CONCLUSION

Dans le tableau 8-3, nous présenterons la méthode de dessalement recommandée, ainsi que quelques données sur le nombre des unités de dessalement, investissement initial, les coûts divers etc. pour chaque campement. Nous y constaterons que la méthode de C.V. est la plus chère (3,13 F.F. pour mille litres) tandis que le prix de production de mille litres d'eau potable par les méthodes de O.I. et E.D. est de 2,26 et 1,25 F.F. respectivement; d'ailleurs le coût de revient moyen de 1 000 litres d'eau potable produit par les usines de distillation de l'eau de la mer, qui sont en service au Koweit est de 1,06 F.F. environ, le coût de revient de transport de l'eau depuis l'usine jusqu'au consommateur n'est pas compris.

Malheureusement, les données sur le coût de transport de l'eau douce depuis les usines de distillations jusqu'aux consommateurs ne sont pas disponibles. Néanmoins, le Bureau de Statistiques du M.E.E. nous a fourni une valeur approximative de 0,132 K.O. = 1,97 F.F. comme la valeur du coût de revient total de chaque mille litres d'eau potable. Pour approvisionner cette eau depuis le réseau de tubes existants jusqu'aux sites des trois campements proposés, il faut étendre le réseau existant, ce qui implique un investissement initial additionnel de 3 millions K.D. $\approx 43,48$ millions F.F.. En supposant un intérêt de 5 % et une période d'amortissement de 20 ans, cette somme sera de 115,36 millions F.F. après 20 ans. Si le taux d'approvisionnement en eau distillée est de 1,5 million Imp.g./j $\approx 6,81$ millions litres/jour pour l'ensemble des trois campements, le coût additionnel du transport de l'eau depuis le réseau existant jusqu'aux sites des trois campements sera de 2,32 F.F. pour chaque mille litres. Donc le coût total de l'approvisionnement en eau potable depuis les usines de distillation jusqu'aux sites des campements est de $1,914 + 2,32 = 4,23$ FF pour chaque mille litres. Par contre le coût moyen de revient de chaque mètre cube d'eau potable qu'on produira par

TABLEAU 8-3

LES USINES ET COUTS DE DESSALEMENT

CAMPEMENT		A	B	C	
CONCENTRATION TOTALE EN SES DISSOUS EN PPM.		12500	3000	8000	
USINE		COMPRESSION DE VAPEUR C.V.	ELECTRODIALYSE E.D.	OSMOSE INVERSE O.I.	
NOMBRE D'UNITES		4	2	2 ou 4	
ALIMENTATION EN EAU SAUMATRE EN MILLION l/j		5,68	3,24	5,05	
RENDEMENT EN EAU POTABLE EN MILLION LITRE /j		2,27	2,27	2,27	
POURCENTAGE DE RECOUVREMENT		40 %	70 %	45 %	
INVESTISSEMENT INITIAL DANS LES USINES DE DESSALEMENT EN MILLION DINARS KOWEIT (D.K.) ET FRANCS FRANCAIS (FF)		D.K.	0,7241	0,140	0,3771
		F.F.	10,49	2,03	5,47
INVESTISSEMENT INITIAL TOTAL EN MILLION D.K. ET FF.		D.K.	1,068575	0,4575	0,77315
		F.F.	15,49	6,63	11,21
COÛT DE L'EAU POTABLE POUR CHAQUE MILLE IMP. GALLONS ≈ 4542,5 LITRES	SANS FRAIS	D.K.	0,434	0,146	0,300
		F.F.	6,29	2,12	4,35
	AVEC FRAIS	D.K.	0,982	0,393	0,707
		F.F.	14,23	5,70	10,25
DUREE DE REELISATION EN MOIS		13 3/4	5	10 1/2	

INTERET SUR LE CAPITAL : 5 %

PERIODE D'AMORTISSEMENT : 5 ans pour les pompes et 20 pour tout le reste.

METHODE D'AMORTISSEMENT : dépréciation.

COUT DU TERRAIN : nul.

le dessalement de l'eau souterraine saumâtre et salée aux emplacements des trois campements sera de 2,21 FF, ce qui montre que l'exploitation et le dessalement de l'eau souterraine saumâtre et salée est plus intéressante dans le cas présenté ci-dessus.

8.3. ALIMENTATION ARTIFICIELLE DES NAPPES SOUTERRAINES

Dans le but d'exposer les possibilités d'exploitation des couches aquifères pour le stockage de l'eau de surface, nous présenterons les résultats rapportés par PARSONS 1964 et YILDER ÇENAY (Editeurs MUTAWA et ABUSADA) 1977 à cet égard.

Dans leurs études, ils ont considéré les possibilités d'alimentation artificielle à travers des fosses d'alimentation et des puits d'injection dans la région de Raudhatain au Koweït nord.

8.3.1. FOSSE D'ALIMENTATION

En utilisant de l'eau extraite depuis quelques puits tout près de deux fosses d'alimentation expérimentales dans la dépression de Raudhatain, PARSONS CORPORATION a effectué en 1962-1963 dix infiltrations d'essai pour l'évaluation de la capacité d'infiltration, les effets de colmatages des matières en suspension, le développement des algues et des bactéries et pour le choix du gravier nécessaire pour couvrir le mur de la fosse d'alimentation. La capacité moyenne d'infiltration ainsi déterminée est de 9,14 m/j. La concentration en chlorures qui est nécessaire pour empêcher la pousse des algues et des bactéries qui ont un effet colmatant est de 4-8 ppm. Par conséquent, une fosse d'alimentation de 265,16 mètres de longueur, 9,45 mètres de largeur et de 3,35 mètres de profondeur, avec une superficie d'infiltration effective de 2 972 m², a une capacité moyenne d'infiltration de 27,25 millions de litres/jour. Ces spécifications de la fosse d'infiltration ont été choisies par PARSONS avec l'espoir qu'une quantité de 507,25 millions de litre/an qui tombe sur la dépression de Raudhatain, alimente la couche aquifère à travers la fosse d'alimentation. Néanmoins, depuis la construction de cette fosse, aucune alimentation n'est arrivée à travers la fosse à l'exception de deux fois: la première fois avant 1970, mais malheureusement il n'y a pas de données sur cet événement, la deuxième fois en 1976. YILDER SENAY 1977, rapporte que le niveau de l'eau dans le puits R-39 A, qui se situe près de la fosse d'alimentation (Fig.8-11), a subi un relèvement maximum de 0,91 m. De plus, il rapporte que les eaux de pluie sont arrivées à la fosse immédiatement après la tempête et ont continué d'y couler pendant 4 jours, la quantité totale infiltrée étant de 227 à 454 millions de litres environ.

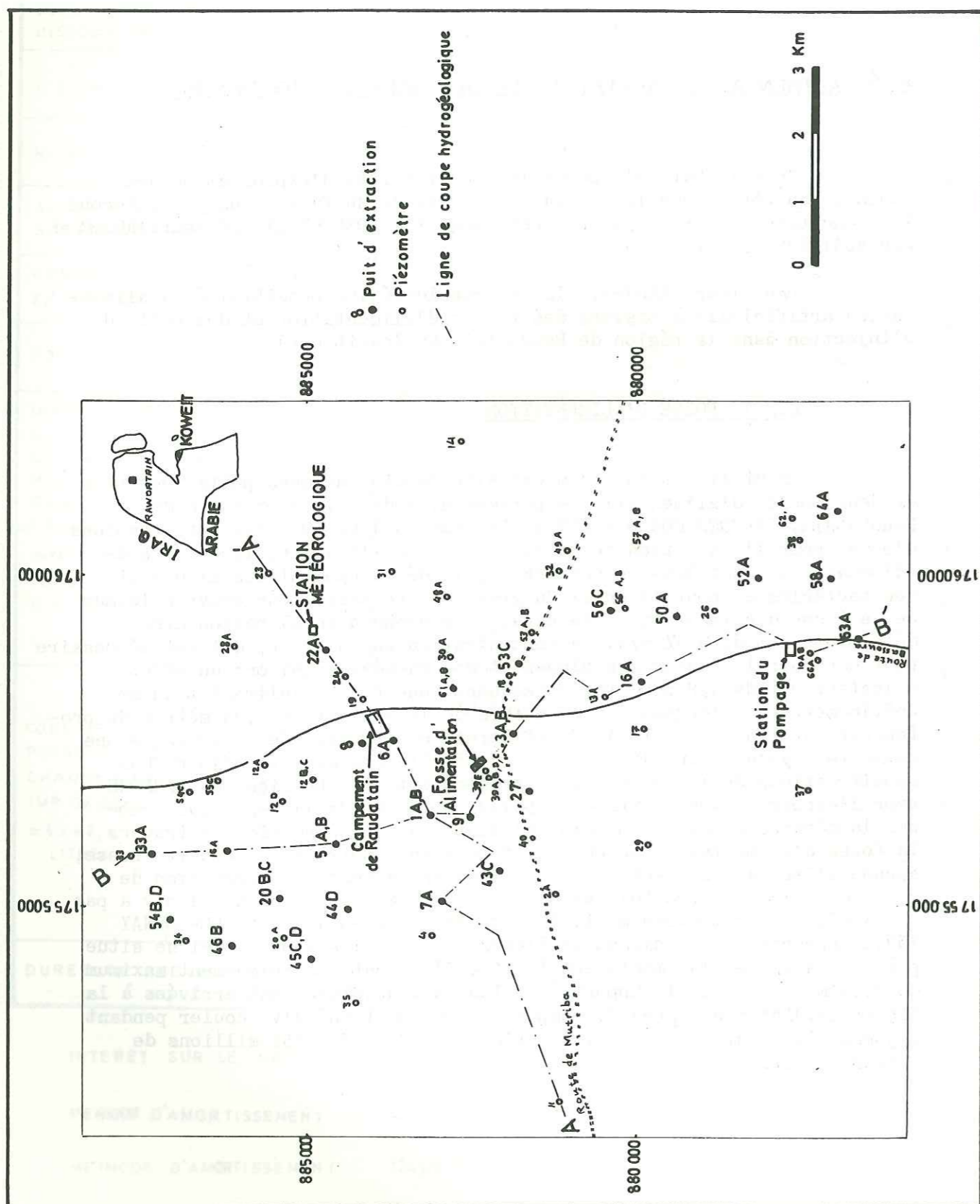


FIG. 8-11.— Situation des puits et de la fosse d'alimentation artificielle au Raudhatain.

Les constatations mentionnées ci-dessus indiquent que le mur de la fosse d'alimentation est raisonnablement perméable. Néanmoins, on croit que les lentilles d'eau douce formées par l'alimentation artificielle, par d'infiltration, soit sur prairie d'épandage, soit à travers la fosse d'alimentation ne sont pas assez épaisses pour qu'on puisse exploiter un pourcentage raisonnable de l'eau infiltrée, en particulier quand on considère qu'il n'y a pas de couches imperméable pour empêcher la fuite vers le haut, de l'eau saumâtre ou salée sousjacent, ce qui est le cas au Raudhatain (voir la figure 8-12).

8.3.2. PUIS D'INJECTION

Dans la technique d'injection, on envoie de l'eau dans l'aquifère à travers un puits. L'eau injectée pousse l'eau de la Formation en occupant la place de celle-ci autour de la zone d'injection (voir la figure 8-12c). L'écoulement de l'eau est en principe identique dans les cas d'injection et d'extraction à l'exception du sens de l'écoulement. La configuration de l'interface entre l'eau injectée et l'eau de la Formation sera semblable à un ballon se gonflant lorsqu'on fait l'injection et à un ballon se dégonflant pendant l'extraction de l'eau de puits.

Généralement, le pourcentage récupérable d'eau injectée est relativement plus grand que celui de l'eau infiltrée à travers les fosses d'alimentation. Le pourcentage récupérable dépend du système et de l'homogénéité de l'aquifère. Dans les conditions d'un système aquifère non homogène, le mouvement de l'interface sera différentiel en fonction de la variation de la porosité effective sur toute la face d'injection (Fig. 8-12 d). Par conséquent, l'interface aura une superficie relativement large, ce qui entraîne plus de mélange entre l'eau injectée et l'eau de la Formation.

En 1977, une injection d'essai à débit constant de 100 Imp.g./min $\approx 75,77 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{sec}$. pour une durée de 29 jours a été exécutée au puits R-63A (fig. 8-14). La concentration totale en sels dissous de l'eau extraite de ce puits est de 2 800 ppm. La concentration totale en sels dissous dans l'eau d'injection était de 400 ppm. Cette eau a été extraite depuis le puits R-58 A. La distance entre les deux puits est de 1 km. Avant l'injection d'essai dans le puits R-63 A, on y a effectué un pompage d'essai à débit constant de 100 Imp.g./min. pour une durée de 1 440 minutes, pour déterminer la qualité de l'eau et la capacité spécifique de ce puits (Fig. 8-13). Après la redescente de l'injection d'essai au puits R-63 A, on y a effectué un pompage d'essai à débit constant de 100 Imp.g./min pendant 40 jours pour qu'on puisse étudier la variation de la qualité de l'eau récupérée. On constate sur la figure 8-15 que la qualité de l'eau récupérée ne restait identique à celle de l'eau injectée que pendant 5 jours. Après cette période là, la concentration totale en sels dissous de l'eau récupérée a graduellement augmenté jusqu'à la valeur de 1000 ppm.

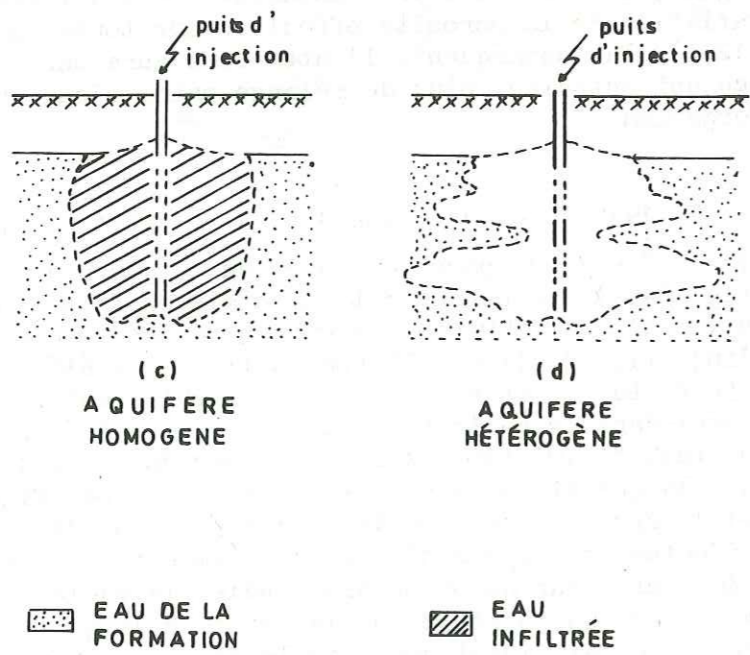
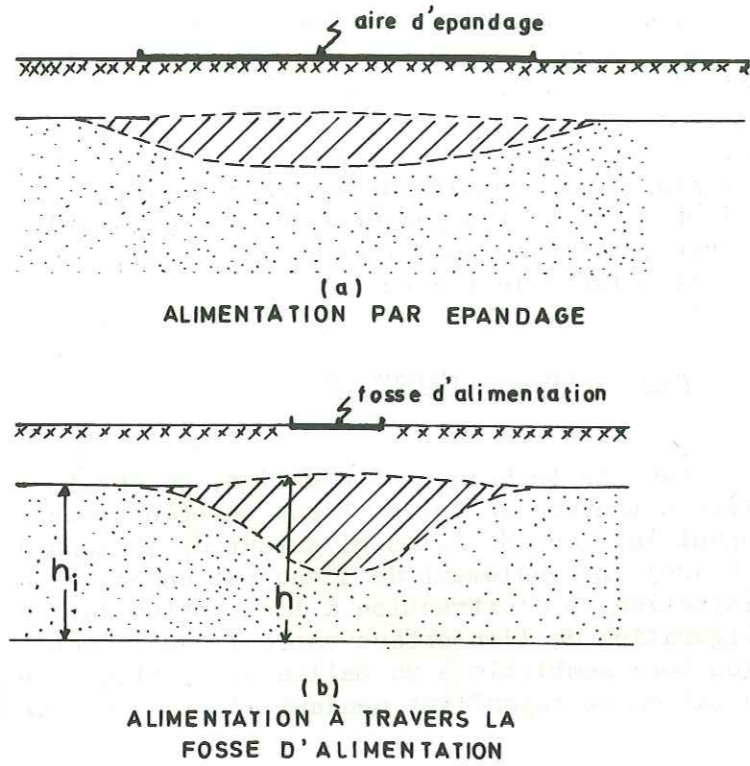


FIG. 8-12. — Schéma des formes d'accumulation de l'eau alimentée artificiellement par différentes méthodes.

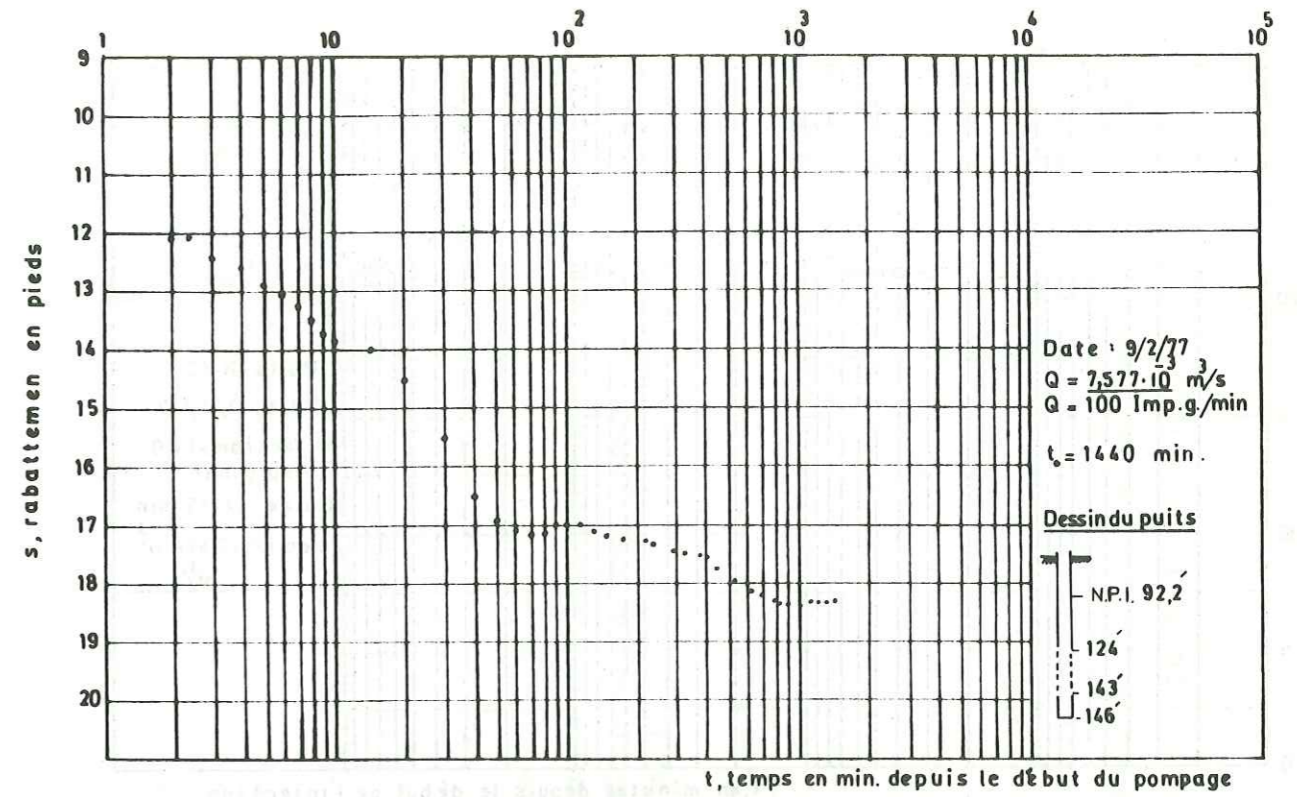


FIG. 813 a. — Courbe de rabattement dans le puits R-63 A pendant un pompage d'essai à débit constant.

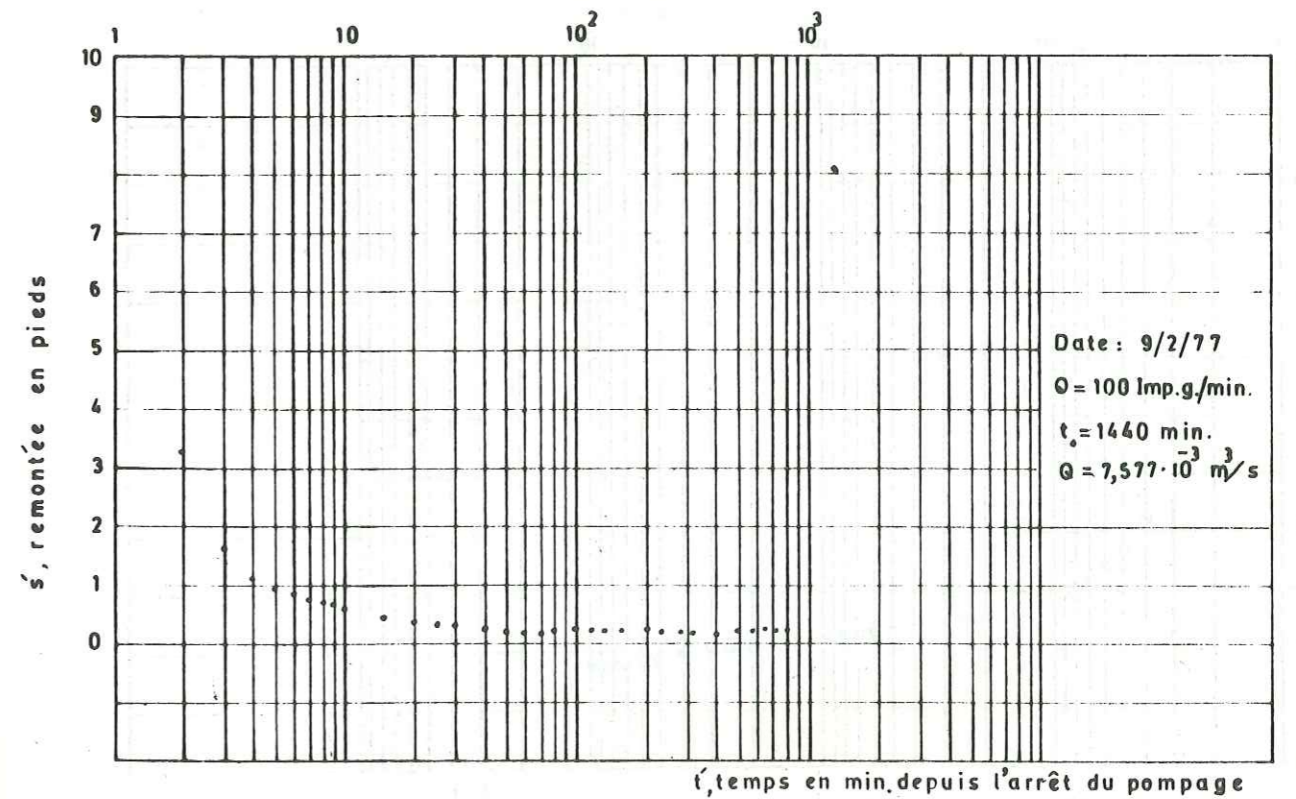


FIG. 8-13 b. — Courbe de remontée pour le puits R-63 A après le pompage d'essai à débit constant

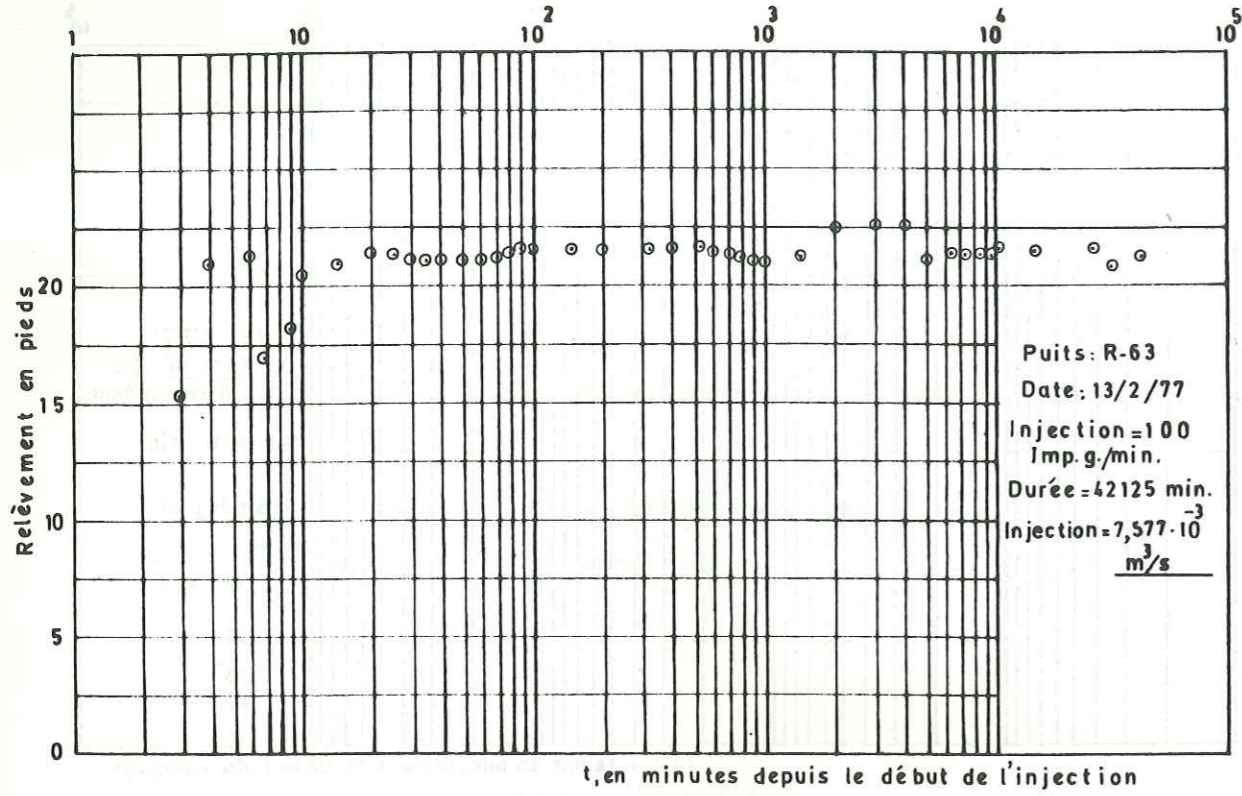


FIG. 8-14 a. — Courbe de remontée du niveau de l'eau dans le puit d'injection R-63A pendant l'injection à débit constant

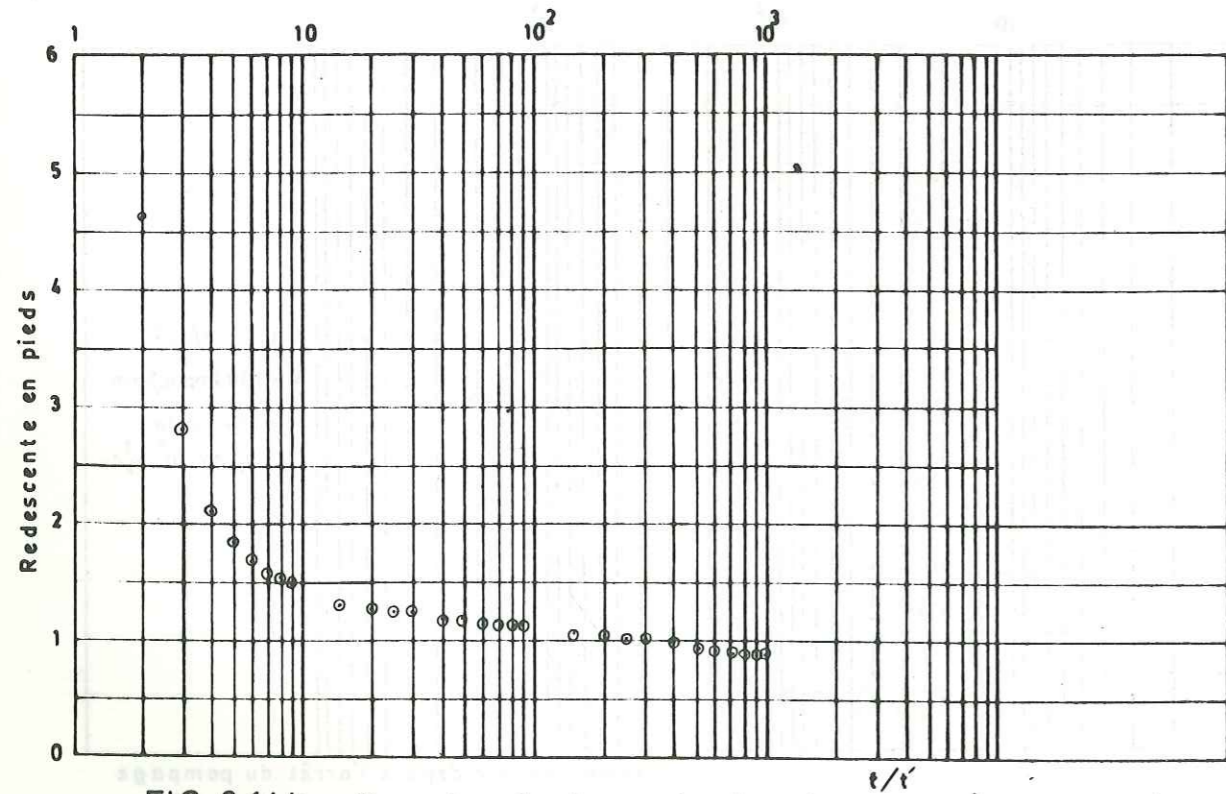


FIG. 8-14 b. — Courbe de descente du niveau de l'eau dans le puits d'injection après l'essai d'injection à débit constant.

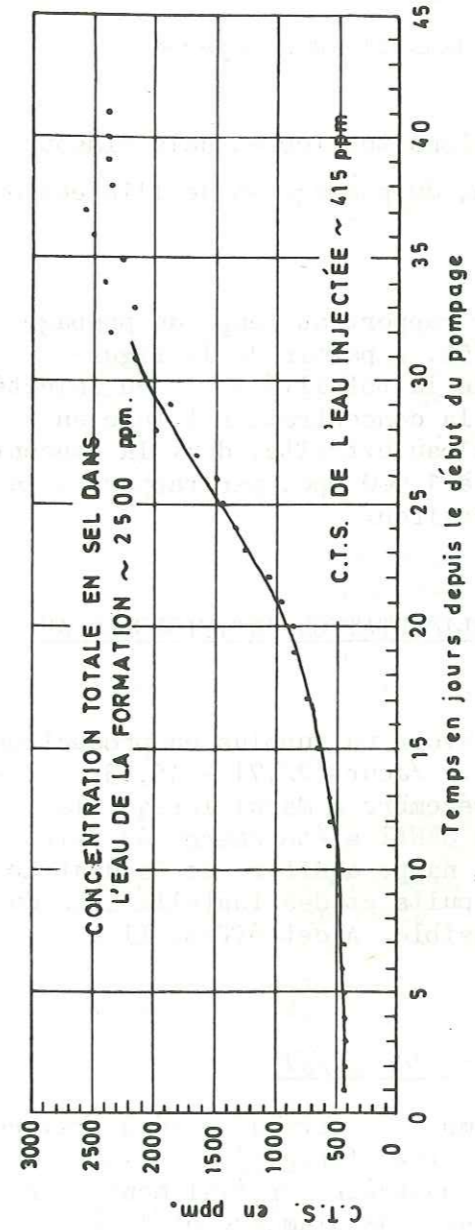


FIG. 8-15 a. — Variation de la qualité de l'eau pendant le pompage d'essai à débit constant de 100 imp. g/min. après l'injection d'essai au puits R-63 A

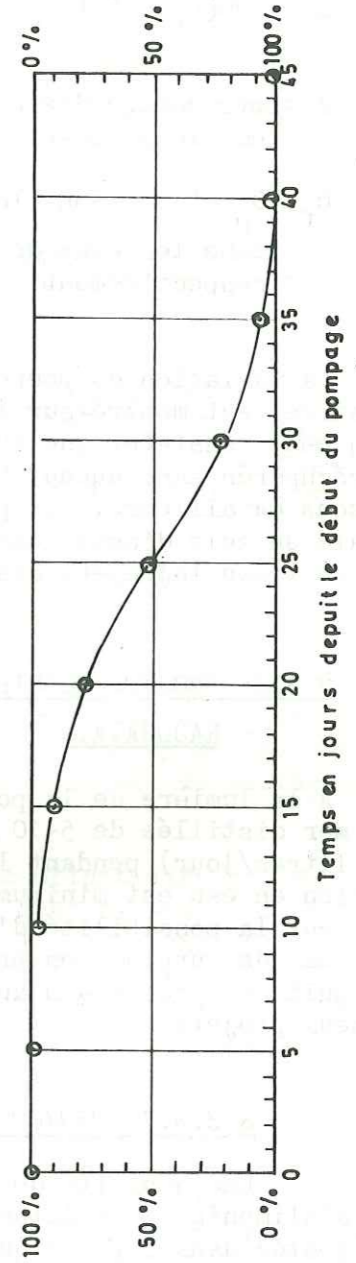


FIG. 8-15 b. — Variation du pourcentage d'eau injectée et d'eau de la formation pendant le pompage d'essai au puits R-63 A

après 25 jours, et à la valeur de 2 500 ppm après 35 jours depuis le commencement du pompage. On peut calculer le pourcentage de l'eau d'injection contenue dans l'eau récupérée à partir de l'équation suivante (YILDER SENAY 1977):

$$A = 100(C_f - C_p) / (C_f - C_i)$$

où

A = pourcentage d'eau d'injection dans l'eau récupérée par le pompage;

C_f , C_p et C_i sont les concentrations totales en sels dissous dans les eaux de la Formation, du pompage et de l'injection respectivement.

La variation du pourcentage A par rapport au temps de pompage (récupération) est montrée sur la figure 8-15b. A partir de la figure 8-15a, on peut constater que 17 % environ de la totalité de l'eau injectée ont été récupérés sans aucun changement de la concentration totale en sels dissous. Par ailleurs, le pourcentage d'eau extraite, dont la concentration totale en sels dissous est inférieure à 1 000 ppm, par rapport à la totalité de l'eau injectée, était de 72 % environ.

8.3.3. PROJETS POSSIBLES POUR L'ALIMENTATION ARTIFICIELLE AU RAUDHATAIN

A la lumière de la possibilité d'avoir un surplus en production d'eau de mer distillée de 5-10 millions Imp.g./Jour (22,71 - 45,43 millions litres/jour) pendant l'hiver (de Décembre à Mars) lorsque la consommation en eau est minimum, Dr. YILDER SENAY a été chargé de faire une étude sur la possibilité d'alimenter la nappe aquifère de Raudhatain par cette eau de surplus, en profitant des puits et des installations du champ de puits de Raudhatain autant que possible. A cet effet, il a proposé deux projets:

8.3.3.1. PROJET I (5 millions Imp.g./j)

Une quantité de 3 millions Imp.g./j sera déversée à travers la fosse d'alimentation existante. Les 2 millions Imp.g./j. restants seront injectés dans 5 puits qu'on devrait construire spécialement pour ce but. Chaque puits d'injection aura 16 pouces de diamètre et 43 à 49 mètres de profondeur avec filtre de gravier. Un pourcentage de 80 % de l'ensemble de la partie saturée dans les deux aquifères, supérieur et moyen, sera crépinée. Selon les données disponibles le taux d'injection dans chaque puits sera de 250 à 300 Imp.g./j (18,94 - 26,52.10⁻² m³/s.).

FIG. 8-145

puits d'injection
constant

8.3.3.2. PROJET II (10 millions Imp.g./j)

Une quantité de 6 millions Imp.g./j sera déversée à travers la fosse d'alimentation existante. Les 4 millions Imp.g./j. restants seront injectés dans 12 puits. Les 4 puits R-1, R-9, R-27 et R-3 qui existent dans le champ de Raudhatain seront utilisés pour l'injection. Donc, pour ce projet on ne devrait construire que 8 puits d'injection. Le taux d'injection dans chaque puits sera le même que celui mentionné pour le projet I (Fig. 8-16).

8.3.4. CONCLUSION SUR L'ALIMENTATION ARTIFICIELLE

Les études sur l'alimentation artificielle au Koweït ont été provoquées par l'inondation occasionnelle des dépressions topographiques pendant quelques saisons exceptionnellement pluvieuses. Actuellement, ces études ont quelque importance en fonction d'un surplus possible de 5 à 10 millions Imp.g./jour d'eau de mer distillée pendant l'hiver.

Nous croyons que l'alimentation artificielle est digne d'études plus détaillées et plus organisées, pas seulement au Raudhatain mais également dans d'autres régions, telle que la région de Sulaibiya, où le niveau de l'eau souterraine s'est abaissé beaucoup, à cause de l'extraction continue de l'eau souterraine de la Formation calcaire de Dammam. Le but principal des études que nous proposons est de trouver un milieu convenable pour le stockage de l'eau de surface pour qu'on puisse le récupérer au besoin.

Les ressources en eau qui semblent disponibles pour l'alimentation artificielle sont les eaux de Shot Al Arab (en égard à l'accord entre les gouvernements Koweïtien et Irakien pour approvisionner Koweït de 300 millions Imp.g./j. \approx 1 363 millions litres/j de l'eau de Shot Al Arab), ainsi que l'importation possible de 50 millions Imp.g./j. environ qu'on pourrait, en principe, transporter par les pétroliers (S.M. ABUSADA, 1979).

Nous croyons que si les ressources mentionnées ci-dessus deviennent disponibles, on aura des problèmes de stockage de l'eau que l'alimentation artificielle semble permettre de résoudre. Généralement, le stockage souterrain de l'eau de surplus est favorable, car:

- le stockage de surface est infaisable économiquement, vu le coût de la construction et d'entretien qui est généralement élevé;
- les pertes d'eau par l'évaporation peuvent être fortes;
- les réservoirs de surface peuvent subir des accidents naturels et artificiels;

- la prolifération des algues peut être difficile à contrôler.

Par conséquent nous croyons que les études détaillées sur l'alimentation artificielle au Koweït devront prendre en considération, entre autres choses les points suivants:

- les caractères, les quantités et la régularité de l'approvisionnement des eaux qui seront vraisemblablement disponibles pour l'alimentation artificielle;

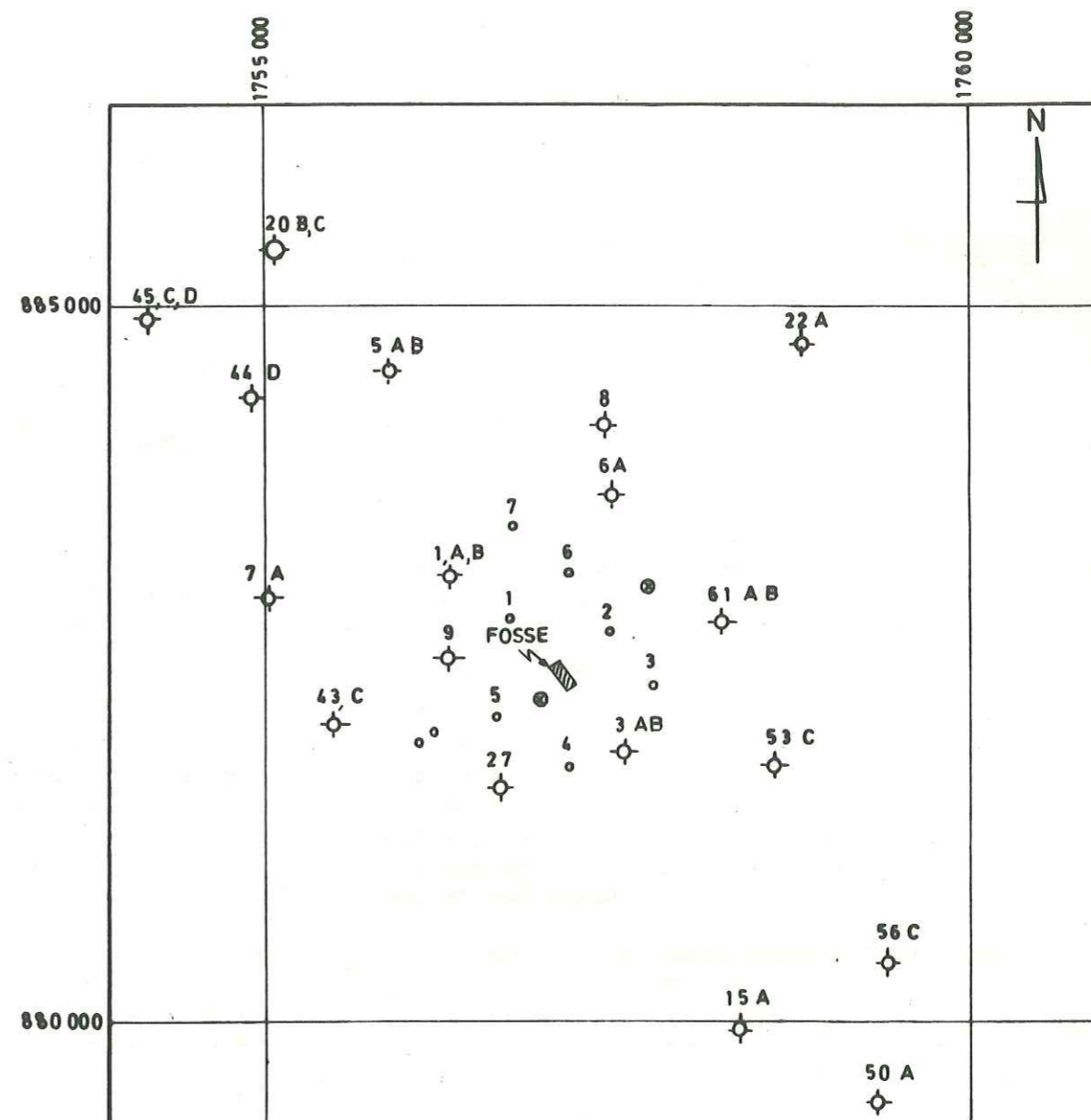
- les aires et les formations géologiques les plus convenables pour l'alimentation artificielle;

- les possibilités de stockage de l'eau douce dans les formations géologiques qui contiennent de l'eau saumâtre ou salée ainsi que les moyens d'augmenter le pourcentage récupérable d'eau douce;

- la compatibilité entre les eaux d'injection et les eaux souterraines originelles;

- les aspects économiques de l'alimentation artificielle.

Il va de soi que le volume des études et travaux nécessaires doit être intégré dans une politique générale de l'eau pour l'Etat de Koweït.



ECHELLE 1/50000

- 27 PUIXS EXISTANTS D'EXTRACTION
- 5 PUIXS PROPOSES À FORER POUR L'INJECTION
- SITUATION DES PIÉSONÈTRES PROPOSÉS

FIG. 8.16. — Situation des projets proposés pour l'alimentation artificielle au Raudhatain (D'après YILDER SHENAY).

CHAPITRE IX

PRINCIPAUX RESULTATS OBTENUS ET CONCLUSIONS GENERALES

9.1. PRINCIPAUX RESULTATS

L'étude de quelques problèmes du gisement et de l'exploitation des eaux souterraines au Koweït, comprend les aspects généraux du gisement de cette ressource, telles que les conditions topographiques, géologiques, climatologiques et chimiques, ainsi que les propriétés hydrodynamiques des aquifères d'une part, et leur exploitation pratique au Koweït d'autre part.

Actuellement, Koweït a une capacité de production d'eaux souterraines de 740 millions de litres/jour environ à partir des onze champs principaux de puits. Un pour cent de cette quantité est de l'eau douce, tandis que le reste est de l'eau saumâtre dont la teneur en sels dissous est de 3 000 - 7 500 ppm. La capacité potentielle d'extraction pourrait être augmentée jusqu'à 1 360 millions de litres/jour en construisant de nouveaux champs de puits à Koweït sud et sud-ouest.

Le sol de Koweït fait partie d'un vaste pédiment formé pendant les périodes pluvieuses du Pléistocène. Le relief topographique est généralement bas et plat, mais les dépressions et crêtes reflètent bien la morphologie des couches sousjacentes. La surface du sol penche généralement vers le Nord-Est avec une pente moyenne de 1/500. Le point le plus élevé du pays est à 285 m d'altitude dans le coin sud-ouest.

Koweït se situe dans l'unité structurale qu'on appelle la plate-forme Arabique ondulée sur laquelle les formations sédimentaires de type épicontinental ou même lagunaire sont affectées par de légères ondulations anticlinales larges et très plates. Les structures sont douces avec une pente de moins de 3°.

Les couches pénétrées pour l'exploitation ou l'exploration des eaux souterraines au Koweït sont celles du Miocène-Recent (Groupe de Koweït) représentées par des couches arénacées avec un développement d'évaporites du Miocène moyen qui s'amincissent vers le Sud-Ouest et celles de l'Eocène (Groupe de Hasa) représentées par une séquence calcaire qui est interrompue par un épisode de couches d'évaporites minces mais très étendues. L'Eocène supérieur, ainsi que l'Oligocène représentent des périodes de volcanisme et de tectonique intenses; c'est ainsi que la Formation calcaire de Dammam (Eocène moyen) qui est l'aquifère le plus important de Koweït, est devenue relativement très poreuses et perméable.

Le climat de Koweït est caractérisé par des étés chauds, occasionnellement interrompus par des périodes d'humidité extrêmement élevée et des hivers doux à froids.

La moyenne annuelle des précipitations pour une période de 27 années est de 115 mm, avec un minimum de 20 mm/an et un maximum de 360 mm/an environ. Des périodes humides et sèches se succèdent mais sans aucune périodicité reconnaissable. La totalité des précipitations a lieu pendant les mois de Septembre jusqu'à Juin, les mois de Janvier et d'Avril étant les plus pluvieux.

L'évaporation mesurée par les bacs de la classe "A" et par l'évaporimètre de Piche correspond à des valeurs moyennes de 3 460 mm et 5 460 mm/an respectivement tandis que l'évaporation théorique calculée selon la méthode de Penman est de 2 630 mm environ. Cette évaporation élevée conduit à la concentration des sels près du sol, en enrichissant les couches supérieures en gypse, sel-gemme et en carbonate de calcium.

Par suite de la grande intensité de la pluie qui caractérise les zones arides, un réseau hydrographique évident et dense s'est formé en Arabie. Ainsi des oueds profonds, longs et ouverts existent aux pieds intérieurs des montagnes et forment de grands bassins saisonniers. Ils débouchent dans le Golfe Arabique en Arabie Nord-Est, tels les Wadi-Al-Baton, Wadi-Harrifa et Wadi-A-Sahba. Des orages sévères provoquent des écoulements substantiels, mais de durées courtes dans les aires de drainage intégré, ce qui donne lieu à une accumulation des eaux dans de nombreux lacs de playa. Ainsi, des eaux souterraines douces forment des intumescences au-dessus du niveau phréatique qui s'aplatit avec le temps, en raison de l'écoulement vers la mer, si l'alimentation secondaire cesse. En s'écoulant hors des zones d'alimentation, leur contenu en sels minéraux augmente avec le temps et le contact avec les sels des sédiments.

Au Koweït, la quantité disponible à l'infiltration est petite car la moyenne annuelle des pluies est faible et les pertes par évaporation sont grandes, ce qui affecte la qualité et la quantité de l'eau disponible à l'infiltration.

En Arabie Est et Nord Est, on peut distinguer quatre systèmes de couches aquifères sédimentaires dont le pendage est vers le Nord et le Nord Est par rapport au bouclier Arabique et dans lesquels la circulation des eaux souterraines est généralement continue :

- (1) Système Paléozoïque-Triasique;
- (2) Système Crétacé;
- (3) Système Eocène;
- (4) Système Néogène Quaternaire.

Les aquifères potentiels de ces systèmes sont les grès qui prédominent dans les séries anciennes vers l'Ouest et les couches carbonatées qui deviennent plus importantes dans les séries plus récentes vers l'Est. Puisque les eaux souterraines s'écoulent de l'Ouest à l'Est, elles tendent à se déplacer des grès plus anciens et souvent plus profonds vers des aquifères carbonatées à la faveur des ouvertures qui peuvent exister dans les aquicludes qui les séparent habituellement.

Le système aquifère Eocène comprend les Formations calcaires d'Umm-Al-Radhuma et de Dammam séparées par l'aquiclude constitué par l'anhydrite de Rus. Sur le plan régional, ce système est considéré comme un seul aquifère car, malgré les aquicludes qui viennent s'intercaler effectivement en quelques endroits, il y a écoulement réciproque de l'eau souterraine et égalisation de la pression, en particulier sur les crêtes des dômes et des anticlinaux où les karsts et les failles sont abondants. La plupart de l'alimentation s'est faite pendant les périodes pluviales anciennes tandis que l'alimentation actuelle est maigre. Généralement, le système Eocène est captif à l'échelle régionale tandis qu'il est libre dans les zones d'affleurement et d'exutoire.

L'écoulement naturel dans ce système se fait par des sources terrestres telles que l'oasis de Hofuf, des sources sous-marines et par l'évaporation depuis les "Sabkhas". De plus, le suintement ascendant à travers les sédiments néogènes et quaternaires susjacent est considéré comme un mécanisme majeur de décharge.

Le système des aquifères Néogènes-Quaternaires de l'Arabie orientale comporte toutes les couches aquifères superficielles qui recouvrent le socle ou la série sédimentaire consolidée de l'Arabie orientale. Elles sont principalement non consolidées ou mal consolidées. Le suintement vers le haut à partir du système Eocène sousjacent fournit son alimentation principale. De rares torrents alimentent les sables et les graviers dans les dépressions topographiques, mais les quantités d'eau douces qui peuvent y rester pour de longues durées utiles sont très faibles.

L'étude du gisement de l'eau souterraine de Koweït se borne aux systèmes Néogène-Quaternaire et Eocène. Les diagraphies géophysiques et données de forage et d'analyses d'eau nous ont permis de préciser les dimensions des couches aquifères, aquitardes et aquicludes dans la plus grande partie de l'Etat de Koweït.

Le Groupe de Koweït (Néogène) couvre la surface de Koweït tout entier et consiste en une alternance de sables et graviers, grès, argiles silts et calcaire ou marnes dont l'épaisseur augmente de 160 m dans le Sud-Ouest jusqu'à 375 m environ dans le Nord-Est. Ce groupe est entièrement sec dans le Sud-Ouest tandis qu'il est presque entièrement saturé au bord du Golfe Arabique. La salinité de l'eau augmente généralement de 3 000 ppm dans le Sud-Ouest jusqu'à 130 000 ppm environ dans le Nord-Est sur une distance de 150 km. Les eaux souterraines douces ne sont rencontrées que de façon limitée dans les parties saturées supérieures, sous forme de petites lentilles flottant sur les eaux saumâtres ou salées, tels que les gisements des dépressions de Raudhatain, Umm-Ail-Aish et Quashaniya au Koweït nord.

Très grossièrement et en particulier dans le Koweït sud-ouest et central, le Groupe de Koweït se divise en un aquifère inférieur et un aquifère supérieur avec un aquitarde entre les deux. L'aquifère supérieur semble être soit un aquifère libre à fuites, soit un aquifère à fuites au-dessus duquel se trouve un aquitarde contenant la surface libre de l'eau souterraine. L'aquitarde du milieu peut se fondre avec l'aquifère inférieur pour donner une couche aquitarde relativement perméable. L'ensemble du Groupe de Koweït et de la Formation calcaire de Dammam sousjacent, où celle-ci est semi-captive, forme un système qu'on peut appeler selon HANTUSH

" couches aquifères à drainance couplée " ou " couches aquifère à drainance mutuelle ". L'ensemble de l'argile de base du Groupe de Koweit et des calcaires à silex du toit de la Formation de Dammam sousjacent forme une zone semi-perméable dont l'épaisseur varie de 0 à 30 m au total.

Le Groupe de Hasa sousjacent consiste en:

- (1) Formation calcaire de Dammam (Eocène moyen)
 - (2) Formation anhyritique de Rus (Eocène inférieur)
 - (3) Formation calcaire d'Umm-Al-Radhuma (Paléocène-Eocène inférieur)
- qui se trouvent partout au Koweit.

La Formation de Dammam dont l'épaisseur varie de 140 m dans le Sud-Ouest jusqu'à 290 m dans le Nord Est, consiste principalement en calcaires, calcaires crayeux et calcaires dolomitiques avec quelques zones argileuses, sableuses et fossilifères. Elle se divise en trois membres dont l'épaisseur est presque égale. Sa base consiste en 7 à 10 m de schistes argileux, ce qui fait avec l'anhydrite de la Formation de Rus sousjacent une zone généralement imperméable. La salinité de l'eau varie de 2 900 ppm dans le Sud-Ouest jusqu'à 200 000 ppm dans le Nord Est. Elle est généralement captive ou semi-captive sauf dans le coin sud-ouest extrême de Koweit où elle est libre. Au Wafra, au Koweit sud, son niveau piézométrique peut être de plus de 40 mètres au dessus du sol, ce qu'on attribue à une barrière hydraulique. L'écoulement de l'eau dans cette Formation se fait principalement par l'exutoire artificiel des puits et par la fuite vers le haut au Groupe de Koweit. Néanmoins, quand la charge piézométrique est suffisamment réduite par le pompage, l'écoulement de l'eau s'inverse et il y a drainage de l'eau du Groupe de Koweit vers la Formation de Dammam. Cette eau provient d'infiltrations dans les affleurements de la Formation de Dammam et du Groupe de Koweit en Arabie à l'Ouest et au Sud-Ouest, ainsi que d'infiltrations à travers les couches Néogènes qui les recouvrent.

Les gisements des eaux souterraines dans la Formation d'Umm-Al-Radhuma ne sont étudiés au Koweit que dans la moitié supérieure de son épaisseur par trois puits situés au Koweit sud-ouest. Elle consiste en calcaires, calcaires dolomitiques et intercalations d'anhydrite et de schistes argileux. Son épaisseur moyenne au Koweit est de 500 m. La teneur en sels dissous dans les trois puits étudiés varie entre 4 100 et 4 900 ppm, étant toujours pire que celle de la Formation de Dammam sur les mêmes sites et plus élevée de 200 à 2 000 ppm en allant vers le Nord Est. La charge piézométrique est toujours supérieure à celle de la Formation de Dammam et augmente de 40 à 75 m environ en allant vers le Nord-Est.

Des irrégularités de la teneur totale en sels dissous en quelques points peuvent être expliquées par la dilution différente par les eaux météoriques le long des zones de perméabilités élevées (karsts, failles etc..) ou faibles. Le lessivage par les eaux météoriques a lieu par infiltration à travers les couches Néogènes en dehors de Koweit vers l'Ouest et le Sud Ouest, tandis que le lessivage dans la plus grande partie de Koweit se fait par les fuites des eaux souterraines vers le haut, par suite de la différence en charge hydraulique.

Selon la classification hydrogéochimique génétique de Sulin, on peut distinguer au Koweit:

- 1) La zone de type sulfaté-sodique dont l'origine est essentiellement météorique qui couvre la zone des eaux saumâtres, ainsi que les eaux douces de Raudhatain;
- 2) La zone de type chloruré-magnésien qui caractérise l'eau récente marine ainsi que l'eau souterraine considérablement influencée par celle-là, ce qu'on trouve dans de petites parties des secteurs orientaux de l'aire de Shigaya-Sulaibiya;
- 3) La zone de type chloruré calcique dans laquelle on rencontre des eaux marines anciennes et transformées par échange ionique et qu'on trouve au Koweit nord-est.

La dissolution de quantités abondantes de gypse et d'anhydrite qui se trouvent disséminés dans le Groupe de Koweit, la Formation de Dammam et des évaporites de la Formation de Rus sousjacent est le processus principal qui contrôle le type chimique de presque toutes les eaux souterraines de Koweit. L'interaction réciproque entre les eaux météoriques et les eaux marines récentes est indiqué par la zone mixte dans le Koweit nord-est. L'échange de bases entre les ions sodium des eaux marines anciennes et les ions calcium du milieu aquifère explique l'existence de CaCl_2 dans les zones d'eaux souterraines très salées et saumûres: La diminution de perméabilité ainsi que l'augmentation de l'argile dans le Nord-Est favorise un temps de séjour très long, ce qui facilite le processus d'échange ionique. Les phénomènes de membrane et d'ultrafiltration à travers les argiles peuvent expliquer vraisemblablement le développement des saumûres dans la Formation de Dammam et les parties inférieures du Groupe de Koweit au Koweit nord-est au dessus desquelles on trouve des eaux moins salées. En employant la correction que nous avons développée en fonction de la teneur en sels dissous et du poids spécifique des eaux, sur les charges hydrauliques mesurées dans les couches différentes, on peut voir que les couches inférieures peuvent avoir une charge hydraulique plus élevée que celle des couches supérieures. De plus, il est possible que la différence de charge pendant les périodes pluvieuses anciennes ait été plus grande qu'aujourd'hui, ce qui pourrait augmenter la possibilité d'ultrafiltration.

Le ^{14}C dans les eaux de la Formation de Dammam est pratiquement absent tandis que les eaux du Groupe de Koweit dans deux puits au Koweit sud-ouest ont de 14 000 à 22 000 ans selon la datation par le ^{14}C , ce qui indique vraisemblablement un mélange entre les eaux anciennes de la Formation de Dammam et les eaux d'infiltration.

Les relations entre les teneurs en deutérium et oxygène 18 des échantillons d'eau de puits de Koweit sud-ouest (Fig. 6-8) correspondent à des concentrations qui se situent au-dessous de la droite

$\text{SD} \% = 8 \text{ } ^{18}\text{O} \% + 10$ qui est valable pour les climats tempérés. La droite $\text{SD} \text{ } \text{‰} = 3,38 \text{ } ^{18}\text{O} \% + 19,98$ que nous avons établie à partir des concentrations en isotopes stables dans les eaux souterraines de la Formation de Dammam au Koweit sud-ouest indique que les eaux de cette Formation ont subi plusieurs épisodes d'évaporation avant leur infiltration finale dans la Formation, car les précipitations non évaporées s'alignent sur la droite caractéristique de pente 8, tandis que la pente de la droite que nous avons établie par la méthode des moindres carrés est de 3,38.

Cette droite recoupe la droite des précipitations en un point correspondant à une température moyenne de 10°C, lors de la condensation calculée à partir des deux équations de Dansgaard (1964), tandis que la moyenne annuelle de la température actuelle au Koweït pendant les mois pluvieux est de 17°C. Les basses valeurs de t (dans l'équation $S^{180} = mSD + t$) de notre droite indiquent que la vapeur d'eau condensée était dans un équilibre avec l'eau de mer, meilleur que l'équilibre actuel. Evidemment, le taux d'évaporation était plus bas que celui d'aujourd'hui, ce qui peut être dû au climat plus humide. Les teneurs en isotopes stables des échantillons de l'eau du Groupe de Koweït pris dans deux puits au Koweït Sud-Ouest ne sont pas très différentes de celles de la Formation de Damman, et ceci pourrait confirmer l'existence d'une drainance vers le haut à partir de la Formation de Damman.

Selon les classifications de WILCOX et de DANEEN, les eaux souterraines exploitées au Koweït, à l'exception des eaux douces de Raudhatain ne sont pas convenables pour l'irrigation par suite de la concentration totale élevée en sels dissous (plus de 35 epm) et par suite de leur salinité potentielle élevée (plus de 10 méq/l) respectivement. Néanmoins, les eaux véritablement exploitées, et dont la teneur en sels dissous est aussi forte que 7 500 ppm ont été utilisées pour l'irrigation au Koweït depuis plus de 20 ans. Il est donc nécessaire d'établir des standards plus convenables pour les conditions locales. D'ailleurs, les eaux souterraines saumâtres (3 000 5 000 ppm) qui sont produites dans les champs de puits du Ministère de l'Electricité et de l'Eau sont utilisées en plus pour le mélange avec les eaux de mer distillées, à raison de 15 % pour rendre celles-ci propres à la consommation humaine, ce qui en fait une ressource très importante pour Koweït.

Le niveau de l'eau dans le Groupe de Koweït, varie de 90 m dans le Koweït sud-ouest à zéro le long de la côte du Golfe Arabique. Les dépôts de ce Groupe sont complètement secs dans le coin sud-ouest extrême du pays. Le sens d'écoulement est généralement vers le Nord-Est. Dans le Koweït sud-ouest, la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement dans l'aquifère supérieur sont de

$0,5 \cdot 10^{-3}$ à $5,7 \cdot 10^{-3}$ m²/s et de $2,9 \cdot 10^{-4}$ à $33 \cdot 10^{-4}$ respectivement, l'épaisseur moyenne étant de 30 m environ. Dans la même région, ceux de l'aquifère inférieur sont de

$0,11 \cdot 10^{-3}$ à $1,14 \cdot 10^{-3}$ m²/s et de

$1,7 \cdot 10^{-4}$ à $2,2 \cdot 10^{-4}$ respectivement, l'épaisseur moyenne étant de 35 m. Ces valeurs ne sont pas très représentatives par suite du petit nombre des points d'essai.

Le niveau piézométrique de la Formation de Damman varie de 90 m environ dans le Koweït sud-ouest jusqu'à quelques mètres au-dessus du niveau de la mer aux environs de la côte, étant toujours plus élevé que celui du Groupe de Koweït de 3 à 12 mètres dans la plus grande partie de la surface de Koweït, et ayant plus ou moins le même sens d'écoulement vers le Nord-Est. Des variations locales peuvent y exister par suite de différences de perméabilités. Les niveaux piézométriques peuvent parfois s'équilibrer en particulier aux sommets des anticlinaux. L'hétérogénéité de cette Formation est indiquée par la variation considérable de sa transmissivité qui varie de

$0,9 \cdot 10^{-3}$ à $12,1 \cdot 10^{-3}$ m²/s. pour une épaisseur variant de 150 à 275 m. Le coefficient d'emmagasinement y varie de

$2,4 \cdot 10^{-4}$ à $8,9 \cdot 10^{-4}$.

L'étude de l'anisotropie de la Formation de Damman que nous avons réalisée selon la méthode de HANTUSH, en employant trois rayons de piézomètres depuis le puits de pompage nous a indiqué que les axes majeurs et mineurs de transmissivité (T_x et T_y) ont des sens différents sur différents emplacements. La différence entre T_x et T_y est de l'ordre de $0,19 \cdot 10^{-3}$ à $0,36 \cdot 10^{-3}$ m²/s. dans les deux emplacements considérés.

L'étude de la piézométrie de la Formation d'Umm Al Radhuma est limitée aux trois puits dans le Koweït sud-ouest où le niveau piézométrique est plus élevé que celui de la Formation de Damman de 43 à 87 m. Par contre, la transmissivité du tiers supérieur (165 m) de cette Formation est très basse et varie de $0,1 \cdot 10^{-3}$ à $0,16$ m²/s., ce qui la rend, ainsi que sa teneur en sels dissous relativement élevée, inexploitable pour les eaux souterraines.

L'étude quantitative du rabattement dans un puits imaginaire au centre du champ B indique qu'on y aura 56,3 m environ du rabattement après une période de pompage continue de 50 ans au débit constant de $2,65 \cdot 10^{-2}$ m³/s. par puits à partir de 16 puits. 70 % de ce rabattement sera induit par les pompes dans les 16 puits qui constituent le champ, tandis que 30 % sera induit par la perte de charge dans le puits lui-même. La méthode de calcul est celle de HANTUSH pour l'écoulement vers les puits dans des aquifères séparés par une couche semi-perméable. Ainsi, nous avons traité le Groupe de Koweït comme un seul aquifère (aquifère n°1) et l'aquifère de Damman comme aquifère n°2, le puits étant libre uniquement contre la Formation de Damman.

Ne disposant pas de piézomètres dans le champ B, nous avons essayé de calculer le coefficient d'emmagasinement de la Formation de Damman de façon approximative en utilisant des données de pompage et de rabattement dans les puits de pompage, en supposant, dans l'équation

$$s = (2,30 Q / 4 \pi T) \cdot \log (2,25 Tt / r^2 S), \quad r = 1 \text{ m ou } 0,3$$

Ce n'est que dans quelques cas particuliers que la méthode que nous avons utilisée peut fournir des résultats apparemment valables, mais il était tout de même intéressant d'essayer de connaître la valeur du coefficient d'emmagasinement dans le champ B et de tester la méthode proposée.

Nous n'avons pas pu calculer le bilan d'eau de façon satisfaisante par suite de l'absence des données surtout, en ce qui concerne l'infiltration et l'écoulement vers le Golfe Arabique. Néanmoins, si une quantité de 10 % de la moyenne annuelle des précipitations s'infiltrait à travers la partie du sol de Koweït où se trouve des eaux souterraines utilisables (à moins de 7 500 ppm), on aura une quantité de 290 millions de litres/jour comme alimentation à partir de l'infiltration. Si l'on ajoute à cette quantité la quantité de 169 millions de litres/jour qui s'écoule latéralement à travers la Formation de Damman, on aura 460 millions de litres/jour comme alimentation journalière, ce qui fait 62 % de la capacité journalière des champs de puits existants. Nous voyons donc que même dans l'hypothèse optimiste et peu vraisemblable où l'infiltration serait de 10 % des précipitations, celle-ci ne peut compenser les quantités d'eau véritablement exploitées.

Généralement, l'exploitation des eaux souterraines au Koweït est basée sur l'épuisement de l'eau par suite des conditions arides. 30 % de la capacité totale des champs de puits existants est fournie par 200 puits environ qui extraient de l'eau qu'à partir de la Formation de Damman dans les champs de Koweït sud-ouest (les champs B, C et D) et les champs d' Abdalliya et de Sulaibiya. La profondeur du puits varie entre 300 et 425 m, tandis que la teneur en sels dissous est de 3 000 à 7 000 ppm. 47 % sont produits dans 560 puits environ, qui sont forés uniquement dans le Groupe de Koweït, dans les régions de Wafra, Abdally et Raudhatain. La profondeur varie de 20 m à Abdally jusqu'à 60 m et 75 m au Wafra et Raudhatain respectivement. L'eau douce produite au Raudhatain ne constitue que 1 % de la quantité totale. Les puits des champs A et E sont construits à objectif double (Gr. K + Damman) et leur capacité est de 15 % de la capacité totale.

Dans la construction et le développement des puits, les champs de puits de Koweït sud-ouest sont d'intérêt spécial. Le forage des dépôts détritiques du Groupe de Koweït en employant le Revert dans le fluide de forage, nous a donné de bons résultats. Egalement, le développement par l'acidification (15 % HCl) au jet rotatif a amélioré de beaucoup l'efficacité des puits. Dans un puits à objectif double, le packer développé localement pour la séparation entre les aquifères à la fois pendant le forage, ainsi que pendant le pompage d'essai et l'échantillonnage de l'eau des différents aquifères dans le même puits, présente un intérêt particulier.

Nous avons développé deux équations pour le calcul du nombre minimum des fentes qu'on doit avoir dans une unité de longueur de crépines à fente, ainsi que l'espacement entre les fentes, selon la vitesse d'entrée, les dimensions des fentes, le diamètre et la longueur de la crépine et le débit de pompage du puits.

L'étude des possibilités de dessalement local des eaux souterraines et saumâtres ou salées de 3 000 à 12 500 ppm par les méthodes de compression de vapeur, électrodialyse et osmose inverse nous a montré que ces méthodes peuvent être compétitives avec le dessalement de l'eau de mer par la méthode de vaporisation instantanée à étages multiples, quand on considère l'approvisionnement en quantités limitées d'eau douce dans des emplacements loin de la mer et loin des réseaux d'approvisionnement en eau existants.

Les problèmes d'alimentation artificielle à travers des fosses d'alimentation et dans des puits d'injection ont été étudiés de façon rudimentaire au Koweït. Il semble que l'alimentation dans les puits d'injection soit généralement plus convenable du point de vue des pourcentages récupérables d'eau injectée quand on considère l'alimentation d'eaux douces dans les aquifères qui contiennent de l'eau saumâtre ou de l'eau salée. Dans les puits R-63 au Raudhatain, 17 % de l'eau injectée, dont la teneur en sels était de 400 ppm, a été récupérée sans aucune variation de la teneur en sels dissous, le taux d'injection étant égal au taux de pompage = 100 Imp.g./min., tandis que l'eau de la Formation contenait 2 500 ppm.

9.2. CONCLUSIONS GÉNÉRALES

En étudiant les conditions hydrogéologiques du gisement des eaux souterraines de Koweït dans leur cadre régional de l'Arabie nord-est, ainsi que les pratiques de l'exploitation de cette ressource importante au Koweït, nous avons parcouru un domaine très large et donc, nous n'avons pas pu consacrer l'attention désirée à beaucoup de problèmes que nous considérons également importants et qui sont dignes d'études plus approfondies et plus spécialisées dans l'avenir.

Cependant, en discutant la plus grande partie des problèmes liés à l'étude des eaux souterraines de Koweït, nous n'avons établi qu'un squelette qui attend d'être animé par des études plus détaillées.

Sur le plan de la gestion des eaux souterraines de Koweït, notre étude nous a permis d'indiquer le rôle que cette ressource joue, bien qu'elle soit saumâtre dans sa majorité, par rapport aux autres ressources disponibles pour l'approvisionnement en eau. Actuellement, la capacité potentielle des champs de puits existants dans l'Etat est de 59% de la capacité courante de production d'eau de l'Etat. Une prévision de demande en l'an 2 000 montre que les champs de puits existants publics ne fourniront que 50 % de la quantité requise pour le mélange avec les eaux distillées de la mer. La construction des champs de puits nouveaux dans le Koweït sud et sud-ouest, où se trouvent les dernières aires à exploiter pour l'extraction de l'eau saumâtre, augmenterait ce pourcentage là jusqu'à 112 %. Ainsi, la grande demande en cette ressource ainsi que sa quantité limitée montrent que son étude quantitative ainsi que sa bonne gestion ne peuvent pas être exagérées.

L'étude topographique indique bien la relation entre la topographie et le gisement des eaux souterraines douces dans les dépôts supérieurs du Groupe de Koweït. Bien que la plus grande partie de tels gisements ait été étudiée de façon détaillée, il nous semble que leur localisation et leur étude dans d'autres parties de Koweït soit de quelque importance. Tel genre de gisement doit également susciter l'étude et l'optimisation des techniques de son extraction.

Les données climatologiques obtenues au Koweït ne représentent que la région côtière, car la totalité des stations météorologiques se trouve à l'Est de l'Etat près de la côte pour la plupart. Bien que notre présentation de la climatologie régionale indique qu'on ne prévoit pas des conditions très différentes à l'intérieur, on croit que quelques stations dans le Sud et le Sud-Ouest peuvent être utiles pour obtenir, en plus des données climatologiques usuelles, des données sur l'évapotranspiration et l'infiltration, en particulier, dans les oueds et les régions agricoles de Wafra et d'Abdally.

Les systèmes aquifères de Koweït sont généralement bien définis. Cependant, des études très détaillées sur les caractéristiques hydrodynamiques des couches aquifères et aquitardes du Groupe de Koweït et de la Formation de Damman sont utiles pour mieux comprendre le comportement des systèmes en extraction. L'étude des données qui seront relevées sur les piézomètres qu'on fore actuellement dans et autour des champs de puits de Shigaya, nous permettra

de réévaluer et de corriger beaucoup des hypothèses qu'on a utilisées dans les calculs théoriques, en particulier, en ce qui concerne la drainance et la prévision du rabattement.

La Formation d'Umm Al Radhuma ne peut pas être considérée comme un aquifère potentiel au Koweït, par suite de sa basse transmissivité et de sa teneur plutôt élevée en sels dissous, ainsi que de sa grande profondeur comme le montrent les trois puits d'exploration forés jusqu'à la moitié supérieure de son épaisseur au Koweït sud-ouest.

Une étude des teneurs isotopiques plus détaillée et mieux répartie des aquifères du Groupe de Koweït, ainsi que de la Formation de Dammam nous semble très importante pour que l'on puisse comprendre le mécanisme de l'alimentation et de la circulation de l'eau dans les systèmes aquifères de façon plus exacte.

Les données que nous avons présentées sur la technique de forage et de développement des puits à Koweït ne permettent pas une évaluation quantitative de leur efficacité. Cependant, nous considérons que l'expérience de Koweït à cet égard peut être utilisée pour mieux documenter et mieux analyser des travaux de ce genre. Les dessins des puits, les matériaux utilisés, ainsi que les techniques suivies dans leurs forages, construction et développement constituent un domaine énorme et très intéressant à développer par les hydrogéologues et les ingénieurs.

L'étude élémentaire que nous avons présentée sur les possibilités d'exploitation des eaux souterraines saumâtres ou salées à la lumière du dessalement par différentes méthodes indique l'importance de poursuivre des études plus avancées à cet égard, en particulier en ce qui concerne des caractères chimiques des eaux qui rendent une certaine eau utilisable pour le dessalement par les diverses techniques. Compte-tenu de la disponibilité des quantités d'eau provenant de différentes sources telles que celle de Shot Al Arab, l'eau qui peut être transportée par les pétroliers, et l'eau distillée en surplus pendant l'hiver, il nous semble qu'il est important d'épanouir et d'approfondir les études sur l'alimentation artificielle des nappes aquifères au Koweït en raison des grandes possibilités de stockage de l'eau dans les aquifères. Des problèmes d'intérêt particulier à cet égard concernent les possibilités de stockage de l'eau douce dans les aquifères contenant de l'eau saumâtre ou salée, ce qui entraîne des études sur les techniques et dispositifs les meilleurs d'alimentation, l'interaction entre les eaux de différentes sources avec le milieu aquifère et les aspects économiques qui en résultent.

En arrivant à la fin de ce travail, nous souhaitons qu'il soit utile pour établir une politique rationnelle de l'eau dans l'Etat de Koweït. Egalement, nous souhaitons qu'il favorise l'animation et l'orientation de recherches valables dans les domaines de l'étude, extraction et utilisation des eaux souterraines, même si celles-ci sont saumâtres ou salées.

ANNEXE I

RÉSULTATS DE QUELQUES ANALYSES CHIMIQUES REPRÉSENTANT LES EAUX SOUTERRAINES PRODUITES DANS LES CHAMPS DE PUIITS PRINCIPAUX AU KOWEIT

RESULTATS DES ANALYSES CHIMIQUES DES EAUX SOUTERRAINES

CHAMP d'Al-Rawdhatain - Partie superieure de la Formation de Dibdiba

PUITS	DATE MOIS/ AN.	PH	CONCENTRATION TOTALE EN SELS DISSOUS EN PPM	UNITE	CONCENTRATION EN ppm, epm et epm %						INDICE HYDROCHIMIQUE							
					CATIONS				ANIONS		FORMULE HYDROCHIMIQUE	COEFFICIENT HYDROCHIMIQUE						
					Na ⁺	K ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻		HCO ₃ ⁻	r Na / r Cl	r SO ₄ / r Cl	r Ca / r Mg	r Cl - r Na / r Mg	r Na - r Cl / r SO ₄	
R-1	5/64	7,8	400	ppm epm epm%			10 0,82 19,11	45 2,24 52,21	30 0,85 19,77	70 1,45 33,72	122 2,00 46,61	M _{0,4} $\frac{HCO_3^{347} SO_4^{34} Cl_{20}}{CO_{52} (Na+K)_{29} Mg_{19}}$	PH 7,8	1,45	1,70	2,73	-0,46	0,26
R-1	4/79	7,9	462	ppm epm epm%	75 3,26 52,49	4,5 0,12 1,85	6 0,49 7,93	47 2,35 37,73	53 1,49 26,06	60 1,37 23,93	176 2,87 46,87	M _{0,46} $\frac{HCO_3^{47} SO_4^{24} Cl_{26}}{Na_{52} Ca_{38} Mg_8}$	PH 7,9	2,18	0,92	4,76	-3,59	1,29
R-5	5/64	8,0		ppm epm epm%			15 1,23 15,17	70 3,49 43,03	80 2,25 27,78	195 4,05 50	110 1,80 22,22	M _{0,58} $\frac{SO_4^{50} Cl_{28} HCO_3^{22}}{Ca_{43} (Na+K)_{42} Mg_{15}}$	PH 8,0	1,51	1,80	2,84	-0,92	0,28
R-5	4/79	7,9	704	ppm epm epm%	130 5,655 56,01	5,5 0,14 1,39	8 0,66 6,5	73 3,64 36,08	64 1,81 19,31	218 4,53 48,46	184 3,02 32,24	M _{0,7} $\frac{SO_4^{49} HCO_3^{32} Cl_{12}}{Na_{56} Ca_{36} Mg_7}$	PH 7,9	3,13	2,51	5,54	-5,86	0,85
R-64	5/64	8,4	1085	ppm epm epm%			20 1,64 10,05	70 3,44 21,08	330 9,31 57,05	275 5,72 35,05	79 1,29 7,90	M _{1,1} $\frac{Cl_{57} SO_4^{35} HCO_3^8}{(Na+K)_{69} Ca_{21} Mg_{10}}$	PH 8,4	1,21	0,61	2,10	-1,17	0,34
R-64	4/79	7,9	1703	ppm epm epm%	300 13,05 63,91	5,5 0,14 0,69	19,4 1,59 7,81	113 5,64 27,62	300 8,46 43,41	412 8,57 43,97	151 2,46 12,62	M _{1,7} $\frac{SO_4^{44} Cl_{43} HCO_3^{13}}{Na_{64} Ca_{28} Mg_8}$	PH 7,9	1,54	1,01	0,20	-2,88	0,54

266

RESULTATS DES ANALYSES CHIMIQUES DES EAUX SOUTERRAINES

Region d'Al Rawdhatain - Formation de Damman

PUITS	DATE MOIS/ AN.	PH	CONCENTRATION TOTALE EN SELS DISSOUS EN PPM	UNITE	CONCENTRATION EN ppm, epm et epm %						INDICE HYDROCHIMIQUE							
					CATIONS				ANIONS		FORMULE HYDROCHIMIQUE	COEFFICIENT HYDROCHIMIQUE						
					Na ⁺	K ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻		HCO ₃ ⁻	r Na / r Cl	r SO ₄ / r Cl	r Ca / r Mg	r Cl - r Na / r Mg	r Na - r Cl / r SO ₄	
KOC 49	5/54		158686	ppm epm epm%	44892 195201 69,97		3422 281,42 10,09	1114 556,09 19,93	97976 276,23 99,07	1161 24,17 0,87	41 0,532 -	M _{158,7} $\frac{Cl_{99} SO_4^1}{Na_{70} Ca_{20} Mg_{10}}$	PH	0,71	0,01	1,98	2,88	-33,56
				ppm epm epm%								M	PH					
				ppm epm epm%								M	PH					
				ppm epm epm%								M	PH					
				ppm epm epm%								M	PH					
				ppm epm epm%								M	PH					

267

RESULTATS DES ANALYSES CHIMIQUES DES EAUX SOUTERRAINES

Champ d' Al SULAIBIYA - Formation de Damman

PUITS	DATE MOIS/ AN.	PH	CONCENTRATION TOTALE EN SELS DISSOUS EN PPM	UNITÉ	CONCENTRATION EN ppm, epm et epm %							INDICE HYDROCHIMIQUE						
					CATIONS				ANIONS			FORMULE HYDROCHIMIQUE	COEFFICIENT HYDROCHIMIQUE					
					Na ⁺	K ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	HCO ₃ ⁻		r Na / r Cl	r SO ₄ / r Cl	r Ca / r Mg	r Cl - r Na / r Mg	r Na - r Cl / r SO ₄	
SU-14	5/74	7,4	4155	ppm epm epm%	545 23,70 35,87	17 0,43 0,65	180 14,79 22,38	544 27,14 41,08	936 26,39 41,75	1725 35,88 56,77	57 0,93 2,21	M 4.16	$\frac{SO_4^{4-} 57 Cl_{42} HCO_3^- 2}{Ca_{41} Na_{36} Mg_{22}}$ PH 7,6	0,89	1,36	1,86	0,18	-0,07
SU-14	1/79	7,7	5100	ppm epm epm%	570 24,79 37,23	20 0,51 0,77	180 14,80 22,23	590 26,49 39,78	1134 31,98 43,47	1875 39,00 53,02	107 1,75 2,39	M 5.1	$\frac{SO_4^{4-} 53 Cl_{43} HCO_3^- 2}{Ca_{40} Na_{38} Mg_{22}}$ PH 7,7	0,78	1,22	1,79	0,49	-0,18
SU-64	12/75	7,8	6197	ppm epm epm%	1005 43,71 45,10	25 0,64 0,66	260 21,37 22,05	625 31,18 32,17	2000 56,4 58,31	1950 38,48 39,79	112 183 1,89	M 6.20	$\frac{Cl_{58} SO_4^{4-} 40 HCO_3^- 2}{Na_{45} Ca_{32} Mg_{22}}$ PH 7,8	0,78	0,68	1,50	0,59	-0,45
SU-64	5/79	7,5	7445	ppm epm epm%	1080 46,98 47,15	25 0,64 0,64	232 19,08 19,15	660 32,93 33,05	2240 63,17 61,83	1760 36,64 35,86	144 2,36 2,31	M 7.45	$\frac{Cl_{62} SO_4^{4-} 36 HCO_3^- 2}{Na_{48} Ca_{33} Mg_{19}}$ PH 7,5	0,74	0,58	1,73	0,85	-0,44
SU-128	12/75	7,7	4420	ppm epm epm%	513 22,31 33,27	21 0,53 0,80	807 17,01 25,37	545 27,20 40,57	675 19,03 28,79	2120 44,09 66,72	181 2,96 4,47	M 4.42	$\frac{SO_4^{4-} 67 Cl_{29} HCO_3^- 4}{Ca_{41} Na_{34} Mg_{25}}$ PH 7,7	1,17	2,31	1,60	-0,19	0,07
SU-128	5/79	7,4	4691	ppm epm epm%	551 23,97 36,43	13 0,33 0,5	189 15,54 23,62	520 25,95 39,44	662 18,67 28,46	2112 43,97 67,02	181 2,97 4,53	M 4.69	$\frac{SO_4^{4-} 67 Cl_{28} HCO_3^- 5}{Ca_{39} Na_{37} Mg_{24}}$ PH 7,4	1,28	2,36	1,67	-0,34	0,12

268

RESULTATS DES ANALYSES CHIMIQUES DES EAUX SOUTERRAINES

Champ D' Al ABDALIYA, Formation de Damman

PUITS	DATE MOIS/ AN.	PH	CONCENTRATION TOTALE EN SELS DISSOUS EN PPM	UNITÉ	CONCENTRATION EN ppm, epm et epm %							INDICE HYDROCHIMIQUE						
					CATIONS				ANIONS			FORMULE HYDROCHIMIQUE	COEFFICIENT HYDROCHIMIQUE					
					Na ⁺	K ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	HCO ₃ ⁻		r Na / r Cl	r SO ₄ / r Cl	r Ca / r Mg	r Cl - r Na / r Mg	r Na - r Cl / r SO ₄	
KOC 40	10/55		3979	ppm epm epm%	610 26,54 40,54		168 13,82 21,11	503 25,10 38,34	1334 37,62 57,49	1235 25,71 39,29	129 2,11 3,22	M 3.98	$\frac{Cl_{57} SO_4^{4-} 39 HCO_3^- 3}{Na_{41} Ca_{38} Mg_{21}}$ PH	0,71	0,68	1,82	0,80	-0,43
KOC 40	5/78	7,4	4400	ppm epm epm%	620 26,97 42,87	25,5 0,65 1,03	150 12,34 19,62	490 24,45 38,87	1174 33,11 52,63	1330 27,69 44,02	129 2,11 3,35	M 4.4	$\frac{Cl_{53} SO_4^{4-} 44 HCO_3^- 3}{Na_{44} Ca_{39} Mg_{20}}$ PH 7,4	0,81	0,84	1,98	0,50	-0,22
KOC 89	5/67		3585	ppm epm epm%	595 25,88 44,31		94 7,73 1,25	497 24,80 42,46	1179 33,25 56,95	1160 24,15 41,37	60 0,98 1,68	M 3.59	$\frac{Cl_{57} SO_4^{4-} 42 HCO_3^- 2}{Na_{44} Ca_{42} Mg_1}$ PH	0,778	0,26	3,208	0,953	-0,305
KOC 89	5/78	7,4	3375	ppm epm epm%	510 22,19 44,34	20 0,51 1,02	108 8,88 17,75	370 18,46 36,89	784 22,11 44,56	1220 25,40 51,19	129 2,11 4,25	M 3.38	$\frac{SO_4^{4-} 51 Cl_{45} HCO_3^- 4}{Na_{45} Ca_{37} Mg_{18}}$ PH 7,4	1,004	1,149	2,079	-0,009	0,003
				ppm epm epm%								M	_____ PH					
				ppm epm epm%								M	_____ PH					

269

RESULTATS DES ANALYSES CHIMIQUES DES EAUX SOUTERRAINES

CHAMP - A Groupe de Koweit + Formation de Damman

PUITS	DATE MOIS AN.	PH	CONCENTRATION TOTALE EN SELS DISSOUS EN PPM	UNITÉ	CONCENTRATION EN ppm, epm et epm %						INDICE HYDROCHIMIQUE							
					CATIONS			ANIONS			FORMULE HYDROCHIMIQUE	COEFFICIENT HYDROCHIMIQUE						
					Na ⁺	K ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻		HCO ₃ ⁻	r Na r Cl	r SO ₄ r Cl	r Ca r Mg	r Cl - r Na r Mg	r Na - r Cl r SO ₄	
A-1	8/75	7,2	3490	ppm epm epm%	745 20,66 40,78	13 0,33 0,65	154 12,65 24,97	341 17,01 33,58	764 21,54 42,11	1310 27,24 53,26	144 2,36 4,61	M 3,49	SO ₄ ⁴ ₅₄ Cl ₄₂ HCO ₃ ³ ₅ PH Na ₄₁ Ca ₃₄ Mg ₂₅ 7,2	0,96	1,26	1,34	0,07	-0,03
A-1	8/79	7,6	3305	ppm epm epm%	545 23,71 52,19	14 0,36 0,86	102 8,39 18,47	206 12,97 28,55	7,35 20,73 40,73	1344 27,98 54,98	133 2,18 4,28	M 3,31	SO ₄ ⁴ ₅₅ Cl ₄₁ HCO ₃ ³ ₄ PH Na ₅₃ Ca ₂₉ Mg ₁₈ 7,0	1,14	1,35	1,546	-0,36	0,11
A-12	8/75	7,3	2840	ppm epm epm%	375 16,31 36,81	13 0,33 0,74	154 12,65 28,55	301 15,01 33,88	519 14,63 34,18	1220 25,37 59,27	171 2,80 6,50	M 2,84	SO ₄ ⁴ ₅₉ Cl ₃₄ HCO ₃ ³ ₇ PH Na ₃₇ Ca ₃₄ Mg ₂₉ 7,3	1,11	1,73	1,19	-0,13	0,06
A-12	5/79	7,6	2780	ppm epm epm%	465 20,23 48,64	14,5 0,37 0,89	112 9,21 22,14	236 11,78 28,32	490 13,82 32,09	1280 26,65 61,85	158 2,59 6,01	M 2,78	SO ₄ ⁴ ₆₂ Cl ₃₂ HCO ₃ ³ ₆ PH Na ₄₉ Ca ₂₈ Mg ₂₂ 7,6	1,46	1,93	1,28	-0,70	0,24
A-13	6/70	7,5	3070	ppm epm epm%			113 9,29 20,61	316 15,77 34,99	704 19,85 40,8	1290 26,83 55,15	120 1,97 4,05	M 3,07	SO ₄ ⁴ ₅₅ Cl ₄₁ HCO ₃ ³ ₄ PH (N+K) ₄₄ Ca ₃₅ Mg ₂₀ 7,5	1,01	1,35	0,77	-0,62	0,006
A-13	5/79	7,5	3342	ppm epm epm%	510 22,19 43,60	14 0,36 0,79	101 8,31 18,21	296 14,77 32,37	764 21,54 43,60	1232 25,65 51,92	135 2,21 4,47	M 3,3	SO ₄ ⁴ ₅₂ Cl ₄₄ HCO ₃ ³ ₄ PH Na ₄₄ Ca ₃₂ Mg ₁₈ 7,5	1,03	1,19	1,78	-0,08	0,03

270

RESULTATS DES ANALYSES CHIMIQUES DES EAUX SOUTERRAINES

CHAMP. -B, Formation de Damman

PUITS	DATE MOIS AN.	PH	CONCENTRATION TOTALE EN SELS DISSOUS EN PPM	UNITÉ	CONCENTRATION EN ppm, epm et epm %						INDICE HYDROCHIMIQUE							
					CATIONS			ANIONS			FORMULE HYDROCHIMIQUE	COEFFICIENT HYDROCHIMIQUE						
					Na ⁺	K ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻		HCO ₃ ⁻	r Na r Cl	r SO ₄ r Cl	r Ca r Mg	r Cl - r Na r Mg	r Na - r Cl r SO ₄	
B-44	5/74	7,3	3195	ppm epm epm%	452 19,66 39,89	13 0,33 0,67	150 12,33 25,02	340 16,96 34,41	635 17,91 36,75	1350 28,08 57,62	167 2,74 5,62	M 3,29	SO ₄ ⁴ ₅₈ Cl ₃₇ HCO ₃ ³ ₆ PH Na ₄₀ Ca ₃₄ Mg ₂₅ 7,3	1,10	1,57	1,38	-0,14	0,06
B-44	5/79	7,3	3297	ppm epm epm%	480 20,88 44,75	16,0 0,41 0,88	95 7,81 16,74	352 17,56 37,63	606 17,09 34,89	1365 28,42 58,02	212 3,42 7,08	M 3,30	SO ₄ ⁴ ₅₈ Cl ₃₅ HCO ₃ ³ ₇ PH Na ₄₅ Ca ₃₈ Mg ₁₇ 7,3	1,22	1,66	2,25	-0,49	0,13
B-116	5/74	7,6	2785	ppm epm epm%	320 13,92 33,14	11 0,28 0,67	150 12,33 29,36	310 15,47 36,83	440 12,41 23,00	1270 26,42 63,86	155 2,54 6,14	M 2,78	SO ₄ ⁴ ₆₄ Cl ₂₃ HCO ₃ ³ ₆ PH Ca ₃₇ Na ₃₃ Mg ₂₉ 7,6	1,12	2,13	1,25	-0,12	0,06
B-116	5/79	7,6	2858	ppm epm epm%	380 16,53 42,43	11,5 0,29 0,76	109 8,96 23,01	264 13,17 33,81	451 12,72 31,04	1240 25,82 63,00	149 2,44 5,96	M	SO ₄ ⁴ ₆₃ Cl ₃₁ HCO ₃ ³ ₆ PH Na ₄₂ Ca ₃₄ Mg ₂₃	0,84	2,25	2,42	0,65	-0,06
				ppm epm epm%								M	_____ PH					
				ppm epm epm%								M	_____ PH					

271

RESULTATS DES ANALYSES CHIMIQUES DES EAUX SOUTERRAINES

CHAMP - C Formation de Damman

PUITS	DATE MOIS/ AN.	PH	CONCENTRATION TOTALE EN SELS DISSOUS EN PPM	UNITÉ	CONCENTRATION EN ppm, epm et epm %						INDICE HYDROCHIMIQUE								
					CATIONS				ANIONS		FORMULE HYDROCHIMIQUE	COEFFICIENT HYDROCHIMIQUE							
					Na ⁺	K ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻		HCO ₃ ⁻	r Na r Cl	r SO ₄ r Cl	r Ca r Mg	r Cl - r Na r Mg	r Na - r Cl r SO ₄		
C-11	5/74	7,2	3254	ppm epm epm%	520 24,36 46,74	11 0,28 0,54	140 11,51 22,08	320 15,97 30,64	810 22,84 44,32	1300 27,04 52,46	101 1,66 3,22	M 2,25	$\frac{SO_4^{4-} 52}{Na_{47} 47} \frac{Cl_{44}}{Ca_{31}} \frac{HCO_3^- 33}{Mg_{22}}$	PH 7,2	1,07	1,18	1,39	-0,13	0,06
C-11	5/79	7,7	3610	ppm epm epm%	550 23,93 47,23	13,5 0,35 0,67	117 9,62 18,99	336 16,77 33,10	845 23,83 44,32	1376 28,65 52,28	79 1,29 2,40	M 3,6	$\frac{SO_4^{4-} 53}{Na_{47}} \frac{Cl_{45}}{Ca_{33}} \frac{HCO_3^- 2}{Mg_{19}}$	PH 7,7	1,00	1,20	1,74	-0,01	0,03
C-40	5/74	8,5	2922	ppm epm epm%	385 16,75 35,88	12 0,31 0,66	160 13,15 28,17	330 16,47 35,28	530 15,51 34,27	1300 27,04 59,74	165 2,71 5,99	M 2,92	$\frac{SO_4^{4-} 63}{Na_{36}} \frac{Cl_{34}}{Ca_{34}} \frac{HCO_3^- 4}{Mg_{28}}$	PH 8,5	1,08	1,74	1,25	-0,09	0,05
C-40	5/79	7,9	2810	ppm epm epm%	345 15,01 38,26	12 0,31 0,79	116 9,54 24,32	288 14,37 36,63	465 13,11 31,77	1230 25,61 62,07	155 2,54 6,16	M 2,8	$\frac{SO_4^{4-} 62}{Na_{38}} \frac{Cl_{32}}{Ca_{37}} \frac{HCO_3^- 6}{Mg_{24}}$	PH 7,9	1,145	1,953	1,506	-0,02	0,074
C-108	5/74	8,0	2722	ppm epm epm%	350 15,22 35,94	13 0,33 0,38	150 12,33 29,11	290 14,47 34,17	450 12,67 30,31	1277 26,56 63,54	157 2,57 6,15	M 2,72	$\frac{SO_4^{4-} 64}{Na_{36}} \frac{Cl_{30}}{Ca_{34}} \frac{HCO_3^- 6}{Mg_{29}}$	PH 8,0	1,2	2,1	1,17	-0,21	0,10
C-108	5/79	7,7	2798	ppm epm epm%	315 13,70 35,62	12 0,31 0,81	108 8,88 23,09	312 15,57 40,48	450 12,19 30,25	1280 26,65 63,53	159 2,61 6,22	M 2,8	$\frac{SO_4^{4-} 64}{Ca_{40}} \frac{Cl_{30}}{Na_{36}} \frac{HCO_3^- 6}{Mg_{23}}$	PH 7,7	1,08	2,10	1,753	-0,114	0,038

272

RESULTATS DES ANALYSES CHIMIQUES DES EAUX SOUTERRAINES

CHAMP - D - Formation de Damman

PUITS	DATE MOIS/ AN.	PH	CONCENTRATION TOTALE EN SELS DISSOUS EN PPM	UNITÉ	CONCENTRATION EN ppm, epm et epm %						INDICE HYDROCHIMIQUE								
					CATIONS				ANIONS		FORMULE HYDROCHIMIQUE	COEFFICIENT HYDROCHIMIQUE							
					Na ⁺	K ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻		HCO ₃ ⁻	r Na r Cl	r SO ₄ r Cl	r Ca r Mg	r Cl - r Na r Mg	r Na - r Cl r SO ₄		
D-6	7/77	7,9	3500	ppm epm epm%	430 18,71 35,15	13,5 0,34 0,81	179 14,72 27,65	390 19,46 36,56	840 23,69 44,18	1237 25,75 48,02	255 4,18 7,79	M 3,5	$\frac{SO_4^{4-} 48}{Na_{35}} \frac{Cl_{44}}{Ca_{37}} \frac{HCO_3^- 8}{Mg_{28}}$	PH 7,9	0,79	1,087	1,322	0,338	-0,193
D-19	4/77	7,9	2925	ppm epm epm%	355 15,44 35,31	12,5 0,32 0,73	149 12,25 28,01	319 15,72 35,95	527 14,86 33,11	1262 26,27 58,53	229 3,75 8,36	M 2,9	$\frac{SO_4^{4-} 59}{Ca_{36}} \frac{Cl_{33}}{Na_{35}} \frac{HCO_3^- 8}{Mg_{28}}$	PH 7,9	1,039	1,768	1,283	-0,047	0,022
D-24	6/77	7,	3148	ppm epm epm%	440 19,14 42,85	16 0,41 0,92	121 9,95 22,27	304 15,17 33,96	542 15,28 32,73	1378 28,69 61,45	166 2,72 5,83	M 3,19	$\frac{SO_4^{4-} 61}{Na_{43}} \frac{Cl_{33}}{Ca_{34}} \frac{HCO_3^- 6}{Mg_{23}}$	PH 7,65	1,253	1,878	1,525	-0,388	0,135
				ppm epm epm%								M	_____ PH						
				ppm epm epm%								M	_____ PH						
				ppm epm epm%								M	_____ PH						

273

RESULTATS DES ANALYSES CHIMIQUES DES EAUX SOUTERRAINES

CHAMP - E; Groupe de Koweit + Formation de Damman

PUITS	DATE MOIS/ AN.	PH	CONCENTRATION TOTALE EN SELS DISSOUS EN PPM	UNITÉ	CONCENTRATION EN ppm, epm et epm %							INDICE HYDROCHIMIQUE							
					CATIONS				ANIONS			FORMULE HYDROCHIMIQUE	COEFFICIENT HYDROCHIMIQUE						
					Na ⁺	K ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻		r Na / r Cl	r SO ₄ / r Cl	r Ca / r Mg	r Cl - r Na / r Mg	r Na - r Cl / r SO ₄		
E-19 *Gr.K	6/78	7,5	3825	ppm epm epm%	370 31,76 48,89	19 0,49 0,72	128 10,53 15,55	500 24,95 36,84	954 26,90 48,22	1250 26,02 46,64	175 2,87 5,14	M 3,83	Cl ₄₈ SO ₄ ₄₇ HCO ₃ ₅ Na ₄₉ Ca ₃₇ Mg ₁₆	PH 7,5	1,181	0,967	2,369	-0,462	0,187
E-19 **Dm.	7/78	7,2	3000	ppm epm epm%	545 23,71 51,03	22 0,56 1,2	100 8,22 17,69	280 13,97 30,07	584 16,47 35,78	1260 26,23 56,98	203 3,33 7,23	M 3,0	SO ₄ ₅₇ Cl ₃₆ HCO ₃ ₇ Na ₅₁ Ca ₃₀ Mg ₁₈	PH 7,2	1,440	1,593	1,699	-0,881	0,276
E-19 Gr.K + Dm.	7/78	7,4	3325	ppm epm epm%	515 22,40 49,09	17,5 0,45 0,99	95 7,81 17,12	300 14,97 32,81	708 19,97 39,92	1280 26,65 53,27	208 3,41 6,82	M 3,33	SO ₄ ₅₃ Cl ₄₀ HCO ₃ ₇ Na ₄₉ Ca ₃₃ Mg ₁₇	PH 7,4	1,122	1,335	1,917	-0,311	0,091
E-12 Dm.	7/78	7,7	4808	ppm epm epm%	770 33,50 45,53	17,5 0,45 0,61	136 11,18 15,20	570 28,44 38,66	976 27,52 43,49	1580 32,89 51,98	175 2,87 4,54	M 4,81	SO ₄ ₅₂ Cl ₄₃ HCO ₃ ₅ Na ₄₆ Ca ₃₉ Mg ₁₅	PH 7,7	1,217	1,195	2,544	-0,535	0,182
E-12 Gr.K	7/78	7,1	3680	ppm epm epm%	431 23,93 44,03	109 8,96 16,49	430 21,46 39,48	947 26,71 49,14	1250 26,02 47,87	98,7 1,62 2,98	M 3,68	Cl ₄₉ SO ₄ ₄₈ HCO ₃ ₃ Na ₄₄ Ca ₃₉ Mg ₁₆	PH 7,1	0,896	0,974	2,395	0,310	-0,107	
E-12 Gr.K + Dm.	7/78	7,2	4184	ppm epm epm%	650 28,28 45,22	18 0,46 0,74	138 11,35 18,15	450 22,45 35,90	1000 28,2 49,66	1270 26,44 46,56	131 2,15 3,79	M 4,18	Cl ₅₀ SO ₄ ₄₇ HCO ₃ ₄ Na ₄₅ Ca ₃₆ Mg ₁₈	PH 7,2	1,003	0,938	1,978	-0,007	0,003

*Groupe de Koweit
**Damman

274

RESULTATS DES ANALYSES CHIMIQUES DES EAUX SOUTERRAINES

KOWEIT SUD-OWEST, Formations de Damman et d' Umm-Al-Radhuma

PUITS	DATE MOIS/ AN.	PH	CONCENTRATION TOTALE EN SELS DISSOUS EN PPM	UNITÉ	CONCENTRATION EN ppm, epm et epm %							INDICE HYDROCHIMIQUE							
					CATIONS				ANIONS			FORMULE HYDROCHIMIQUE	COEFFICIENT HYDROCHIMIQUE						
					Na ⁺	K ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻		r Na / r Cl	r SO ₄ / r Cl	r Ca / r Mg	r Cl - r Na / r Mg	r Na - r Cl / r SO ₄		
	12/66	8	3710	ppm epm epm%			145 11,92 22,86	240 11,98 22,98	780 22,00 42,19	1420 29,56 56,69	45 0,58 1,11	M 3,7	SO ₄ ₅₇ Cl ₄₂ HCO ₃ ₁ (Na+K) Ca ₂₃ Mg ₂₃	PH 8	1,28	1,34	1,01	-0,52	0,211
	/73	7,0	4632	ppm epm epm%	388 16,87 26,09	36 0,92 1,42	158 12,99 20,09	685 34,18 52,85	460 12,97 20,06	2345 48,82 75,49	222 2,88 4,45	M 4,6	SO ₄ ₇₅ Cl ₂₀ HCO ₃ ₄ Ca ₅₃ Na ₂₆ Mg ₂₀	PH 7	1,39	4,01	2,63	-0,36	0,10
	8/67	7,5	2810	ppm epm epm%	550 23,92 52,20	10 0,25 0,54	130 10,68 23,30	220 10,97 23,94	670 18,89 42,38	1180 24,54 55,05	70 1,14 2,55	M 3,66	SO ₄ ₆₁ Cl ₃₆ HCO ₃ ₃ Na ₅₀ Mg ₃₀ Ca ₂₀	PH 8,3	1,39	1,68	0,67	-0,47	0,23
	11/73	8,3	4899	ppm epm epm%	320 13,915 17,54	53 1,36 1,71	306 25,17 31,72	619 38,89 49,02	570 16,08 20,28	2830 58,92 74,29	283 3,68 4,63	M 4,9	SO ₄ ₇₄ Cl ₂₀ HCO ₃ ₅ Ca ₄₉ Mg ₃₂ Na ₁₈	PH 8,3	0,87	3,66	1,55	0,09	-0,04
	10/75	7,2	3877	ppm epm epm%	482 20,96 36,9	20 0,512 0,01	169 13,88 24,0	429 21,407 37,70	749 21,124 37,74	1575 32,79 58,58	159 2,064 3,69	M 3,88	SO ₄ ₅₉ Cl ₃₈ HCO ₃ ₄ Ca ₃₈ Na ₃₇ Mg ₂₄	PH 7,2	0,992	1,55	1,54	0,012	-0,005
	11/73	8,2	4109	ppm epm epm%	110 4,78 8,63	16 0,41 0,74%	211 17,35 31,31	659 32,88 59,33	167 4,71 9,00	2120 44,14 84,34	268 3,48 6,65	M 4,1	SO ₄ ₈₄ Cl ₉ HCO ₃ Ca ₅₉ Mg ₃₁ Na ₉	PH 8,2	1,02	9,37	1,90	-0,004	0,0017

275

RESULTATS DES ANALYSES CHIMIQUES DES EAUX SOUTERRAINES

Region d' Al ABDALLY, Partie superieure du Groupe de Koweit

PUITS	DATE MOIS AN.	PH	CONCENTRATION TOTALE EN SELS DISSOUS EN PPM	UNITE	CONCENTRATION EN ppm, epm et epm %							INDICE HYDROCHIMIQUE						
					CATIONS				ANIONS			FORMULE HYDROCHIMIQUE	COEFFICIENT HYDROCHIMIQUE					
					Na ⁺	K ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	HCO ₃ ⁻		r Na r Cl	r SO ₄ r Cl	r Ca r Mg	r Cl - r Na r Mg	r Na - r Cl r SO ₄	
AF-1	3/73	7,4	1943	ppm epm epm%	150 6,52 22,88	15 0,38 1,33	37 3,04 10,67	372 18,56 65,12	111 3,13 11,48	1064 22,15 81,22	107 1,75 6,42	M 1,9	SO ₄ ⁴ ₈₁ Cl ₁₁ HCO ₃ ³ ₆ PH Ca ₆₅ Na ₂₃ Mg ₁₁ 7,4	2,08	7,08	6,11	-1,12	0,15
AF-2	3/73	7,4	5244	ppm epm epm%	929 40,41 55,49	16 0,41 0,56	110 9,05 12,43	460 27,95 31,52	941 26,54 34,61	2343 48,78 63,62	83 1,36 1,77	M 5,2	SO ₄ ⁴ ₆₄ Cl ₃₅ HCO ₃ ³ ₂ PH Na ₅₆ Ca ₃₂ Mg ₁₂ 7,4	1,52	1,84	2,54	-1,53	0,284
AF-3	2/73	7,4	7400	ppm epm epm%	1950 84,83 75,94	17,5 0,48 0,43	83 6,83 6,11	392 19,56 17,51	17,34 48,90 47,29	2526 52,59 50,86	117 1,92 1,86	M 7,4	SO ₄ ⁴ ₅₁ Cl ₄₈ HCO ₃ ³ ₂ PH Na ₇₆ Ca ₈₁ Mg ₆ 7,4	1,74	1,08	2,86	-5,26	0,68
				ppm epm epm%								M	_____ PH					
				ppm epm epm%								M	_____ PH					
				ppm epm epm%								M	_____ PH					

276

RESULTATS DES ANALYSES CHIMIQUES DES EAUX SOUTERRAINES

Region d' Al Wafra - Groupe de Kuwait et Fm. de Damman

PUITS	DATE MOIS AN.	PH	CONCENTRATION TOTALE EN SELS DISSOUS EN PPM	UNITE	CONCENTRATION EN ppm, epm et epm %							INDICE HYDROCHIMIQUE						
					CATIONS				ANIONS			FORMULE HYDROCHIMIQUE	COEFFICIENT HYDROCHIMIQUE					
					Na ⁺	K ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	HCO ₃ ⁻		r Na r Cl	r SO ₄ r Cl	r Ca r Mg	r Cl - r Na r Mg	r Na - r Cl r SO ₄	
B3-F29-1 Gr. de Koweit	4/79	7,3	6388	ppm epm epm%	1130 49,12 54,27	70 1,79 1,98	130 10,69 11,80	580 28,94 31,95	1897 53,50 61,22	1525 31,75 36,34	130 2,13 2,49	M 3,4	Cl ₆₁ SO ₄ ⁴ ₃₆ HCO ₃ ³ ₂ PH Na ₅₄ Ca ₃₂ Mg ₁₂ 7,3	0,60	0,80	4,46	5,9	-0,55
B5-F17-1 Gr. K.	9/78	7,4	7470	ppm epm epm%	1380 60,03 53,99	75 1,92 1,73	1800 14,80 13,31	690 34,43 30,97	2298 64,80 59,35	2000 41,64 38,13	138 2,26 2,07	M 7,5	Cl ₅₉ SO ₄ ⁴ ₃₈ HCO ₃ ³ ₂ PH Na ₅₄ Ca ₃₁ Mg ₁₃ 7,4	0,60	0,87	3,83	5,1	-0,46
B5-F25-1 Gr. K.	9/78	7,4	4670	ppm epm epm%	860 37,41 41,52	55 1,41 1,56	130 10,69 11,87	410 40,59 45,05	1371 38,66 57,99	1250 26,025 39,03	91 1,49 2,23	M 4,7	Cl ₅₈ SO ₄ ⁴ ₃₉ HCO ₃ ³ ₂ PH Ca ₄₅ Na ₄₃ Mg ₁₂ 7,4	0,63	0,91	3,15	3,9	-0,41
WW-1 Damman	3/74	7,6	5836	ppm epm epm%	1210 52,63 56,72	49 1,25 1,35	160 13,16 14,18	516 25,75 27,75	2335 65,85 73,76	982 20,45 22,91	181 2,97 3,33	M 5,8	Cl ₇₄ SO ₄ ⁴ ₂₃ HCO ₃ ³ ₃ PH Na ₅₇ Ca ₂₈ Mg ₁₄ 7,6	0,799	0,31	1,96	1,01	-0,65
WW-3 Damman	2/75	7,4	6661	ppm epm epm%	1250 54,38 56,90	62 1,59 1,66	166 13,65 14,28	520 25,95 27,15	2463 69,46 72,61	1120 23,32 24,38	176 2,88 3,01	M 6,7	Cl ₇₃ SO ₄ ⁴ ₂₄ HCO ₃ ³ ₃ PH Na ₅₉ Ca ₂₇ Mg ₁₄ 7,7	0,78	0,34	1,90	1,11	-0,65
WW-7 Damman	4/75	7,5	7778	ppm epm epm%	1688 73,43 58,43	72 1,84 1,46	215 17,68 14,07	656 32,73 26,04	3278 92,44 77,45	1150 23,94 20,06	181 2,97 2,49	M 7,8	Cl ₇₇ SO ₄ ⁴ ₂₀ HCO ₃ ³ ₂ PH Na ₆₀ Ca ₂₆ Mg ₁₄ 7,5	0,79	0,26	1,85n	1,08	-0,79

277

ANNEXE II

- COÉFFICIENTS DE CONVERSION

- FONCTIONS MATHÉMATIQUES RENCONTRÉES DANS LE CHAPITRE N°7

Dans certaines tables, un nombre est suivi d'un chiffre entre parenthèses. Le chiffre est la puissance de dix par laquelle le nombre est surmultiplié par exemple: $2,73 (-3) = 0,00273$

Les nombres sont inscrits sous la forme anglo-saxonne. Pour les convertir, il faut remplacer les points par des virgules; par exemple 2.73 doit être remplacé 2,73. (KRUSEMAN G.P. et al. 1973).

COEFFICIENTS DE CONVERSION

Abréviations: ft = pied; in = pouce; l = litre; Imp.gal. = gallon impérial; U.S.gal. = gallon U.S.; h = heure

Table of length conversions: LONGUEUR (m, cm, ft, in) and INVERSE DES LONGUEURS (m^-1, cm^-1, ft^-1, in^-1)

Table of area conversions: AIRES (m^2, ft^2) and INVERSE DES AIRES (m^-2, ft^-2)

Table of volume conversions: VOLUMES (m, l, Imp.gal., U.S.gal., ft^3)

Table of time conversions: TEMPS (jour, h, min, sec) and INVERSE DES TEMPS (jour^-1, h^-1, min^-1, sec^-1)

Table of flow rate conversions: DEBITS (l/sec, m^3/jour, m^3/sec, Imp.gal./jour, U.S.gal./jour, ft^3/jour)

Table of permeability conversions: COEFFICIENT DE PERMEABILITE (m/jour, m/sec, cm/h, Imp.gal./jour-ft^2, U.S.gal./jour-ft^2, Imp.gal./min-ft^2, U.S.gal./min-ft^2)

Table of transmissivity conversions: TRANSMISSIVITE (m^2/jour, m^2/sec, Imp.gal./jour-ft, U.S.gal./jour-ft, Imp.gal./min-ft, U.S.gal./min-ft)

Table of transmissivity conversions (continued)

Table of transmissivity conversions (continued)

Table of transmissivity conversions (continued)

Abréviations: j. = jour; m. = min.

TABLE DES VALEURS DE W(u) CORRESPONDANT AUX VALEURS DE u ET DE 1/u (WALTON, 1962)

Table of W(u) values for various u and 1/u values, with columns for u, 1/u, and W(u) for n(1) through n(10).

TABLE DES FONCTIONS e^x, e^-x, K_0(x) et e^x K_0(x)

Table of mathematical functions: e^x, e^-x, K_0(x), and e^x K_0(x) for x values from 0.010 to 0.999.

TABLE DES VALEURS DE W (u, r/B)
(voir Chapitre 3, Section 4; HANTUSH, 1956)

u	1/u	r/B	0	0.005	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.79
0				1.08(1)	9.44	8.06	7.25	6.67	6.23	5.87	5.56	5.29	5.06	
1(-6)	1.00(6)		1.32(1)											
2(-6)	5.00(5)		1.25(1)											
4(-6)	2.50(5)		1.18(1)	1.07(1)										
6(-6)	1.66(5)		1.14(1)	1.06(1)										
8(-6)	1.25(5)		1.12(1)	1.05(1)	9.43									
1(-5)	1.00(5)		1.09(1)	1.04(1)	9.42									
2(-5)	5.00(4)		1.02(1)	9.95	9.30									
4(-5)	2.50(4)		9.55	9.40	9.01	8.03								
6(-5)	1.66(4)		9.14	9.04	8.77	7.98	7.24							
8(-5)	1.25(4)		8.86	8.78	8.57	7.91	7.23							
1(-4)	1.00(4)		8.63	8.57	8.40	7.84	7.21							
2(-4)	5.00(3)		7.94	7.91	7.82	7.50	7.07	6.62	6.22	5.86				
4(-4)	2.50(3)		7.25	7.23	7.19	7.01	6.76	6.45	6.14	5.83	5.55			
6(-4)	1.66(3)		6.84	6.83	6.80	6.68	6.50	6.27	6.02	5.77	5.51	5.27	5.05	
8(-4)	1.25(3)		6.55		6.52	6.43	6.29	6.11	5.91	5.69	5.46	5.25	5.04	
1(-3)	1.00(3)		6.33		6.31	6.23	6.12	5.97	5.80	5.61	5.41	5.21	5.01	
2(-3)	5.00(2)		5.64		5.63	5.59	5.53	5.45	5.35	5.24	5.12	4.89	4.85	
4(-3)	2.50(2)		4.95		4.94	4.92	4.89	4.85	4.80	4.74	4.67	4.59	4.51	
6(-3)	1.66(2)		4.54		4.53	4.51	4.48	4.45	4.40	4.35	4.30	4.24		
8(-3)	1.25(2)		4.26		4.25	4.23	4.21	4.19	4.15	4.12	4.08	4.03		
1(-2)	1.00(2)		4.04		4.03	4.02	4.00	3.98	3.95	3.92	3.89	3.85		
2(-2)	5.00(1)		3.35		3.34	3.34	3.33	3.31	3.30	3.29	3.26			
4(-2)	2.50(1)		2.68		2.67	2.67	2.66	2.65	2.65	2.65	2.64			
6(-2)	1.66(1)		2.29		2.28	2.28	2.28	2.27	2.27	2.27				
8(-2)	1.25(1)		2.03		2.02	2.01	2.01	2.01	2.01	2.01				
1(-1)	1.00(1)		1.82							1.81	1.81	1.81		
2(-1)	5.00(1)		1.22							1.22				
4(-1)	2.50(1)		7.02(-1)							7.00(-1)				
6(-1)	1.66(1)		4.54(-1)											
8(-1)	1.25(1)		3.11(-1)											

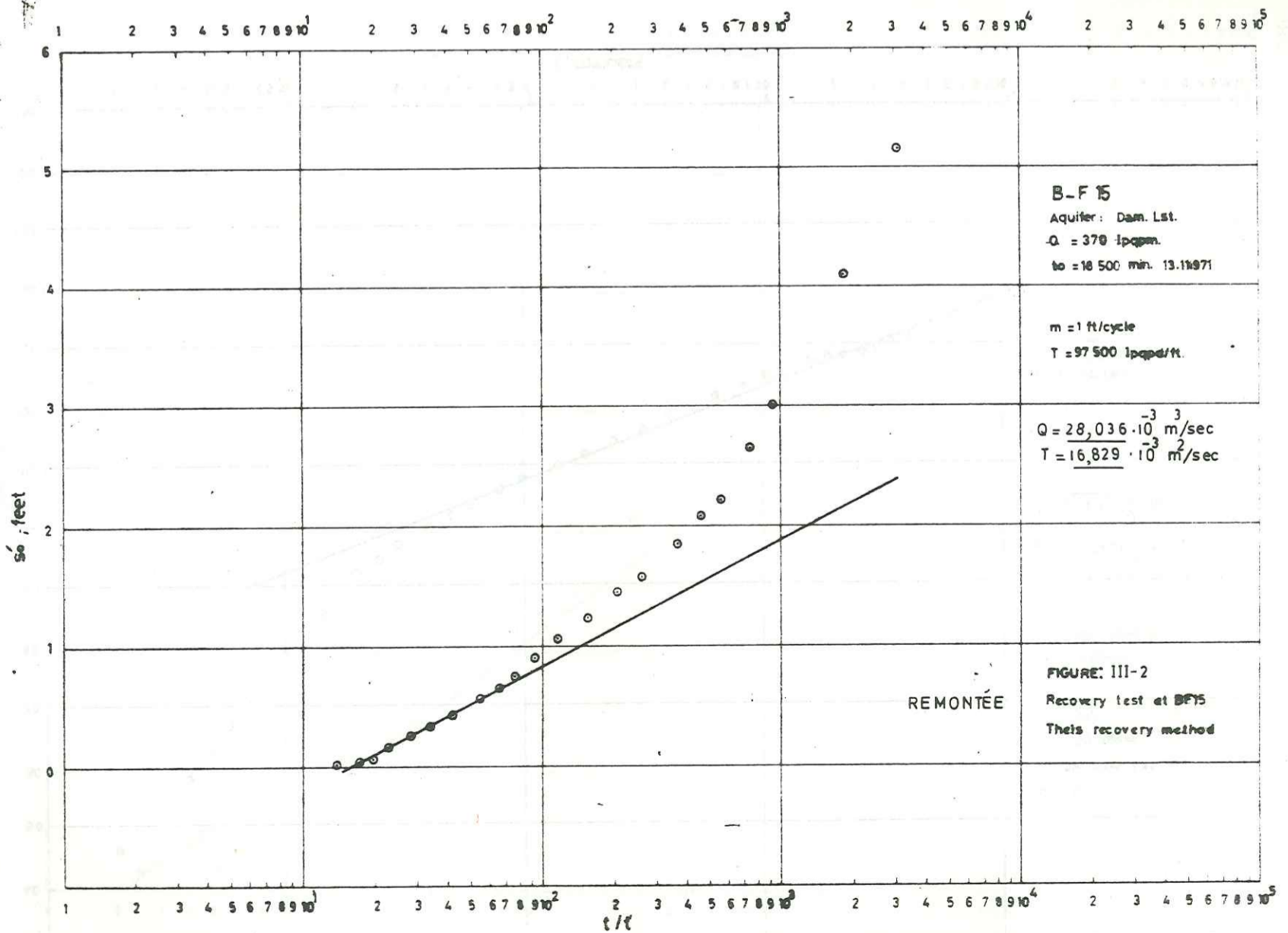
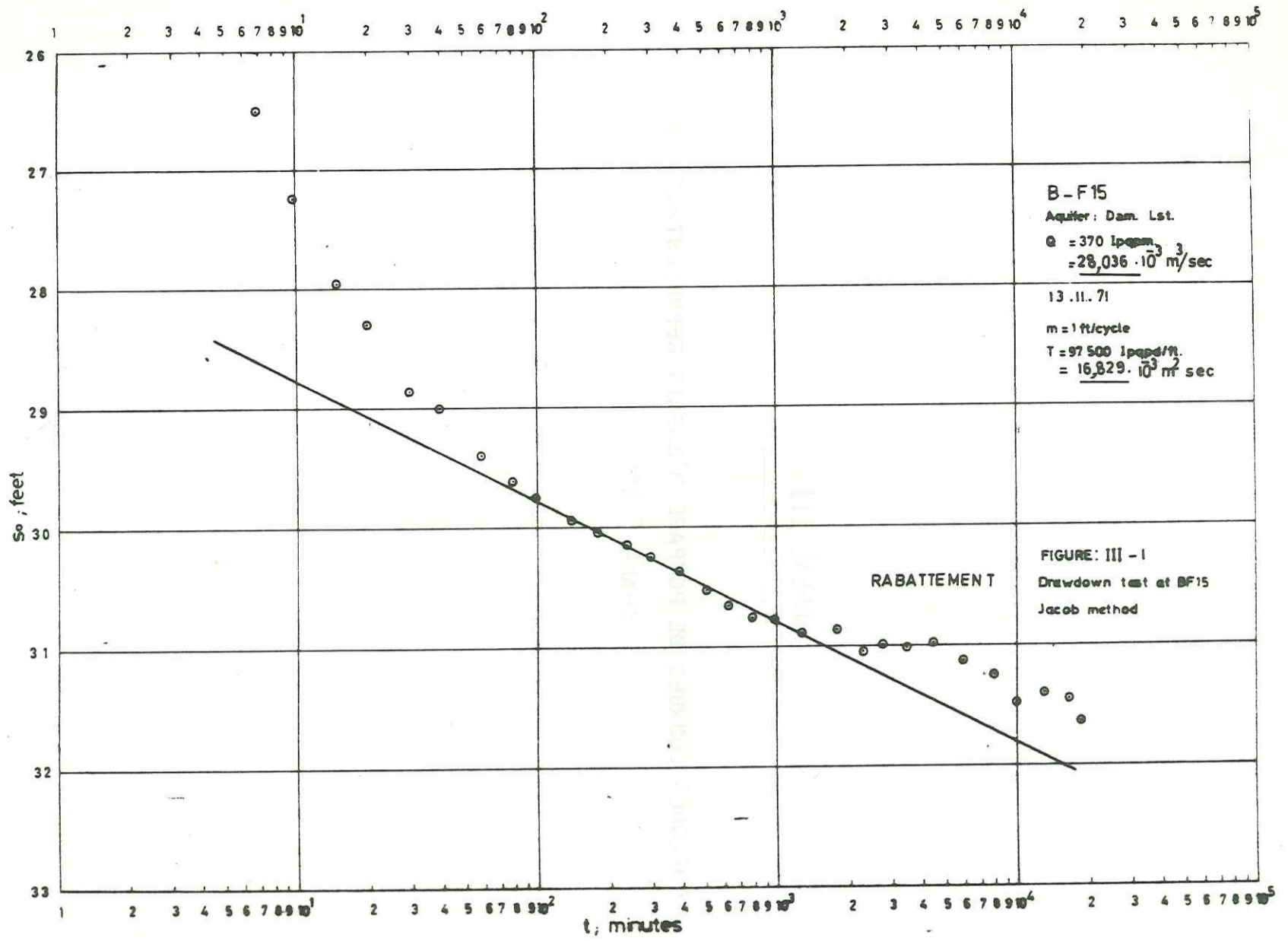
† On peut trouver une table plus étendue chez Hantush (1956) et Walton (1962).

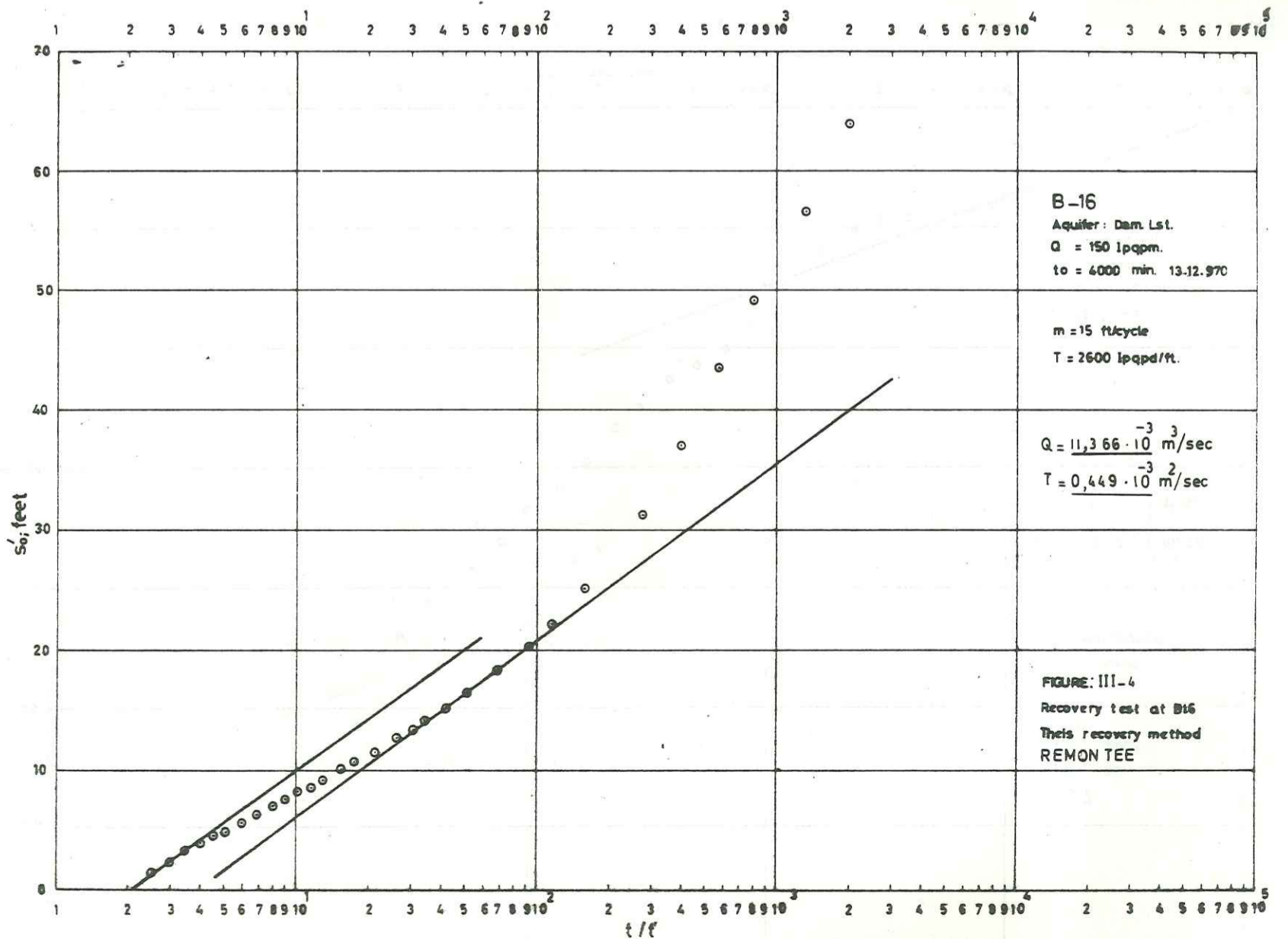
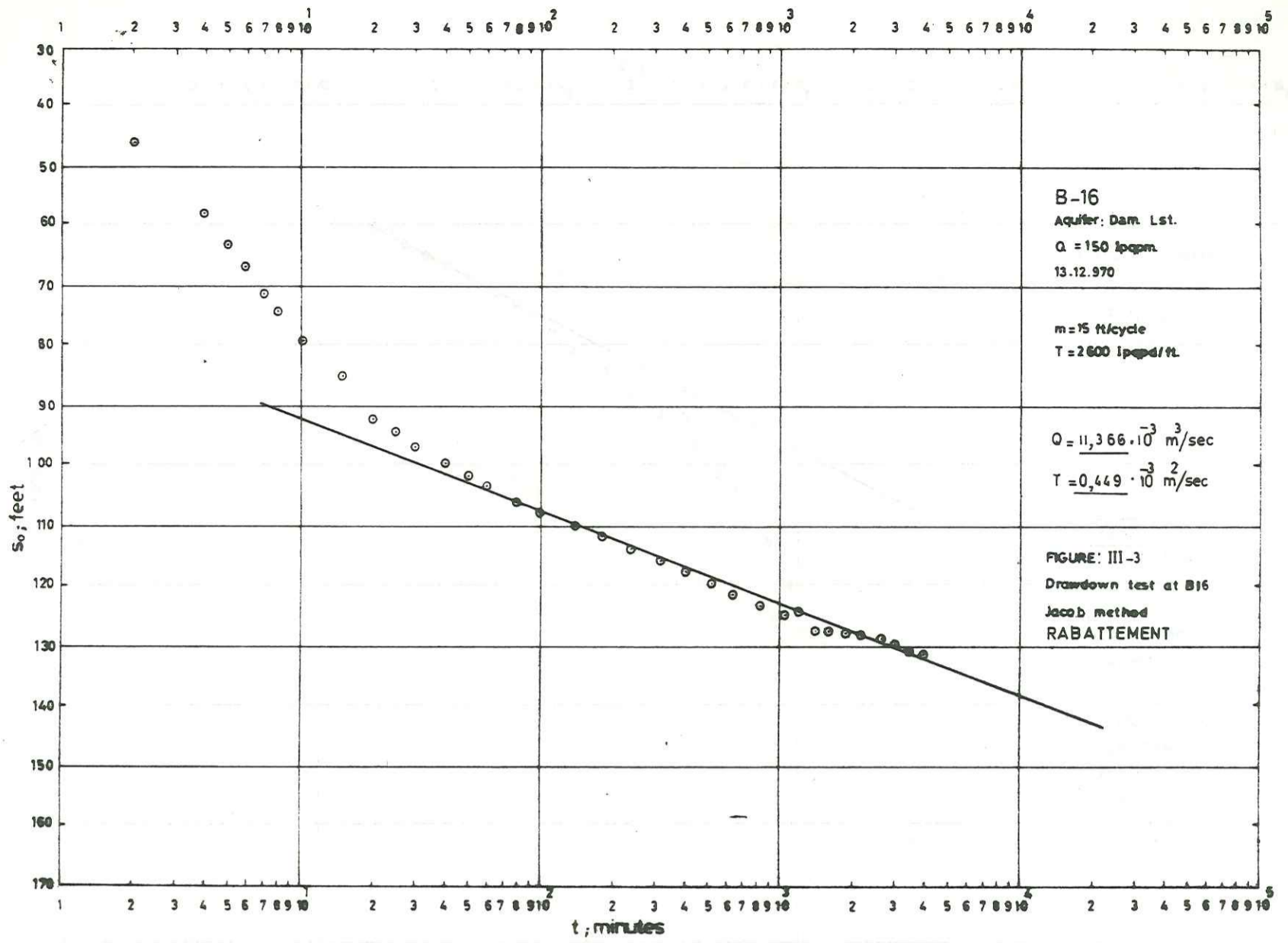
(cont.)

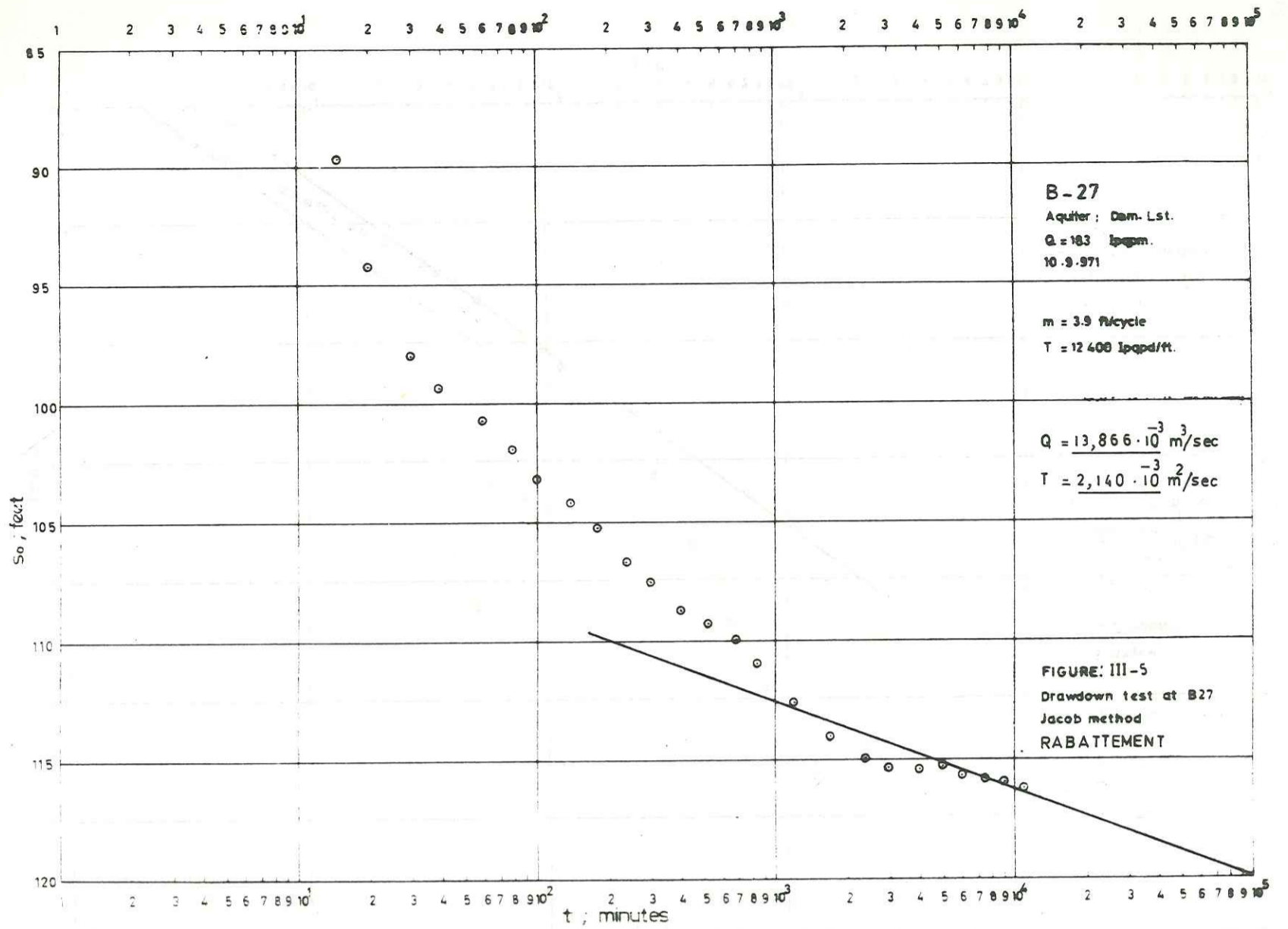
u	1/u	r/B	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6	0.8
0				4.85	3.50	2.74	2.23	1.55	1.13
1(-4)	1.00(4)		8.63						
2(-4)	5.00(3)		7.94						
4(-4)	2.50(3)		7.25						
6(-4)	1.66(3)		6.84						
8(-4)	1.25(3)		6.55	4.84					
1(-3)	1.00(3)		6.33	4.83					
2(-3)	5.00(2)		5.64	4.71					
4(-3)	2.50(2)		4.95	4.42	3.48				
6(-3)	1.66(2)		4.54	4.18	3.43				
8(-3)	1.25(2)		4.26	3.98	3.36	2.73			
1(-2)	1.00(2)		4.04	3.81	3.29	2.71	2.22		
2(-2)	5.00(1)		3.35	3.24	2.95	2.57	2.18		
4(-2)	2.50(1)		2.68	2.63	2.48	2.27	2.02	1.52	
6(-2)	1.66(1)		2.29	2.26	2.17	2.02	1.84	1.11	
8(-2)	1.25(1)		2.03	2.00	1.93	1.83	1.69	1.39	1.08
1(-1)	1.00(1)		1.82	1.80	1.75	1.67	1.56	1.31	1.05
2(-1)	5.00		1.22	1.21	1.19	1.16	1.11	9.96(-1)	8.58(-1)
4(-1)	2.50		7.02(-1)	7.00(-1)	6.93(-1)	6.81(-1)	6.65(-1)	6.21(-1)	5.65(-1)
6(-1)	1.66		4.54(-1)	4.53(-1)	4.50(-1)	4.44(-1)	4.36(-1)	4.15(-1)	3.87(-1)
8(-1)	1.25		3.11(-1)	3.10(-1)	3.08(-1)	3.05(-1)	3.01(-1)	2.89(-1)	2.73(-1)
1	1.00		2.19(-1)	2.18(-1)	2.16(-1)	2.14(-1)	2.07(-1)	1.97(-1)	
2	5.00(-1)		4.88(-2)	4.87(-2)	4.85(-2)	4.82(-2)	4.73(-2)	4.60(-2)	
4	2.50(-1)		3.77(-3)	3.77(-3)	3.77(-3)	3.76(-3)	3.74(-3)	3.73(-3)	
0				1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
1(-2)	1.00(2)		4.04						
2(-2)	5.00(1)		3.35						
4(-2)	2.50(1)		2.68						
6(-2)	1.66(1)		2.29	8.39(-1)					
8(-2)	1.25(1)		2.03	8.32(-1)					
1(-1)	1.00(1)		1.82	8.19(-1)					
2(-1)	5.00		1.22	7.15(-1)	2.27(-1)				
4(-1)	2.50		7.02(-1)	5.02(-1)	2.10(-1)	6.91(-2)			
6(-1)	1.66		4.54(-1)	3.54(-1)	1.77(-1)	6.64(-2)	2.22(-2)		
8(-1)	1.25		3.11(-1)	2.54(-1)	1.44(-1)	6.07(-2)	2.18(-2)		
1	1.00		2.19(-1)	1.85(-1)	1.14(-1)	5.34(-2)	2.07(-2)	7.3(-3)	
2	5.00(-1)		4.88(-2)	4.44(-2)	3.35(-2)	2.10(-2)	1.12(-2)	5.1(-3)	2.1(-3)
4	2.50(-1)		3.78(-3)	3.6(-3)	3.1(-3)	2.4(-3)	1.60(-3)	1.0(-3)	6.0(-4)

ANNEXE III

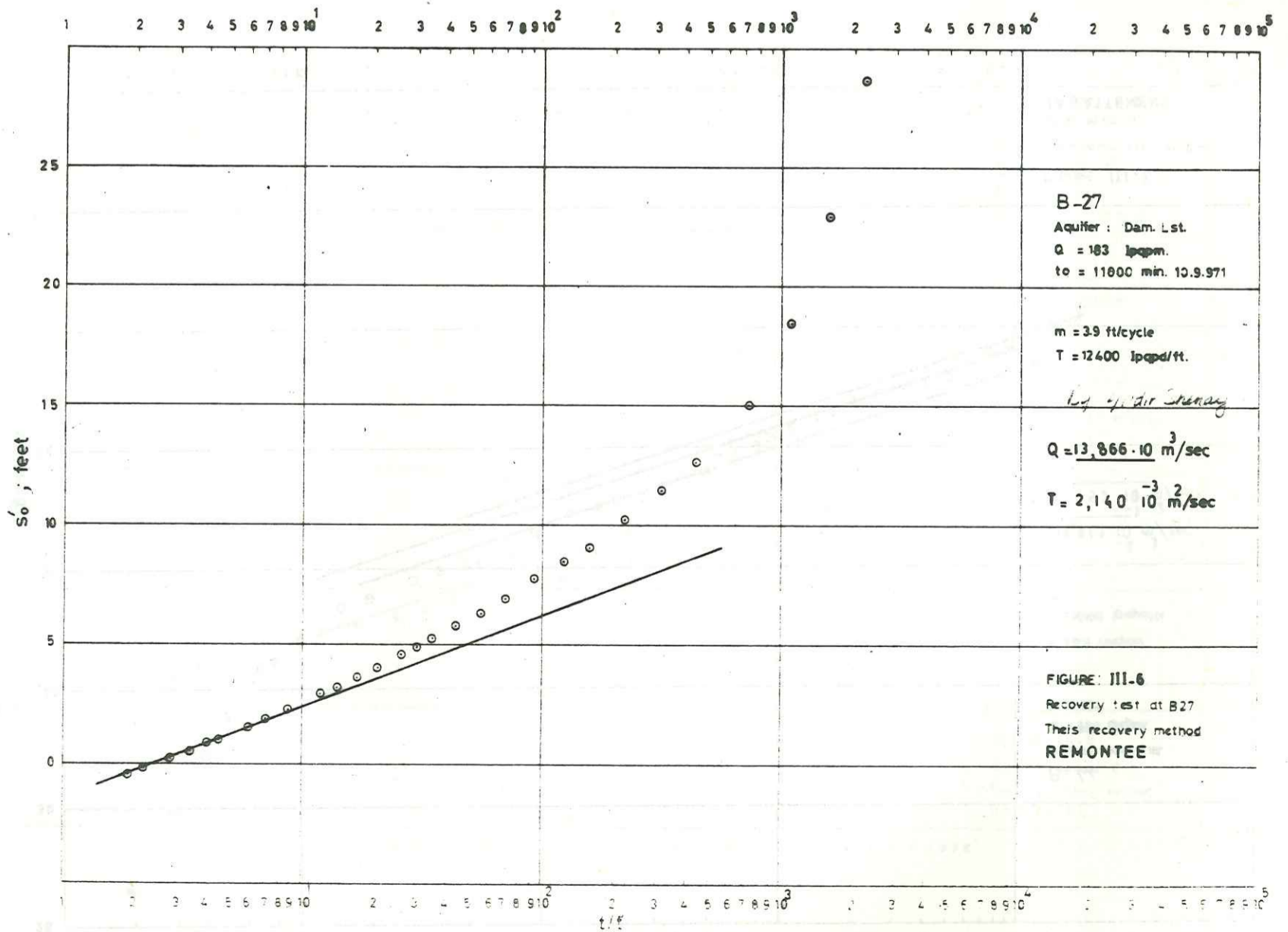
QUELQUES COURBES DE POMPAGE D'ESSAIS REPRÉSENTANTS LE CHAMP " B "



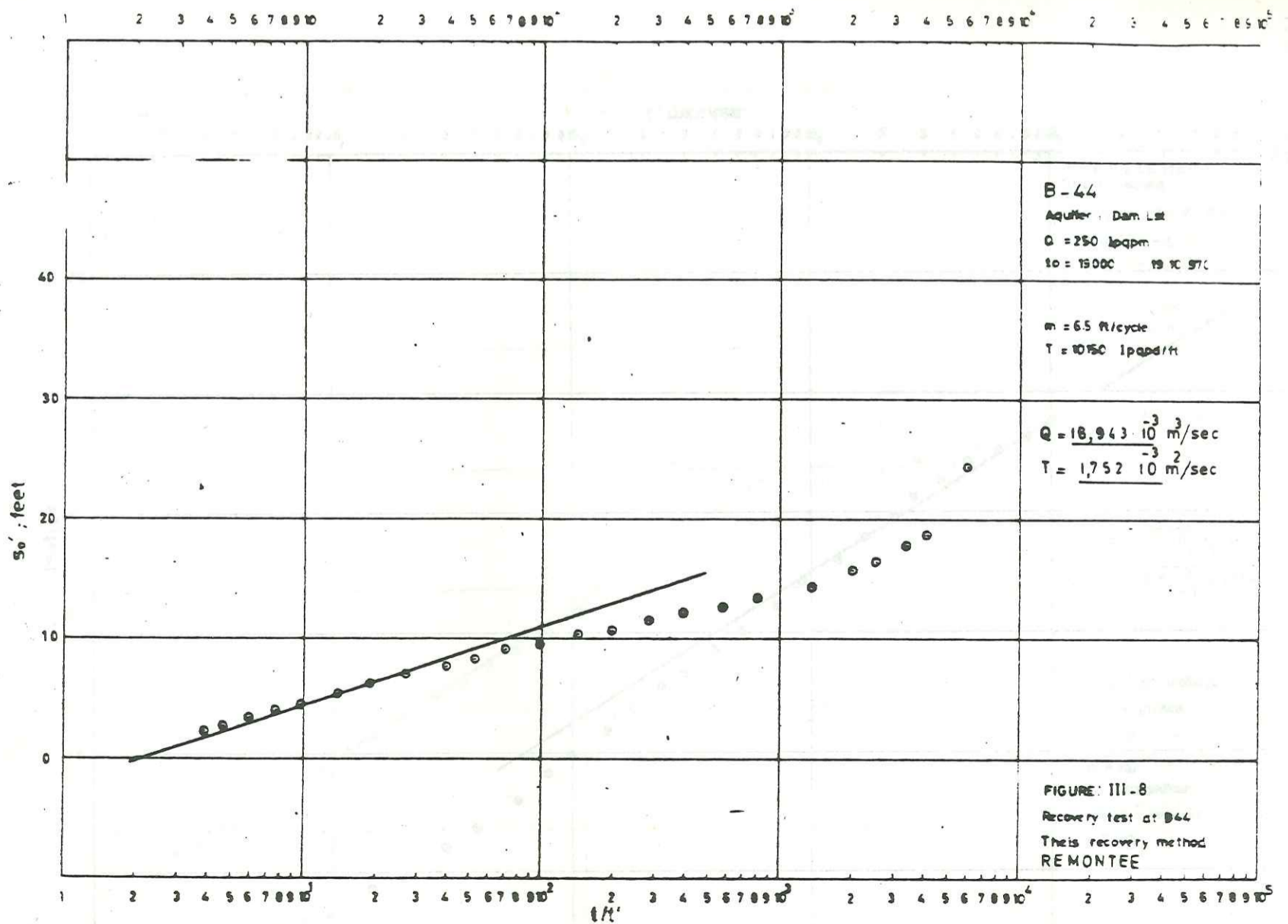
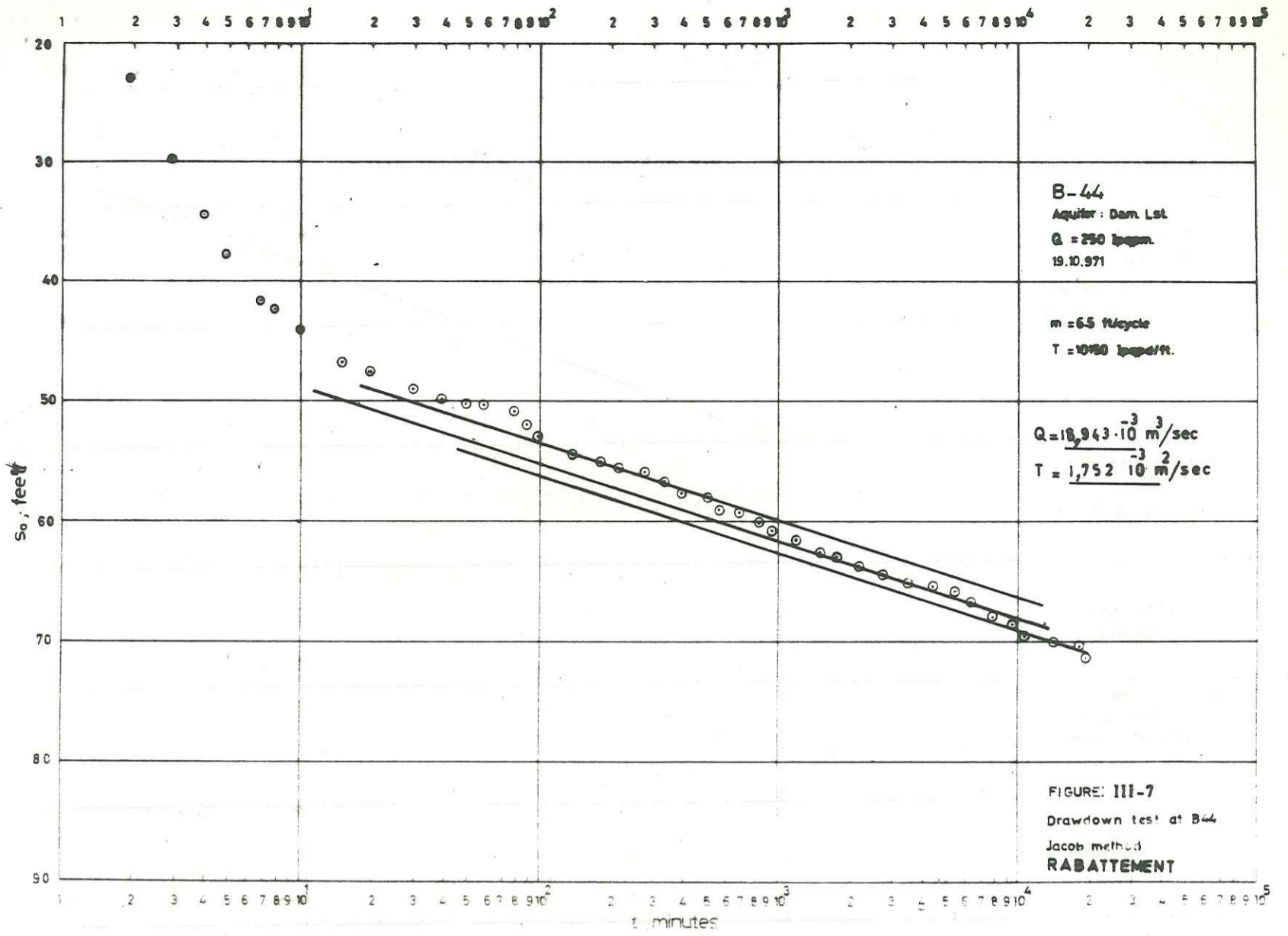


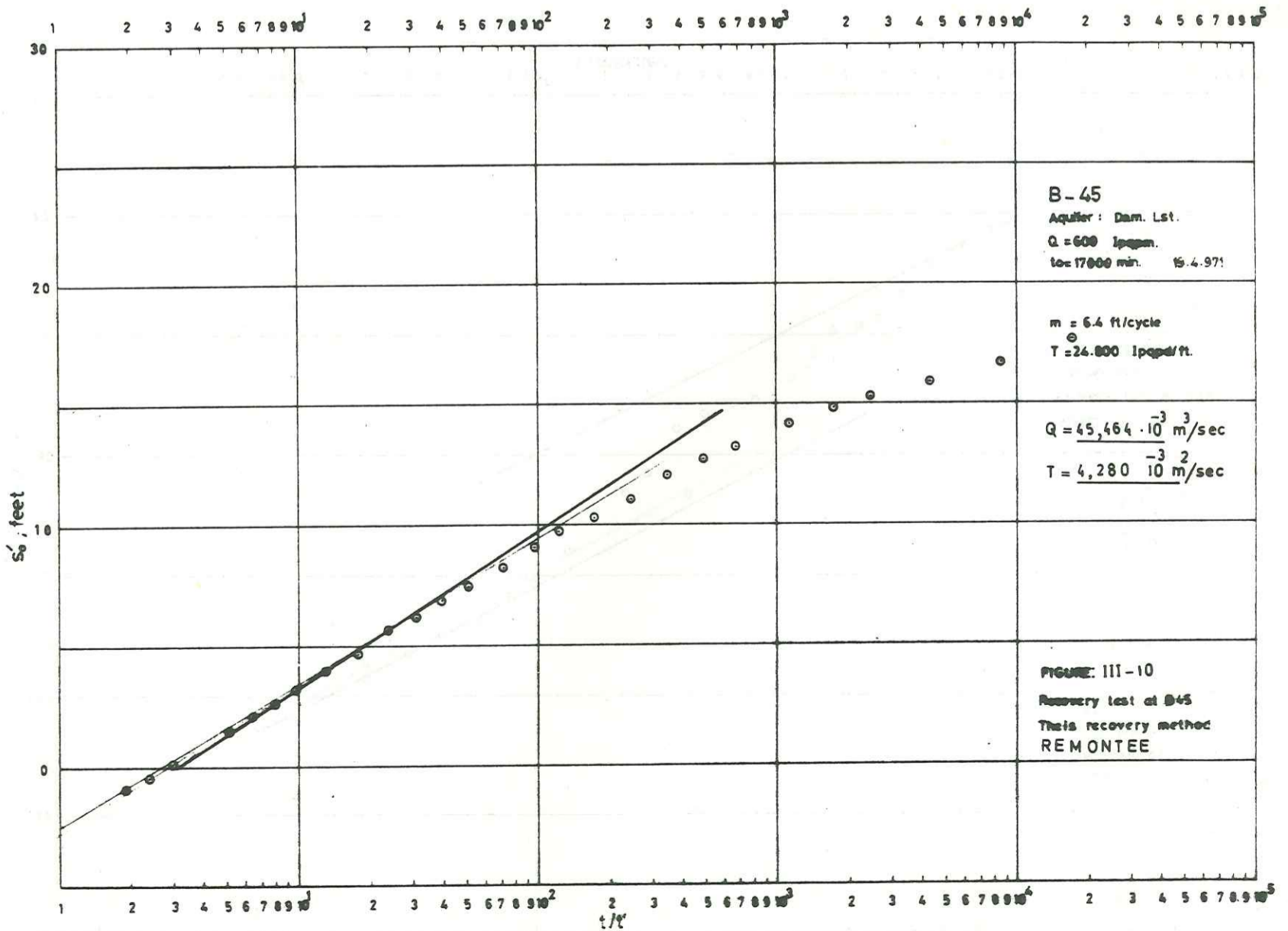
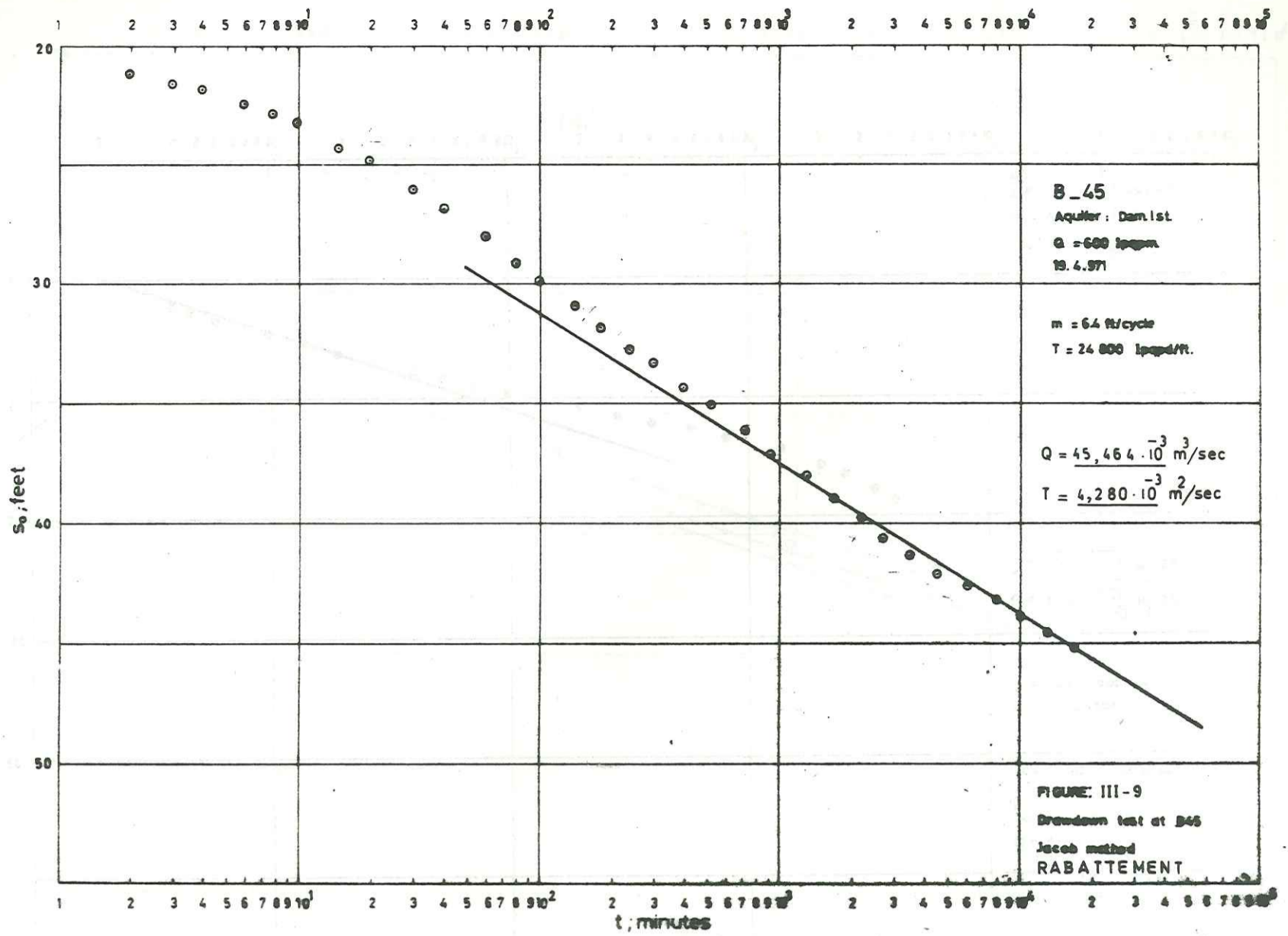


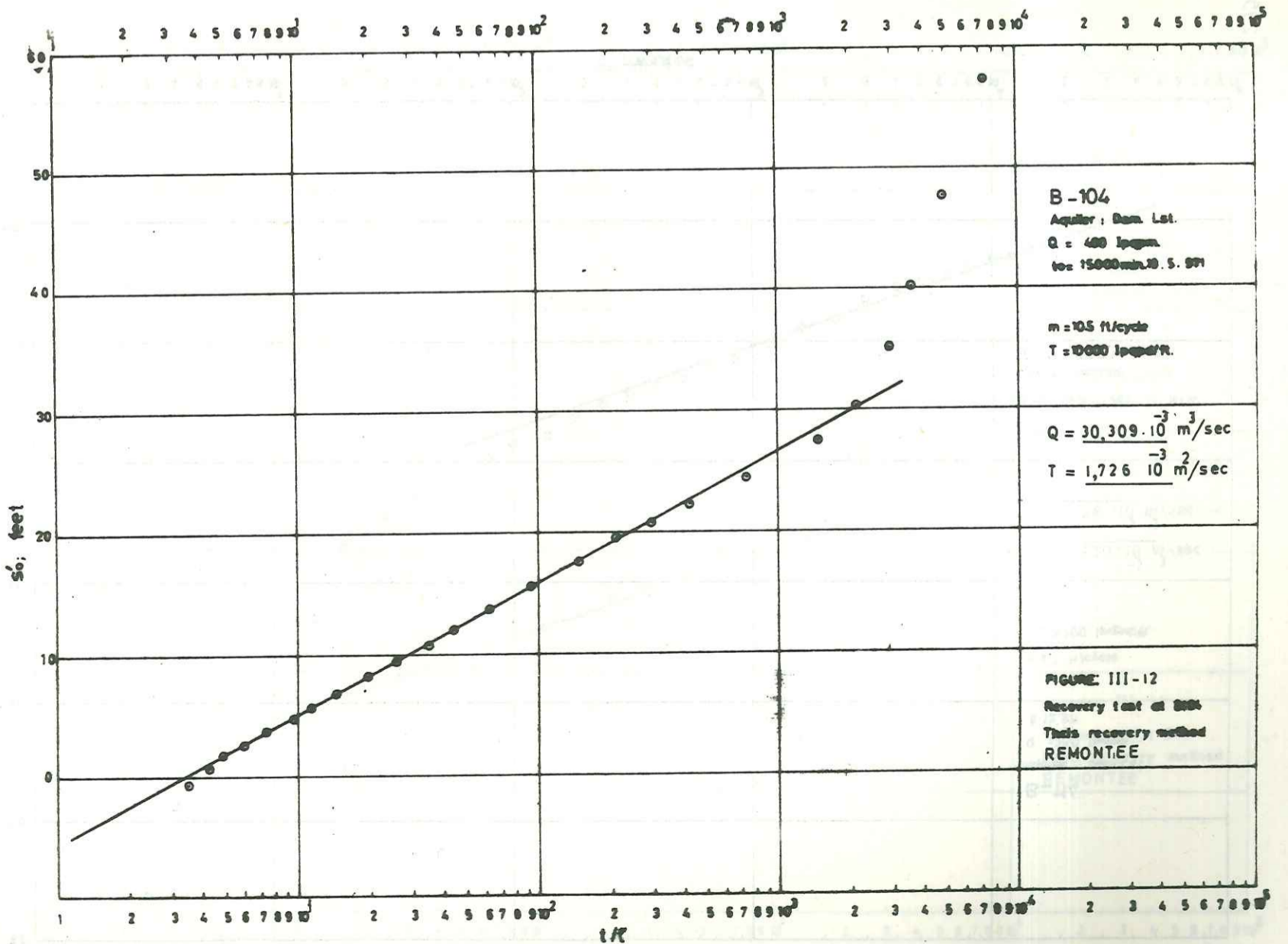
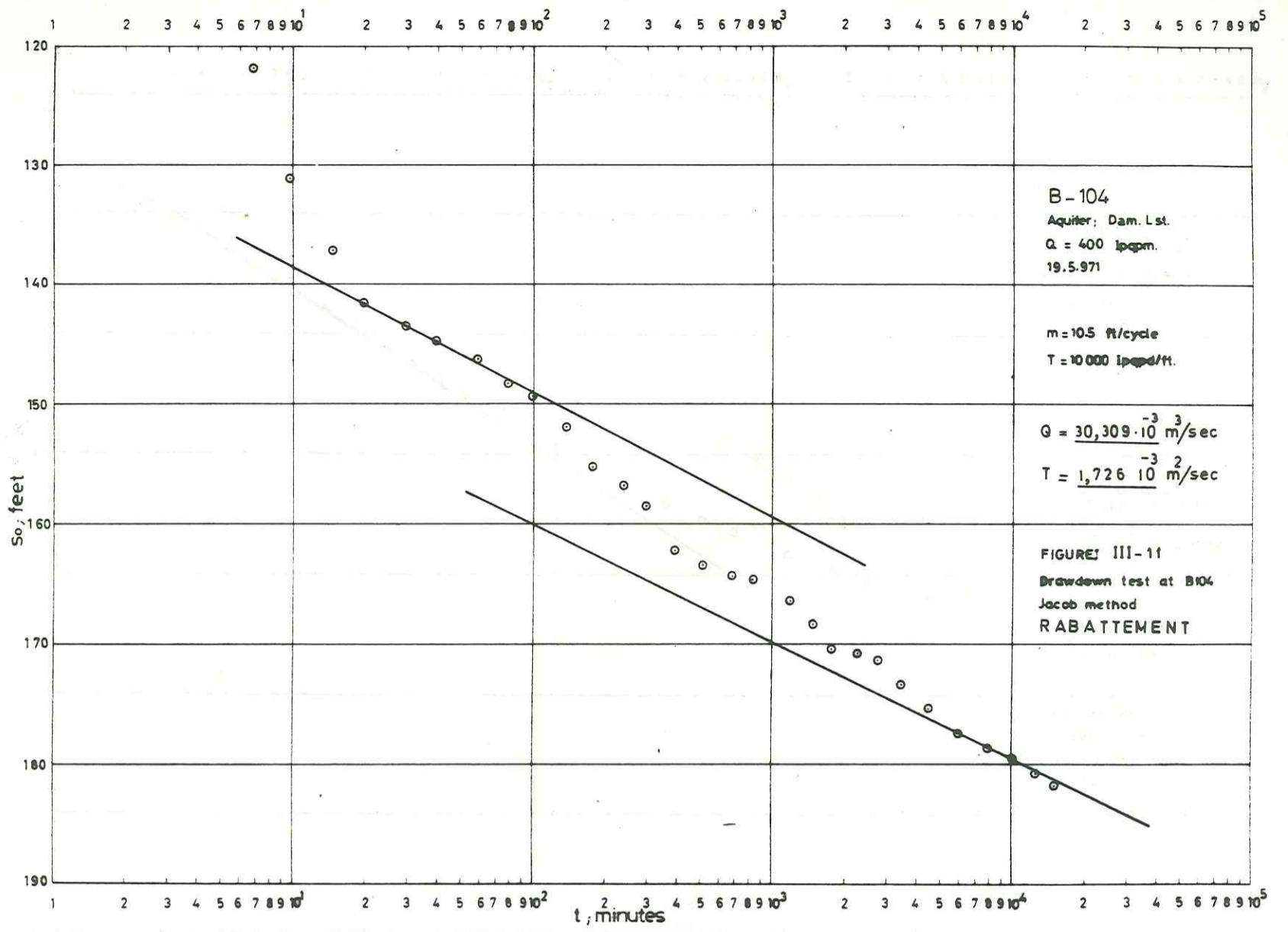
287

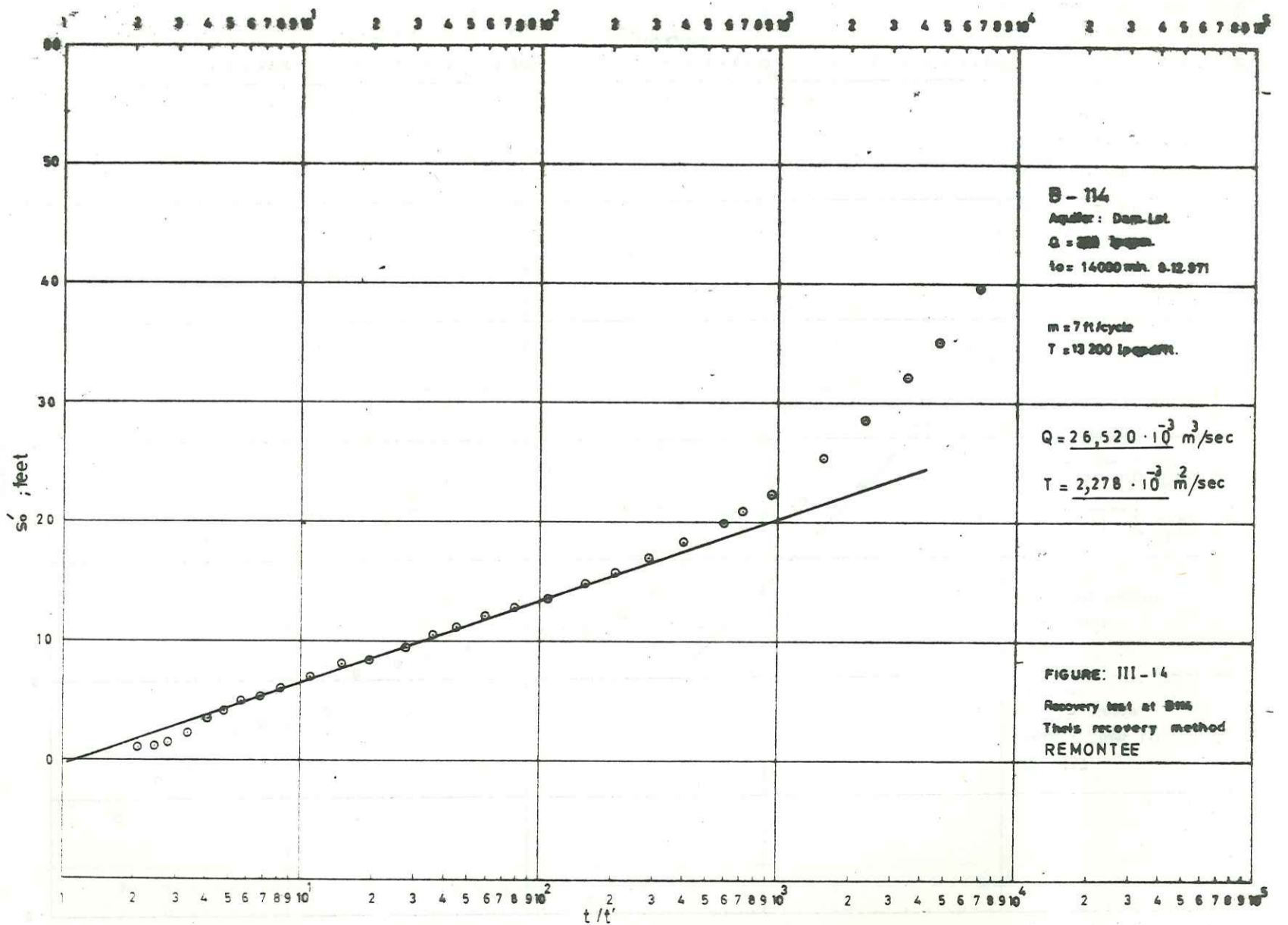
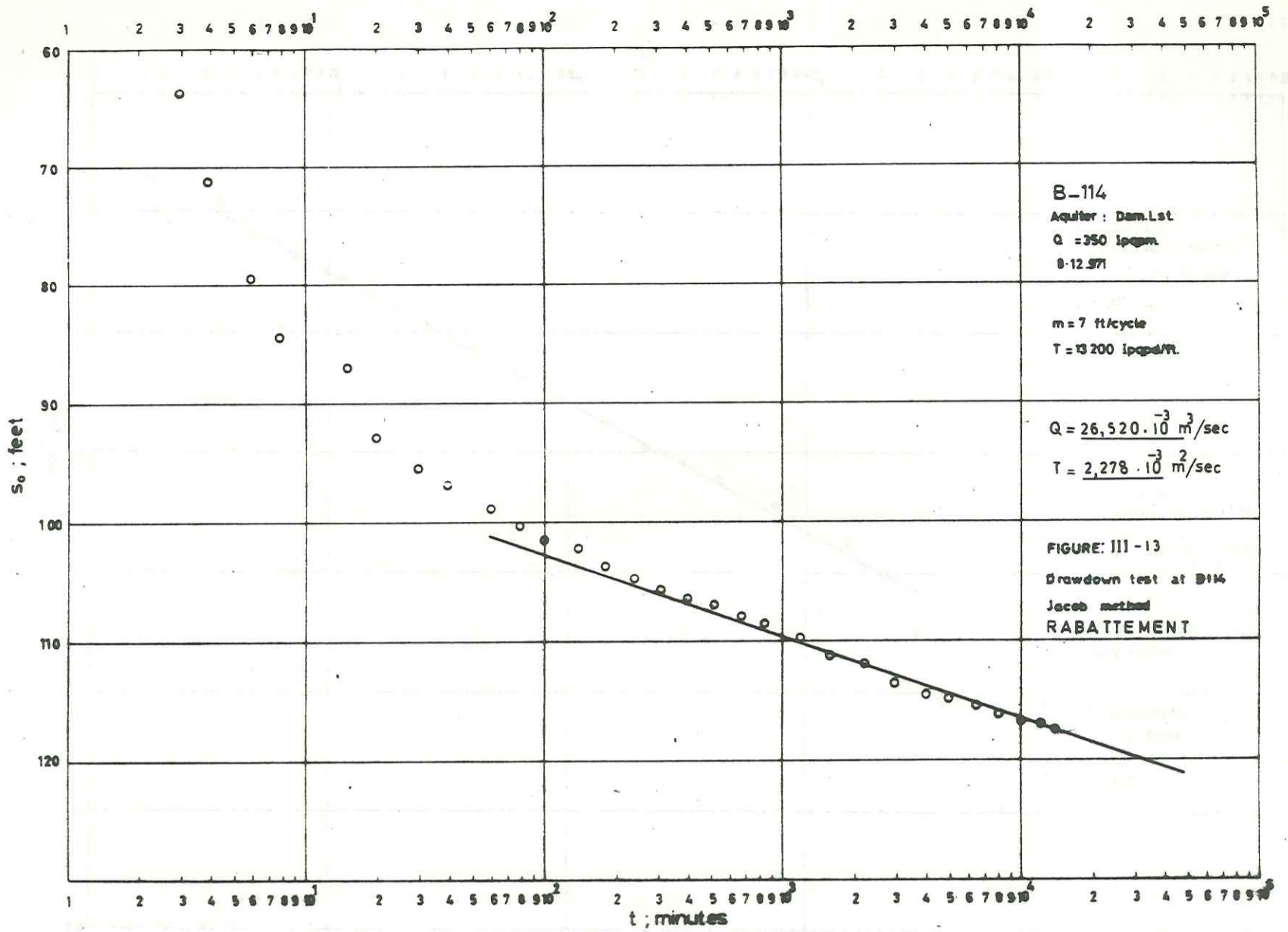


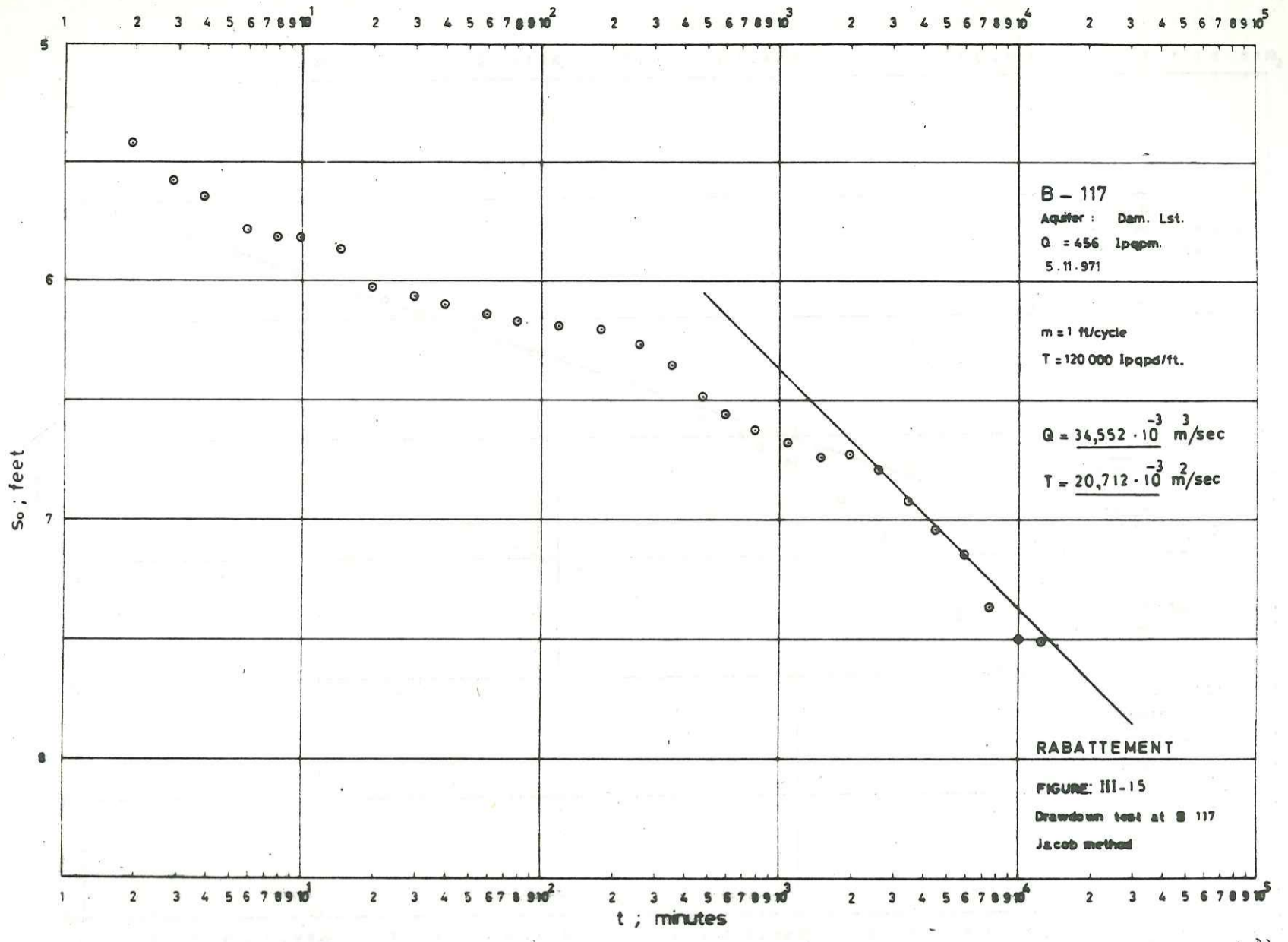
288



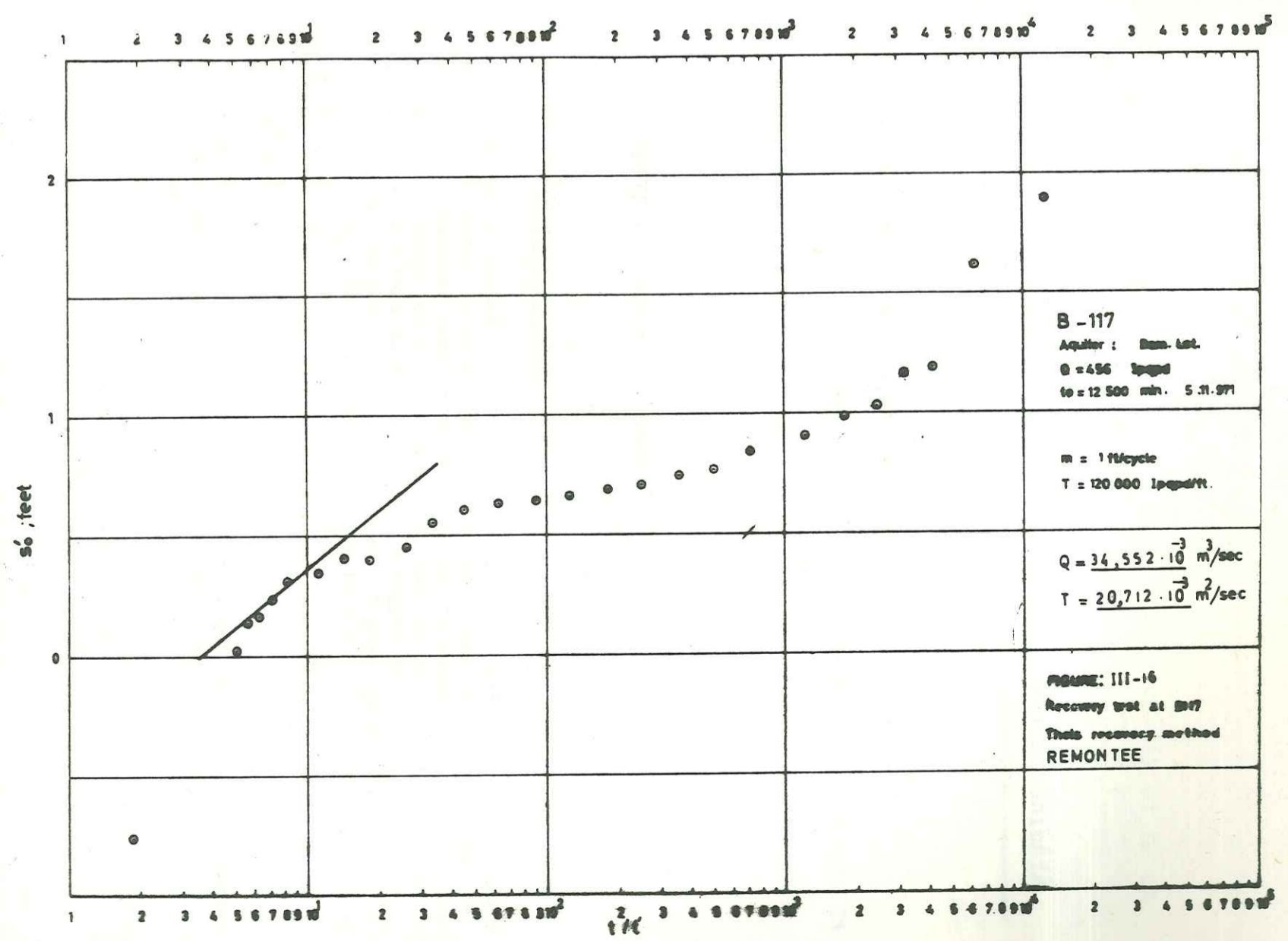








297



298

ANNEXE IV

PROGRAMMES DE FORAGE DES PUIITS DU PROJET DE SHIGAYA

- PUIITS DANS LE CALCAIRE DE DAMMAM - CHAMP "D"
- PUIITS À OBJECTIF DOUBLE (GROUPE DE KOWEIT ET FORMATION DE DAMMAM) - CHAMP "E"

PUIITS DE DAMMAM - CHAMP "D"

I - DESSIN GENERAL DU PUIITS

Tubage plein centré de 16 pouces de diamètre à mettre à la profondeur de 9 mètres au moins, au-dessous du toit de la Formation de Dammam dans un trou de 21 pouces de diamètre pour le moins. Le tubage sera cimenté depuis le sabot de tubage jusqu'à la surface du sol. Un trou libre de 7 1/8" - 12 1/4" de diamètre sera foré dans la Formation calcaire de Dammam, jusqu'à la profondeur de 427 mètres environ ou, comme il sera spécifié par le délégué du Ministère de l'Electricité et de l'Eau (M.E.E.). La profondeur du toit de la Formation de Dammam varie entre 213 et 260 mètres.

II - FORAGE

- 1) Installer un tube de surface (tube guide), qui permettra le passage d'un trépan de diamètre de 21 pouces, pour qu'on puisse éviter l'érosion et l'effondrement près du sol;
- 2) Forer le trou pilote de diamètre pas plus de 12 1/4 pouces jusqu'à la profondeur de 9 mètres environ, au-dessous du toit de la Formation de Dammam ou comme il sera spécifié par le délégué du M.E.E.;
- 3) Préparer le trou pilote pour que l'équipe du M.E.E. puisse faire la diagraphie électrique et gamma (un avertissement de 8 heures doit être donné);
- 4) Elargir le trou pilote jusqu'au diamètre précisé dans la section I;
- 5) Essayer le trou pour verticalité et alignement selon les standards de l'Association Américaine des travaux de l'eau A.W.W.A. (section 1-G, A-100-66). Si le trou ne satisfait pas aux exigences mentionnées ci-dessus le contracteur sera obligé de corriger l'aplomb et /ou l'alignement à son compte;

- 6) Installer le tube de 16 pouces de diamètre jusqu'à la profondeur minimum de 9 mètres au-dessous du toit de la Formation de Dammam (des centreurs seront mis aux intervalles de 30 mètres);
- 7) Cimentier l'espace annulaire depuis le sabot de tubage jusqu'au sol en utilisant le ciment de classe B API avec un laitier de ciment de 1,45 kg/l. Préparer le puits pour la diaggraphie thermique par l'équipe du M.E.E. 12 heures après l'opération de cimentation;
- 8) Essayer le puits pour l'aplomb et l'alignement comme précisé dans la section II-5;
- 9) Faire l'essai de pression de 500 psi \approx 89,29 kg/cm pendant 10 minutes;
- 10) Forer le trou libre de 12 1/4" de diamètre jusqu'à la profondeur totale de 427 m, ou comme il sera précisé par le délégué du M.E.E., en utilisant de l'eau claire comme fluide de forage;
- 11) Collecter des échantillons lithologiques tous les trois mètres pendant l'étape n° 10;
- 12) Faire circuler de l'eau dans le trou pour qu'il soit propre;
- 13) Mesurer le niveau piézométrique ainsi que la profondeur totale du puits.

III - DEVELOPPEMENT

- 1) Acidifier le trou libre en utilisant l'acide chlorhydrique (HCl) dont la concentration est de 15 % à travers le train de tiges ouvert à sa partie basse. Le volume de l'acide à ajouter devra être égal au volume du trou libre foré dans la Formation de Dammam;
- 2) Laisser agir l'acide 12 heures;
- 3) Nettoyer le trou libre par curage jusqu'à la profondeur totale du puits;

IV - POMPAGE D'ESSAI

- 1) Mettre une pompe submersible à la profondeur précisée par le M.E.E. (capacité de pompes 300 Imp.g./min. charge = 133 mètres);
- 2) Un pompage d'essai par paliers sera effectué par l'équipe du M.E.E. pour une durée minimum de 8 heures.

V - COUPER le tubage du puits au niveau de 0,9 mètres au dessus du sol. Soudez une toque sur la bouche du puits. La toque devra avoir un bouchon d'un pouce de diamètre. Soudez par points le numéro du puits sur le tubage. Nettoyer le site de tous débris et remplissez les fosses à boue de forage par des remblais du sol;

PUITS DANS LES AQUIFERES DU GROUPE DE KOWEIT ET DE LA FORMATION DE DAMMAM (PUITS À OBJECTIF DOUBLE, CHAMP "E")

I - DESSIN GENERAL

Tubage de 16 pouces de diamètre à mettre à la profondeur de 9 mètres environ au-dessous du toit de la Formation de Dammam avec 2 à 4 intervalles de crépines à fente circonférentielle continue en forme de V dont la totalité est de 30 mètres de longueur environ, et dont le diamètre est de 16 pouces. Les crépines seront mises contre les zones les plus perméables du Groupe de Koweit. Le trou libre dans la Formation de Dammam devra avoir le diamètre le plus grand possible et la profondeur totale du puits sera de 427 m environ, ou comme il sera précisé par le délégué du M.E.E.. La profondeur du toit de la Formation de Dammam est de 213-260 mètres environ.

II - FORAGE, DEVELOPPEMENT ET ESSAI DU GROUPE DE KOWEIT

A) FORAGE

- 1) Installer un tube guide permettant le passage d'un outil de forage de diamètre 25" et empêchant l'érosion et l'effondrement;
- 2) Le fluide du forage ne doit pas faire de dégâts irréversibles aux aquifères du Groupe de Koweit;
- 3) Forer un trou de 9 pouces de diamètre jusqu'à la profondeur de 9 mètres environ au-dessous du toit de la Formation de Dammam, comme il sera précisé par le géologue du M.E.E. Collecter un échantillon lithologique tous les 1,5 m.
- 4) Préparer le trou de 9 pouces de diamètre pour la diaggraphie électrique et rayons gamma;
- 5) Elargir le trou pilote jusqu'au diamètre de 25 pouces jusqu'à la profondeur de 9 mètres environ au-dessous du toit de la Formation de Dammam. L'élargissement du trou au-dessous du niveau de l'eau du Groupe de Koweit ne doit pas être commencé avant que le gravier, le tubage et les crépines soient apportées sur le site du puits;
- 6) Aléser le trou-pilote en utilisant l'aléreur de 25" de diamètre;
- 7) Tester l'aplomb et l'alignement du trou selon les standards de AWWA (section 1-6, A 100-66). Si le trou de forage ne satisfait pas les exigences, le contracteur sera obligé de corriger l'aplomb et l'alignement à son compte;
- 8) Nettoyer les déblais de forage par circulation;
- 9) Installer le tubage et les crépines équipées de vanne à boule flottante;
- 10) Cimentier, pour le moins, une longueur de 15 mètres environ de l'espace annulaire autour de l'extrémité inférieure du tubage de 16" de diamètre en utilisant le ciment de classe B selon le standard de API.

11) Placer le filtre gravier depuis le niveau du ciment jusqu'à la profondeur de 30 mètres environ au-dessus du niveau de l'eau du Groupe de Koweit. Au cours de l'alimentation du gravier, la quantité et le niveau de celui-ci devra être mesurés fréquemment;

12) Tester de nouveau l'aplomb et l'alignement du puits comme précisé dans l'étape n°7 ci-dessus;

B) DEVELOPPEMENT

1) Développer le puits pour qu'il ait une valeur de $C \approx 5 \times 10^{-5}$ pied/ (Imp.g./min)². Les processus de développement doivent comporter le jet-rotatif, décolmatage, acidification, utilisation des produits chimiques pour qu'on puisse enlever la boue de forage. Eviter les processus qui peuvent endommager la crépine.

2) Ajouter du gravier au besoin pour que son toit soit toujours au niveau de 30 m au dessus du niveau de l'eau du Groupe de Koweit.

3) Ajouter du remblai de sol dans l'espace annulaire jusqu'à la profondeur de 10 m au dessous du sol.

4) Cimenter l'espace annulaire depuis la profondeur de 10 mètres jusqu'au sol.

C) ESSAI

1) Faire descendre la pompe submersible dont la capacité et la charge sont de 22,73 .10⁻³ m³/s et 183 m respectivement.

2) Faire descendre un train de tubes de 1" de diamètre pour qu'on puisse mesurer le rabattement du niveau de l'eau pendant l'essai. Les profondeurs où on mettra la pompe et le train de tube seront exigées plus tard.

3) Un pompage d'essai sera effectué par l'équipe du M.E.E. pour une durée de 8 heures au moins;

4) Si la valeur de C obtenue à partir de l'étape 3 ne satisfait pas la limite mentionnée dans l'étape B.1, on devra reprendre les travaux du développement et l'essai comme précisé ci-dessus.

III - FORAGE, DEVELOPPEMENT ET POMPAGE D'ESSAI DE LA FORMATION CALCAIRE DE DAMMAM

A) FORAGE

1) Faire descendre un tricône de 10" de diamètre pour forer la vanne à boule flottante.

2) Faire descendre un train de tube chemisant avec un packer pour qu'on puisse protéger les crépines et les zones aquifères du Groupe de Koweit pendant le forage de la Formation calcaire de Dammam.

3) Forer un trou de diamètre maximum autant que possible au-dessous du sabot du tubage jusqu'à la profondeur précisée par le géologue du M.E.E. en utilisant de l'eau claire et propre comme fluide de forage.

4) Collecter des échantillons lithologiques pour chaque intervalle de profondeur de forage de trois mètres;

5) Nettoyer le trou libre par circulation;

6) Enlever le tubage - chemise et le packer en dehors du puits;

7) Mesurer la profondeur totale du puits;

8) Mesurer le niveau piézométrique.

B) ESSAI DE POMPAGE

1) Faire comme précisé dans la section II.C;

2) Une diagraphie de diamètre sera faite par l'équipe du M.E.E.

IV. COUPER le tubage au niveau de 0,9 mètre au dessus du niveau du sol. Souder une toque à bouchon de diamètre de 1 pouce, sur la bouche de puits. Souder par points le numéro du puits sur le tubage. Nettoyer le site de tous débris et remplir les fosses de la boue de forage par un remblai de sol.



BIBLIOGRAPHIE

- ABUSADA S.M. .- 1973 - A report on Al-Quashaniya ground water area including Al-Abdally farms rectangle MEW- KOWEIT.
- ABUSADA S.M. .- 1977 - Proposals for the modification of the drilling programme of water wells of field E. MEW KOWEIT.
- ABUSADA S.M. .- 1979 - Remarks on the proposals for the transportation of fresh water in oil tankers. MEW, KOWEIT.
- ABUSADA S.M. .- 1979 - Status of ground water study of the Kuwait Group in Wafra agricultural area. MEW G.W.D. KOWEIT
- ABUSADA S.M. .- 1980 - Correction of hydraulic heads in multilayered sedimentary rocks containing brines of different dissolved solids concentrations. MEW G.W.D. KOWEIT.
- AL HAJJI Y.Y. .- 1976 - A quantitative hydrological study of field A in southern Koweit. M. Sc. Thesis. Ohio University.
- ALLEMOZ M. .- 1976 - Alimentation des nappes en pays aride. Etude de l'infiltration et de l'évapotranspiration en Tripolitaine (Libye). Université de Grenoble. Thèse 3ème cycle.
- AL NAIMI A.I. .- 1965 - The ground water of northern Sandi Arabia. Fifth Arab petroleum congress. Caïro.
- AL NAKSHABANDI G. et al.- 1978 - Reclamation of Wafra sandy soil. Kuwait Institute for scientific research. Annual report, KOWEIT.
- AL NASSER S.A. .- 1978 - Water ressources in Kuwait. Kuwait National Symposium on Science and Technology for development. K.I.S.R. KOWEIT.
- AL SAYARI S.S. et ZOLT J.G. - 1978 - Quaternary period in Saudi Arabia Springer - Verlag/Wien.
- ARAB EXPERTS.- 1964 - Water reSSources of Kuwait. MEW KOWEIT.
- ASTIER J.L.- 1971 - Géophysique Appliquée à l'hydrogéologie. MASSON & Cie PARIS.
- ATEN R.E. and BERGSTROM R.E.- 1965 - Ground water hydrology of Kuwait. Society of Civil Engineers, Mobile, Alabama.
- BACK W. & HANSHAW B.B.- 1965 - Chemical geohydrology in V.T. CHOW (ed.), "Advances in Hydrosience". Academic Press, Inc. NEW-YORK.
- BERGSTROM R.E. & ATEN R.E. - 1965 - Natural recharge and localisation of fresh ground water in Kuwait Journal of Hydrology. Vol.2, p.

- BERRY F.A.F. & HANSHAW B.B.- 1960 - Geologic field evidence suggesting membrane properties of shales. Proc. 21 st. International Geological Congress COPENHAGEN.
- BIZE J., BOURGUET L. & LEMOINE J. 1972 - L'alimentation artificielle des nappes souterraines. MASSON & Cie - PARIS.
- BLAVOUX B. - 1978 - Etude du cycle de l'eau au moyen de l'oxygène 18 et du tritium - Possibilités et limites de la méthode des isotopes du milieu en hydrologie de la zone tempérée. Université Pierre et Marie CURIE - Thèse d'Etat.
- BROWN R.H., KONOPLYANSTEV A.A., INESON J. & KOVALESKY V.S. - 1975 - Ground water studies an International guide fo research and practice UNESCO PARIS.
- BRYAN R.P. - 1970 - Letter to the chief engineer of the water and Gas D ept. KOWEIT.
- BURDON D.J. - 1973 - Ground water resources of Saudi Arabia. Sciences monogram n°2 ArabLeague educational cultural and scientific organisation. Cairo.
- BURDON D.J. - 1977 - Flow of fossil ground water. Q.J.L.Engng Geol. 10 97-124.
- BURDON D.J. & AL SHARHAN A. - 1968 - The problem of paleokarstic Damman limestone aquifer in Kuwait. Jour.Hydrology. Vol. 6.-
- BURDON D.J. & OTKUN G.- 1968 - Hydrogeological control of development in Saudi Arabia. XXIII Inter. Geol. Congress vol.VII, PRAGUE.
- CARTER D.B.- 1957 - World climatological atlas, mean annual water deficit Laboratory of climate. CENTERTON N.J.
- CASTANY G. - 1967 - Traité pratique des eaux souterraines. DUNOD PARIS
- C.D.R.E. 1978 - Feasibility report on the supply of potable water to the proposed army camps by desalination of brackish water. W.R.D.C. MEW KUWAIT
- C.G.G.- 1969 - Shigaya geophysical survey (3 avril-12 octobre 1968) MEW KUWAIT.
- CLARK L.- 1977 - In discussion of Burdon D.J. 1977, flow of fossil ground water. Q. JL Engng Geol. 10, 97-104.
- COLLINS A.G.- 1975 - Geochemistry of oilfield water. Elsevier scientific Publishing Company.
- CONRAD G.M.A. & OLIVE P.- 1975 - Mise en évidence par le tritium, de la recharge actuelle des nappes libres de la zone aride saharienne (Algérie). J. Hydrology vol. 27, p. 207-224.

- CONSTANTINIDIS D.- 1978 - Hydrodynamique d'un système aquifère hétérogène Hydrogéologie de la Thessalie orientale. Université de GRENOBLE Thèse d'Etat.
- CONSTANTINIDIS D. & SARROT REYNAULD.- 1978 - Comparaison des méthodes de détermination du coefficient d'emménagement des nappes aquifères. Compte-rendu du 103e congrès national des Sociétés Savantes. NANCY, Vol IV, p. 153-164.
- CRAIG H. - 1961 - 1961 - Isotopic variations in meteoric waters. Science 133, 1702-1703 WASHINGTON.
- DANSGAARD W.- 1964 - Stable isotopes in precipitation. Tellus 16, 436-468 STOCKHOLM.
- DAVIS S & DEWIEST R.J.M. - 1966 - Hydrogeology. John WILLEY & SONS, Inc.
- DENISE B. 1976 - Hydrogeology. JOHN WILLEY & SONS, Inc. Librairie Hachette, PARIS.
- DONENN L.D. - 1961 - The influence of crop and soil on percolating water Proceedings of ground water conference CALIFORNIA.
- EPSTEIN S. & MAYEDA T.- 1953 - Variations of the ¹⁸O content of waters from natural sources. Geochim. Acta 4, 213-224 LONDON.
- FATIMA A.R.- 1977 - People and water in Kuwait. Dar Al Salassed Kuwait
- FISHER N.B. 1961 ?- The middle east, a physical social and regional geography Methmem & Co LONDON.
- FONTES J.C.- 1976 - Les isotopes du milieu dans les eaux naturelles. Revue de la Houille Blanche, n° 134 - 1976.
- FOX A.F. - 1956 - Oil occurrences in Kuwait International Geol. Congress, 20 th. MEXICO.
- FLANDRIN J. & CHAPELLE J. - 1961 - Le pétrole. Edition Technip. PARIS
- FUCH W., GATTINGER T.E. & HOLZER A.F. - 1968 - Explanatory text to the synoptic geological map of Kuwait. Geological survey of Austria.
- GRIM R.E.- 1953 - Clay mineralogy Mc. Graw Hill, New-York
- HAMIDA I. & AL YAQUOUBI A.S. - 1977 .- The hydrogeochemical regime of the main ground water fields in KUWAIT, 3e seminar on environment and polution. University of KUWAIT.
- HANTUSH M.S. - 1964 - Hydraulics of wells in V.T. CHOW ed. "Advances in hydrosciences" Academic press, Inc. NEW YORK. Vol.1
- HANTUSH M.S. - 1966 - Flow to wells in aquifers separated by a semipermeable" layer. Journal of Geophysical Research, vol. 72, n°6.
- HANTUSH M.S. - 1969 - Memorandum on Shigaya ground water project. Report to MEW KUWAIT.
- HUMPHRIES H. & Sons - 1977 Aquaba water supply hydrogeological study. Report

- HUMPHRIES H. and Sons - 1977 - Aquaba water supply, hydrogeological study. Report to the Government of the Hashimite Kingdom of Jordan.
- INTERTANKO 1979 - Proposals for the transportation of fresh water in tankers International Association of Independent Tanker Owners, Radhusgaten 25. Post Box 1452 - VIKA OSLO J. NORWAY.
- ITALCONSULTANT 1971 - Agricultural resources survey. Ministry of Agriculture and water, Sandi Arabia (1965-1971).
- JOHNSON DIVISION UOP - 1966.- Ground water and wells E.E. JOHNSON Inc. Minnesota.
- JOHNSON U.O.P. - 1975 - Rewert. Welle screen bulletin 275 Saint Paul Minnesota.
- KAMENSKY G.N. 1947 - Search and investigation of groundwater. Gas Geolizdat U.S.S.R.
- KASSTER P. - 1971 - The structural and geomorphic evolution of the Persian golf. The 1971 International geological congress at HEIDELBERG.
- KELLEY W.P. - 1948 - Cation exchange in soils. Am. chem. Soc. Monograph. 109.
- KHALAF F.I. 1978 - Geology and mineralogy of beach sediments of Kuwait Institute of Scientific Research (K.I.S.R.).
- KRUSEMAN G.P., DERIDDER N.A. - 1974 - Interpretation et discussion des pompages d'essai. Institut International pour l'amélioration et la mise en valeur des terres. WAGENINGEN - HOLLAND.
- KUWAIT NATIONAL HOUSING AUTHORITY - 1976 - Review of the master plan. KUWAIT
- LETOURNEUR J. & MICHEL R. - 1971 - Geologie du genie civil. Librairie ARMAND COLIN PARIS.
- LLOYD J.W. & FARAG M.H. - 1978- Fossil ground water gradients in arid regional sedimentary basins. Ground water J. V.16 n°6.
- MACFAYDEN W.A. - 1938 Water supply in Iraq. Iraq Geol. Dept. Pub. n°1 BAGHDAD.
- MCKELVEY J.G. & MILNE J.H. - 1960 - The flow of salt solution through compacted clays. Proc. 9th Natl. Conf. clay and clay minerals Lafayette (Natl. Acad. Sci. Natl. Res. Council. WASHINGTON D.C.
- M.E.E. MINISTERE DE L'ELECTRICITE et de l'EAU - Archives du Service des Eaux souterraines (S.E.S.) KUWAIT.
- M.E.E. 1975 - Kuwaits electricity and water: Yesterday today and tomorrow KUWAIT.

- M.E.E. 1975 - Geohydrological report of Dammam limestone aquifer and Wafra Farms area MEW GWD KUWAIT.
- M.E.E. 1977 - Comments on K.O.C. report on the development of Abdalliyah brackish waterfield. MEW GWD KUWAIT.
- DIRECTORATE GENERAL OF CIVIL AVIATION - 1978 - Climatological data, second edition. Meteorological Dept. KUWAIT.
- METEOROLOGICAL OFFICE - 1966 - Tables of temperature, relative humidity and precipitations for the world. Part V Asia. Her Majesty'r stationary office London Second Edition.
- MILETIC P. - 1963 - An outline of the geology and hydrogeology of the southern desert of Iraq Geoloski, Vjesnik, ZAGREB, vol.15, n°12.
- MILTON D.I. - 1967 - Geology of Arabian peninsula KUWAIT. Geol. Surv. prof. paper 560 F WASHINGTON.
- MITCHELL R.C. - 1958 - Notes on the geology of western Iraq and Northern Saudi Arabia. Geol. Rundschau Stutgard. Vol p.
- MOGG J.L. - 1969 - Step drawdown test needs critical review. Ground water vol. 17, n°1.
- NAJJAR Z.R.- 1975 - Lectures on the geology of Arabia Unive rsity of Kuwait, Geology dept.
- NATIONAL ACADEMY OF SCIENCE - 1974 - More water for arid lands; Promissing technologies and research opportunities - WASHINGTON D.C.
- OFFICE OF SALINE WATER - 1970 - Special report on status of desalting, comprehensive fromework study. United states Dept. of Interior WASHINGTON D.C.
- OTKUN G. - 1969 - Outlines of ground water resources of Saudi Arabia, proc. Inter. Cong. on Arid lands in a changing world. TUCSON ARIZONA.
- OTKUN G. - 1975 - More about paleocene karst aquifer in Saudi Arabia. Inter. Assoc. Hydrogeologists 12 th. Inter Congress - Karst hydrogeology Huntsville, ALABAMA.
- OWEN R.M.S. & NASR S.N. - 1956 - Stratigraphy of Kuwait - Basra area. Am. Assoc. Assoc. of Petrol Geologists. NEW YORK.
- PARSONS R.M. & COMPANY - 1957 - Ground water resources of Iraq. Provision al regional maps. LOS ANGELES
- PARSONS CORPORATION - 1963 - Ground water resources of Kuwait, vol.1 - LOS ANGELES.
- PARSONS CORPORATION - 1964 - Ground water resources of Kuwait, vol II LOS ANGELES.

- PILGRIM G.E. - 1908 - Geology of the Persian gulf and adjoining portions of Persia and Arabia. Mem. Geol. Surv. India, vol. 34.
- PILOT J. - 1974 - Les isotopes en géologie: Méthodes et applications. DOIN Editeurs PARIS.
- POWERS R.W., RAMIREZ L.F., REDMOND C.D. & ELBERG E.L. - 1966 - Geology of the Arabian peninsula sedimentary geology of Saudi Arabia. U.S.E.S. professional paper 560 D.
- QUABAZARD F.A. - 1977 - Management of brackish water supply and demande in Kuwait. Msc. Thesis University of Arizona TUSCON.
- ROSSET G.M., MAILLAND G.- 1976 - Etude d'un aquifère profond hétérogène en zone aride, plaine du Wadi Al Hira et du Wadi Abu Shaybah. Tripolitaine (Libye). Université de GRENOBLE (Thèse de 3e cycle).
- SAFADI M.S. - 1973 - The ground water resources in the Arabian peninsula. Science monogram n°2, ALESCO Cairo.
- SARROT-REYNAULD J., SALEHI E. & BLAVOUX B. - 1978 - Caractéristiques isotopiques isotopiques et origine des eaux thermominérales d'Azerbaïdjan oriental (Iran). Comptes-rendus du 103e Congrès National des Sociétés Savantes NANCY vol. IV, p. 141-152.
- SHEAHAN N.T. 1972 - Discussion of well losses due to reduced formation permeability and comments on the step drawdown test. Ground water, vol. 1, 10, n°4.
- SCHOELLER H. - 1962 - Les eaux souterraines. MASSON PARIS.
- SHAMPINE W.J., DINCER T. & NOORY M. 1978 - AN evaluation of isotope concentrations in the groundwater of Saudi Arabia. I.A.E.A. S.M. 228/23 Vienna.
- SULIN N.A. - 1946 - Water of oil deposits in the system of natural water. MOSCOU USSR.
- U.S. DEPT. OF HEALTH EDUCATION AND WELFARE - 1956 - Public health service drinking water standards U.S. Publi. health Service publ.
- VAILLANT J.R. - 1970 - Les problèmes de dessalement de l'eau de mer et des aux saumâtres . EYROLLES PARIS Editions EYROLLES PARIS.
- YAQUOUBI A.S. 1977 - A study of some ground water chemistry problems in Shigay and Sulaihiya. M. Sc. Thesis University KUWAIT.
- YILDER S. ET SARA O. - 1975 - Ground water hydrogeology of Abdaliya farms area.MEW GWD KUWAIT.

- YILDER S. (Editeurs ABUSADA S. & AL MUTAWA F.) - 1977- Ground water and artificial recharge in Raudhatain water field. M.E.W. G.W.D. KUWAIT KUWAIT.
- YURTSEVERT Y. & PAYNE B.R. - 1978 - Application of environmental isotopes to ground water investigations in Quatar. IAEA. SM 228/24 Vienna.
- ZAMANKHAN M. - 1975 - Hydrogeologie du bassin versant de Moharhu. Hydrodynamiques des massifs calcaires de la région de Chiraz Iran. Université GRENOBLE Thèse d'Etat.

LISTE DES TABLEAUX

<u>TABLEAUX</u>	<u>PAGES</u>
1.1. L Les usines actuelles et projetées de dessalement	6
1.2. Quelques données sur les champs de puits existants	9
1.3. Quelques données sur les régions potentielles pour l'ex- ploitation des eaux souterraines saumâtres.....	10
1.4. Prévisions des demandes journalières en eau de différentes origines pendant l'été de l'année 2000	16
4.1. Données climatologiques régionales	49
4.2. Stations pluviométriques et météorologiques de Koweit	52
4.3. Intensité maximum de la pluie	56
4.4. Intensité - durée - fréquence de la pluie	56
4.5. Températures moyennes mensuelles et annuelles	57
4.6. Nombre moyen des jours avec la visibilité dans certaines étendues	58
4.7. Humidité relative moyenne - mensuelle et annuelle	61
4.8. Moyennes mensuelles de l'évaporation mesurée	62
4.9. Flux de radiation de courte longueur d'onde de la haute atmosphère	65
4.10. Moyennes mensuelles de l'évaporation mesurée et calculée à la station météorologique de l'aéroport international 1957 - 1977	66
4.11. Evapotranspiration potentielle (méthode de Blaney-Criddle ...	68
4.12. Evapotranspiration potentielle (méthode de Prescott)	68
5.1. Description générale des formations sédimentaires en Arabie et de leur comportement hydrogéologique	76
5.2. Classification des roches sédimentaires de l'Arabie comme aquifères potentiels gréseux ou carbonatés	78
5.3. Principaux aquifères en Arabie	80
5.4. Exemples de composition de quelques eaux souterraines typiques exploitées dans divers aquifères en Arabie saoudite. 81	81

5.5.	Quelques données hydrogéologiques fournies par des sondages d'essai dans l'oasis d'Al-Hasa	82
5.6.	Mouvement des eau souterraines dans les trois grands systèmes des couches aquifères en Arabie	86
5.7.	Caractéristiques hydrauliques des composants du système des couches aquifères éocènes dans l'Est de l'Arabie saoudite	87
6.1.	Coefficients caractérisants les types génétiques des eaux (d'après Sulin, 1946)	141
6.2.	Gamme des valeurs des coefficients hydrodynamiques de quelques zones des eaux souterraines de Koweit	142
6.3.	Isotopes principaux de l'environement utilisés en hydrologie.	149
6.4.	Analyses isotopiques des échantillons des eaux souterraines pris dans quelques puits au Sud-Ouest de Koweit	151
6.5.	Classification des eaux d'irrigation selon leur contenu en bore	160
6.7.	Classification des eaux de la région Caucasienne en URSS	164
6.8.	Classification des eaux de l'Asie Centrale en URSS	164
6.9.	Analyses chimiques des échantillons des eaux distillées saumâtres et mélangées pris dans la zone de Shuaiba le 21 Février 1979 et standards des eaux potables de l'O.M.S. (1958)	167
7.1.	Coefficients hydrauliques des nappes aquifères à Raudhatain .	170
7.2. C	Coefficient hydrauliques des couches aquifères du Groupe de Koweit au Koweit Sud-Ouest	171
7.3.	Coefficients hydrauliques de la Formation de Dammam	174
7.4.	Niveau piézométrique dela Formation d'Umm-Al-Radhuma et de la Formation de Dammam dans trois puits au Koweit sud ouest..	184
7.5.	Transmissivité dans la Formation d'Umm-Al-Radhuma	184
7.6.	Données du calcul de la migration des eaux souterraines à travers la Formation de Dammam	186
7.7.	Données du forage des puits du champ "B".....	189
7.8.	Pertes de charge, calculées par la méthode de Jacob dans quelques puits du champ "B"	
7.9.	Pertes de charge dans quelques puits du champ "B" calculées par la méthode de capacité spécifique	202
7.10.	Calcul approximatif du coefficient d'emménagement à partir des données du rabattement dans le puits du pompage.....	206

7.11.	Relation approximative entre le poids spécifique et la teneur en sels dissous en mg/l	212
7.12	Relation approximative entre le poids spécifique et la teneur en sels dissous en ppm	213
8.1.	Evaluation des quantités d'eau souterraine emmagasinée et extractible de la dépression de Raudhatain	223
8.2.	Analyses chimiques représentatives des eaux souterraines de trois campements A, B et C	239
8.3.	Méthodes et coûts de dessalement des eaux souterraines aux trois campements A, B et C	243

=====

LISTE DES FIGURES

<u>FIGURES</u>	<u>Pages</u>
1.1. Localisation de l'Etat de Koweit	2
1.2. Carte de l'Etat de Koweit	2
1.3. Usine d'énergie électrique et distillation de Shuaiba sud.	5
1.4. Localisation des champs de puits	8
1.5. Augmentation de la population de Koweit	13
1.6. Demande annuelle et totale en eau saumâtre pour l'irrigation et pour la population 1976-2000	15
1.7. Demande journalière de pointe 1976-2000	15
2.1. Carte topographique et quelques profils de sol.....	19
2.2. Traits topographiques principaux	20
2.3. Hydrographie et niveau piézométrique de l'aquifère peu profond d'Al-Raudhatain et Umm-Al-Aish	
2.4. Variations de la concentration totale en sels dissous dans les eaux souterraines en fonction des variations d'altitude et de profondeur (région d'Al Quashaniya)...	25
3.1. Schéma structural du Moyen Orient	28
3.2. Carte géologique générale de l'Arabie Saoudite et coupe géologique schématique	29
3.3. Coupe synthétique des principales unités lithologiques en Arabie	32
3.4. Corrélation Nord-Sud dans la région de Koweit-Bassourah	.32
3.5. Champs et puits pétroliers dans la région de Koweit Bassourah32
3.6. Corrélation ouest-est dans la région de Koweit-Bassourah.	.32
4.1. Situation des stations météorologiques régionales	50
4.2. Situation des stations météorologiques au Koweit	50
4.3. Modules pluviométriques mensuel	54
4.4. Variations de la pluviométrie pour quatre stations au cours des 27 années	55

4.5.	Températures moyennes mensuelles pour quatre stations	59
4.6.	Directions des vents	60
4.7.	Nomogramme de Penman	64
4.8.	Evaporations mensuelles mesurées et calculées	67
4.9.	Evapotranspirations mensuelles mesurées et calculées	69
4.10	Resau hydrographique régional	71
5.1.	Minéralisation et directions d'écoulement des eaux souterraines entre la région de l'affleurement de la Formation d'Umm-Al-Radhuma et la zone côtière du Golfe	83
5.2.	Coupe hydrogéologique schématique du bassin sédimentaire de l'Arabie	85
5.3.	Coupe hydrogéologique SO-NE montrant les couches aquifères principales dans les systèmes Néogène et Eocène - Paléocène au Koweït	92
5.4.	Coupe hydrogéologique NO-SE montrant les couches aquifères principales dans les systèmes Néogène et Eocène-Paléocène au Koweït	93
5.5.	Coupe hydrogéologique montrant les couches aquifères principales dans la région SO de Koweït	94
5.6.	Carte des isopaches du Groupe de Koweït	96
5.7.	Cartes des isopaches de la tranche saturée en eau souterraine de Koweït	96
5.8.	Coupe hydrogéologique O-E montrant les couches aquifères du Groupe de Koweït et de la Formation de Damman	97
5.9.	Carte des isopaches de l'argile de la base du Groupe de Koweït	98
5.10	Carte de l'altitude du toit de la Formation de Damman	98
5.11	Situation des coupes hydrogéologiques des dépressions d'Al-Raudhatain - Umm-Al-Aish et Al-Quashaniya	100
5.12.	Coupe hydrogéologique AA' (N-S) d'Al Raudhatain	101
5.13.	Coupe hydrogéologique BB' (SO-NE) d'Al-Raudhatain).....	102
5.14.	Coupe hydrogéologique CC' (NO-SE) d'Umm-Al-Aish	103
5.15.	Coupe hydrogéologique DD' (NE-SO) d'Umm-Al-Aish	104
5.16.	Coupe EE' (NO-SE) d'Al-Quashaniya	106
5.17.	Carte des isopaches de la Formation de Damman	107
5.18	Coupe géophysique O-E dans le Groupe de Koweït et de la Formation de Damman	108
5.19	Carte des isopaches du silex du toit de la Formation de Damman	109

5.20	Coupe hydrogéologique synthétique indiquant la paléokarstification vraisemblable et quelques problèmes du développement des eaux souterraines de la Formation de Damman au Koweït	110
5.21.	Carte synthétique de la propsection géophysique de la Formation de Damman	111
5.22.	Coupe hydrogéologique schématique montrant l'alimentation depuis l'Arabie et les échanges entre les aquifères ...	118
6.1.	Cartes des zones de salinité des eaux souterraines au Koweït	120
6.2.	Carte de l'isosalinité de la Formation d'Umm-Al-Radhuma	122
6.3.	Carte de l'isosalinité de la Formation de Damman.....	123
6.4.	Diagrammes de Schoeller-Berkaloff pour quelques analyses chimiques représentant les eaux souterraines dans les champs de puits principaux au Koweït	125
6.	6.4.a Raudhatain	125
	6.4.b Koweït sud-ouest	126
	6.4.c Sulaibiya et Abdalliya	127
	6.4.d Champ A	128
	6.4.e Champs B, C et D	129
	6.4.f Champ E	130
	6.4.g Région agricole d'Al Abdally	131
	6.4.h Région agricole de Wafra	132
6.5.	Diagrammes triangulaires de Piper	133
	6.5.a Raudhatain	133
	6.5.b Koweït sud-ouest:	134
	6.5.c Sulaibiya et Abdalliya	135
	6.5.d Champs A, B, C et D	136
	6.5.e Champ E	137
	6.5.f Région agricole d'Al Abdally	138
	6.5.g Région agricole de Wafra	139
6.6.	Zones chimiques des eaux souterraines selon la classification de Sulin	141
6.7.	Situation des puits de l'échantillonnage isotopique ...	152
6.8.	Concentration en ¹⁸ O et deutérium dans les eaux souterraines des aquifères du Groupe de Koweït et Formation de Damman à Koweït sud-ouest	155
6.9.	Classification des eaux pour l'irrigation selon la Méthode de Wilcox	159
6.10	Classification des eaux pour l'irrigation d'un sol à perméabilité moyenne (D ONEEN, 1961).....	162

7.1.	Carte piézométrique du Groupe de Koweit	169
7.2.	Carte piézométrique de la Formation de Dammam	173
7.3.	Zones de transmissivité de la Formation de Dammam	178
7.4.	Courbes de rabattement dans les piézomètres de la Formation de Dammam au site SW-24	182
7.5.	Courbes de rabattement dans les piézomètres de la Formation de Dammam au site SW-25	183
7.6.	Disposition générale du projet de Shigaya au Koweit Sud-Ouest	188
7.7.	Dessin et construction d'un puits représentant les puits du champs B	191
7.8.	Courbe de remontée du puits B-27	192
7.9.	Schéma du système aquifère du champ B	194
7.10.	Pompages d'essai par paliers au puits B-27	199
7.11.	Droite de perte de charge du puits B-27	200
7.12.	Correction des charges hydrauliques des couches interstratifiées contenant des eaux salées	208
8.1.	Situation de la région agricole d'Al-Abdally	210
8.2.	Schéma du système aquifère et de l'écoulement vers les puits de la région agricole d'Al Abdally	219
8.3.	Dessins des puits proposés par KOC et MEE pour le champ de puits d'Al Abdally	222
8.4a	Variations de la qualité de l'eau extraite au champs de puits de Raudhatain en fonction du temps d'extraction	223
8.4b	Extraction moyenne annuelle au champ de puits d'Al Raudhatain	224
8.5.	Construction typique de puits du champ d'Al Raudhatain	225
8.6.	Rabattement permanent du niveau de l'eau à cause de captages au Raudhatain	226
8.7.	Déplacement de la courbe d'isosalinité de 1 000 ppm par suite de captages pendant la période de 1964-1976	227

8.8.	Type de construction d'un puits dans le Groupe de Koweit Dammam (puits à objectif double)	232
8.9.	Influence du développement sur la valeur de la constante de perte de charge dans le puits D-7 foré dans la Formation de Dammam	233
8.10.	Dessin du packer utilisé pour la séparation entre le Groupe de Koweit et la Formation de Dammam	235
8.11.	Situation de la fosse d'alimentation artificielle d'Al Raudhatain	245
8.12.	Schéma des formes d'accumulation de l'eau infiltrée artificiellement par différentes méthodes dans les nappes souterraines	247
8.13.	Courbes de pompage d'essai et de la remontée au puits R-63A	248
8.14.	Courbes d'injection d'essai et de descente du niveau de l'eau au puits R-63A	249
8.15.	Variation de la qualité de l'eau captée pendant le pompage d'essai effectué après l'injection d'essai au puits R-63 A	250
8.16.	Situation des projets proposés pour l'alimentation artificielle	254

PLANCHES

1	Carte géologique régionale de l'Arabie nord-est
2	Carte géologique de Koweit



TABLE DES MATIERES

	Pages
AVANT PROPOS	
I INTRODUCTION.....	1
1.1. BUT DE L'ETUDE	1
1.2. PRESENTATION SOMMAIRE DE L'ETAT DE KOWEIT	1
1.3. LES RESSOURCES EN EAU	3
1.3.1. Historique	3
1.3.2. Les ressources actuelles	4
1.3.2.1. Les eaux de la mer	4
1.3.2.2. Les eaux souterraines	7
1.3.2.3. Les eaux d'égouts	11
1.3.3. Autres ressources en eau	11
1.3.4. Les ressources disponibles en face de la demande	12
1.4. TRAVAUX ANTERIEURS	14
2. TOPOGRAPHIE	18
2.1. LES GRANDS TRAITES DE LA TOPOGRAPHIE	18
2.1.1. Les collines coniques et allongées	18
2.1.2. Les crêtes et les cuestas	21
2.1.3. Les vallées et les dépressions	21
2.1.4. Les traits éoliens	24
2.1.5. Iles et rivages	24
2.2. QUELQUES REMARQUES SUR LES RAPPORTS ENTRE LA TOPOGRA- PHIE ET LES EAUX SOUTERRAINES	26
3. ETUDE GEOLOGIQUE	27
3.1. GEOLOGIE REGIONALE	27
3.1.1. Généralités	27
3.1.2. Unités structurales	27
3.1.2.1. Bouclier arabe (I)	30
3.1.2.2. Plate-forme arabe tabulaire (II) ...	30
3.1.2.3. Plate-forme arabe ondulée (III)	30
3.1.2.4. Zone des "foothills"(IV)	30
3.1.2.5. Chaînes des Iranides (V)	30
3.1.2.6. Haut plateau iranien (VI)	31
3.1.3. Stratigraphie	31
3.1.3.1. Les roches détritiques du Paléozoïque inférieur	31

3.1.3. Stratigraphie	31
3.1.3.1. Les roches détritiques du Paléozoïque inférieur	31
3.1.3.2. Les roches détritiques du Permien supérieur et du Trias	33
3.1.3.3. Les roches détritiques et calcaires du Jurassique	33
3.1.3.4. Les calcaires du Jurassique supérieur et du début du Crétacé inférieur	33
3.1.3.5. Les roches détritiques à la fin du Crétacé inférieur	33
3.1.3.6. Les roches détritiques du Crétacé moyen ...	34
3.1.3.7. Les calcaires du Crétacé supérieur - Eocène	34
3.1.3.8. Les roches détritiques du Miocène et du Pliocène	34
3.1.3.9. Les dépôts Quaternaires	35
3.1.4. Tectonique	35
3.1.4.1. Les failles	35
3.1.4.2. Les plis	35
3.2. GEOLOGIE DES COUCHES RENCONTREES AU KOWEIT	36
3.2.1. Généralités	36
3.2.2. Stratigraphie générale des couches pénétrées.	37
3.2.3. Géologie des couches supérieures	37
3.2.3.1. Groupe de Koweit	39
3.2.3.1.1. Les dépôts récents	39
3.2.3.1.2. Sédiments récents et subrécents	39
3.2.3.1.3. Formation de Dibdiba (Miocène à Pleistocène)	40
3.2.3.1.4. Formation du Fars inférieur (Miocène)	41
3.2.3.1.5. Formation du Ghar (Miocène ? ou Oligocène Inférieur ?) ...	41
3.2.3.2. Groupe de Hasa	42
3.2.3.2.1. La Formation de Dammam	42
3.2.3.2.2. La Formation de Rus	44
3.2.3.2.3. La Formation d'Umm-Al-Radhuma	45
4. CLIMATOLOGIE ET HYDROLOGIE DE SURFACE	48
4.1. CLIMATOLOGIE REGIONALE	48
4.2. LE CLIMAT	51
4.3. LES MESURES CLIMATOLOGIQUES ET LES DONNEES	51
4.4. LES ELEMENTS CLIMATOLOGIQUES	51
4.4.1. Pluviométrie	51

4.4.1.1. Répartition pluviométrique dans l'espace	51
4.4.1.2. Répartition pluviométrique dans le temps	53
4.4.2. La température	58
4.4.3. Les vents	58
4.4.5. Evaporation	62
4.4.5.1. Evaporation théorique (méthode de Penman)	63
4.4.5.2. Evapotranspiration potentielle	63
4.4.5.2.1. Méthode de Blaney-Criddle	63
4.4.5.2.2. Méthode de Prescott	63
4.5. HYDROLOGIE DE SURFACE	70
4.5.1. Hydrographie régionale	70
4.5.1.1. Les oueds des bandes côtières	72
4.5.1.2. Les oueds intérieurs ouverts	72
4.5.1.3. Les oueds intérieurs fermés	72
4.5.2. Cycle de l'eau au Koweit	72
5 - HYDROGEOLOGIE REGIONALE ET GISEMENTS DES EAUX SOUTERRAINES AU KOWEIT	75
5.1. HYDROGEOLOGIE REGIONALE	75
5.1.1. Les caractères hydrogéologiques des Formations sédimentaires en Arabie	75
5.1.2. Principales couches aquifères en Arabie	79
5.1.3. Hydrochimie	79
5.1.3.1. La chimie des eaux souterraines	79
5.1.3.2. Données isotopiques	79
5.1.4. Hydraulique des eaux souterraines	84
5.1.4.1. Système des aquifères Paléozoïque-Triassique..	84
5.1.4.2. Système des aquifères Crétacés	87
5.1.4.3. Système des aquifères Eocènes	87
5.1.4.4. Système des aquifères Néogène - Quaternaire de l'Arabie orientale	90
5.2. GISEMENTS DES EAUX SOUTERRAINES ET SYSTEMES DES AQUIFERES AU KOWEIT	91
5.2.1. Gisements des eaux souterraines peu profondes	91
5.2.2. Gisements des eaux souterraines du Groupe de Koweit .	95
5.2.3. Gisement des eaux souterraines dans la Formation de Dammam	105
5.2.4. Gisement des eaux souterraines dans la Formation d'Umm Al Radhuma	113
5.2.5. Conclusions sur le gisement des eaux souterraines au Koweit	113

6 - HYDROGEOCHIMIE	119
6.1. REPARTITION HYDROGEOCHIMIQUE DES EAUX SOUTERRAINES DE KOWEIT	119
6.1.1. Classification des eaux souterraines de Koweit. sur la base de leur minéralisation	119
6.1.1.1. Zone des eaux douces	119
6.1.1.2. Zone des eaux saumâtres	119
6.1.1.3. Zone des eaux souterraines salées	121
6.1.1.4. Zone des eaux souterraines très salées ..	121
6.1.2. Représentation graphique des analyses d'eau ...	124
6.1.3. Classification hydrogéochimique génétique (Sulin 1947)	124
6.1.3.1. Zones des eaux souterraines du type sulfaté sodique	124
6.1.3.2. Zone des eaux souterraines du type chloruré-magnésien	140
6.1.3.3. Zone des eaux souterraines du type chloruré-calcique	140
6.2. GENESE DE LA MINERALISATION ET FACTEURS DE L'ENVIRONNEMENT CONTROLANT LE REGIME CHIMIQUE	143
6.2.1. Conditions climatologiques	143
6.2.2. Lessivage et dissolution des constituants	143
6.2.3. Action réciproque entre les eaux météoriques douces et eaux marines récentes et anciennes....	143
6.2.4. Le rôle de l'argile et l'échange de bases entre l'eau souterraine et le milieu aquifère.....	144
6.2.5. Facteurs artificiels	147
6.3. HYDROISOTOPES	148
6.3.1. Généralités	148
6.3.2. Les données isotopiques de Koweit	148
6.3.3. Interprétations des teneurs en deutérium et ^{18}O .	150
6.4. EVALUATION DE LA QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES	
6.4.1. Classification et évaluation des eaux pour l'irrigation	158
6.4.1.1. Méthode de WILCOX (1948)	158
6.4.1.2. Méthode de DONEEN (1961)	158
6.4.1.2.1. Salinité potentielle	160

6.4.1.2.2. Indice de perméabilité	161
6.4.1.2.3. Bore	161
6.4.2. Evaluation des eaux souterraines pour les usages domestiques	163
6.4.3. Conclusions	165
7 - PROPRIETES HYDRODYNAMIQUES DES TERRAINS	168
7.1. GROUPE DE KOWEIT	168
7.2. FORMATION DE DAMMAM	172
7.2.1. Carte piézométrique	172
7.2.2. Transmissivité	172
7.2.3. Coefficient d'emmagasinement	179
7.2.4. Anisotropie	179
7.3. FORMATION D'UMM AL RADHUMA	184
7.4. CALCUL DE LA MIGRATION DE L'EAU SOUTERRAINE DANS LA FORMATION DE DAMMAM	185
7.5. ETUDE QUANTITATIVE DU CHAMP DE PUIITS "B"	187
7.5.1. Système aquifère	187
7.5.2. Pompages d'essai et coefficients hydrauliques des couches aquifères	187
7.5.3. Mécanisme de l'écoulement dans le système aquifère et l'équation de l'écoulement	193
7.5.4. Rabattement	196
7.5.4.1. Rabattement théorique	197
7.5.4.2. Pertes de charge	
- méthode de JACOB	198
- méthode de Capacité spécifique	198
7.5.4.3. Interférence	202
7.5.4.4. Rabattement au centre du champ "B" après 50 ans de pompage continu	203
7.5.5. Calcul approximatif du coefficient d'emmagasinement	204

7.6. CORRECTION DE LA CHARGE HYDRAULIQUE SELON LA TENEUR EN SELS DISSOUS	207
7.6.1. Généralités	207
7.6.2. Formules de correction	207
7.6.3. Détermination du poids spécifique de l'eau de la Formation à partir des concentration en sels dissous	210
7.6.4. Exemple	210
7.6.5. Conclusion	211
8 - EXPLOITATION ET ALIMENTATION ARTIFICIELLE	214
8.1. GENERALITES	214
8.2. EXPLOITATION DES EAUX SOUTERRAINES	216
8.2.1. Exploitation actuelle	216
8.2.1.1. Champ de puits privés	216
8.2.1.1.1. Al Abdally	217
8.2.1.1.2. Wafra	220
8.2.1.1.3. Al-Abdalliya	220
8.2.1.1.4. Exploitation privée dispersée	221
8.2.1.2. Champs de puits publics	221
8.2.1.2.1. Raudhatain	221
8.2.1.2.2. Umm-Al-Aish	228
8.2.1.2.3. Sulaibiya	228
8.2.1.2.4. Shigaya (Champs de A,B,C,D et E) ...	228
8.2.1.3. Construction et développement des puits du projet de Shigaya	229
8.2.1.4. Une méthode pour la détermination du nombre et de l'espacement des fentes dans les crépines à fentes	236
8.2.2. Exploitation potentielle	238
8.2.2.1. Région I	238
8.2.2.2. Région II	238
8.2.2.3. Région de Wafra	238
8.2.3. Exploitation des eaux souterraines saumâtres et salées à la lumière du dessalement	238
8.2.3.1. Techniques de dessalement considérées.....	239
8.2.3.1.1. Vaporisation instantanée à étages multiples	240
8.2.3.1.2. Compression de vapeur (c.v.)	240
8.2.3.1.3. Electrodialyse (E.D.)	240

8.2.3.1.4. Osmose inversé (O.I.)	241
8.2.3.2. Méthode de dessalement préférée pour les 3 campements	241
8.2.3.3. Système de prise d'eau	242
8.2.3.4. Conclusion	242
8.3. ALIMENTATION ARTIFICIELLE DES NAPPES SOUTERRAINES	244
8.3.1. Fosse d'alimentation	244
8.3.2. Puits d'injection	246
8.3.3. Projets possibles pour l'alimentation artificielle au Raudhatain	251
8.3.3.1. Projet I	251
8.3.3.2. Projet II	252
8.3.4. Conclusion sur l'alimentation artificielle au Koweit	252
9 - PRINCIPAUX RESULTATS OBTENUS ET CONCLUSIONS GENERALES	255
9.1. PRINCIPAUX RESULTATS	255
9.2. CONCLUSIONS GENERALES	263
ANNEXES	
I - RESULTATS DE QUELQUES ANALYSES CHIMIQUES REPRESENTANT DES EAUX SOUTERRAINES PRODUITES DANS LES CHAMPS DE PUIITS PRINCIPAUX AU KOWEIT	265
II - COEFFICIENTS DE CONVERSION ET FONCTIONS MATHEMATQUES RENCONTREES	278
III - QUELQUES COURBES DE POMPAGES	282
IV - PROGRAMMES DE FORAGE	299
IV.1. PUIITS DANS LE CALCAIRE DE DAMMAM (Champ "D")	
IV.2. PUIITS A OBJECTIF DOUBLE (Groupe de Koweit et Formation de Dammam) (Champ "E")	301
BIBLIOGRAPHIE	304
TABLEAUX	311
FIGURES	314
TABLE DES MATIERES	319

Dernière page d'une thèse

VU

GRENOBLE, le

Le Président de la Thèse

Vu, et permis d'imprimer

GRENOBLE, le

Le Président de l'Université
Scientifique et Médicale

1870

1871

1872

1873