

وزارة الطاقة والتصنيع  
ادارة المناجم والتنقيب  
قسم التنقيب

MINISTERE DE L'INDUSTRIE ET DE L'ENERGIE  
DIRECTION DES MINES ET DE LA GEOLOGIE  
SERVICE GEOLOGIQUE

---

(NOUVELLE SERIE)

BULLETIN N° 43

# HYDROGEOLOGIE DE LA HAUTE SAOURA (Sahara nord occidental)

Par

Michel Alain ROCHE

Docteur en Géologie Dynamique

Chargé de Recherches de l'O.R.S.T.O.M.

PUBLICATIONS DU SERVICE GEOLOGIQUE DE L'ALGERIE

ALGER - 1973



## SOMMAIRE

	page
INTRODUCTION .....	7
METHODES D'ETUDE .....	8
CONTEXTE GEOLOGIQUE .....	9
HYDROLOGIE DE L'OUED SAOURA .....	10
CHAPITRE 1 : LA NAPPE DU GRAND ERG OCCIDENTAL .....	13
CHAPITRE 2 : HYDROGEOLOGIE DE LA VALLEE DE LA SAOURA .....	23
2. 1. Région d'Igli et de Touzdit .....	23
2. 2. Région de Mazzer et Acacha .....	30
2. 3. Région de Béni-Abbés et Ouarourout .....	36
2. 4. Palmeraies d'El Ouata .....	47
2. 5. Palmeraies d'Anefid, Aguedal et El Beïda .....	61
2. 6. Inféro-flux de l'Oued Saoura .....	66
CHAPITRE 3 : HYDROGEOLOGIE DES FORMATIONS HAMADIENNES .....	73
3. 1. Hydrogéologie de la Hamada du Guir .....	73
3. 2. Hydrogéologie de la Petite Hamada .....	77
CHAPITRE 4 : HYDROGEOLOGIE DES MONTS D'UGARTA .....	79
CONCLUSION .....	85
— Alimentation et causes des différences de débit des nappes d'eaux souterraines de la Haute Saoura .....	85
— Exploitation des ressources .....	86
PLANCHES PHOTOGRAPHIQUES .....	88
BIBLIOGRAPHIE .....	89
PLANCHES HORS-TEXTE	



## Introduction

Dans la région de la Haute Saoura, comme dans bien d'autres au Sahara, les principales ressources économiques demeurent la culture irriguée pour les sédentaires et l'élevage pour les nomades. Or, ce n'est que dans une extension et surtout une rationalisation de ces deux activités que la région possède quelques chances de développement. En pays désertique, encore plus que partout ailleurs, toute entreprise est conditionnée par le problème primordial de l'eau. Si l'on envisage un développement économique régional, la première action à entreprendre est un inventaire systématique des ressources hydrauliques.

Dans ce but, le Centre de Recherches sur les zones arides entreprit en 1963 la réalisation d'un programme d'études hydrogéologiques dans la Saoura (fig. 1). Deux missions furent effectuées : la première eut lieu d'octobre 1963 à avril 1964, la seconde d'août à novembre 1964. Cet ouvrage résume les connaissances acquises alors sur les trois ensembles aquifères de la région.

— A l'est de l'Oued Saoura, la nappe phréatique du Grand Erg Occidental représente les ressources souterraines les plus importantes. La zone drainée par la Saoura a été plus particulièrement étudiée.

Les eaux de cette nappe alimentent les terrasses de la rive gauche de la vallée où sont implantées les palmeraies, l'essentiel de la vie régionale s'y trouve concentrée. L'examen de l'inféro-flux de l'Oued n'est pas dissociable de l'étude de cette nappe.

— A l'ouest, une nappe libre est contenue dans les terrains mio-pliocènes de la Hamada du Guir. Ses ressources en eaux, extrêmement modestes, insuffisantes au développement des palmeraies, profitent seulement sur sa bordure orientale à quelques nomades.

— Enfin les Monts d'Ougarta recèlent trois unités aquifères, en partie captives, en partie libres, en partie captives, dans les grès et quartzites cambro-ordoviens. Quelques points d'eau, quelques petites palmeraies disséminées permettent à une population isolée de subsister dans cette région très désertifiée.

Avant d'aborder l'étude de ces nappes, les méthodes de travail seront exposées ainsi que les principaux traits de la géologie régionale et de l'hydrologie de surface. Ces données sont en effet nécessaires à la compréhension de l'hydrogéologie de la Haute Saoura.

Nous tenons à remercier ici particulièrement M. Marçais, J., Directeur du Centre de Recherches sur les zones arides, M. Rodier, J., Directeur du Service Hydrologique de l'O.R.S.T.O.M. et M. Conrad, G., Docteur ès-Sciences, grâce auxquels la réalisation de cette étude a été possible. Nous remercions en outre M. Merabet, O., Chef du Service Géologique de l'Algérie, qui a bien voulu publier les résultats hydrogéologiques dans le Bulletin du Service Géologique de l'Algérie.

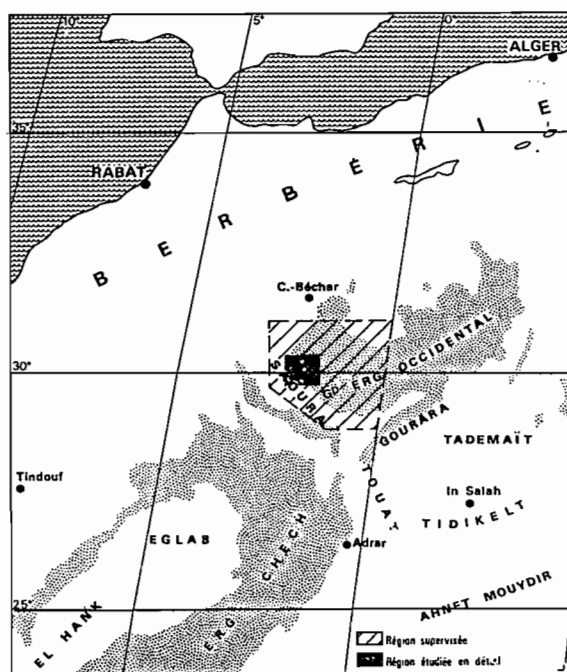


Fig. 1. Carte de situation de la région étudiée.

## Méthodes d'étude

L'étude régionale comprend deux phases :

— Une étude globale des ressources en eaux comportant la mise au point d'un inventaire des points d'eau. Cet inventaire représente la partie la plus importante des travaux. Les observations et mesures portent sur les conditions de gisement, la profondeur et la cote piézométrique, les débits, la physico-chimie des eaux.

L'étude physico-chimique des eaux a été menée en partie à Béni-Abbès avec des mesures de résistivité, de résidus secs et de pH et des dosages des chlorures par volumétrie (nitrate d'argent). Une corrélation entre les résidus secs (en mg/l) et les résistivité  $\rho$  (18°C en  $\Omega$ . cm), déterminée expérimentalement (fig. 2), a pour équation

$$rs = \frac{65 \cdot 10^4}{\rho}$$
 Elle permet d'estimer rapidement la valeur des résidus secs.

Au Centre de Recherches Géodynamiques de Thonon-les-Bains 120 eaux ont été analysées. Le sodium et potassium ont été dosés par photométrie de flamme et les autres ions par volumétrie : le calcium et magnésium par le complexon, les chlorures par le nitrate mercurique, les sulfates par le chlorure de baryum après passage sur colonne de résine, les carbonates et bicarbonates par l'acide sulfurique.

Le degré hydrotimétrique est défini par  $dh = 5(rCa + rMg)$  et l'indice de déficit chloro-alcalin par  $rCl - rNa$ .

L'échelle de potabilité de H. Schoeller (1937), spécialement conçue pour les zones arides, a été utilisée.

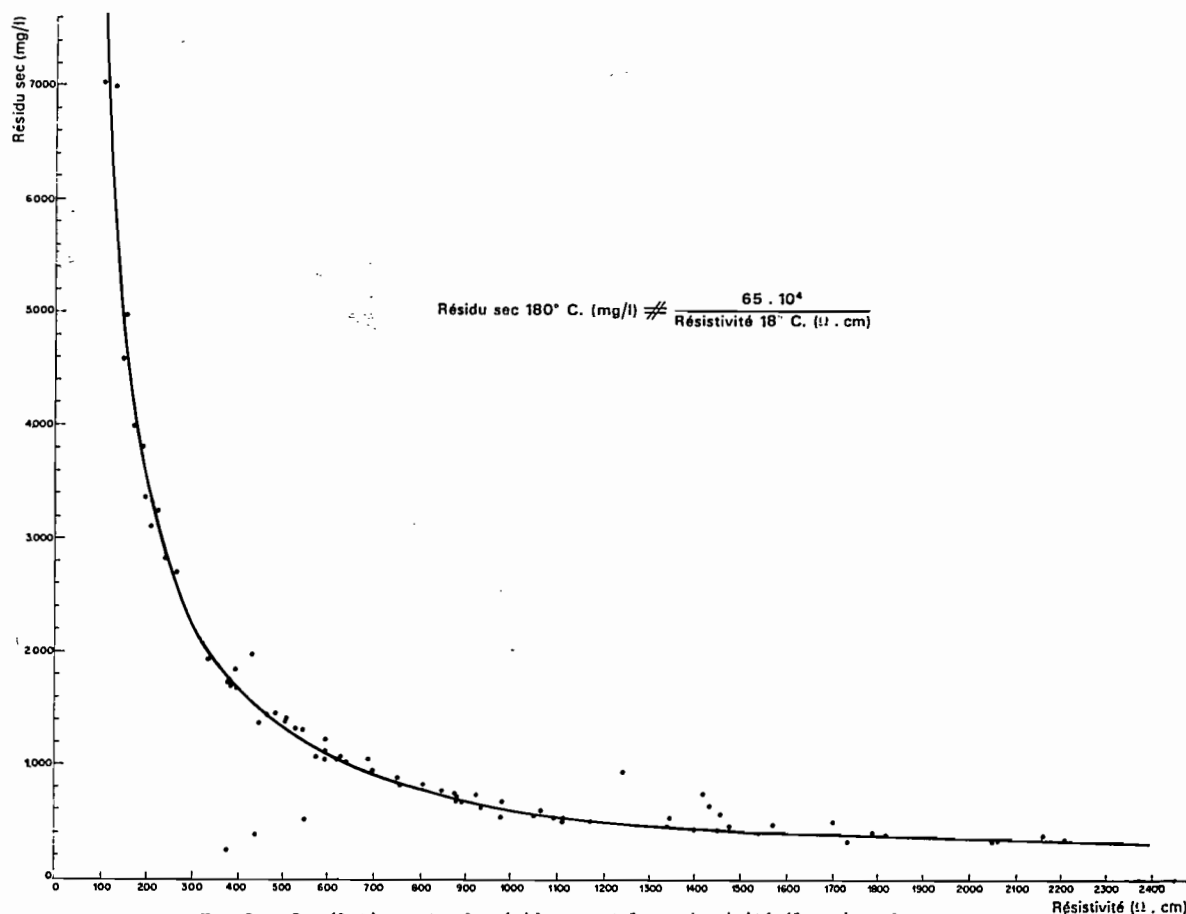


Fig. 2. Corrélation entre le résidu sec et la conductivité électrique des eaux souterraines de la Haute-Saoura.

Les analyses isotopiques de l'oxygène et du tritium ont été effectuées au Laboratoire de Géologie Dynamique de Paris suivant les procédés classiques.

Le contexte morphologique et géologique avait déjà fait l'objet de nombreuses reconnaissances. Seules ont été précisées des coupes du Néogène et du Quaternaire, en raison de l'importance hydrogéologique de ces terrains.

— Une étude expérimentale des nappes par essais de pompage, visant à la détermination des transmissivités et des débits de la nappe.

En régime de non-équilibre, la méthode graphique d'approximation logarithmique de H. Cooper et C. Jacob, donnant le rabattement en fonction du logarithme du temps, a pour expression

$$\Delta = \frac{0,183 Q}{T} \log \frac{2,25 Tt}{x^2 S}$$

$\Delta$  est le rabattement observé à l'instant  $t$ , en m,  
 $Q$  le débit constant de pompage, en  $m^3/s$ ,

$T$  la transmissivité, en  $m^2/s$ ,

$t$  le temps écoulé depuis le début du pompage, en s,

$x$  la distance du piézomètre à l'axe du puits, en m,

$S$  le coefficient d'emmagasinement.

Sur papier semi-logarithmique, le coefficient angulaire  $a = \frac{0,183 Q}{T}$  de cette droite est donné

par l'accroissement de  $\Delta$  dans un cycle logarithmique. Dans ce cas  $\log t = 1$  et

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{0,183 Q}{T} = c \text{ d'où } T = \frac{0,183 Q}{c}$$

En début de pompage, le débit oscille légèrement et il semble alors préférable de tracer la droite du rabattement spécifique en fonction du logarithme du temps

$$\frac{\Delta}{Q} = \frac{0,183}{T} \left( \log \frac{2,25 T}{x^2 s} + \log t \right)$$

pour laquelle  $T = \frac{0,183}{c}$

La remontée a aussi été étudiée en appliquant la formule

$$\Delta = \frac{0,183 Q}{T} \log \frac{t}{t'}$$

dans laquelle  $t$  est le temps écoulé depuis le début du pompage,  $t'$  le temps écoulé depuis l'arrêt. Sur papier semi-logarithmique la droite obtenue permet de calculer la transmissivité  $T = \frac{0,183 Q}{c}$

Dans l'interprétation de ces trois types de graphiques, il a été tenu compte de l'effet de capacité du puits sur la dépression du niveau piézométrique, en appliquant à l'emploi des formules la condition restrictive

$$t > 25 \frac{r^2}{T}, \text{ ou } t' \text{ pour la remontée.}$$

### Contexte Géologique

Les études géologiques au Sahara nord-occidental ont été menées principalement par N. Menchikoff, A. Poueyto, G. Petter, D. Le Maître (1952), Cl. Pareyn (1962) pour le Paléozoïque et par H. Schoeller (1945), J. Dresch (1951), H. Alimen (1952-1967), J. Chavaillon (1956-1964), G. Conrad (1959-1969) pour les formations hamadiennes et les dépôts quaternaires. Les rapports entre les terrains tertiaires et quaternaires ont fait l'objet d'une étude détaillée (fig. 3) de G. Conrad et M. A. Roche (1965). La carte géologique (pl. I) est une synthèse de ces travaux.

Le substratum de la région est formé d'assises paléozoïques allant du Cambrien au Viséen. Toutefois dans les Monts d'Ougarta, au coeur des anticlinaux, apparaissent des rhyolites présumées infracambriennes mais peut-être plus anciennes. Ces terrains ont été modérément plissés par l'orogénèse hercynienne. Les structures sont représentées par des plis larges, parfois légèrement dissymétriques mais sans aucun déversement ou plissement. Les directions des axes des plis varient de SSE - NNW à E-W. Les pendages sont faibles, de 30° à 10° en moyenne. Les failles et flexures, rares et localisées, sont peu importantes dans la couverture. L'orogénèse ne s'est pas accompagnée ici de métamorphisme ou d'une induration importante des sédiments. Les grès, en particulier, ont conservé leur porosité d'origine. On observe par contre une fissuration très développée des grès, des quartzites et des calcaires et parfois une schistosité de fracture dans les argiles.

Le Mio-Pliocène (ng), recouvert du Plio-Villafranchien (pv) constitue la Hamada du Guir (fig. 3). Au sud du km 30, le Plio-Villafranchien représente

seulement la base de la Petite Hamada, la partie supérieure étant du Villafranchien supérieur (q1). Ces terrains reposent en discordance sur le Primaire dont ils comblent les vallées paléogènes et sont recouverts par le Grand Erg Occidental à l'est de la vallée de la Saoura.

Les formations quaternaires occupent de très grandes surfaces. Elles constituent principalement le sommet de la Petite Hamada, des terrasses alluviales étagées, des encroûtements calcaires plus ou moins silicifiés, des ergs, des alluvions récentes d'oueds, de sebkhas et des dépôts de pente. L'évolution du bassin endoréique de la Saoura est une succession de phases humides et arides (G. Conrad 1969)

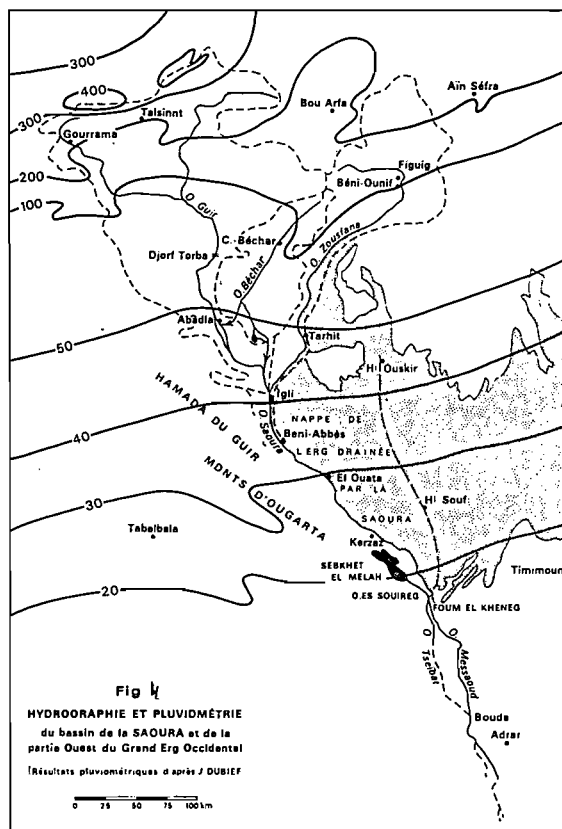
Au cours du pluvial villafranchien supérieur, (q1 ou Mazzérien), qui correspond à une accentuation de la pluviosité pendant une longue période, sans pour autant dépasser le stade semi-aride ou subaride, s'organise un réseau hydrographique, présentant un aspect proche de l'actuel. Les terrains du Villafranchien supérieur sont surtout représentés par des formations essentiellement détritiques du type de la « haute terrasse de Mazzèr », la partie supérieure de la Petite Hamada et des croûtes calcaires.

Après une période de désertification, une plus modeste révolution climatique se réalise au Quaternaire moyen q2. Le réseau hydrographique s'organise à nouveau et un glacis, emboîté dans le glacis villafranchien, s'élabore avec formation d'encroûtements calcaires cependant moins importants que ceux du Villafranchien supérieur.

Après le Pléistocène moyen s'instaure un climat aride, voire hyperaride, interrompu au Pléistocène supérieur q3a (ou Saourien) par le « Dernier Pluvial Saharien » et à l'Holocène q3b (ou Guirien) par « l'Humide Néolithique ». Au cours du Pléistocène supérieur s'édifie, entre plus de 40 000 et 14 000 ans B. P., une belle terrasse sableuse de 25 à 30 m avec intercalations lacustres. A l'Holocène, le climat devient aride pendant quelques millénaires et favorise l'édification des grands ergs sous leur forme massive. Puis une recrudescence des phénomènes météorologiques provoque sur tout le Sahara une courte révolution climatique, l'Humide Néolithique, qui se traduit par une remontée des nappes d'eaux souterraines. Des sédiments lacustres, datés entre 6500 et 4000 ans, se déposent alors en bordure et à l'intérieur de l'Erg, tandis qu'une terrasse alluviale emboîtée dans le Saourien s'établit dans la vallée de la Saoura.

## Hydrologie de l'Oued Saoura

L'oued Saoura commence à Igli au confluent du Guir et de la Zousfana, descendus respectivement du Haut Atlas marocain et de l'Atlas Saharien (fig. 4). Les écoulements provoqués généralement par les précipitations sur le haut bassin, déferlent plus ou moins loin en aval. Beaucoup atteignent une cuvette fermée, la Sebkhel el Melah, par l'intermédiaire de l'Oued es Souireg qui descend vers le nord-ouest à la sortie du Foum el Kheneg. Les crues de fréquences plus rares se divisent en deux après ce Foum, une partie des eaux s'écoulant toujours dans l'Oued es-Souireg, l'autre passant dans l'Oued Messaoud et l'Oued et Tseibat, pour gagner les grandes sebkhas du Touat.



De 1901 à 1967, la période la plus longue séparant deux crues à Beni-Abbès serait de 2 ans et demi. Elle se situe entre 1927 et 1929, mais doit être simplement due à une lacune de renseignements. Aussi cette valeur est-elle indiquée pour donner seulement une limite, probablement par excès. Les études de terrain se sont déroulées d'oc-

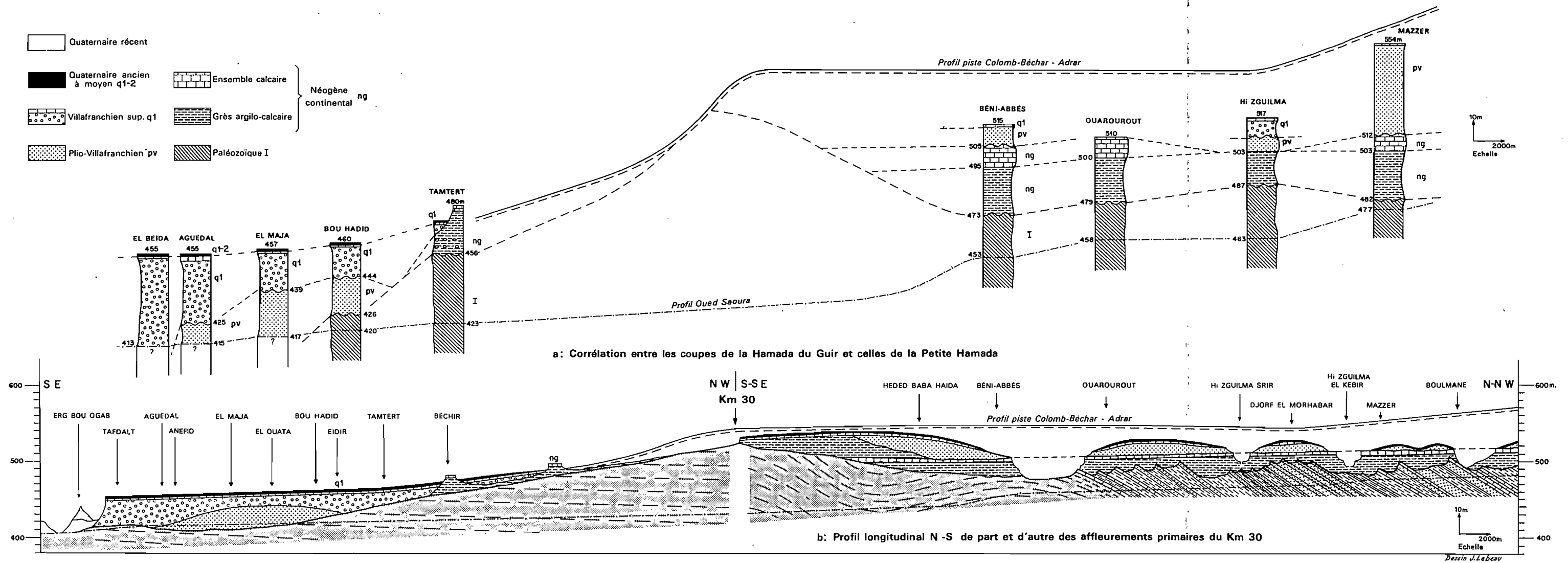


Fig. 3 : Profil nord-sud de l'extrémité méridionale de la Hamada du Guir.  
Rapports entre les formations tertiaires et quaternaires (d'après G. CONRAD et M.-A. ROCHE - 1965).

tobre 1963 à novembre 1964, sans qu'aucune crue ne s'écoule dans le Bas Guir, la Basse Zousfana ou la Saoura. Le dernier écoulement remontait à juillet 1963. Il avait atteint la Sebkhet el Melah et très certainement passé dans l'Oued Messaoud. Le suivant, de faible importance, a eu lieu le 11 novembre et s'est arrêté au Foum Marhouma. Cette période de 16 mois sans crue est la plus longue qui ait été observée de 1952 à 1967. L'avantage de cette coïncidence est d'avoir pu mener l'ensemble de l'étude hydrogéologique sur une période non influencée par les crues.

Cependant, parmi les oueds sahariens, la Saoura est un des plus vivants car des crues, souvent importantes, s'y produisent fréquemment (1).

#### 1. FREQUENCES DES MOIS AU COURS DESQUELS LES CRUES APPARAISSENT A BENI-ABBES.

Il est préférable de compter le nombre de mois plutôt que celui des crues car le plus souvent les renseignements disponibles ne permettent pas d'individualiser les écoulements.

A Béni-Abbès, les nombres de mois au cours desquels se sont produites une ou plusieurs crues de 1901 à 1967 sont les suivants :

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	total
10	7	15	12	15	8	2	2	8	19	22	15	135

La liste des crues étant certainement incomplète, les valeurs obtenues sont des estimations par défaut.

Sur les 67 ans d'observation, il y aurait eu par exemple 22 ans avec une ou plusieurs crues en novembre. Il apparaît que les fréquences maximales sont pour les mois d'automne (novembre, octobre, décembre) puis de printemps (mars, mai, avril), les pluies de ces périodes sur les hauts bassins étant généralement seules capables de produire de gros écoulements. Les fréquences minimales sont pour juillet et août.

On connaît en moyenne au moins 2 mois par an, au cours desquels apparaissent une ou plusieurs crues.

De 1901 à 1967, on note au minimum 40 mois au cours desquels se sont produites dans la Saoura

une ou plusieurs crues de forte importance (soit plus d'une fois tous les deux ans) se répartissant ainsi :

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	total
1	1	6	1	1	2	1	0	2	11	9	5	40

Ce sont donc octobre, novembre, mars et décembre les mois les plus fréquents pour les gros écoulements.

Sur 67 ans, on connaît un minimum de 28 mois au cours desquels se sont produites des crues ayant atteint le Foum el Kheneg. Il est d'ailleurs probable que la majorité des fortes crues, dont il vient d'être question ci-dessus, aient atteint aussi le Foum et même la Sebkhet el Melah pour laquelle on relève seulement 20 mois. Il est en effet à remarquer que de 1952 à 1967, la Sebkhet el Melah a été alimentée 14 fois et en réalité certainement par plus de 14 crues, ce qui représente plus d'une crue par an.

Enfin sur ces 67 ans, on connaît seulement 9 crues ayant passé dans l'Oued Messaoud, soit un minimum de 13 tous les 100 ans. Deux auraient atteint la région de Reggane en octobre 1915 et novembre 1967, 3 ont atteint Bouda (2 en mars, 1 en octobre). Les 4 autres, de plus faible importance se sont produites en mars (2), décembre (1) et juillet (1). Là encore, il est probable que ces chiffres soient assez inférieurs à la réalité et ne peuvent vraiment indiquer qu'un minimum.

#### 2. TEMPS D'ÉCOULEMENT

L'oued Saoura, en aval d'Igli, coule souvent plusieurs fois au printemps et à l'automne de presque toutes les années avec seulement parfois de très courtes périodes d'interruption. A Béni-Abbès, l'écoulement continu peut durer plusieurs mois consécutifs (supérieur par exemple à 5 mois en 1967-1968).

La durée moyenne d'une crue dans la Haute Saoura n'est pas déterminable. A Abadla, d'après J. Dubrief (1951), la durée moyenne serait de 13,5

(1) Les résultats sur le régime hydrologique sont déduits d'une liste des crues établie par J. Dubrief (1951) pour la période 1901-1950 et par nous-mêmes pour la période 1951-1967 grâce en particulier aux renseignements que nous ont communiqués J. Dubrief, G. Conrad, et J. Fabre.

jours, sur la période 1901-1950. Il est évident que cette durée est plus courte dans la Haute Saoura qu'en cette dernière station.

### 3. DEBITS ET VOLUMES ECOULES

Le débit de pointe de la crue de mars 1959 aurait été de 2500 m<sup>3</sup>/s à Abadla.

Les plus forts débits observés dans le Guir et la Saoura sont ceux des crues de 1915 et 1967. Lors de cette dernière, le débit maximal aurait été d'environ 5 000 à 5 500 m<sup>3</sup>/s à Djorf Torba. Sans l'écrêtement de la crue par le barrage en construction il aurait, paraît-il, atteint 6 000 à 6 500 m<sup>3</sup>/s.

Dans la Haute Saoura, le débit maximal des crues de fréquences rares, telles celles de 1915 et 1967, doit pouvoir dépasser 3000 m<sup>3</sup>/s.

On peut estimer que les fortes crues, du type de celle de mars 1959, apportent à la Saoura un volume d'eau supérieur à 500 millions de m<sup>3</sup>.

### 4. PHYSICO-CHIMIE DES EAUX DE CRUES

Les résultats d'analyses d'eaux prélevées lors de la crue du 11 novembre 1964 à Abadla et Béni-Abbès ont été reportées sur un diagramme logarithmique (fig. 40). Le tableau ci-dessous indique les principales caractéristiques hydrochimiques :

	r Cl	r SO <sub>4</sub>	r CO <sub>3</sub>	rCl-rNa	$\frac{r SO_4}{r Cl}$	$\frac{r CO_3}{r SO_4}$	$\frac{rMg}{r Ca}$	$\frac{r Na}{r Mg}$
Abadla	3,80	3,20	4,40	< 0	0,84	1,38	0,30	2,70
Béni-Abbès	22,57	3,75	2,08	> 0	0,17	0,55	0,43	3,54

Le résidu sec des eaux d'Abadla est relativement faible : 590 mg/l. A Béni-Abbès il est près de 4 fois supérieur. Cette augmentation s'explique par la dissolution des sels du lit et secondairement par l'évaporation subie par les eaux au cours de leur écoulement.

Les rapports  $r SO_4/r Cl$  et  $r CO_3/r SO_4$  décroissent vers l'aval tandis que  $r Mg/r Ca$  et  $r Na/r Mg$  croissent.

La formule caractéristique à Abadla  $r CO_3 > r Cl > r SO_4$   $r Ca > r Na > r Mg$  évolue vers

l'aval ; à Béni-Abbès elle est devenue  $r Cl > r SO_4 > r CO_3$   $r Na > r Ca > r Mg$ .

Les variations des teneurs en CO<sub>3</sub> combiné peuvent s'expliquer par l'augmentation des températures et le brassage des eaux. Les teneurs en sulfates ne varient pratiquement pas, alors que celles en chlorures croissent fortement par dissolution des sels déposés à la surface du lit qui sont donc essentiellement du chlorure de sodium.

Les potabilités sont respectivement de la classe 2 et 4 à Abadla et Béni-Abbès.

## CHAPITRE I

## LA NAPPE DU GRAND ERG OCCIDENTAL

1. 1. *LIMITES GEOGRAPHIQUES ET MATERIAUX AQUIFERES*

La nappe phréatique ne se localise pas uniquement sous le Grand Erg Occidental, elle ne représente là qu'une partie d'un vaste système aquifère dont A. Cornet (1945) a précisé les limites :

Au nord elle se raccorde sans discontinuité avec la nappe de la Hamada Sud Oranaise. Sa limite extrême nord se trouve déterminée par l'accident sud atlasique. Elle débute au contact des terrains plissés et dans bien des cas doit profiter des pertes des nappes atlasiques telles que celles du Turonien. Les inféro-flux des grands oueds débouchant de l'Atlas s'y raccordent. L'eau est contenue dans les couches rouges des « terrains des gours » (Mio-Pliocène), sous-jacents à la dalle hamadienne calcaire.

Au nord-est la nappe se prolonge vers le Pays des Daïas.

Au sud-est, elle s'équilibre avec les eaux du Continental intercalaire qui se comportent en nappe libre sur le bord nord-ouest du synclinal du Tadmaït. Dans le Gourara, les deux nappes se raccordent suivant une ligne difficile à préciser alors que la falaise du Tadmaït correspond à une ligne de pente brusque de la nappe phréatique, les eaux du Cénomaniens-Turonien étant beaucoup plus élevées.

Sur le bord sud-est de l'Erg, cette rupture se continue. La nappe phréatique du Mzab qui s'abaisse vers l'est se trouve, sur le bord ouest de la falaise turonienne, à une cote très supérieure à celle de la nappe de l'Erg.

Au nord-ouest, dans la région des massifs primaires de la Zousfana, aucune reconnaissance n'a été menée. Nous pensons que l'hydrogéologie est analogue à celle de la région d'Igli et que la nappe se situe essentiellement dans le Paléozoïque et le Quaternaire.

La bordure ouest, c'est-à-dire le flanc oriental de la vallée de la Saoura, est étudiée en détail dans le chapitre suivant. Les terrains aquifères sont le Paléozoïque, le Mio-pliocène, le Plio-Villafranchien et le Quaternaire. Les sables dunaires du Grand Erg ne contiennent qu'exceptionnellement la nappe. Les eaux s'arrêtent vers l'ouest dans la vallée de la Saoura.

1. 2. *PIEZOMETRIE*

D'après la carte de A. Cornet (1948) (fig. 5), la nappe s'écoule dans l'ensemble en direction du sud, dans le sens de la pente des roches réservoirs. Son gradient hydraulique moyen, calculé sur toute son étendue, est de 2,5 pour 1000.

Dans le Gourara et le Méguiden, un axe de drainage apparaît dans la surface piézométrique ; les eaux s'écoulent vers le sud-ouest en direction du Touat.

En passant de la Hamada Sud Oranaise sous le Grand Erg, la pente de la nappe diminue tandis que les courbes piézométriques deviennent sinusoïdales.

Dans la Saoura, H. Schoeller (1945) a montré que la nappe descend du massif carbonifère d'El Khel-la en direction de l'Oued (partie ouest de la carte de A. Cornet).

A la suite de nos missions dans la Saoura, nous avons tracé une nouvelle carte piézométrique de la moitié ouest de la nappe de l'Erg, au 1/500 000 (fig. 5 et pl. II), en nous appuyant sur les feuilles topographiques au 1/200 000 éditées en 1962 et sur les résultats des campagnes de nivellement que nous avons effectuées dans les palmeraies.

Cette carte plus précise ne modifie pas le sens général de l'écoulement, mais le tracé des courbes piézométriques est dans le détail sensiblement différent. Elles se trouvent décalées d'une trentaine de mètres vers le sud et leur inflexion parallèlement à la Saoura, apparaît beaucoup plus marquée, accen-

tuant ainsi le rôle de drain exercé par la vallée. Les sinuosités des courbes près d'Hassi bel Gaa et Hassi Ouin Labbes n'existent pas.

Le drainage de la nappe par la Grande Source de Béni-Abbès n'apparaît pas dans le tracé des isopièzes. La ligne de courant aboutissant à Béni-Abbès passe aux environs d'Hassi Malah (hassi = puits en arabe). Il est curieux de constater qu'Hassi Djedid se trouve sur la ligne de courant aboutissant à El Ouata alors qu'Hassi Fokra se situe sur celle arrivant à Kerzaz ; sur cette ligne de courant la pente moyenne est 1,9 pour 1000. L'influence du drainage de la vallée de l'Oued Saoura s'exerce sur une grande superficie de la nappe. La ligne de courant passant par Hassi Ali, Hassi Souf et Hassi el Bagra marque la limite orientale à partir de laquelle les eaux échappent au drainage de l'Oued Saoura. La région déterminée par cette ligne prolongée jusqu'à Hassi Ouskir, la lisière sud du Djebel el Khella et l'Oued, a une superficie de 13 000 km<sup>2</sup>. Etant donné que d'éventuels apports plus septentrionaux sont incertains, on peut estimer que c'est la superficie minimale drainée par la vallée de la Saoura depuis Igli jusqu'au Foum el Kheneg.

### 1. 3. PROFONDEUR DE LA SURFACE PIEZOMETRIQUE

La profondeur de la surface piézométrique dans les puits peut être lue sur la carte (pl. II), la cote du sol et la cote piézométrique y étant indiquées. Il faut souligner que les puits sont toujours creusés dans le Plio-Villafranchien ou le Quaternaire de gassis particulièrement déprimés. Les sommets de certaines dunes peuvent atteindre 100 à 130 mètres au-dessus de ces creux et il va de soi que ces profondeurs, données par rapport au sol des gassis, ne sont pas applicables à l'étude de certains phénomènes. Sur un profil allant de Hassi Malah à Béni-Abbès, nous avons mesuré une épaisseur moyenne de 33 mètres de sables dunaires, en admettant, ce qui est fréquemment le cas, que le substratum se situait le plus souvent au niveau des creux de dunes (d'où une estimation par défaut).

Dans la zone de la nappe drainée par la Saoura, la profondeur de la surface piézométrique semble être le plus fréquemment de 10 à 20 mètres, spécialement au voisinage de la lisière de l'Erg ou dans la zone voisine de Béni-Abbès.

La profondeur maximale observée est de 28 mètres à Hassi Fokra.

En règle générale, d'après les observations de terrain et les déductions qu'il est possible de faire

à l'aide des cartes topographiques et piézométriques, la profondeur de la surface piézométrique va en décroissant du nord au sud et de l'est vers la vallée de la Saoura. Ainsi, sur le profil d'Hassi Malah à Béni-Abbès, la surface piézométrique doit se rencontrer entre 50 et 70 mètres au sud du Djebel el Khella, par contre au droit de Mazzer puis de Béni-Abbès elle se situe entre 8 et 25 mètres aux points de forage les plus favorables. En bordure même de la Saoura ou dans le sud de l'Erg, elle peut se situer localement à 2 ou 3 mètres.

### 1. 4. RAPPORTS ENTRE LA NAPPE DU GRAND ERG OCCIDENTAL ET LA NAPPE DU CONTINENTAL INTERCALAIRE

La nappe du Continental intercalaire se rencontre sous le Grand Erg Occidental et la Hamada Sud Oranaise où elle est libre. Il est intéressant de comparer sa piézométrie (Ph. Rognon - 1964) à celle de la nappe du Grand Erg Occidental (fig. 5).

Les eaux du Continental intercalaire s'écoulent vers le sud-est dans la partie ouest du Grand Erg. La limite occidentale de la nappe se situe parallèlement à l'Oued Saoura, à une vingtaine de kilomètres de la vallée. Le niveau piézométrique est nettement inférieur à celui de la nappe de l'Erg, ainsi par exemple, de 425 mètres au droit d'Igli, il s'abaisse à 395 mètres au droit de Béni-Abbès et à 325 mètres au droit de Ksabi. Aux mêmes points, le niveau piézométrique de la nappe de l'Erg se situe respectivement 135, 105 et 20 mètres plus haut. L'hypothèse de l'alimentation de la nappe de l'Erg par les eaux du Continental intercalaire est donc écartée, mais au contraire, des pertes de la première au profit de la seconde pourraient se produire. Suivant les auteurs, ces débits d'infiltration sous la Hamada Sud Oranaise et le Grand Erg s'échelonnaient de 0 à 12 m<sup>3</sup>/s ; Ph. Rognon a adopté arbitrairement 4 m<sup>3</sup>/s sur tout l'ensemble de la nappe. Soulignons cependant que ces pertes éventuelles de la nappe de l'Erg n'ont pas été mises en évidence.

La faible minéralisation des eaux du Continental intercalaire (1000 à 2000 mg/l), sous la Hamada Sud Oranaise et l'Erg, tend à étayer l'hypothèse des pertes car ces teneurs seraient dues à l'apport de la nappe de l'Erg, elle-même peu chargée en sels.

### 1. 5. PHYSICO-CHIMIE DES EAUX

Du 20 au 30 décembre 1963, des prélèvements ont été effectués sur la bordure et à l'intérieur du



Grand Erg, d'Igli à El Beïda, soit sur un front de nappe de 100 km. le diagramme logarithmique (fig. 6) présente les résultats d'analyses physico-chimiques des eaux choisies pour leur situation ou pour leur résidu sec qui se sont révélés parmi les plus faibles. Du nord au sud ce sont : Séguet Haboussa d'Igli (N° 205), Source Hemam de Mazzer (N° 214), Gueteub el Ma dans l'Erg (N° 284), Foggara d'Ouarourout (N° 228), Grande Source de Béni-Abbès (N° 181), Hassi Rokna au fond du Golfe de Béni-Abbès (N° 286), Puits de Marhouma (N° 277), Puits du chateau d'eau d'El Ouata (N° 267), Puits d'Anefid (N° 247), Hassi Mayouch d'Aguedal (N° 232).

Les températures de la nappe en décembre peuvent atteindre 26°.

Il faut souligner que ces températures, observées pendant la période la plus froide de l'année, sont supérieures à la moyenne interannuelle des températures de l'air sous l'abri (22,8°) à Béni-Abbès.

Le tableau I mentionne les intervalles de variation et médiane observés de différentes caractéristiques hydrochimiques.

Les résidus secs sont extrêmement faibles pour des eaux de régions aussi arides et des valeurs de 340 mg/l représentent une exception au Sahara.

r s	dh	r Cl	r SO <sub>4</sub>	r CO <sub>3</sub>	rCl-rNa	$\frac{r \text{ SO}_4}{r \text{ Cl}}$	$\frac{r \text{ CO}_3}{r \text{ SO}_4}$	$\frac{r \text{ Mg}}{r \text{ Ca}}$	$\frac{r \text{ Na}}{r \text{ Mg}}$
340	15,6	1,26	0,78	1,73	> 0	0,55	2,25	0,17	3,56
450	22,6	2,24	1,80	2,49	> 0	0,82	1,34	0,38	1,39
605	36,0	3,73	3,43	3,50	< 0	1,27	1,02	0,58	3,56

Tableau I : Intervalles de variation et médiane de différentes caractéristiques chimiques des eaux de la bordure ouest du Grand Erg Occidental.

Les formules caractéristiques se présentent toutes avec  $r \text{ Ca} > r \text{ Na} > r \text{ Mg}$ .

Jusqu'à Béni-Abbès on note  $r \text{ CO}_3 > r \text{ Cl} > r \text{ SO}_4$  sauf pour la foggara d'Ouarourout où l'on a déjà  $r \text{ Cl} > r \text{ CO}_3 > r \text{ SO}_4$ . Au sud de Béni-Abbès les eaux les moins chargées ont ce dernier faciès.

On a aussi toujours

$r (\text{Ca} + \text{Mg}) > r (\text{Na} + \text{K})$  et  $r \text{ CO}_3 > r (\text{Cl}$

+  $\text{SO}_4)$ . Signalons pour Hassi Rokna

$r \text{ CO}_3 > r \text{ SO}_4 > r \text{ Cl}$   $r \text{ Na} > r \text{ Ca} > r \text{ Mg}$

La médiane des différentes caractéristiques chimiques des eaux de la bordure de l'Erg, avant leur écoulement dans les terrasses de la vallée, évolue suivant la latitude du lieu de prélèvement : les résidus secs, les teneurs en alcalino-terreux (donc aussi le dh), et les rapports  $r \text{ Mg}/r \text{ Ca}$  croissent d'amont en aval de la nappe, tandis que les rapports  $r \text{ Na}/r \text{ Mg}$  et  $r \text{ CO}_3/r \text{ SO}_4$  décroissent. Les rapports  $r \text{ SO}_4/r \text{ Cl}$  ne marquent que de faibles oscillations.

Ce sont des eaux de potabilité permanente, de la classe 1 ou 2.

Ces diverses caractéristiques amènent à penser que les pertes par évaporation sont extrêmement réduites, à cause de la profondeur assez élevée des eaux, de la diversité des terrains au-dessus de la zone saturée et en particulier de la forte épaisseur des sables qui créent une protection efficace. L'augmentation des concentrations ioniques se ferait essentiellement par dissolution des sels des terrains traversés.

## 1. 6. BILAN SOMMAIRE

### 1.6.1. PERTES

Les pertes au profit du Continental intercalaire ne sont qu'hypothétiques mais ne peuvent être de toutes façons que très faibles.

L'évaporation de la nappe a dû très vite cesser lors de la baisse du niveau piézométrique, à cause de la diversité des terrains au-dessus de la zone saturée et en particulier des sables dunaires dont une faible épaisseur suffit pour créer une protection efficace. Elle ne peut de nos jours être encore effective qu'en certains points de la bordure de l'Erg, où la surface piézométrique est peu profonde

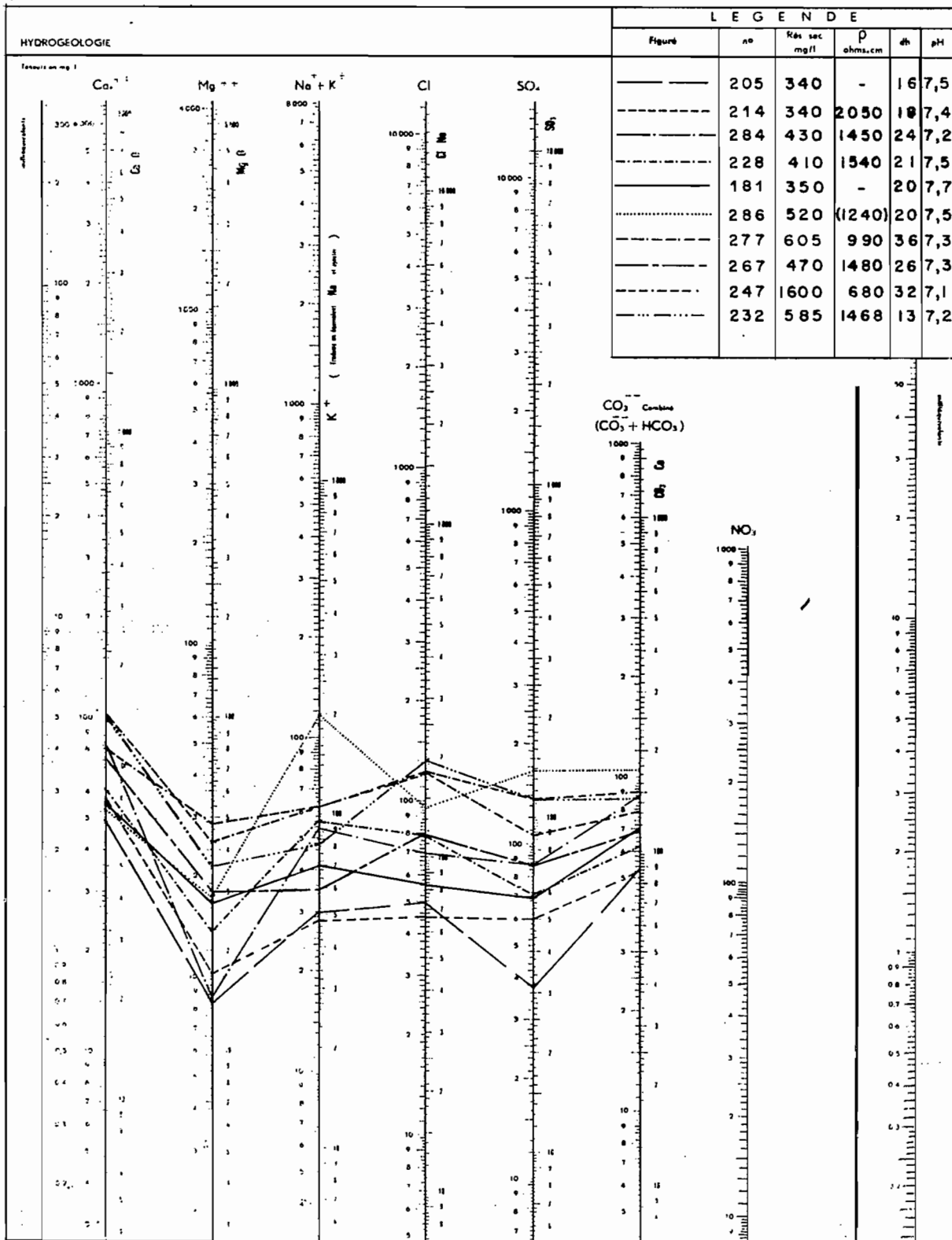


Fig. 6. Diagramme d'analyses d'eaux de la bordure ouest de la nappe du Grand Erg occidental.

mais peut être négligée dans un bilan sommaire des eaux de la nappe. Evidemment il n'en est plus de même dans la vallée de la Saoura où la presque totalité des eaux est consommée par évaporation et évapotranspiration dans les terrasses quaternaires puis dans le lit de l'Oued.

Dans l'étude de la vallée de la Saoura (chapitre suivant), les débits de la nappe dans cette région ont été évalués par différentes méthodes dont des essais de pompage.

— Dans la région d'Igli  $6 \text{ m}^3/\text{h}/\text{km}$  sont exploitées. Le débit total de la nappe a été estimé entre 10 et  $20 \text{ m}^3/\text{h}/\text{km}$ .

— Dans la région de Mazzer  $6 \text{ m}^3/\text{h}/\text{km}$  représentent le débit total des exurgences et du puits d'alimentation en eau. Il semble qu'il faille retenir une valeur de  $12 \text{ m}^3/\text{h}/\text{km}$  pour le débit total de la nappe.

— De Ouarrout à Juiffa, il a été évalué des débits compris entre 10 et  $18 \text{ m}^3/\text{h}/\text{km}$ . Sur l'ensemble du front, situé entre Mazzer et Juiffa, on évalue des débits de 4,3 à  $15 \text{ m}^3/\text{h}/\text{km}$ .

— De Bou Hadid à El Maja, c'est-à-dire dans les palmeraies d'El Ouata, les débits seraient compris entre 25 et  $70 \text{ m}^3/\text{h}/\text{km}$ . Cette dernière valeur semble cependant relativement élevée par rapport aux autres régions.

Nous pensons ainsi pouvoir estimer, principalement en fonction de ces diverses valeurs, un débit moyen de 10 à  $20 \text{ m}^3/\text{h}/\text{km}$  sur l'ensemble du front de la nappe compris entre Igli et El Beïda.

#### 1.6.2. ALIMENTATION

L'alimentation par les oueds septentrionaux n'existe pas car la carte piézométrique montre que cette partie de la nappe est en dehors de la zone d'influence éventuelle. D'autre part, l'infiltration des crues se traduirait probablement par une augmentation de la minéralisation, ce qui n'est pas le cas.

Nous avons vu que l'hypothèse de l'alimentation par des remontées de la nappe du Continental intercalaire était infirmée par les études piézométriques.

La Hamada Sud Oranaise ne semble pas se prolonger sous la zone ouest de l'Erg et les apports en eaux souterraines par les massifs paléozoïques, notamment celui du Djebel el Khella, paraissent difficile à concevoir. Quoiqu'il en soit, ils ne sau-

raient fournir les débits observés. Il est plus délicat, sans une reconnaissance de terrain, de connaître l'hydrogéologie de la région d'Hassi Ouskir où un écoulement éventuel pourrait contribuer à alimenter dans la Saoura le front situé au sud de Guerzim.

La nappe du Grand Erg Occidental débitant dans la Saoura, au moins entre Igli et El Beïda, semble être un système aquifère autonome qui s'alimente ou s'est alimenté par sa propre surface. C'est pourquoi nous étudierons en détails les deux seules possibilités d'alimentation qui peuvent être retenues comme plausibles : l'infiltration des eaux de pluies et un héritage des phases humides quaternaires, en particulier de la dernière phase néolithique.

#### A. ALIMENTATION PAR LES PLUIES

Le processus d'infiltration des eaux météoriques dans les sables a fait l'objet de nombreux travaux dans lesquels on peut trouver des bibliographies détaillées (H. Schoeller - 1962, J. Dervieux - 1957, Cl. Viguier - 1962, R. Degallier - 1964). Il s'est agi d'études ponctuelles sur les dunes et, bien qu'elles tendent à persuader de la réalité de l'infiltration dans certains cas favorables, elles ne fournissent aucun ordre de grandeur du phénomène. C'est ce à quoi nous nous attacherons en prenant le problème sous un autre angle, celui du bilan. Après un bref rappel des caractéristiques physiques et climatiques de l'Erg, la hauteur de la lame d'eau débitée actuellement par la nappe dans la Saoura sera comparée à celle des pluies susceptibles de s'infiltrer.

Nous verrons aussi ce que l'étude des compositions isotopiques apporte au problème.

#### *Caractéristiques physiques du milieu*

Les facteurs qui tendent à favoriser l'infiltration des pluies dans l'Erg sont liés à la nature même des sables, à la morphologie et à la végétation :

— la grosseur des sables (médiane 0,20 mm,

$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}} = 1,4)$$

— l'humidité des sables à faible profondeur

— la protection efficace des sables contre l'évaporation et le transport éolien des sables secs qui viennent recouvrir les sables humides.

— le phénomène de succion et les gradients de température qui font varier le potentiel capillaire.

— l'effet piston

— l'endoréisme extrême de l'Erg qui limite le ruissellement sur de grands parcours ; les eaux tombant sur l'Erg ne peuvent que s'infiltrer ou s'évaporer. Cependant le ruissellement, généralement nuisible à l'infiltration, a ici un effet bénéfique car il peut se réaliser, à la suite de fortes pluies sur de courtes distances telles que sur certains gassis ou pentes de dune et concentre les eaux dans les points bas. Les nomades affirment d'ailleurs qu'il se forme par endroits de véritables mares après les pluies importantes. Il faut aussi souligner que l'Erg recouvre un réseau hydrographique fossile qui peut éventuellement encore fonctionner sur les surfaces découvertes de sables.

— la végétation très clairsemée utilise l'eau en cours d'infiltration seulement par endroits.

#### *Caractéristiques climatiques*

Il existe dans la région un gradient géographique des conditions climatiques, notamment de la pluviosité, avec accentuation du caractère aride vers le sud. A la station de Béni-Abbès, qui présente une situation moyenne par rapport au Grand Erg, les principaux résultats peuvent se résumer ainsi (d'après J. Dubief - 1950, 1963) :

- moyenne annuelle de l'insolation : 9,7 h par jour
- température moyenne annuelle de l'air sous abri : 22,8°, avec un hiver rigoureux
- humidité relative moyenne mensuelle : 18 à 70 %
- nombre de jours moyen annuel de vents : 25
- évaporation Piche moyenne annuelle : 4809 mm

Les pluies sont essentiellement réparties au printemps et à l'automne. Les mois les plus favorables au phénomène d'infiltration sont compris entre octobre et avril. Les valeurs moyennes ont été le plus souvent calculées sur deux périodes :

1926-1950 et 1926-1960 — Hauteurs moyennes annuelles : 32 et 41 mm.

1926-1950 et 1926-1960 — Hauteurs moyennes des mois favorables : 24 et 33 mm.

1926-1950 — Hauteurs moyennes annuelles des pluies supérieures à 5, 10, 20 mm : 18, 12 et 7 mm

1926-1950 — Hauteurs moyennes, pendant les mois favorables, des pluies supérieures à 5, 10, 20 mm : 15, 10 et 6 mm.

1921-1959 — Des valeurs maximales telles que 48,1 mm le 20 mars 1959, 38,5 mm en 25 mn le 26 avril 1943.

1951-1960 — Hauteurs moyennes des pluies supérieures à 5 mm, pendant les mois favorables et dont l'intensité a été supérieure à 2 mm/h : 29 mm.

1925-1950 — Nombre moyen annuel de jours de pluie supérieure à 5 mm : 1,5 jour.

Nombre moyen annuel de jours de pluie > 5mm pendant les mois favorables : 1,2 jour.

Durée moyenne des sécheresses « de 5 mm » : 6,4 mois

Durée maximale observée « de 5 mm » : 3 ans 8 mois, « de 10 mm » : 6 ans 10 mois, « de 20 mm » : 6 ans 10 mois.

#### *Comparaison des hauteurs de pluie et des débits de la nappe*

L'alimentation par les pluies ne peut être de toute façon que très faible compte-tenu des hauteurs moyennes de pluie mais peut-être néanmoins suffisante, vu la lame d'eau débitée.

Un débit moyen de 10 à 20 m<sup>3</sup>/h/km a été estimé sur les 100 km du front de la nappe entre Igli et El Beïda. D'après la carte piézométrique, la superficie drainée serait de 4100 km<sup>2</sup> en prenant pour limite septentrionale la lisière sud du Djebel el Khella. Ce débit représente un volume annuel de 9 à 18. 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> ou une lame d'eau de 2,2 à 4,4 mm répartie sur la superficie drainée. En extrapolant de débit moyen de 10 à 20 m<sup>3</sup>/h/km au 250 km de front de nappe sur la Zousfana et la Saoura, d'El Aouedj au Foug el Kheneg, le volume débité annuellement serait de 22 à 44.10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>, ou 0,7 à 1,4 m<sup>3</sup>/s ou une lame d'eau de 1,7 à 3,4 mm répartie sur 13 000 km<sup>2</sup>.

Nous ne tiendrons pas compte des autres termes du bilan, c'est-à-dire des pertes de la nappe par évaporation, qui ne doivent d'ailleurs être effectives qu'en certains points de bordure et négligeables à l'échelle envisagée, ni d'hypothétiques pertes au profit du Continental intercalaire, ou d'éventuels apports par le Djebel el Khella et la région d'Hassi Ouskir. En admettant donc que seules les pluies alimentent la nappe, il est possible d'estimer

les coefficients d'infiltration théoriques, nécessaires pour suffire aux débits.

Pour une pluviométrie moyenne annuelle de 41 mm (Béni-Abbès a une situation moyenne par rapport à la zone considérée) et une lame d'eau débitée de 2 à 4 mm, il faudrait donc un coefficient d'infiltration de 5 à 10 %. En choisissant arbitrairement des conditions beaucoup plus sévères, telles que seules les pluies supérieures à 20 mm et tombant d'octobre à avril, soit 6 mm, puissent s'infiltrer, il faudrait des coefficients d'infiltration de 37 à 74 %.

Ces quelques calculs ne peuvent fournir que des ordres de grandeurs et prétendent seulement montrer que les chiffres avancés sont suffisamment compatibles pour que l'infiltration des pluies puisse être réelle. Ceci probablement entre octobre et avril et plus particulièrement dans les zones basses de l'Erg et sur sa bordure où la nappe est moins profonde.

#### Compositions isotopiques des eaux

— Oxygène  $^{18}\text{O}$  et  $^{16}\text{O}$

Les rapports isotopiques ont été mesurés sur des eaux prélevées d'Igli à Aguedal, sur le front de la nappe (G. Conrad, J. Ch. Fontes, R. Letolle et M.A. Roche - 1965). Les résultats sont présentés

dans le tableau II.

Les valeurs, très homogènes, s'échelonnent de  $\delta^{18}\text{O} = -3,6$  à  $-4,7$  ‰. Les eaux d'El Berda peu profondes, ont déjà subi une évaporation ( $\delta^{18}\text{O} = -3,1$  ‰). La moyenne est  $-4,0$  ‰. La nappe de l'Erg se trouve caractérisée par sa composition isotopique de l'oxygène et se distingue nettement de celle des autres nappes de la région. Sur deux mois d'observation, les variations de la Source de la Grande Dune (N° 151) ne sont pas décelables, celles de la Grande Source (N° 181), sur une période de 8 mois, requièrent des analyses supplémentaires pour l'interprétation.

D'octobre 1963 à novembre 1964, à Béni-Abbès, deux pluies de 1 mm sont tombées en janvier 1964 ( $\delta^{18}\text{O} = -4,1$  ‰), une troisième de 0,6 mm en septembre 1964 ( $\delta^{18}\text{O} = +4,2$  ‰). Malgré les précautions que nous avons prises à l'échantillonnage, la précipitation de septembre, faible, isolée et à caractère orageux, ne doit pas être significative. La valeur d'hiver est en accord avec la latitude ( $30^\circ\text{N}$ ) et l'époque de la précipitation. Les deux valeurs correspondent de façon satisfaisante avec les températures moyennes mensuelles à l'époque considérée. D'après W. Dansgard (1964)  $\delta^{18}\text{O} = 0,7 t - 13,6$ ; dans cette équation,  $\delta^{18}\text{O}$  ‰ est la composition isotopique et  $t$  la température au sol en degré centigrade. On trouve ainsi :

Localité	Date	$\theta$ eau	Niveau dynamique ou débit	r s (mg/l)	$^{18}\text{O}$ (‰) SMOW
Igli : Séguet Haboussa N° 205	2. 9.64	26° 4	0,59 l/s	340	- 4,2
Igli : El Berda N° 293	25.10.64		0,50 m		- 3,1
Mazzer : Aïn Hemam N° 214	1. 9.64	25° 7	0,65 l/s	340	- 3,8
Erg : Gueteub el Ma N° 284	25.12.63	$\approx 25^\circ$	21 m		- 4,2
Béni-Abbès : Source de la Grande Dune N° 151	31. 8.64 14. 9.64 6.10.64	26-38°	0,24 l/s	$\approx 380$	- 3,9 - 3,7 - 3,7
Béni-Abbès : Grande Source N° 181	31. 1.64 14. 9.64 19. 9.64	26°  27° 9	28,5 l/s	350	- 3,8 - 4,6 - 4,8 - 4,8
Béni-Abbès : Foggara C.N.R.S. N° 124	31. 8.64	26° 6	0,04 l/s	$\approx 600$	- 3,6
Béni-Abbès : Foggara N° 143	31. 8.64	24° 2	0,21 l/s	680	
Aguedal : Hassi Mayouch N° 132	3. 9.64	$\approx 25^\circ$	3,90 m	$\approx 600$	- 4,2

Tableau II : Résultats d'analyses des compositions isotopiques de l'oxygène des eaux de la nappe du Grand Erg Occidental.

t janvier = 13,6° (moyenne de janvier = 11,0°)  
 t septembre = 27,7° (moyenne de septembre = 30,1°), étant bien entendu que la température isotopique apparente ne concerne que le temps de la pluie et compte tenu de la restriction citée plus haut sur la valeur significative de l'échantillon de septembre ; le rapprochement est néanmoins intéressant.

Le manque relatif d'échantillons de précipitation ne permet pas de conclure définitivement. Cependant il apparaît que la valeur moyenne (— 4,0 ‰) des eaux de la nappe est en bon accord avec celle de la pluie d'hiver (— 4,1 ‰). Les pluies d'été n'alimenteraient pas la nappe phréatique.

#### — Tritium

La teneur en tritium des eaux de la Grande Source de Béni-Abbès, prélevées en septembre 1964, est inférieure à 20 TU (1), alors que la pluie du 6 septembre 1964 contenait par exemple 906 ± 30 TU. On serait tenté de conclure que l'alimentation par les eaux de pluie n'a pas eu lieu pendant les dix dernières années précédant le prélèvement. Bien qu'il puisse en être ainsi, sans controverser l'hypothèse de l'alimentation actuelle par les pluies, il convient cependant de nuancer une telle affirmation. En effet, si quelques pluies tombées ces dix dernières années s'étaient infiltrées jusqu'à la surface piézométrique, l'augmentation de la teneur globale en tritium de l'énorme quantité d'eau que représente la nappe n'aurait été que très faible. D'autre part, il faut penser que le temps d'infiltration des eaux de pluie jusqu'à la nappe, puis d'écoulement de ces zones d'infiltration jusqu'aux exurgences, peut être supérieur à dix ans.

En même temps que la poursuite de ces études par des analyses périodiques, il serait nécessaire de doser le carbone 14 qui détient peut-être la véritable clé du problème.

#### B. HERITAGE DES PHASES HUMIDES QUATERNAIRES

Sur l'ensemble du Sahara, les études géologiques récentes, appuyées par des datations au <sup>14</sup>C, ont permis de préciser la paléogéographie des derniers millénaires.

G. Conrad (1965-1968) signale au Sahara Nord Occidental, en particulier dans le Grand Erg, la vallée de la Saoura, l'Erg Chech et la région de Bir

el Moktar — Rezeg Allah, des sédiments lacustres (sols noirs et marnes blanches, à industrie néolithique) datés entre 6 500 et 4 000 ans B.P. Ce sont là des témoins de l'Humide néolithique. Cette période avait été séparée du Dernier Pluvial Saharien (plus de 40 000 à 14 000 ans B.P.) par plusieurs millénaires à climat plus aride.

Des sédiments lacustres holocènes ont d'ailleurs été aussi reconnus dans le Grand Erg Oriental par P. Bellair ; au sud-ouest d'In Guezam par C. Arambourg ; dans le Ténééré (5130 ± 300 ans B.P.) par H. Hugot. H. Faure (1965), avec plusieurs âges absolus, met également en évidence cette phase néolithique humide entre 5500 et 3500 ans, qui, séparée de l'époque des grands lacs (22.000 à 7.500 ans) par une période aride de 7.000 à 5.500 ans, ne représenterait qu'une récurrence ou une persistance humide vers l'assèchement général. D'après H. Faure, les nappes actuelles du Ténééré continueraient ainsi de nos jours à éliminer lentement des eaux accumulées au cours de ces périodes.

Un calcul simplifié permet d'estimer le rabattement actuel de la nappe et de juger de la vraisemblance d'un tarissement débuté à la fin du néolithique en comparant la valeur obtenue aux profondeurs de la surface piézométrique. S'il n'y avait pas de réalimentation, le débit de la nappe et le rabattement du niveau piézométrique tendraient à diminuer avec le temps suivant la loi de tarissement :

$$Q = Q_0 e^{-\alpha t}$$

Avec un débit de 10 m<sup>3</sup>/h/km et un coefficient d'emmagasinement compris entre 5 et 30 % (Cette dernière valeur paraissant d'ailleurs très forte), on calcule des rabattements actuels de 44 à 7 mm par an, répartis sur l'ensemble des 4100 km<sup>2</sup> considérés. Pour un débit de 20 m<sup>3</sup>/h/km on obtient 88 et 13 mm. La plus faible de ces valeurs, avec 10 m<sup>3</sup>/h/km et 30 % est de 7 mm soit 7 m pour 1000 ans, ce qui semble déjà très élevé puisque cette valeur actuelle n'aurait fait que décroître depuis environ 4000 ans jusqu'à nos jours suivant une loi exponentielle et que les profondeurs de la surface piézométrique sont généralement inférieures à une trentaine de mètres. Rappelons toutefois qu'au sud d'Hassi Malah les eaux doivent se rencontrer entre 50 et 70 mètres.

Sur une période de 13 mois, faisant suite à 4 années sans pluies importantes, nous n'avons observé sur la bordure ouest de la nappe que des variations positives ou négatives inférieures à 0,15 mètre

(1) 1 TU correspond à 1 atome <sup>3</sup>H pour 10<sup>18</sup> atomes <sup>1</sup>H

et des fluctuations du débit des sources non significatives. Ainsi apparaît l'importance des réserves de la nappe.

Ces valeurs de tarissement évaluées précédemment, bien qu'un peu fortes, n'infirmement pas l'hypothèse de l'héritage néolithique des eaux. En fait, si les derniers sédiments lacustres sont datés de 4 milliers d'années, la nappe a continué à être alimentée par les pluies bien après la phase humide proprement dite. Il est en effet probable que le climat n'est pas devenu désertique avec une pluviométrie régulièrement décroissante. Des petites fluctuations climatiques, telles que C.E.P. Brooks (1950) en mentionne dans diverses régions de l'hémisphère nord, ont dû se produire au Sahara ces quatre derniers millénaires. On est ainsi amené à penser qu'au cours de cette dernière période, avec une tendance moyenne vers l'aridité, se sont succédées des séries d'années ou de siècles plus humides ou plus arides qu'actuellement.

*En conclusion* nous pensons que la nappe est

héritée des phases humides quaternaires, la dernière étant celle du Néolithique au cours de laquelle les eaux affleuraient dans bien des gassis pour former de nombreux petits lacs interdunaires. La nappe avait ainsi fait le plein. Cependant l'alimentation par les pluies ne s'est pas arrêtée totalement à la disparition de ces eaux de surface. Elle a dû par la suite s'effectuer avec plus ou moins d'importance suivant les fluctuations pluviométriques mais cependant avec une tendance moyenne à décroître jusqu'à nos jours. Actuellement, une alimentation par les pluies est encore effective mais accidentelle dans le temps (à la suite d'années très pluvieuses et à pluies individuelles fortes) et l'espace (spécialement dans les creux de dunes et de gassis).

Ceci a permis de freiner le tarissement des ressources. Cette alimentation par les pluies, bien que globalement décroissante dans le temps, est allée aussi de pair avec la décroissance naturelle du débit de tarissement. D'après les évaluations précédentes, ce double « freinage » pourrait expliquer à lui seul les caractéristiques actuelles de la nappe.

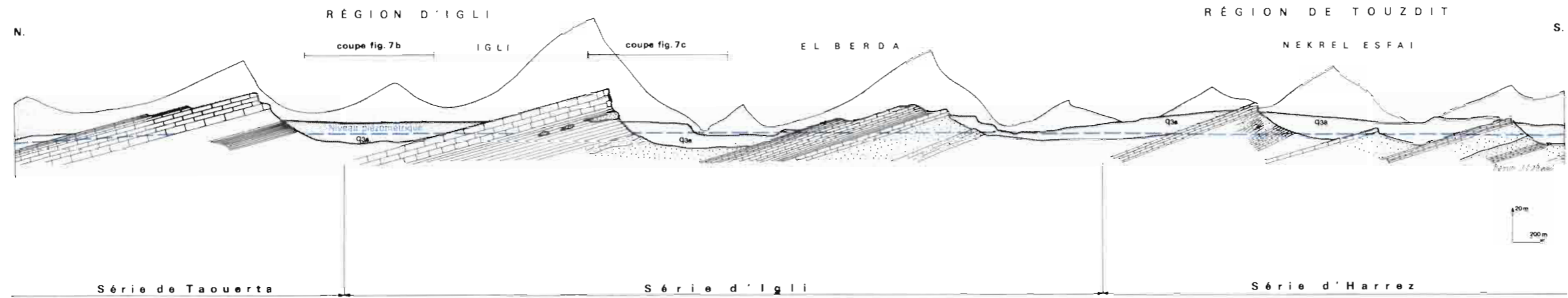


Fig. 7a : Condition de gisement de la nappe de l'Erg dans les terrains du sommet du Viséen supérieur et le Quaternaire (Saourien et sables dunaires) suivant une coupe parallèle à la lisière de l'Erg dans la région d'Igli et de Touzdit. (Séries primaires d'après Cl. PAREYN - 1962).

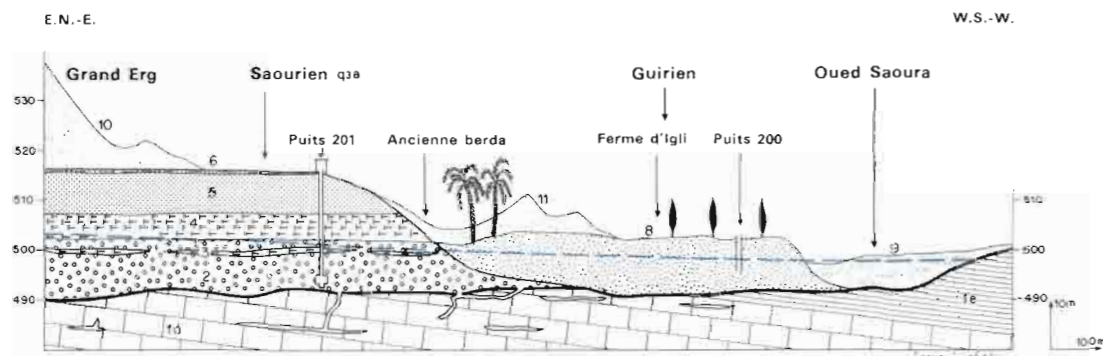


Fig. 7b : Coupe hydrogéologique, transversale à la vallée de la Saoura, passant par les puits de la ferme d'Igli.

- 1d : calcaires du Viséen supérieur.
- 1e : schistes du Viséen supérieur.
- 2 : Poudingues calcaires à encroûtements calcaires (Villafranchien supérieur).
- 3 et 4 : Calcaire marneux et sableux (Villafranchien supérieur?).
- 5 : Sables gris-blanc fins (Saourien).
- 6 : Marnes sableuses blanches (Saourien ou Guirien).
- 8 : Sables bistres avec passées d'argiles et de graviers (Guirien).
- 9 : Sables thixotropiques.
- 10 : Dune du Grand Erg.
- 11 : Dunes blanches.

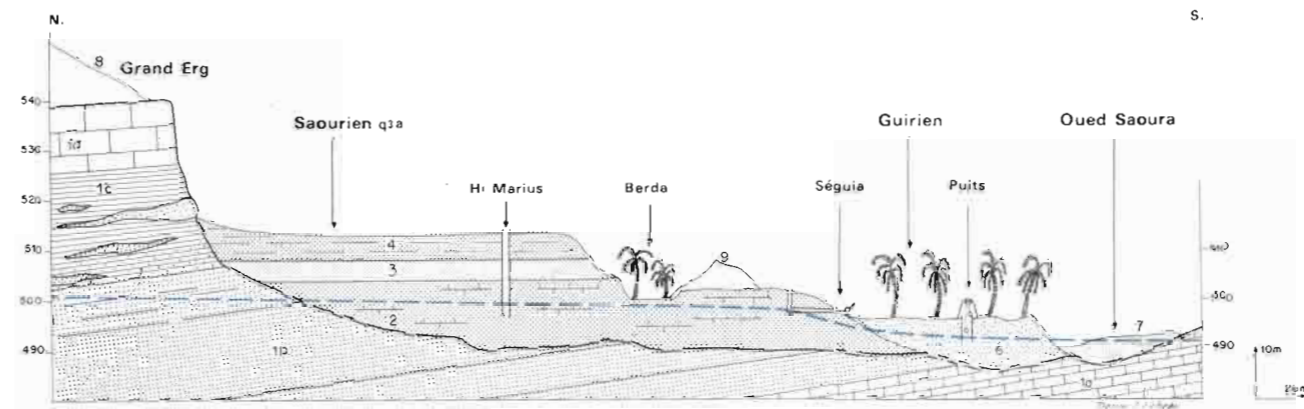


Fig. 7c : Coupe hydrogéologique, transversale à la vallée de la Saoura, passant par la séguia Haboussa d'Igli.

- 1 a - 1 d : Calcaire, grès et schistes (Viséen supérieur).
- 2 - 4 : Sables gris et jaunes à passées marneuses (Saourien).
- 6 : Sables bistres (Guirien).
- 7 : Sables thixotropiques.
- 8 : Dunes du Grand Erg.
- 9 : Dunes blanches.

## HYDROGEOLOGIE DE LA VALLEE DE LA SAOURA

## 2.1. REGION D'IGLI ET TOUZDIT

Dans la région d'Igli et Touzdit (pl. I), la nappe de l'Erg apparaît en étroite relation avec les terrains paléozoïques et quaternaires que recouvrent les dunes. Il n'y a pas de hamada visible en rive gauche.

L'étude a été limitée immédiatement au nord d'Igli, mais le long de la Zousfana et dans les régions nord-ouest du Grand-Erg, la nappe doit se rencontrer fréquemment en position géologique analogue.

## 2. 1. 1. CONDITIONS DE GISEMENT DE LA NAPPE

Le Viséen supérieur forme le soubassement de la région. Il est représenté par les séries d'Harrez, d'Igli et Taouerta, composées essentiellement de schistes, de grès et de calcaires (cl. Pareyn - 1962).

Les vallées creusées dans les assises monoclinales de pendage 10 à 15° N, ont été comblées par les dépôts sableux du Saourien (fig. 7a). Seules les crêtes les plus élevées émergent de ces dépôts. Ces vallées s'allongent ainsi perpendiculairement à la lisière nord-sud de l'Erg qui ennoie rapidement le tout à l'est.

Sous les dunes, à une distance indéterminable, la hamada doit succéder au Saourien et recouvrir les reliefs du Paléozoïque comme cela s'observe dans le nord du Golfe de Mazzer.

En bordure de l'Oued Saoura, le Primaire a été plus érodé au Quaternaire ancien et moyen et se trouve très souvent complètement enseveli par les dépôts saouriens qui forment une terrasse continue.

Entre la crête Ali ou Abou et celle d'Igli, emboîtée dans le Saourien, la terrasse guirienne dessine un large golfe. Plus au sud, elle se réduit à une mince bande en bordure du lit actuel de l'Oued. Les palmiers s'étendent sur cette basse terrasse jusqu'au sud de Touzdit.

Le puits N° 201 de la ferme expérimentale est creusé en bordure de l'Erg dans les terrains quater-

naires (fig. 7b). A la base, reposant directement sur les calcaires d'Igli (1 d) où s'observent des boyaux de dissolution, on rencontre des poudingues (2) à éléments calcaires soudés entre eux par des encroûtements calcaires dus à la circulation des eaux de la nappe. Ce poudingue, à grande perméabilité, passe vers le haut à un calcaire marneux et sableux (3 et 4). Nous n'avons rencontré, nulle part dans la Saoura, ce faciès calcaire qui est probablement à rattacher à la base du Villafranchien supérieur. L'épaisseur de cet ensemble doit être d'environ une quinzaine de mètres. Le sommet de la terrasse est formé d'une dizaine de mètres de sables saouriens gris blanc fins (5), protégés par 0,5 à 1 mètre de marnes blanches sableuses (6) à rattacher soit au Saourien soit au Guirien. La terrasse guirienne, dans laquelle est creusé le puits N° 200, est formée de sables bistres (8) plus ou moins riches en graviers et en minces passées argileuses.

Les alluvions de l'Oued sont sableuses, thixotropiques par endroits. Enfin les dunes du Grand Erg Occidental (10) se distinguent par leur couleur des petites dunes blanches (11) qui recouvrent localement le Guirien.

La coupe de la figure 7c montre une disposition d'ensemble analogue. Sur le Paléozoïque (1a — 1d) reposent des sables gris et jaunes saouriens (2 — 4) à passées marneuses. La terrasse guirienne (6), les alluvions actuelles de l'Oued (7), les dunes blanches (9) et celles du Grand Erg, sont semblables à celles de la coupe précédente.

Les puits sont creusés soit dans le Guirien, soit dans le Saourien, mais aucun dans le Paléozoïque (fig. 13 et 14). C'est là une remarque générale à l'ensemble de la Saoura et non spécifique à la région d'Igli.

Si l'eau apparaît dans les dépôts quaternaires des vallées fossiles et dans les sables dunaires, l'ensemble des terrains carbonifères ne jouent pas toujours le rôle d'imperméable. En effet, la plupart de ces roches, exceptés les schistes peuvent laisser

circuler l'eau et l'absence de puits s'explique par la difficulté du fonçage. Il faut concevoir la nappe de l'Erg généralisée à l'ensemble des terrains paléozoïques perméables et des dépôts quaternaires (fig. 7a).

Certains bancs de grès tendres du Viséen et les dépôts quaternaires constituent vraisemblablement des zones d'écoulement préférentiel de la nappe, mais il est difficile d'être plus précis. C'est pourquoi nous avons seulement représenté sur le profil hydrogéologique perpendiculaire au sens d'écoulement vers l'Oued (fig. 7a), une surface piézométrique « moyenne » à faible gradient hydraulique vers le sud.

Ce Paléozoïque montre parfois les traces de circulation ancienne d'eaux. Des boyaux de dissolution, pouvant atteindre quelques centimètres de diamètres, s'observent dans les calcaires d'Igli et communiquent avec les poudingues de la base de la terrasse quaternaire. Il est probable que ces calcaires compacts ne laissent plus circuler l'eau dès une certaine profondeur, leur perméabilité en grand disparaissant. Au contraire les assises gréseuses à perméabilité en petit doivent donner naissance à des nappes sous le bassin d'Abadla.

#### 2.1.2. PROFONDEUR DE LA SURFACE PIEZOMETRIQUE

Dans le Saourien de Touzdit, où n'existe qu'un seul palier, la surface piézométrique se situe à moins de 7 m par rapport au sol.

Aux alentours d'Igli, la nappe y est plus profonde. Le « Puits de l'Erg » de la ferme (N° 201) rencontre la nappe à 13,5 m et l'abaisse à 22 m pour un débit de 15 m<sup>3</sup>/h, Hassi Marius la rencontre à la même profondeur (fig. 7b et 7c).

Dans la zone de la Séguet Haboussa, deux paliers s'étagent sur le Saourien. Sur le plus bas, des berdas rencontrent la nappe à 4 m.

A el Berda, à l'intérieur de l'Erg, l'eau apparaît dans le fond des trous cultivés (berdas) qui ne dépassent pas 3 m par rapport aux creux des dunes. Dans le plus vaste l'eau est à moins de 0,50 m, dans les sables verts saouriens.

Dans le Guirien la surface piézométrique se situe entre 3 et 5 m.

#### 2.1.3. PIEZOMETRIE — VARIATIONS DU NIVEAU PIEZOMETRIQUE ET DES DEBITS

A la lisière de l'Erg, dans le Saourien, le niveau piézométrique de la nappe domine de plusieurs mètres l'inféro-flux de l'Oued Saoura (fig. 7b et 7c). Il apparaît que le niveau piézométrique s'abaisse rapidement de l'Erg vers l'Oued. Les palmeraies établies sur les terrasses quaternaires vivent grâce à la nappe de l'Erg qui s'écoule en partie à travers ces dépôts.

En période d'étiage de l'Oued Saoura, la nappe se déverse dans l'inféro-flux qu'elle contribue à alimenter. Les eaux s'écoulent alors vers le sud, dans les alluvions actuelles de l'Oued. En période de crue, elles tendent à s'équilibrer avec le niveau de l'eau dans l'Oued. Le niveau piézométrique de la Saoura détermine donc le niveau de base de la nappe.

Les variations du niveau piézométrique et des débits sont de faible amplitude. En dehors des périodes de crue et suivant les saisons, le niveau de base de la nappe varie seulement de quelques dizaines de centimètres. Le niveau d'alimentation, c'est-à-dire le niveau piézométrique dans l'Erg, ne semble pas subir de plus grandes fluctuations.

Deux séries de mesures ont été faites à deux dates différentes. La première correspond au milieu de l'hiver, la seconde à la fin de l'été. Le tableau ci-dessous en présente les résultats. Ces variations sont extrêmement faibles et ne permettent pas d'interprétations. Le débit des séguias et foggaras dépend d'autre part beaucoup de leur état d'entretien.

N°	Profondeur du niveau piézométrique ou débit		Variations
	20.12.63	25.10.64	du 20.12.63 au 25.10.64
204	6,60 m.	6,90 m.	— 0,30 m
208	6,60 m.	6,61 m.	— 0,01 m
209	6,62 m.	6,63 m.	— 0,01 m
210	7,48 m.	7,37 m.	+ 0,11 m
205	0,10 l/s	0,05 l/s	— 0,05 l/s

2.1.4. HYDRODYNAMIQUE DE LA NAPPE

A. ESSAIS DE DEBITS

*Puits n° 209 de Touzdit (terrasse saourienne)*

C'est un puits incomplet, à parois latérales étanches, ouvert à la base (se reporter au § « Méthodes d'étude » pour l'introduction théorique). L'essai de pompage a duré 48 h pendant lesquelles 7 paliers ont été approchés. La courbe spécifique (fig. 8) permet de déterminer un débit spécifique de 5,5 m<sup>3</sup>/h/m. Au début de l'essai, en régime de non-équilibre, les points représentatifs du rabattement spécifique en fonction du logarithme du temps (fig. 9) définissent une droite qui à son extrémité satisfait

à la condition limite  $t > \frac{25r^2}{T}$  avec  $c = 315$  et

permet d'évaluer une transmissivité  $T = 6.10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s. Le dernier segment de droite de la courbe de remontée (fig. 10) satisfait à la condition

$t' > \frac{25r'^2}{T}$  et permet de calculer, avec  $c = 0,17$ ,

une transmissivité  $T = 18.10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s.

La valeur de la transmissivité serait ainsi comprise entre  $6.10^{-4}$  et  $18.10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s.

*Puits n° 200 de la ferme expérimentale (terrasse guirienne).*

Le puits est du même type que le précédent. L'essai s'est déroulé avec un débit de 27 m<sup>3</sup>/h pendant 4h. Compte tenu des conditions restrictives, le graphique rabattement-logarithme du temps (fig. 11) fournit une valeur de transmissivité de  $20.10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s pour  $c = 0,07$  et celui de remontée (fig. 12) une valeur de  $7.10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s pour  $c = 0,21$ .

B. DEBITS EXPLOITES

Une estimation des débits exploités à Igli, sur un front de 5 km, peut se présenter ainsi :

- Puits n° 201 de la ferme expérimentale : 15 m<sup>3</sup>/h
- Hassi Marius : 3 m<sup>3</sup>/h
- Hassi Lafont : 1 m<sup>3</sup>/h
- Puits n° 203 du chateau d'eau de la Mairie : 4 m<sup>3</sup>/h
- Séguet Haboussa : 0,35 m<sup>3</sup>/h
- Une centaine de puits dans la palmeraie, à 5 m<sup>3</sup>/j en moyenne : 20 m<sup>3</sup>/h

Soit un total de 45 m<sup>3</sup>/h qui représente 93 m<sup>3</sup>/h/km.

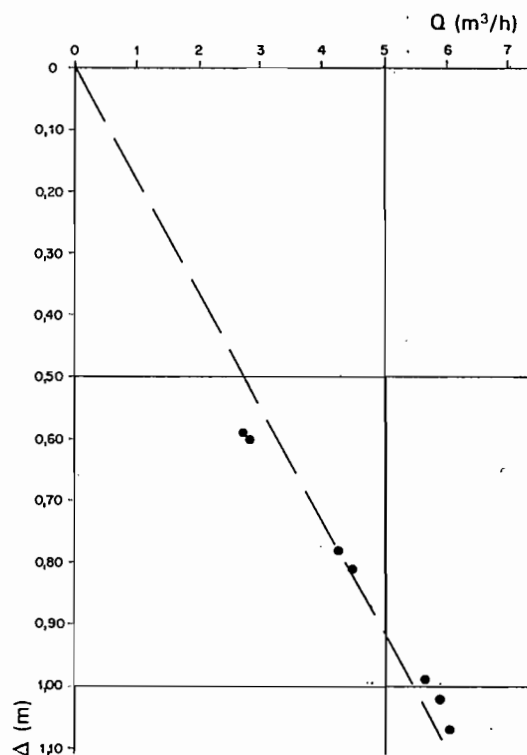


Fig. 8. Puits 209. Courbe caractéristique.

A cela il faudra ajouter les débits exploités aux puits n° 208, 209 et 210 de Touzdit, ce qui portera le débit total exploité dans le Saourien aux environs de 60 m<sup>3</sup>/h sur un front de 10 km soit 6 m<sup>3</sup>/h/km.

C. DEBITS DE LA NAPPE, D'IGLI A TOUZDIT.

Le débit unitaire d'une nappe en régime permanent est donné par la formule  $q = LT i$ , pour laquelle  $L$  est la longueur du front considéré,  $T$  la transmissivité et  $i$  le gradient hydraulique. L'examen de la surface piézométrique (pl. II) semble autoriser l'emploi de cette formule.

Pour 1 km de front aux environs du puits n° 209 de Touzdit, le débit de la nappe de l'Erg dans le Saourien peut ainsi être estimé :  
 Pour  $T = 6.10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s il vient  $q = 3.10^{-3}$  m<sup>3</sup>/s/km = 11 m<sup>3</sup>/h/km.

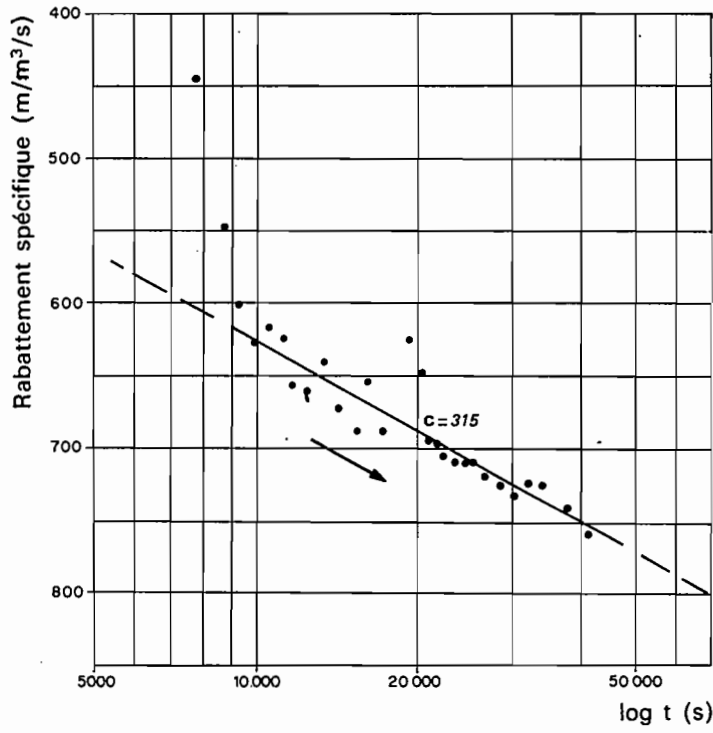


Fig. 9. Puits 209. Droite rabattement spécifique - logarithme du temps.

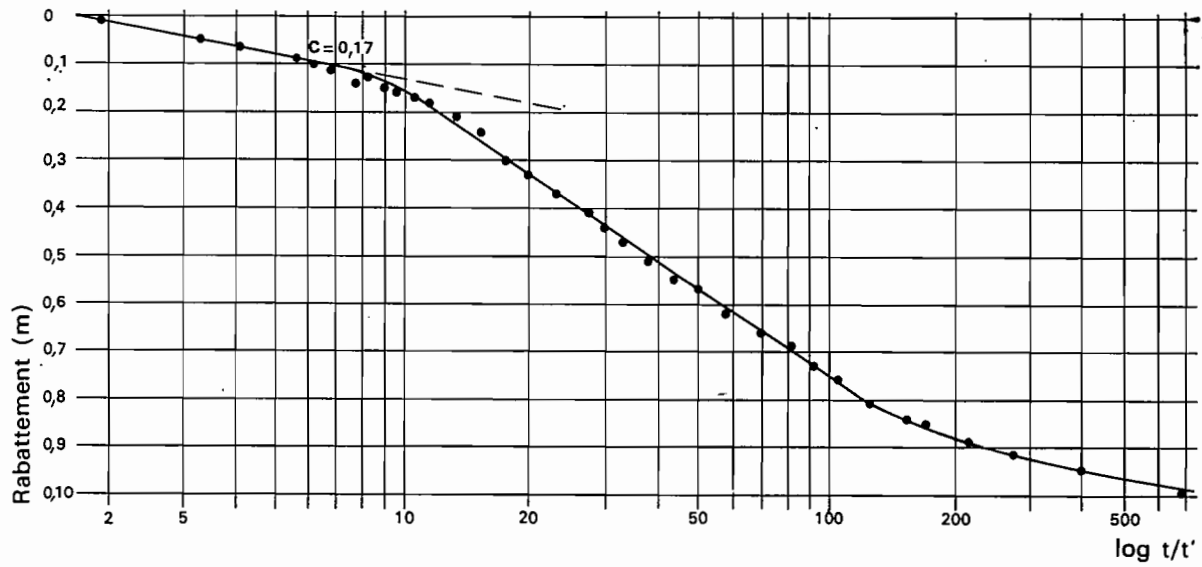


Fig. 10. Puits 209. Courbe de remontée.

Pour  $T = 20 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$  il vient  $q = 9 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}/\text{km} = 32 \text{ m}^3/\text{h}/\text{km}$ .

Le débit exploité, évalué dans le paragraphe ci-dessus, représente le débit minimal de la nappe. Il faut considérer en effet qu'une grande partie des eaux échappe à l'exploitation pour être par la suite utilisée directement par la végétation ou s'évaporer là où le niveau piézométrique est proche de la surface du sol et enfin qu'une part non négligeable utilise les assises perméables du Paléozoïque pour gagner les sables actuels de l'Oued Saoura. En contrepartie les couches imperméables du Paléozoïque diminuent la section « utile » du front de nappe (cf. fig. 7a).

A la suite de ces divers calculs et considérations, nous pensons finalement pouvoir avancer sans gros risques d'erreur, un débit moyen de la nappe de l'Erg dans cette région compris entre 10 et 20  $\text{m}^3/\text{h}/\text{km}$  à la lisière des dunes.

2. 1. 5. PHYSICO-CHEMIE DES EAUX

A. DIFFERENTES CATEGORIES D'EAUX.

12 eaux, prélevées le 20 décembre 1963, d'Igli à Touzdit, ont été classées en trois catégories d'après leurs caractères physico-chimiques :

- a) les eaux typiques de l'Erg, prélevées dans le Saourien et le Guirien en bordure des dunes.

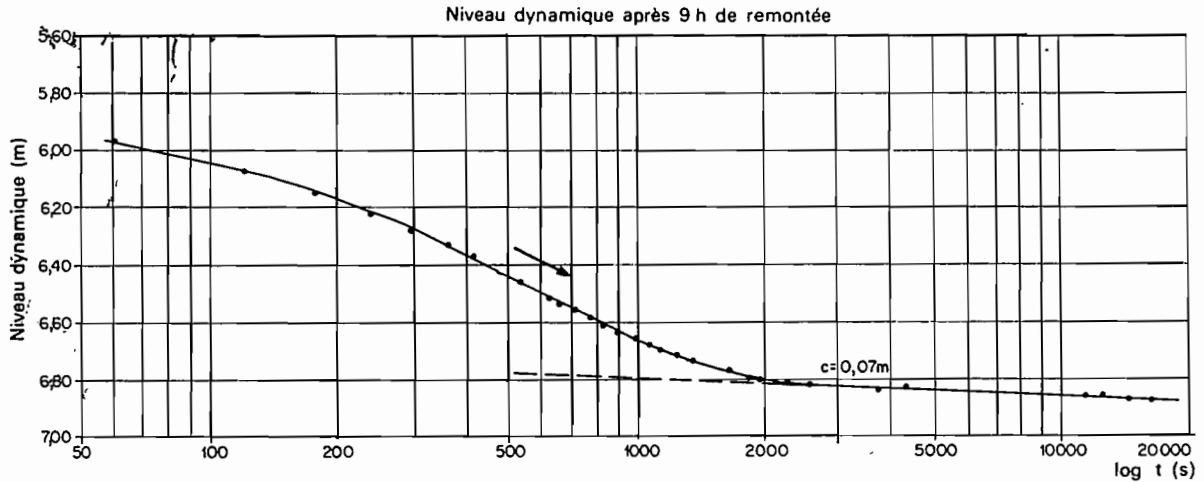


Fig. 11. Puits 200. Droite rabattement - logarithme de temps.

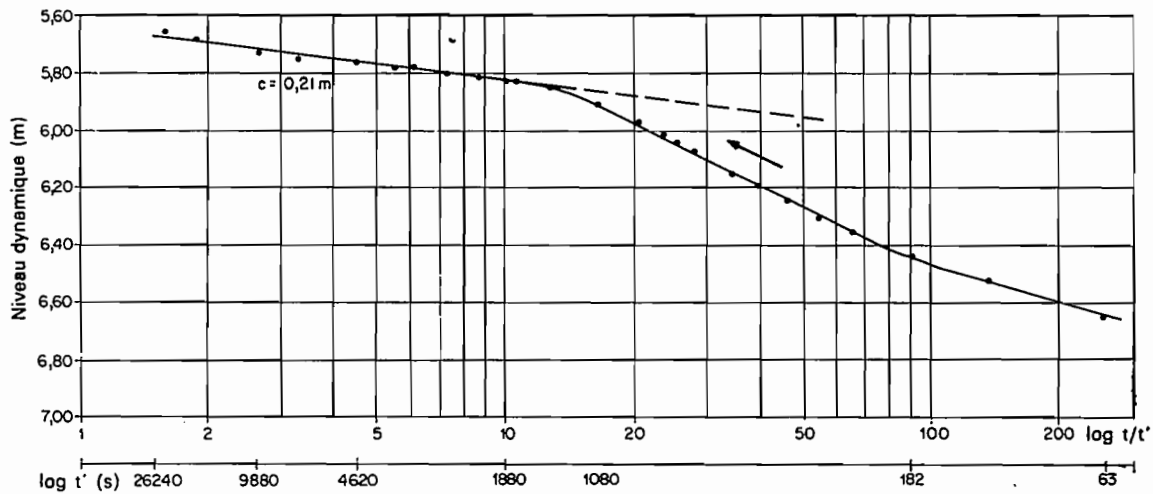


Fig. 12. Puits 200. Courbe de remontée.

b) les eaux à caractères physico-chimiques évolués, intermédiaires à ceux des eaux de l'Erg et de l'Oued, à la suite de leur écoulement dans le Saourien et le Guirien à l'extérieur de l'Erg.

c) les eaux de l'Oued, prélevées dans le lit mineur et exceptionnellement dans le Guirien.

Le diagramme logarithmique (fig. 13) présente ces résultats d'analyses. Le tableau III indique pour ces trois catégories, la médiane et les intervalles de variation observés de différentes caractéristiques hydrochimiques.

a) *Les eaux typiques de l'Erg.*

Ce sont les eaux choisies parmi les moins chargées et les plus représentatives de la nappe de l'Erg.

Les températures maximales sont de 24°.

Les résidus secs ne dépassent guère 500 mg/l. C'est à Igli que l'on trouve les eaux les moins chargées de la région étudiée et certainement de toute la Saoura. L'eau de la Séguet Haboussa, avec un résidu sec de 340 mg/l et une teneur totale en ions de

8,35 me/l, est la plus douce qui ait été rencontrée.

Par rapport aux eaux des régions plus méridionales, celles d'Igli et de Touzdit présentent des caractères extrêmes :

- Concentrations totales en sels les plus faibles
- Teneurs en SO<sub>4</sub> les plus faibles
- Teneurs en CO<sub>3</sub> les plus faibles
- r CO<sub>3</sub>/r SO<sub>4</sub> les plus élevés
- r Mg/r Ca les plus faibles
- r Na/ r Mg les plus élevés

Ces eaux ne semblent avoir subi qu'une faible évolution chimique.

Les formules caractéristiques sont :

r CO<sub>3</sub> > r Cl > r SO<sub>4</sub>      r Ca > r Na > r Mg  
évaluant vers

r Cl > r CO<sub>3</sub> > r SO<sub>4</sub>      r Ca > r Na > r Mg

Les limites de variation et la médiane de différents rapports sont indiquées dans le tableau III. La potabilité est permanente, de la classe 1.

	r s	dh	r Cl	r SO <sub>4</sub>	r CO <sub>3</sub>	rCl-rNa	r SO <sub>4</sub>	r CO <sub>3</sub>	r Mg	r Na
							r Cl	r SO <sub>4</sub>	r Ca	r Mg
Eaux de l'Erg (4 échantillons)	340	15,6	1,40	0,78	1,76		0,76	3,07	0,20	1,90
	440	23	1,94	1,24	2,47	> 0	0,63	2,25	0,27	2,03
	510	26	2,21	1,68	3,36		0,55	1,16	0,28	2,39
Eaux évoluées (6 échantillons)	540	26	3,74	1,90	2,85	> 0	0,81	0,75	0,26	1,90
	1030	51	8,93	6,37	1,95	> 0	0,69	0,40	0,35	2,35
	2080	176	32,61	14,30	0,58	< 0	0,44	0,05	0,65	3,65
Eaux de l'Oued (2 échantillons)	6900	249	65,5	39,2	1,61		0,60	0,13	0,96	2,36
	7985	263	90	39,2	2,84	> 0	0,48	0,09	1,06	2,72
	9070	276	113	39,2	4,06		0,35	0,04	1,15	3,07

Tableau III : Intervalles de variation et médiane de différentes caractéristiques de la nappe à Igli et Touzdit.

b) *Les eaux à caractères physico-chimiques évolués.*

Les compositions chimiques de ces eaux évoluent avec leur concentration totale en sels et représentent tous les jalons entre les eaux de l'Erg et celles de l'Oued. Le diagramme logarithmique met cette évolution en évidence. Elle se produit sur une distance très courte, de quelques dizaines de mètres à un kilomètre.

Les températures ne varient guère et s'échelonnent de 25 à 20°.

Les résidus secs passent de 500 à plus de 2000 mg/l.

Les formules caractéristiques sont :

r Cl > r SO<sub>4</sub> > r CO<sub>3</sub>    r Ca > r Na > r Mg  
avec SO<sub>4</sub> > Ca ou r Na > r Ca > r Mg  
avec SO<sub>4</sub> < Ca.

La potabilité de ces eaux est de la classe 2, 3 ou 4.

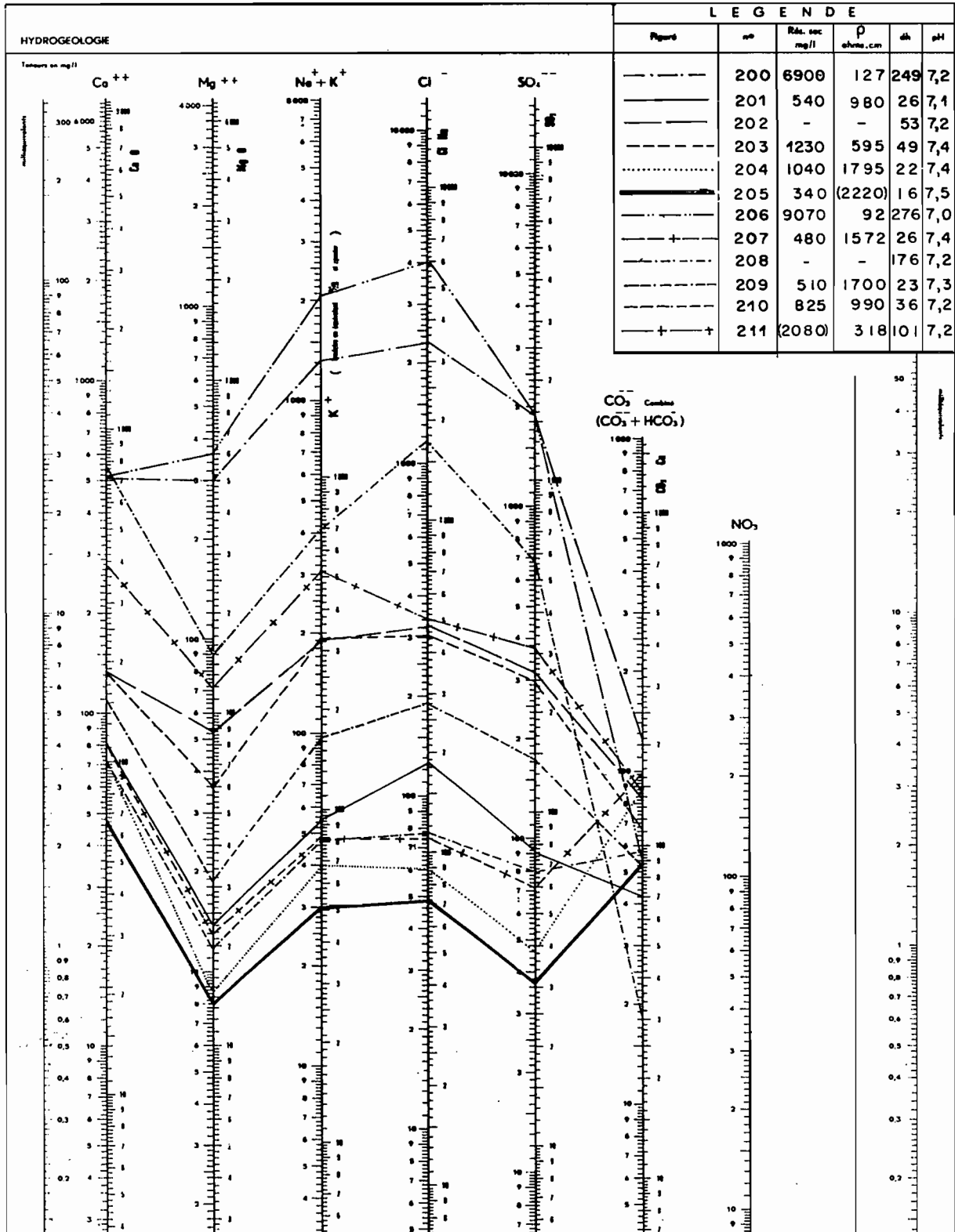


Fig. 13. Diagramme d'analyses d'eaux de la région d'Igli et de Touzdit.

c) *Les eaux des alluvions de l'Oued.*

Un des échantillons a été prélevé dans un petit filet d'eau (5 l/s environ) coulant dans l'Oued. L'autre provient du puits de la ferme expérimentale qui en cours de pompage (27 m<sup>3</sup>/h) fait appel à l'inféro-flux de l'Oued.

Les températures ne se différencient pas de celles des eaux étudiées précédemment.

Les résidus secs sont très élevés et supérieurs à 6900 mg/l. L'eau de l'Oued, avec ses 9070 mg/l, est la plus chargée qui ait été prélevée sur l'ensemble du terrain, exception faite de celle de certaines gueltas et de la Sebket el Melah.

Ces eaux ne sont pas potables.

Les formules caractéristiques sont :

$r \text{ Cl} > r \text{ SO}_4 > r \text{ CO}_3$   $r \text{ Na} > r \text{ Ca} > r \text{ Mg}$   
évoluant vers  $r \text{ Na} > r \text{ Mg} > r \text{ Ca}$ .

B. CONCLUSIONS SUR L'ÉVOLUTION CHIMIQUE DES EAUX D'AMONT EN AVAL DE LA NAPPE.

Suivant un sens E-W, c'est-à-dire d'amont en aval de la nappe, les eaux se concentrent et leur composition chimique évolue au fur et à mesure de leur cheminement vers l'Oued.

L'évaporation des eaux arrivant près de la surface du sol, l'irrigation et l'évapotranspiration en sont les facteurs principaux.

D'amont en aval de la nappe, dans le Quaternaire, les concentrations augmentent à Iglî dans les proportions de 1 à 6. Les eaux de l'Oued sont ici 30 fois plus chargées que celles de l'Erg.

Le rapport  $r \text{ SO}_4 / r \text{ Cl}$  reste compris entre 0,76 et 0,51 et ne marque que de faibles oscillations.

La formule  $r \text{ CO}_3 > r \text{ Cl} > r \text{ SO}_4$   $r \text{ Ca} > r \text{ Na} > r \text{ Mg}$ , caractéristique des eaux de la région les moins chargées en sels, évolue vers  $r \text{ Cl} > r \text{ SO}_4 > r \text{ CO}_3$   $r \text{ Na} > r \text{ Mg} > r \text{ Ca}$ , formule qui se rapproche de celle de l'eau de mer.

C. ÉVOLUTION DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX DANS LE TEMPS.

Par comparaison des analyses d'eaux prélevées par M. Bourgeois de 1958 à 1961 et par nous-mêmes en 1963 sur les deux puits de la ferme, on peut suivre l'évolution hydrochimique de la nappe depuis son exploitation intensive en cet endroit.

Le puits n° 201, creusé dans le Saourien, produit des eaux dont la composition ne varie pratiquement

pas, autant que l'on puisse en juger par ces diverses analyses provenant de laboratoires différents.

Le puits n° 200, creusé dans le Guirien, a fourni au cours de son exploitation des eaux de plus en plus chargées. Ceci peut s'expliquer par un appel d'eau des alluvions de l'Oued car le débit est très élevé, par un recyclage important des eaux d'irrigation, le puits se trouvant au milieu du périmètre irrigué, et par une diminution importante des apports de l'Erg après la mise en service du puits n° 201.

REGIONS DE MAZZER ET BENI-ABBES

Les régions de Mazzer et Béni-Abbès constituent une unité hydrogéologique dans la vallée de la Saoura car c'est en fait le seul endroit où les formations mio-pliocènes et plio-villafranchiennes apparaissent en rive gauche, prolongeant la Hamada du Guir sous le Grand Erg Occidental. Ces terrains aquifères forment les « falaises » de Mazzer et affleurent dans le « golfe » qui s'étend à l'est ; ils sont recouverts par les dunes vers le sud, se retrouvent à Ouarourout et Béni-Abbès puis disparaissent définitivement sous l'Erg à Juiffa, quelques kilomètres au sud de Béni-Abbès.

A l'est, ces formations représentent le soubassement des dunes et contiennent la nappe, au moins jusqu'à Hassi Fokra (R. Capot-Rey - 1943, H. Schoeller - 1945, J. Chavaillon - 1964).

C'est cette région que H. Schoeller (1945) étudia : la nappe des terrasses de la vallée de la Saoura est alimentée par celle de l'Erg contenue dans la dalle hamadienne et le *tachenghit* rouge (voir paragraphe 2.2.1.). Ses eaux souterraines se dirigent, en se chargeant en sels, vers l'Oued où elles s'équilibrent avec l'inféro-flux.

2.2. REGION DE MAZZER ET ACACHA

Les petites palmeraies de Mazzer s'étalent en rive gauche sur le Saourien ou les alluvions actuelles et sont principalement alimentées par les sources de la hamada. Au contraire la palmeraie d'Acacha, en amont, s'étend dans le lit majeur de l'Oued. Elle est chaque fois ravagée par les crues de moyenne et forte importance. La présence de quelques palmiers en rive droite est à signaler car c'est une exception dans la région.

2.2.1. CONDITIONS DE GISEMENT DE LA NAPPE

Le Tournaisien (formations d'Oulad Bou Hadid, Hassi Zguilma), le Viséen inférieur (formations de Hassi Zguilma, el Hariga), la base du Viséen

supérieur (formation de Mazzer, Acacha, Boulmane) forment le soubassement de la région et affleurent dans la vallée. Ces terrains sont essentiellement des grès et des argiles avec des intercalations généralement peu épaisses de calcaires (Cl. Pareyn - 1962).

La coupe (fig. 14) passant par le ksar de Mazzer et Hassi Ali bel Hadj el Aïd (mal situé sur la feuille au 1/200 000, voir pl. II), montre les relations entre les terrains hamadiens et les terrasses quaternaires : en discordance sur le Paléozoïque, le Néogène et le Plio-Villafranchien constituent la Hamada du Guir. Le Mazzérien (Villafranchien supérieur) représente la terrasse quaternaire la plus ancienne, consécutive à l'organisation du réseau hydrographique et à l'enfoncement de l'Oued Saoura. En contrebas s'étale le Saourien, le Guirien et les alluvions actuelles. Le Guirien extrêmement dégradé se distingue mal de ces alluvions.

#### MIO-PLIOCENE ET PLIO-VILLAFRANCHIEN (ng et pv)

Le Néogène débute par un grès à ciment argilo-calcaire peu consolidé en moyenne, avec une passée plus gypseuse et un niveau de grès calcaire plus massif (fig. 14) (G. Conrad et M.A. Roche - 1965). Ces terrains relativement bien cimentés supportent la dalle hamadienne inférieure. C'est un calcaire gréseux, silicifié. Observée dans le détail, cette dalle se révèle discontinue. Le niveau supérieur en bordure de la Saoura constitue un palier morphologique auquel viennent se raccorder des glacis quaternaires établis à l'ouest et sur le « Golfe » de Mazzer. En rive gauche, ces terrains apparaissent aquifères sur toute leur épaisseur soit une trentaine de mètres.

Les formations plio-villafranchiennes pv sont bien développées au-dessus de la dalle hamadienne inférieure.

Au fond de Hassi Ali se rencontrent des argiles rouges, sableuses (1,50 m observé), qui recouvrent probablement la dalle hamadienne et au niveau desquelles apparaît l'eau. C'est le *tachenghit* déjà repéré par H. Schoeller (1945) dans d'autres puits de l'Erg. Au-dessus se développent sur 24 mètres, des grès à ciment calcaire peu abondant avec passées de sables. Ces sédiments ont une forte per-

méabilité en petit, bien qu'ils ne soient pas aquifères en cet endroit. Au-dessus, à la base des buttes du fond du « Golfe », s'observent des sables et grès blancs à stratifications entrecroisées (10 m) et à passées graveleuses, avec au sommet un niveau rouge inconstant. Le sommet de ces buttes est constitué d'un tuf calcaire puis de calcaire lacustre plus compact (4 m). On observe par places un encroûtement, formé de sable contenant des éléments bréchiques et de calcaire d'aspect colonnaire.

#### LES TERRASSES QUATERNAIRES.

##### *Le Mazzérien (q1).*

Reposant sur la dalle hamadienne ou sur le Plio-Villafranchien érodés, la « Haute Terrasse de Mazzer » débute par des grès à boules remaniées (fig. 14). Au-dessus s'observent des argiles sableuses gypseuses et salées puis des sables blancs grossiers. Un tuf calcaire et un grès calcaire, encroûté d'un conglomérat à galets noirs patinés, forment le sommet de la terrasse sur laquelle s'étend un reg couvert de ces mêmes galets noirs.

##### *Le Saourien (q3a)*

Ces dépôts aquifères s'étalent en contrebas de la falaise ou du talus mio-pliocène, et comblent les petits talwegs affluant à la Saoura. Ce sont essentiellement des sables verts et jaunes au sommet desquels se rencontrent des marnes gris bleuâtre. Leur épaisseur dépasse rarement une quinzaine de mètres.

En résumé, la nappe se rencontre à la base du Plio-Villafranchien et sur toute l'épaisseur du Mio-Pliocène puis, dans la vallée, elle passe dans le Saourien et les alluvions actuelles du lit majeur de l'Oued.

#### 2.2.2. PROFONDEUR DE LA SURFACE PIEZOMETRIQUE

Dans les formations hamadiennes, le niveau piézométrique est de moins en moins profond en direction de la falaise. A Hassi Ali, il se situe à 24,0 mètres, alors qu'à Hassi Ogola, en bordure du talus hamadien, il n'est plus qu'à 2,80 mètres. Cependant ce dernier puits est creusé dans un talweg.

Dans les alluvions actuelles, la nappe est très proche ; le niveau piézométrique se rencontre entre 4 mètres et la surface du sol. Des gueltas subsistent à l'intérieur même de la palmeraie d'Acacha.

### 2.2.3. PIEZOMETRIE ET ECOULEMENT DES EAUX SOUTERRAINES

Les sources de Mazzer s'étagent à tous les niveaux du talus hamadien et non uniquement dans la dalle, comme le pensait H. Schoeller. Il en existe sept vraiment actives.

Les sources Ogola et Darabin et le puits Ogola (n° 212) correspondent au niveau piézométrique le plus élevé sur la bordure de la falaise, il est évalué à 510 mètres. Les sources er-Rmel (n° 213), Abaran (n° 215) et Hesna se situent à peu près au niveau du sommet du Saourien à 495 mètres. La source Hemam est nettement plus basse et coule au niveau des alluvions actuelles, à 482 mètres. La source Bogara sort au contact des argiles carbonifères et du Mio-Pliocène, à 480 mètres.

La cote piézométrique d'Hassi Ali, situé 6 km à l'est, serait de 516 mètres (d'où un gradient hydraulique de l'ordre de 1 pour 1000 sous le Golfe de Mazzer). J. Chavaillon (1964) situe ce puits dans le Mio-Pliocène, ce qui place le niveau piézométrique dans le puits une vingtaine de mètres en dessous de celui des sources supérieures de Mazzer. En fait, il s'agit du Plio-Villafranchien et l'eau se rencontre au sommet du *tachenghit* à faible perméabilité en petit (G. Conrad et M.A. Roche - 1965). Cette assise, à prédominance argileuse, ne doit jouer qu'un rôle secondaire dans l'écoulement des eaux par rapport à la dalle mio-pliocène sous-jacente, à perméabilité en grand.

Toutes les sources de Mazzer sortent de boyaux de dissolution, parfois agrandis par les villageois. Le développement de ce réseau de type karstique est très important. Les directions semblent s'établir principalement dans des plans verticaux et horizontaux, amenant ainsi les eaux, par captures successives, jusqu'au Carbonifère schisteux qui constitue la limite d'enfouissement. Le Carbonifère est plus élevé de quelques mètres que le niveau piézométrique de l'inféro-flux de l'Oued qui constitue le niveau de base de la nappe ; tout le matériel

aquifère mio-pliocène se situe donc dans la zone dénoyée.

La perméabilité en petit des grès calcaires et du calcaire silicifié joue un rôle très effacé par rapport à la perméabilité en grand. Les diamètres des chenaux sont variables et s'échelonnent du centimètre à plusieurs décimètres. Les environs d'Aïn Hemam et Aïn Hesna montrent les plus beaux chenaux de la région. La grotte d'Aïn Hemam est la plus vaste, on y observe plusieurs dépôts étagés de carbonate de calcium concrétionné. Sur l'ensemble du front de la nappe, l'eau sort seulement de quelques boyaux, certains sont humides mais de nombreux apparaissent secs. Les sources sont généralement en relation directe avec les oueds du sommet du « Golfe » et se situent à proximité ou en dessous de leur débouché sur la falaise. Ceci amène à penser que l'infiltration des eaux de ruissellement a grandement favorisé, en dessous du lit même des oueds, la formation de ces boyaux ; lesquels par leur importance, ne peuvent représenter que les vestiges de la circulation des eaux souterraines lors des périodes quaternaires plus humides.

Ce développement de la perméabilité en grand sur toute l'épaisseur du Mio-Pliocène prend certainement toute son ampleur sur la bordure du talus, à cause des phénomènes de dislocation qui favorisent la dissolution. Par contre, on peut penser raisonnablement que sous l'Erg, ce sont la dalle hamadienne et localement les grès et sables plio-villafranchiens qui jouent seuls le rôle principal dans l'écoulement des eaux.

Dans la terrasse saourienne emboîtée, une nappe se constitue à partir des venues d'eau des boyaux et secondairement de l'ensemble de la surface de contact. Il doit en effet exister un certain nombre de sources cachées par le Quaternaire. Cette nappe s'écoule vers les alluvions actuelles, alimentant alors quelques jardins et en partie la palmeraie d'Acacha. En atteignant l'Oued, les eaux prennent la direction du sud.

### 2.2.4. DEBITS DES SOURCES ET DE LA NAPPE

Le tableau IV présente les valeurs des débits des sources évaluées à différentes dates.

Le débit des points d'eau est nettement influencé par leur état d'entretien qui laisse à désirer, d'autant

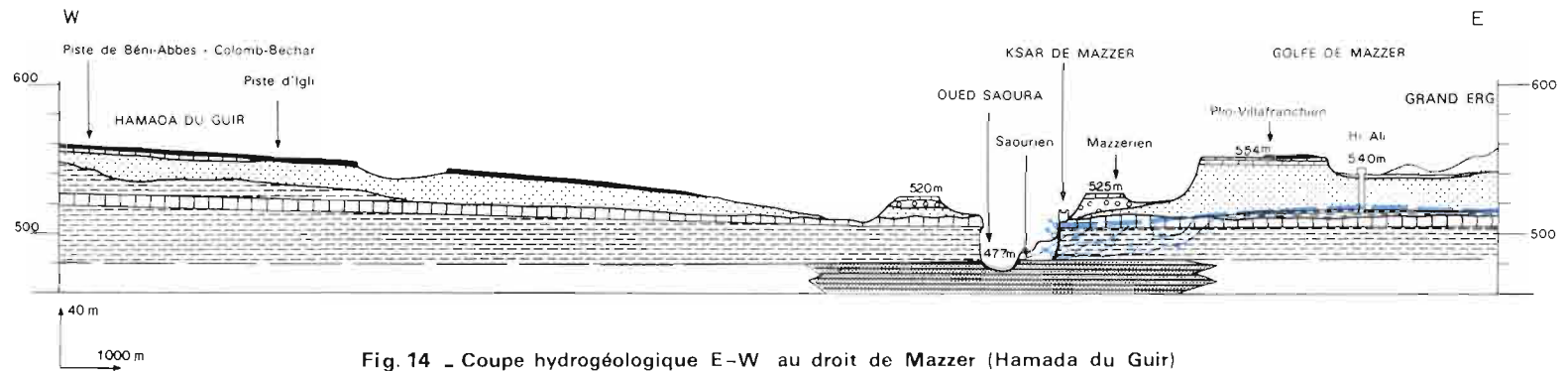
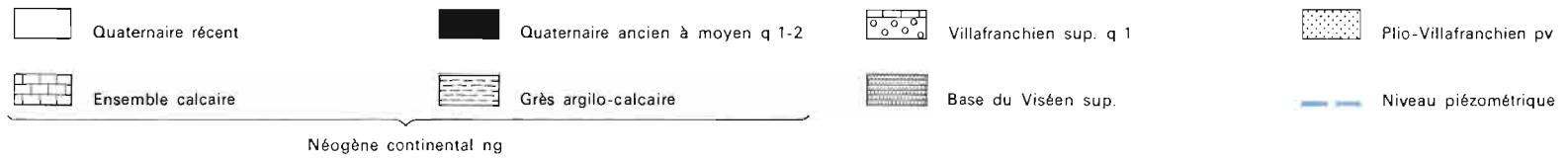


Fig. 14 - Coupe hydrogéologique E-W au droit de Mazzer (Hamada du Guir)  
D'après G. CONRAD et M. A. ROCHE - 1965.



plus que la mesure n'est souvent réalisable qu'à l'extrémité d'amenées d'eau impossible à contrôler. De ce fait, les faibles variations peuvent déjà s'expliquer facilement.

Les débits s'avèrent faibles. Ils ne semblent pas montrer de variations orientées sur cette période non influencée de 8 mois. Les faibles variations ne sont pas significatives.

Source	Date	Débit (l/s)
Aïn Hemam (214)	1941 Schoeller	1 à 1,5 (estimation)
	21.12.63	0,67
	4. 3.64	0,77
	2. 9.64	0,59
	21.10.64	0,64
Aïn er-Rmel (213)	21.12.63	0,60
	2. 9.64	0,54
	21.10.64	0,51
Aïn Ogola	2. 9.64	0,15
	21.10.64	0,16
Aïn Abaran (215) + Aïn Hesna	1963 - 1964	0,10 (estimation)
Aïn Darabin	1963 - 1964	0,20 (estimation)
Aïn Bogara	1963 - 1964	suintements
Aïn Boundra	1963 - 1964	suintements

Tableau IV : Débits des exurgences de Mazzer, mesurés à différentes dates.

Le débit total des exurgences et d'Hassi Ogola est évalué à 1,7 l/s soit environ 6 m<sup>3</sup>/h sur un front d'un kilomètre. Surtout en raison des sources qui doivent se déverser directement dans le Saourien, on peut vraisemblablement au moins doubler cette valeur, soit 12 m<sup>3</sup>/h/km.

## 2.2.5. PHYSICO-CHIMIE DES EAUX

### A. DIFFERENTES CATEGORIES D'EAUX

Dans la région de Mazzer et Acacha, 13 eaux prélevées le 20 décembre 1963, ont été classées en trois catégories, d'après leur position géologique et leurs caractères physico-chimiques :

— Les eaux typiques de l'Erg, prélevées dans le Mio-Pliocène.

— Les eaux à caractères physico-chimiques évolués, intermédiaires à ceux des eaux de l'Erg et de

l'Oued, prélevées dans le Saourien et les alluvions du lit majeur de la Saoura.

— Les eaux de l'Oued, prélevées dans un mince filet d'eau coulant dans le lit mineur.

Le tableau V mentionne les intervalles de variation et la médiane de différentes caractéristiques hydro chimiques de ces trois catégories.

#### a) Les eaux typiques de l'Erg

Les températures maximales sont de 25°.

Le diagramme logarithmique (fig. 15) fait apparaître nettement l'unité du faciès hydrochimique.

Les résidus secs sont inférieurs à 400 mg/l. Les eaux les moins chargées proviennent de la source Hemam (340 mg/l) et du puits Ogola (350 mg/l). Elles sont légèrement plus chargées que celles de la Séguiet Haboussa d'Igli, mais cependant moins que celles de la Grande Source de Béni-Abbès.

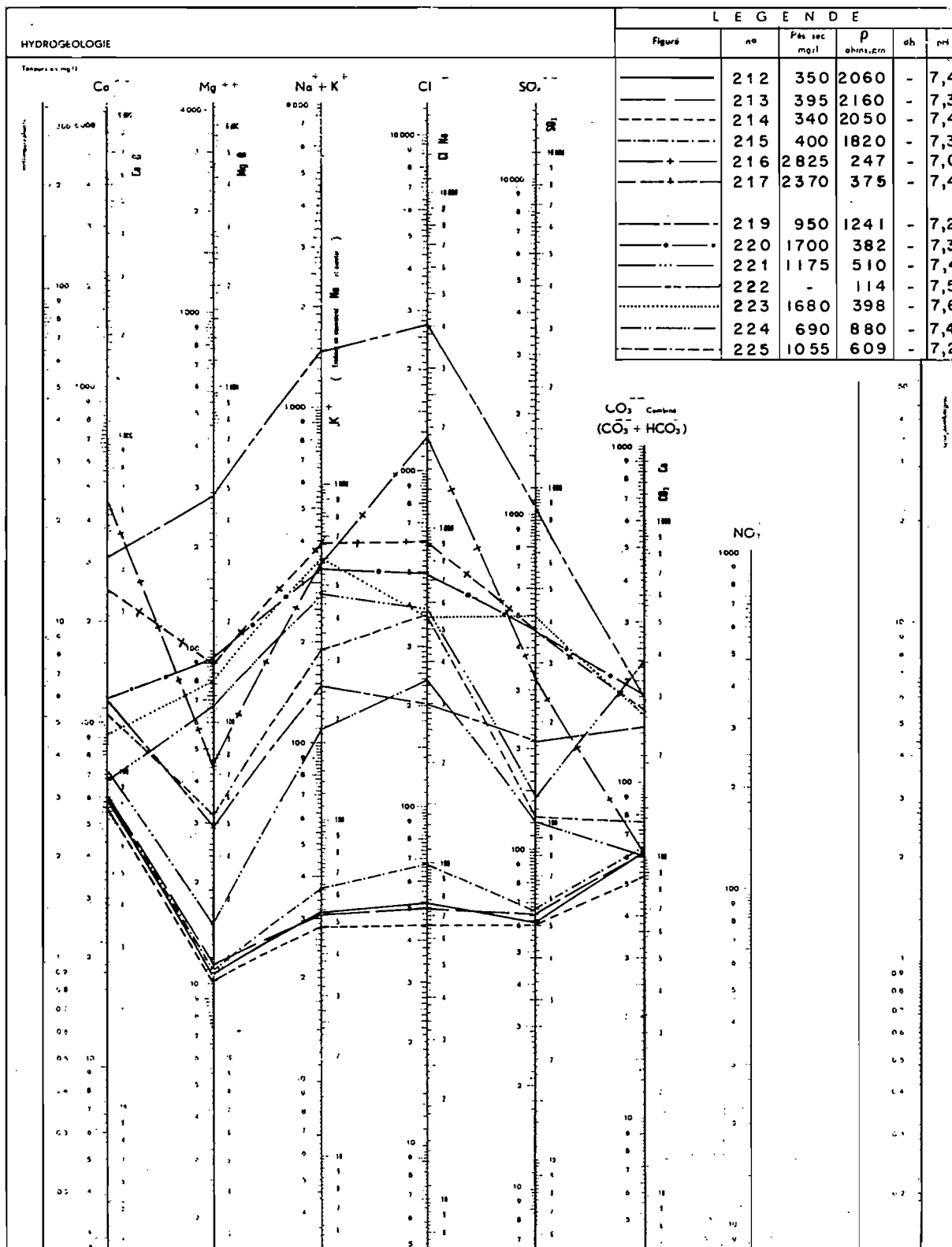


Fig. 15. Diagramme d'analyses d'eaux de la région de Mazzer et d'Acacha.

Catégorie d'eau	rs mg/l	dh	r Cl	r SO <sub>4</sub>	r CO <sub>3</sub>	r Cl- rNa	r SO <sub>4</sub>	r CO <sub>3</sub>	r Mg	r Na
							rCl	r SO <sub>4</sub>	r Ca	r Mg
Eaux de l'Erg (Mio-Pliocène) (4 échantillons)	340	18,4	1,26	1,26	1,73	>0	1,00	1,61	0,30	1,43
	370	19,4	1,44	1,32	2,05	>0	0,92	1,54	0,31	1,51
	400	19,8	1,63	1,36	2,12	>0	0,83	1,38	0,32	1,73
Eaux évoluées (Saourien) (3 échantillons)	690	24	5,70	2,56	2,02	> 0	0,80	1,06	0,34	2,66
	950	40	6,80	2,60	2,60	> 0	0,38	1,00	0,41	3,23
	1055	41	10,2	4,58	4,87	< 0	0,25	0,79	0,48	3,80
Eaux évoluées (Alluvions actuelles) (5 échantillons)	1175	44	10,4	2,96	2,06	< 0	0,99	2,63	0,16	1,89
	1700	68	13,8	9,35	5,54	< 0	0,54	0,59	1,32	2,27
	2825	134	35,4	10,3	7,78	> 0	0,19	0,31	1,64	3,99
Eaux de l'Oued (1 échantillon)	5700	192	76,9	21,5	5,8	> 0	0,28	0,27	1,51	2,80

Tableau V : Intervalles de variation et médiane de différentes caractéristiques hydrochimiques de la nappe à Mazzer et Acacha.

L'indice de déficit chloro-alcalin est positif.

Par rapport aux autres eaux de l'Erg de toute la région supervisée, ce sont les moins chargées en chlorures et à rapport  $r\text{SO}_4/r\text{Cl}$  le plus élevé. Les valeurs des différents rapports sont indiquées dans le tableau V.

Les formules caractéristiques sont :

$r\text{CO}_3 > r\text{Cl} > r\text{SO}_4$        $r\text{Ca} > r\text{Na} > r\text{Mg}$   
Leur potabilité est permanente, de la classe 1.

b) *Les eaux à caractères physico-chimiques évolués*

Les eaux prélevées dans le Saourien sont chimiquement moins évoluées que celles (de la même catégorie) des alluvions actuelles bordant le lit mineur de la Saoura. Elles constituent les jalons entre les eaux de l'Erg et celles de l'Oued.

La température maximale, mesurée pour les eaux du Saourien, est de 23° et indique une baisse par rapport à celles des eaux du Mio-Pliocène, du moins pour cette époque de l'année. Elle continue à diminuer dans le Guirien, 17° y étant le minimum observé.

Dans le Saourien, il semble que la limite inférieure des résidus secs soit 400 mg/l ; les teneurs moyennes avoisinent 1000 mg/l. Dans les alluvions

actuelles, les résidus secs dépassent 1000 mg/l, mais dans les conditions normales ne semblent pas s'élever au-delà de 3000 mg/l.

Les formules caractéristiques évoluent de  $r\text{Cl} > r\text{SO}_4 > r\text{CO}_3$      $r\text{Na} > r\text{Ca} > r\text{Mg}$  dans le saourien, vers  $r\text{Cl} > r\text{CO}_3 > r\text{SO}_4$      $r\text{Na} > r\text{Mg} > r\text{Ca}$  dans les alluvions actuelles, où l'évolution se poursuit avec  $r\text{Cl} > r\text{SO}_4 > r\text{CO}_3$

$r\text{Ca} > r\text{Na} > r\text{Mg}$   
ou  $r\text{Na} > r\text{Ca} > r\text{Mg}$   
ou  $r\text{Na} > r\text{Mg} > r\text{Ca}$

Les potabilités sont permanentes, des classes 2 et 3 pour les eaux du Saourien, 3 et 4 pour celles des alluvions actuelles.

c) *Les eaux de l'Oued*

L'eau de l'Oued, avec ses 5700 mg/l de résidu sec, est la plus chargée parmi les échantillons prélevés à Mazzer et Acacha.

La formule caractéristique est :

$r\text{Cl} > r\text{SO}_4 > r\text{CO}_3$      $r\text{Na} > r\text{Mg} > r\text{Ca}$ .

Les valeurs des différents rapports sont indiquées dans le tableau V.

La potabilité est de la classe 5.

## B. CONCLUSIONS SUR L'ÉVOLUTION CHIMIQUE DES EAUX DANS L'ESPACE.

L'évolution des eaux de l'Erg, du Mio-Pliocène jusqu'aux alluvions actuelles, s'effectue rapidement sur quelques centaines de mètres.

La température décroît de 25° à 17°.

Les résidus secs passent de 340 à 5700 mg/l.

Les formules caractéristiques évoluent de

$r \text{ CO}_3 > r \text{ Cl} > r \text{ SO}_4$      $r \text{ Ca} > r \text{ Na} > r \text{ Mg}$   
à  $r \text{ Cl} > r \text{ SO}_4 > r \text{ CO}_3$      $r \text{ Na} > r \text{ Mg} > r \text{ Ca}$

Le tableau V permet de suivre cette évolution :

$r \text{ SO}_4 / r \text{ Cl}$  décroît de 1,0 à 0,28 mais irrégulièrement

$r \text{ CO}_3 / r \text{ SO}_4$  décroît régulièrement de 1,6 à 0,27  
 $r \text{ Mg} / r \text{ Ca}$  croît très régulièrement de 0,30 à 1,5  
 $r \text{ Na} / r \text{ Mg}$  croît de 1,4 à 2,8.

L'indice de déficit chloro-alcalin reste positif mais devient parfois négatif, avec le passage des eaux dans les terrasses quaternaires où des niveaux argileux doivent être responsables d'échanges ioniques.

## 2.3. REGION DE BENI-ABBES ET OUAROU-ROUT

La palmeraie de Béni-Abbès s'étend en rive gauche sur le Saourien et le Guirien, en contrebas de la falaise mio-pliocène. A l'origine, le village doit probablement son importance à l'existence d'une source unique dans la Saoura qui irrigue à elle seule la palmeraie principale et alimente en partie la population en eau potable.

### 2.3.1. CONDITIONS DE GISEMENT DE LA NAPPE.

Le Dévonien moyen et supérieur constitue dans la région le soubassement de la hamada (fig. 16). En rive gauche de l'Oued Saoura à Béni-Abbès, les schistes rouges du Dévonien supérieur constituent le mur imperméable de la nappe. On les observe au fond de plusieurs puits, sous le Quaternaire.

Dans ces terrains et le Mio-Pliocène s'encaisse la vallée de la Saoura, où le Saourien et le Guirien sont très bien représentés.

La nappe se situe en rive gauche dans les terrains hamadiens et quaternaires (fig. 16).

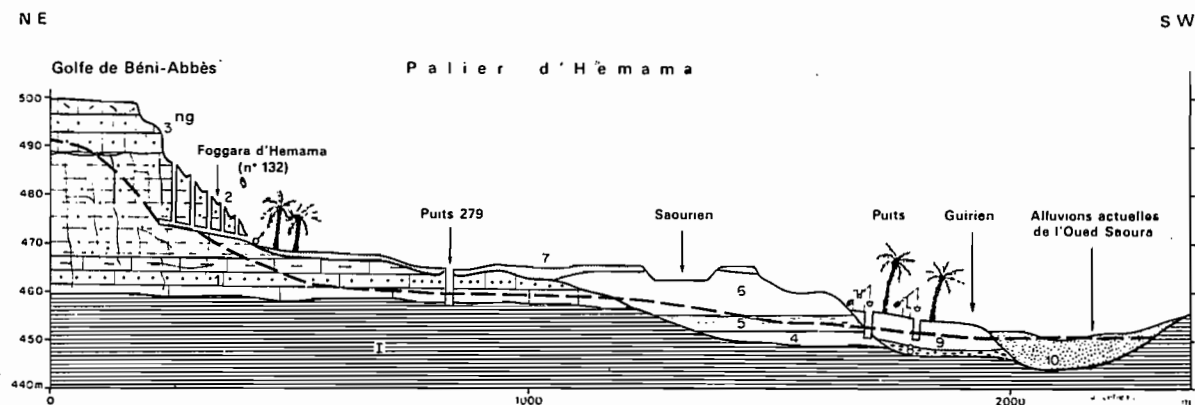


Fig. 16. Coupe hydrogéologique à travers le palier d'Hémama près de Béni-Abbès.

1 : Schistes rouges (Dévonien supérieur). 2 : Calcaires à éléments de Primaire (Néogène). 3 : Torba : grès argilo-calcaire (Néogène). 4 : Dalle calcaire hamadienne inférieure (Néogène). 5 - 6 : Sables et marnes sableuses (Saourien). 7 : Cailloutis (Guirien). 8 : Sables fins (Guirien). 9 : Sables à débris de Primaire (actuel).

a) *Le Mio-Pliocène et Plio-Villafranchien.*

Le Mio-Pliocène est représenté, à la base, par des sédiments variés suivant les lieux (G. Conrad et M.A. Roche - 1965). A Hemama (fig. 16), dans le puits 279 s'observent, juste au-dessus des schistes, des calcaires à gros éléments de Primaire (1), alors qu'à la base de la Gara Diba ce sont des sables éolisés, clairs, avec un horizon encroûté de type alios, et des grès rougeâtres limités par des cloisons gypseuses.

Au-dessus, près de 20 mètres de *torba* (2) constituent l'essentiel du talus hamadien parfois très escarpé. Il s'agit d'un grès argilo-calcaire de type lacustre, faiblement consolidé, de couleur claire légèrement verte avec des taches lie-de-vin et vertes.

La dalle hamadienne inférieure est constituée à la base de calcaire gréseux (3) dans lequel un niveau de 0,2 à 0,3 mètre de sables très riches en CO<sub>2</sub> Ca vient s'intercaler. Font suite des grès tendres, clairs puis des calcaires silicifiés, en bancs discontinus, recouvrant un grès à ciment calcaire. L'épaisseur totale dépasse une dizaine de mètres.

En bordure de la Saoura, la dalle hamadienne érodée forme un palier morphologique plus ou moins large, mais en s'éloignant de la vallée, des sédiments néogènes essentiellement représentés par des grès à ciment marno-calcaire, se développent au-dessus de cette dalle.

Au-dessus de l'ensemble néogène érodé repose le Plio-Villafranchien de même type qu'à Mazzer.

b) *Les terrasses quaternaires et alluvions actuelles de l'Oued.*

Le Villafranchien supérieur et le Quaternaire moyen sont très mal représentés. Certains *gô* et dépôts de pente pourraient éventuellement s'y rattacher.

*Le Saourien.*

Les dépôts saouriens se développent en rive gauche, en contrebas de la falaise hamadienne, dans la partie est de la palmeraie et au-delà de la piscine à Hemama (fig. 16). Ce sont des sables gris, jaunes, ou bruns (4 et 6) avec une intercalation marno-sableuse de 2 à 3 mètres, vers la base (5). Leur taille médiane se situe entre 0,10 et 0,17 mm. L'épaisseur peut atteindre probablement une quinzaine de mètres.

A Hemama, ces sables se terminent en biseau vers l'Est sur les calcaires gréseux de la base du Mio-Pliocène. C'est ainsi que le puits 279 traverse 1 mètre de sables brun pâle (7), puis le Mio-Pliocène (1), sur 8 à 10 mètres où il trouve l'eau 2 à 3 mètres avant le mur imperméable que constituent les schistes probablement fameniens.

Vers l'ouest, l'eau passe des terrains hamadiens dans la base du Saourien.

*Le Guirien*

Des cailloutis représentent la base du Guirien (8) et apparaissent fréquemment sur 0,50 à 1 mètre d'épaisseur, dans le fond des puits, sur les schistes du Dévonien supérieur (I). Au-dessus, font suite 4 à 5 mètres de sables fins bistres (9) dans lesquels se retrouvent, vers la base, des passées de cailloutis. 1 à 2 mètres de marnes grises et noires terminent la série. On observe de fréquentes passées argileuses brunes, intercalées dans ces sédiments. Les dépôts aquifères sont les cailloutis et les sables.

2.3.2. *ECOULEMENT DES EAUX SOUTERRAINES ET PIEZOMETRIE*

L'écoulement des eaux souterraines dans la région est du même type qu'à Mazzer. Dans le fond du « Golfe », les eaux s'écoulent à la base des terrains qui surmontent la dalle et dans celle-ci. La *torba* joue alors le rôle d'imperméable (H. Schoeller - 1945) plus ou moins efficace.

En bordure de la Saoura, on observe un développement des boyaux de dissolution un peu moins important qu'à Mazzer. Les calcaires qui constituent en partie la dalle, sont fins et compacts. Leur perméabilité en petit paraît être négligeable par rapport à leur perméabilité en grand. Des boyaux de dissolution s'y observent en effet sur la falaise ; ils représentent les vestiges de nappes quaternaires plus importantes que la nappe actuelle qui utilise cependant encore partiellement ce réseau. Leurs diamètres sont généralement inférieurs à une dizaine de centimètres et leurs directions surtout horizontales. Ils sont particulièrement nombreux à la base de la dalle et au contact de celle-ci avec les marnes sableuses. Ils y prennent un grand développement latéral et arrivent parfois à former de véritables abris sous roche. C'est là probablement, le système hydraulique de la Grande Source.

Ces calcaires sont en outre très fissurés. Ces fissures, assez capricieuses, apparaissent dans les puits

en cours de fonçage sur le « Golfe » et sur la falaise de la hamada où la trace de circulation d'eau ancienne est visible.

Des boyaux se situent dans les marnes sableuses, juste en dessous de la dalle, mais sont ensuite plus rares vers le bas. Cette série, qui semble avoir une proportion d'argile plus forte qu'à Mazzer, n'a qu'une faible perméabilité. Son rôle dans la circulation des eaux sous l'Erg est certainement réduit.

En bordure du talus hamadien, dans la vallée, il n'en est plus de même car ces formations se débitent en énormes parallélépipèdes, allongés dans le sens vertical, et les fissures permettent alors l'enfouissement des eaux jusqu'aux lits sableux ou plus calcaires de la base du Mio-Pliocène. Dans ces terrains, les eaux profitent alors également pour s'écouler des joints de stratification, en y développant plus ou moins des boyaux horizontaux. Une grotte située en face de Béni-Abbès, de l'autre côté de l'Oued, a été creusée par les eaux d'infiltration d'un oued du plateau, et bien que située en rive droite, elle permet de comprendre le mode de circulation dans ces formations hamadiennes.

Nous évaluons à 490 mètres la cote piézométrique de la nappe dans le puits de la Sous-Préfecture, creusé dans la dalle hamadienne derrière la Grande Dune. Compte-tenu de sa position géologique sensiblement analogue, la Grande Source sortirait à environ 487 mètres.

A Hassi Rokna, au fond du « Golfe », le niveau piézométrique peut être estimé voisin de 513 mètres, ce qui représente sur 7 kilomètres un gradient hydraulique de 3 pour 1000.

A partir de ces terrains néogènes, l'eau passe dans les terrasses quaternaires, à perméabilité en petit. La palmeraie de Béni-Abbès est privilégiée par rapport aux autres de la Saoura car la nappe y est alimentée par l'infiltration des eaux de la Grande Source. L'apport latéral du Mio-Pliocène est alors secondaire, comparé aux 26 l/s répandus sans interruption sur les 40 hectares.

L'inféro-flux de l'Oued, c'est-à-dire le niveau de base de la nappe, se situerait, aux alentours du radier, à 453 mètres

### 2.3.3. LA GRANDE SOURCE

#### SITUATION

Le captage se situe à 700 mètres au sud-est de l'Ermitage du Père de Foucault, entre deux petits

oueds entaillant la dalle hamadienne (fig. 17). Le captage est enterré sous les dépôts de pente et seuls les déblais de la séguia qui en part permettent d'en préciser l'emplacement. L'eau est amenée par une conduite de béton jusqu'à la piscine.

#### HYDROGEOLOGIE

Il s'agit d'une simple source et non d'une fog-gara. Elle sourd quelques mètres en dessous de la dalle hamadienne, très silicifiée en cet endroit. Ceci incite à penser que le captage n'est pas construit à l'exurgence même, qui doit se situer au contact de la dalle et des marnes. D'ailleurs on entendrait, paraît-il, le bruit d'une cascade à l'endroit du captage.

Elle doit probablement son origine à un développement exceptionnel du réseau de type karstique, peut-être en liaison avec les écoulements de surface qui ont pu se réaliser sur le « Golfe » de Béni-Abbès. De telles surfaces non envahies par les sables se retrouvent d'ailleurs en amont des sources de Mazzer et d'Ouarourout.

Pour expliquer le débit élevé on pourrait également invoquer un barrage souterrain naturel en aval, tel une faille ou un bombement du substratum paléozoïque qui, sans arrêter l'écoulement, surélèverait le niveau de la nappe. La Grande Source représenterait un trop-plein sur la vallée. Cependant, comme nous le verrons plus loin, aucune anomalie du niveau piézométrique n'est assez prononcée pour apparaître sur la carte en courbes isopièzes au 1/500 000 (pl. II). D'après cette carte, la ligne de courant aboutissant à la Grande Source proviendrait de la région située au sud d'Hassi Malah.

#### DEBIT

E.F. Gauthier (1908) évalua son débit à 18 l/s, H. Schoeller (1945) avança 18 à 25 l/s, certains ont parlé de 40 l/s.

Nous avons mesuré le débit le 9 janvier 64 par le remplissage de la piscine : 263 m<sup>3</sup> remplis en 9450 secondes, soit 27,8 l/s avec une précision estimable à  $\pm 1$  l/s.

La Circonscription de l'Hydraulique de Colomb-Béchar avait mesuré le débit, du 12 au 22 décembre 61, à l'aide d'un compteur à hélice Woltman de 150 mm de diamètre placé dans la séguia. Le débit pendant ce temps, succédant à une période sèche, était 29,3 l/s.

La différence de ces deux valeurs n'est pas significative, pouvant facilement être imputable à la précision des mesures. En conclusion, nous admettons que le débit moyen après trois ans de sécheresse est  $28 \pm 1$  l/s soit  $101 \pm 4$  m<sup>3</sup>/h.

Les variations dans le temps ne sont absolument pas connues mais les deux mesures précédentes montrent qu'elles paraissent être faibles.

UTILISATION

A la piscine, elle est divisée en deux parts inégales pour l'alimentation en eau du village et l'irrigation de la palmeraie.

La population de Béni-Abbès compte 2 500 habitants environ. En étant large, on peut estimer le besoin en eau potable à 150 l par habitant et par jour, ce qui représente une demande maximale de 3,8 l/s. En 1964 la consommation était voisine de 2 l/s.

La palmeraie principale, soit 40 hectares, est irriguée par les eaux de la Grande Source. Le débit déversé en continu est voisin de 25 l/s, ce qui représente 0,65 l/s/ha ou une hauteur d'eau irriguée de 2 050 mm/an.

Se reporter au paragraphe 2.3.6. pour la physico-chimie des eaux.

2.3.4. PROFONDEUR DE LA SURFACE PIEZOMETRIQUE

Les mesures de la profondeur de l'eau par rapport au sol, effectuées dans tous les puits, en novembre 1963, ont permis de tracer la carte en courbes d'égale profondeur de la surface piézométrique (fig. 17).

Par la suite, il n'a pas été refait de mesures précises mais nous n'avons pas observé, d'octobre 1963 à novembre 1964, des variations du niveau piézométrique supérieures à 1 mètre. Il semble que, dans la palmeraie, les petites variations dépendent surtout de l'irrigation des terrains alentours par les eaux de la Grande Source.

Dans le Mio-Pliocène, la profondeur du niveau piézométrique varie de 0 à 18 mètres et dépend de la morphologie du terrain et de la situation géologique de la nappe. A Hassi Rokna le niveau piézométrique est à 11,70 m par rapport à la margelle qui domine le sol de quelques dizaines de centimètres. Sur le « Golfe », immédiatement à l'est de la

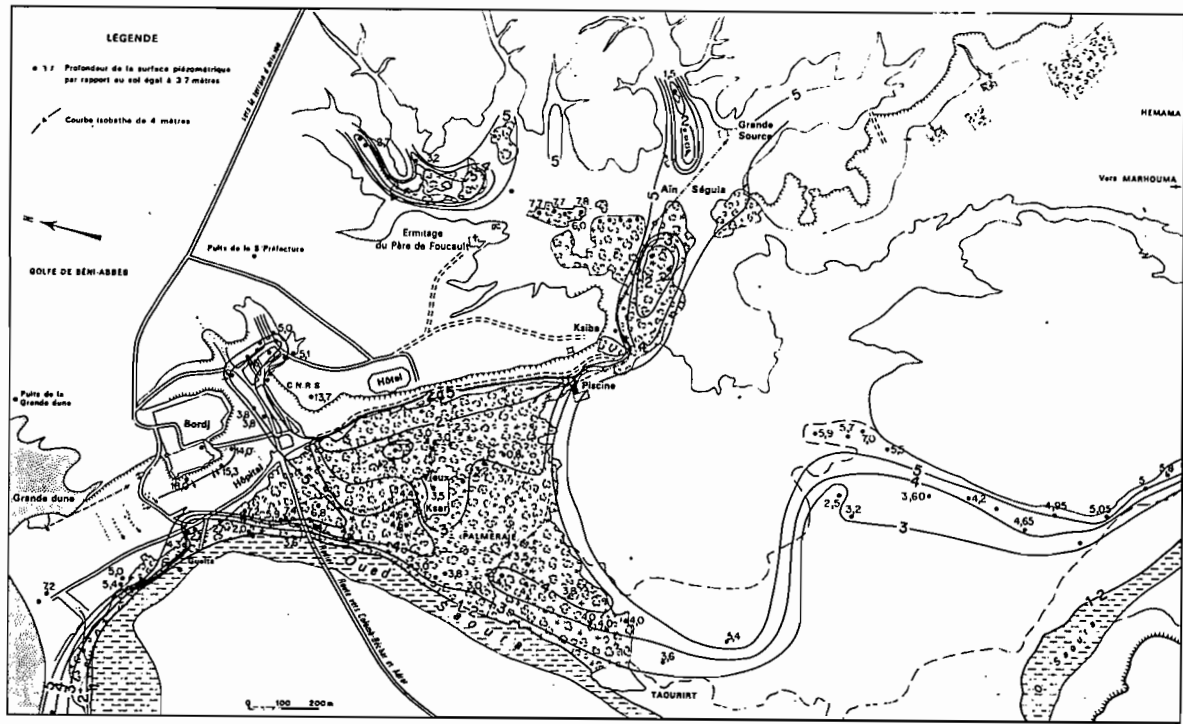


Fig. 17. Béni-Abbès. Courbes d'égale profondeur de la surface piézométrique de la nappe (en m).

Grande Dune et du bordj, la nappe se rencontre à la base de la dalle calcaire, à une profondeur de 7 à 10 mètres, mais sur le talus de la hamada les eaux gagnent alors la base du Mio-Pliocène et la profondeur peut atteindre 18 mètres.

Dans les terrasses quaternaires, elle n'excède pas 8 mètres, et se trouve le plus souvent entre 3 et 5 mètres. Dans la palmeraie, sur un profil passant par le vieux ksar, la profondeur augmente de 2 à 4 mètres du talus hamadien en direction de la rive de l'Oued. La rive elle-même correspond à une variation de 3 mètres. Dans l'Oued, l'inféro-flux se rencontre généralement à moins de 1 mètre.

### 2.3.5. DEBITS DES POINTS D'EAU ET DE LA NAPPE

#### A. DEBITS DES EXSURGENCES

Les débits des sources et foggaras ont été mesurés par chronométrage du temps de remplissage d'un seau. Ils ont été évalués lorsque toute mesure était impossible.

Exceptée la Grande Source, avec ses 101 m<sup>3</sup>/h, toutes les exurgences de Béni-Abbès fournissent des débits compris entre le suintement et 1,8 m<sup>3</sup>/h, avec un total de 12,6 m<sup>3</sup>/h.

Des mesures ont été effectuées à divers intervalles de temps, sur les points d'eau les plus favorables à une étude représentative. Les résultats sont présentés dans le tableau VI.

D'après ces résultats de mesure, il ne semble pas que les débits varient beaucoup et ces variations minimales peuvent être imputées autant à l'entretien des captages qu'à une éventuelle évolution des réserves d'eaux souterraines.

#### B. DEBITS DE LA NAPPE DANS LA REGION DE BENI-ABBES

*Un débit minimal mesuré* : Il est égal au débit total des exurgences soit 30 l/s de Béni-Abbès à Juiffa (quelques km au sud de Béni-Abbès) et 1,5 l/s à Ouarourout. Soit 114 m<sup>3</sup>/h sur un front de 11 kilomètres.

*Un débit maximal évalué* : En plus du débit des exurgences, il faut tenir compte du débit passant par les assises inférieures du Mio-Pliocène puis dans les terrasses quaternaires.

L'épaisseur de la nappe est faible à la base du Mio-Pliocène : 2 à 3 mètres à Hemama. L'hydro-

points d'eau	Date	débit (l/s)
Foggara d'Hemama (n° 132)	3. 9.64	0,040
	6.10.64	0,042
	15.11.64	0,364
Foggara d'Hemama (n° 134)	3. 9.64	0,014
	6.10.64	0,015
Séguia de Béni-Abbès (n° 143)	18.12.63	0,314
	31. 8.64	0,205
	14. 9.64	0,190
Séguia de Béni-Abbès (n° 146)	18.11.63	0,035
	18.12.63	0,041
	31. 8.64	0,030
Séguia de Béni-Abbès (n° 149)	18.11.63	0,029
	18.12.63	0,026
	31. 8.64	0,033
	14. 9.64	0,032
	6.11.64	0,028
Séguia de Béni-Abbès (n° 150)	5. 2.64	0,037
	15. 2.64	0,036
	captage refait	
	6. 9.64	0,149
	6.11.64	0,146
Séguia de la Grande Dune (n° 151)	18.11.63	0,230
	1.12.63	0,244
	11.12.63	0,241
	18.12.63	0,243
	5.12.64	0,235
	15. 2.64	0,233
	30. 3.64	0,226
	31. 8.64	0,230
	14. 9.64	0,240
6.11.64	0,240	

Tableau VI : Variations des débits des exurgences de Béni-Abbès

chimie semble y indiquer un écoulement lent. Les perméabilités des calcaires gréseux et grès argileux paraissent relativement faibles. Les sources ou foggaras, relativement nombreuses, drainant l'eau dans le talus néogène fournissent au total un débit inférieur à 6 m<sup>3</sup>/h. C'est pourquoi, compte tenu de ces observations de terrain, nous pensons que le débit de la nappe qui échappe au drainage des exurgences ne dépasse pas, en étant large, une cinquantaine de m<sup>3</sup>/h et que le débit maximal de la nappe d'Ouarourout à Juiffa demeure inférieur à 165 m<sup>3</sup>/h.

*En conclusion*, les débits de la nappe de Ouarourout à Juiffa sont estimés à :

$114 \text{ m}^3/\text{h} < Q (11 \text{ km}) < 165 \text{ m}^3/\text{h}$   
soit  $10,4 \text{ m}^3/\text{h}/\text{km} < Q (11 \text{ km}) < 15 \text{ m}^3/\text{h}/\text{km}$

### C. DEBITS DE LA NAPPE DE MAZZER A BENI-ABBES

Sur un front de 28 kilomètres, de Mazzer à Juiffa, le débit de la nappe de l'Erg dans le Néogène peut être ainsi circonscrit :

*Un débit minimal mesuré* :  $6 \text{ m}^3/\text{h}$  à Mazzer et  $114 \text{ m}^3/\text{h}$  à Béni-Abbès, soit un total de  $120 \text{ m}^3/\text{h}$  dont quatre cinquièmes dus à la Grande Source.

*Un débit maximal évalué* : Compte tenu des observations et calculs précédents, il semble qu'un débit spécifique maximal puisse être estimé aux environs d'une quinzaine de  $\text{m}^3/\text{h}/\text{km}$ , soit un débit total de  $420 \text{ m}^3/\text{h}$  de Mazzer à Béni-Abbès. La Grande Source fournissant alors le quart de ce débit.

*En conclusion*, les débits de la nappe de Mazzer à Juiffa sont estimés à :

$120 \text{ m}^3/\text{h} < Q (28 \text{ km}) < 420 \text{ m}^3/\text{h}$   
soit  $4,3 \text{ m}^3/\text{h}/\text{km} < Q (28 \text{ km}) < 15 \text{ m}^3/\text{h}/\text{km}$

### 2.3.6. PHYSICO-CHIMIE DES EAUX

28 eaux, prélevées le 30 décembre 1963 d'Ouarourout à Juiffa, ont été classées en trois groupes d'après leur situation géologique et leurs caractéristiques physico-chimiques (Tableau VII).

— Les eaux typiques de l'Erg, prélevées dans le Mio-Pliocène.

— Les eaux à caractères physico-chimiques évolués, intermédiaires à ceux des eaux de l'Erg et de l'Oued, à la suite de l'écoulement dans les terrasses saourienne et guirienne.

— Les eaux de l'Oued.

50 mesures de résidu sec et 132 dosages des teneurs en Cl, d'eaux prélevées en novembre 1963, permettent de tracer avec une bonne précision les cartes en courbes d'égales résidus secs et isochlores.

### A. DIFFERENTES CATEGORIES D'EAUX.

#### a) Les eaux typiques de l'Erg

Le diagramme logarithmique (fig. 18) illustre très nettement l'unité du faciès hydrochimique.

Il convient d'attacher une grande importance à l'hydrochimie de la Grande Source (n° 181), car par son débit élevé, elle représente un bon échantillon moyen des eaux de la nappe du Grand Erg.

Les températures des eaux du Néogène, observées en décembre, varient de  $18^\circ$  à  $26^\circ \text{ C}$ . Cette valeur maximale est celle des eaux de la Grande Source à Ain Séguia, à proximité du captage. Nous avons mesuré à différentes époques les variations de température qui se limitent à  $1^\circ$  et ne permettent aucune interprétation, les mesures ayant été faites avec différents thermomètres.

Les résidus secs sont déjà plus élevés qu'à Mazzer et Igli. Les eaux les moins chargées proviennent de la Grande Source avec  $350 \text{ mg/l}$  et  $11,2 \text{ me/l}$ . Ils ne dépassent qu'accidentellement  $600 \text{ mg/l}$ .

Les valeurs des différents rapports caractéristiques sont présentées dans le tableau VII.

Les formules caractéristiques évoluent avec les concentrations totales en sels, on observe d'abord :

(3 échantillons)  $r \text{ CO}_3 > r \text{ Cl} > r \text{ SO}_4$   
 $r \text{ Ca} > r \text{ Na} > r \text{ Mg}$

puis (7 échantillons)  $r \text{ Cl} > r \text{ CO}_3 > r \text{ SO}_4$   
 $r \text{ Ca} > r \text{ Na} > r \text{ Mg}$

ou (2 échantillons)  $r \text{ Ca} > r \text{ Na} > r \text{ Mg}$   
enfin  $r \text{ Cl} > r \text{ SO}_4 > r \text{ CO}_3$   
 $r \text{ Ca} > r \text{ Na} > r \text{ Mg}$

Leur potabilité est de la classe 1 et 2. L'eau de la Grande Source qui alimente le village en eau courante est de la classe 1.

#### b) Les eaux à caractères évolués

Le diagramme logarithmique (fig. 19) met en évidence la diversité des faciès.

Les températures s'échelonnent de  $13$  à  $22^\circ$  et sont donc inférieures, à cette époque de l'année, à celles des eaux de l'Erg.

Les résidus secs, sur l'ensemble des échantillons, ne dépassent pas  $3320 \text{ mg/l}$ , le minimum observé est de  $430 \text{ mg/l}$  ; en général ils avoisinent  $1000 \text{ mg/l}$ .

Leur potabilité est des classes 1,2,3 ou 4.

Les formules caractéristiques se répartissent ainsi :

nombre d'échantillons	formules caractéristiques
3	$r \text{ CO}_3 > r \text{ Cl} > r \text{ SO}_4$ . . . $r \text{ Ca} > r \text{ Na} > r \text{ Mg}$
1	$r \text{ Na} > r \text{ Ca} > r \text{ Mg}$
1	$r \text{ Na} > r \text{ Mg} > r \text{ Ca}$

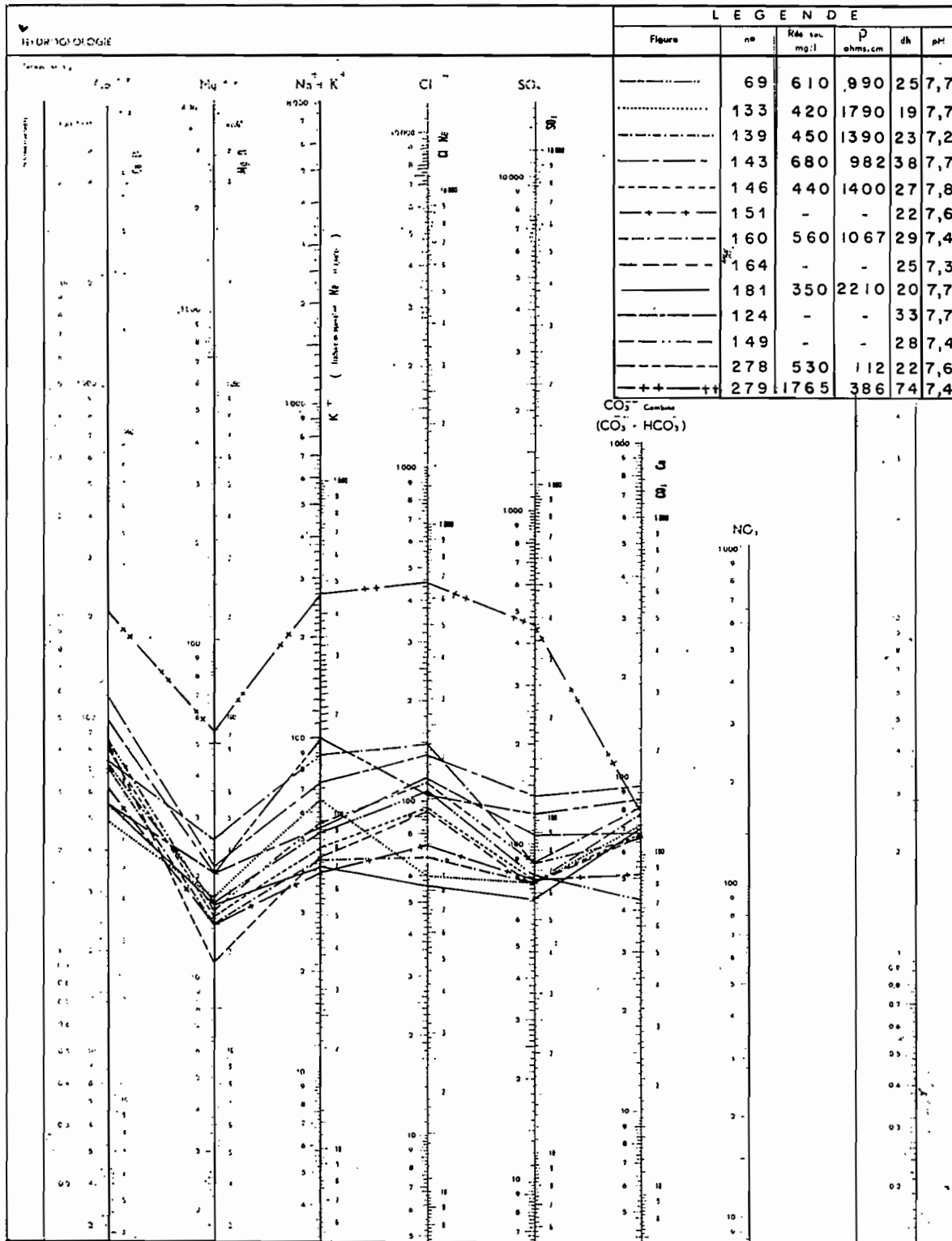


Fig. 18. Diagramme d'analyses d'eaux du Mio-Pliocène de Béni-Abbès.

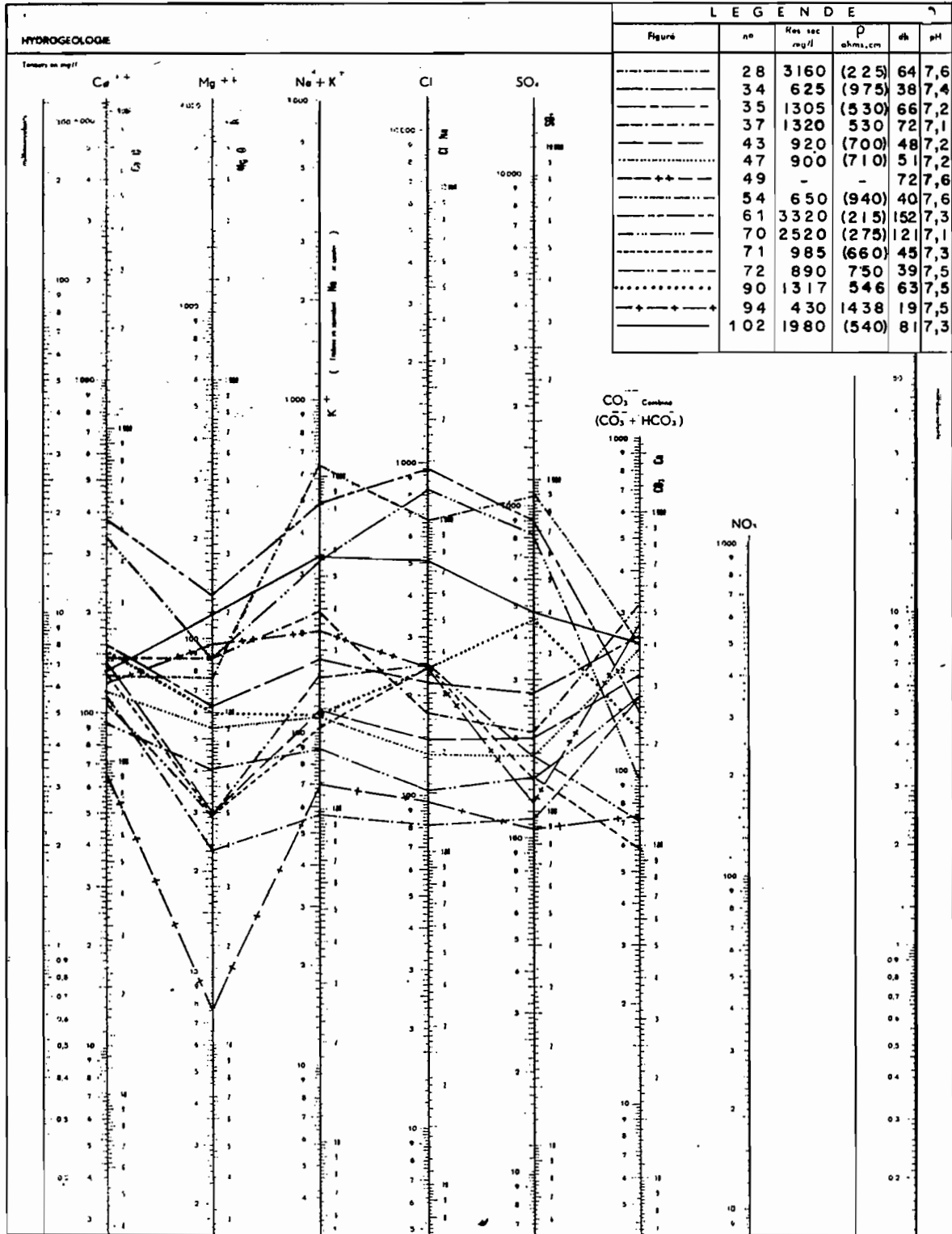


Fig. 19. Diagramme d'analyses d'eaux du Quaternaire de Béni-Abbès.

2	$r \text{ CO}_3 > r \text{ SO}_4 > r \text{ Cl}$	$r \text{ Ca} > r \text{ Na} > r \text{ Mg}$	c) <i>Les eaux de l'Oued</i>
1	$r \text{ Cl} > r \text{ CO}_3 > r \text{ SO}_4$	$r \text{ Ca} > r \text{ Na} > r \text{ Mg}$	Les résidus secs, de 4580 et 7025 mg/l, sont beaucoup plus élevés que ceux des eaux des terrasses quaternaires.
1	$r \text{ Cl} > r \text{ SO}_4 > r \text{ CO}_3$	$r \text{ Na} > r \text{ Mg} > r \text{ Ca}$	Les formules caractéristiques sont :
2		$r \text{ Ca} > r \text{ Na} > r \text{ Mg}$	$r \text{ Cl} > r \text{ SO}_4 > r \text{ CO}_3$ $r \text{ Na} > r \text{ Ca} > r \text{ Mg}$
1		$r \text{ Na} > r \text{ Ca} > r \text{ Mg}$	ou $r \text{ Na} > r \text{ Mg} > r \text{ Ca}$
1	$r \text{ SO}_4 > r \text{ Cl} > r \text{ CO}_3$	$r \text{ Ca} > r \text{ Na} > r \text{ Mg}$	Ces eaux sont de la classe 5 de potabilité.
2		$r \text{ Na} > r \text{ Ca} > r \text{ Mg}$	

Groupes d'eau	dh	rs mg/l	r Cl	r SO <sub>4</sub>	r CO <sub>3</sub>	r Cl- r Na	r SO <sub>4</sub>	r CO <sub>3</sub>	r Mg	r Na
							r Cl	r SO <sub>4</sub>	r Ca	r Mg
Eaux du Néogène (13 échantillons)	19,4	350	1,57	1,44	1,44	> 0	0,95	1,63	0,22	2,52
	25,0	450	2,70	1,63	2,34	> 0	0,68	1,39	0,37	1,80
	37,7	680	4,16	2,91	3,14	< 0	0,44	0,86	0,62	1,28
Eaux du Quaternaire (15 échantillons)	19,4	430	2,28	2,23	1,96	> 0	1,40	3,42	0,19	1,00
	64	1145	6,72	4,15	6,64	< 0	0,86	1,09	0,64	1,54
	152	3320	27,12	22,56	10,52	< 0	0,40	0,17	1,45	4,84
Eaux de l'Oued (2 échantillons)	141	4580	54,48	12,44	7,64	< 0	0,23	0,61	1,50	3,11
	155	5802	69,26	19,72	6,36	< 0	0,28	0,40	1,21	4,16
	169	7025	84,04	26,99	5,08	< 0	0,32	0,19	0,91	5,20

Tableau VII : Intervalles de variation et médianes observés de différentes caractéristiques chimiques des eaux de Béni-Abbès.

## B. REPARTITION DANS L'ESPACE DES TENEURS TOTALES EN SELS ET EN CHLORURES

### a) Répartition des teneurs totales en sels

50 mesures de résidu sec, que nous avons effectuées en novembre 1963, ont permis de tracer la carte en courbes d'égale teneur en sels de la région de Béni-Abbès (fig. 20).

La concentration croît globalement du talus hamadien jusqu'à l'Oued. Les zones de concentrations minimales (inférieures à 500 mg/l) se situent dans le Mio-Pliocène ou en contrebas du talus, suivant une bande plus ou moins large, ainsi que sur une grande partie de la terrasse d'Hemama. Dans le Quaternaire, les concentrations atteignent rapidement 1000 mg/l vers l'aval de la nappe.

La zone irriguée par les eaux de la Grande Source apparaît nettement : les eaux de la nappe y atteignent l'Oued avec des concentrations dépassant de peu 1000 mg/l, alors qu'en dehors de cette zone,

elles s'élèvent toujours à plus de 2000 mg/l et peuvent atteindre des valeurs de plusieurs milliers de mg/l.

Une zone de forte concentration se situe autour du vieux ksar : Les concentrations y sont supérieures à 3000 mg/l, 3340 mg/l étant la concentration maximale observée. Cette partie de la palmeraie est faiblement ou pas du tout irriguée, d'autre part les murs d'enceinte sont entourés d'un fossé où la surface piézométrique est au niveau du sol et où l'évaporation de la nappe est intense.

L'influence bénéfique des irrigations sur la salinisation de la nappe de la palmeraie apparaît donc nettement.

### b) Répartition des teneurs en chlorures

La carte en courbes isochlores (fig. 21) a été dressée d'après 130 dosages que nous avons effectués sur place, en novembre 1963.

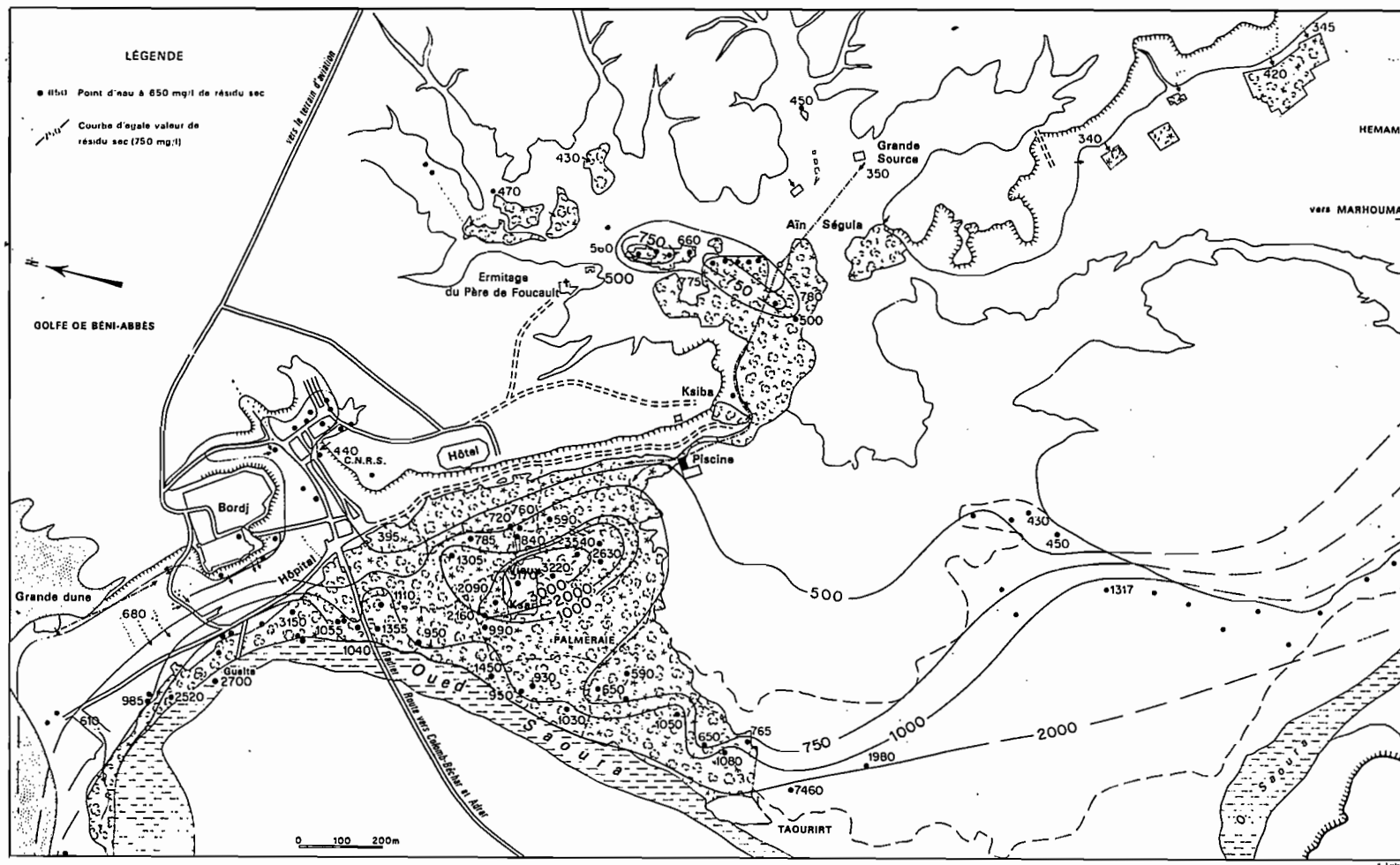


Fig 20. Béni-Abbès. Courbes d'égale valeur de résidu sec de la nappe (en mg/l)

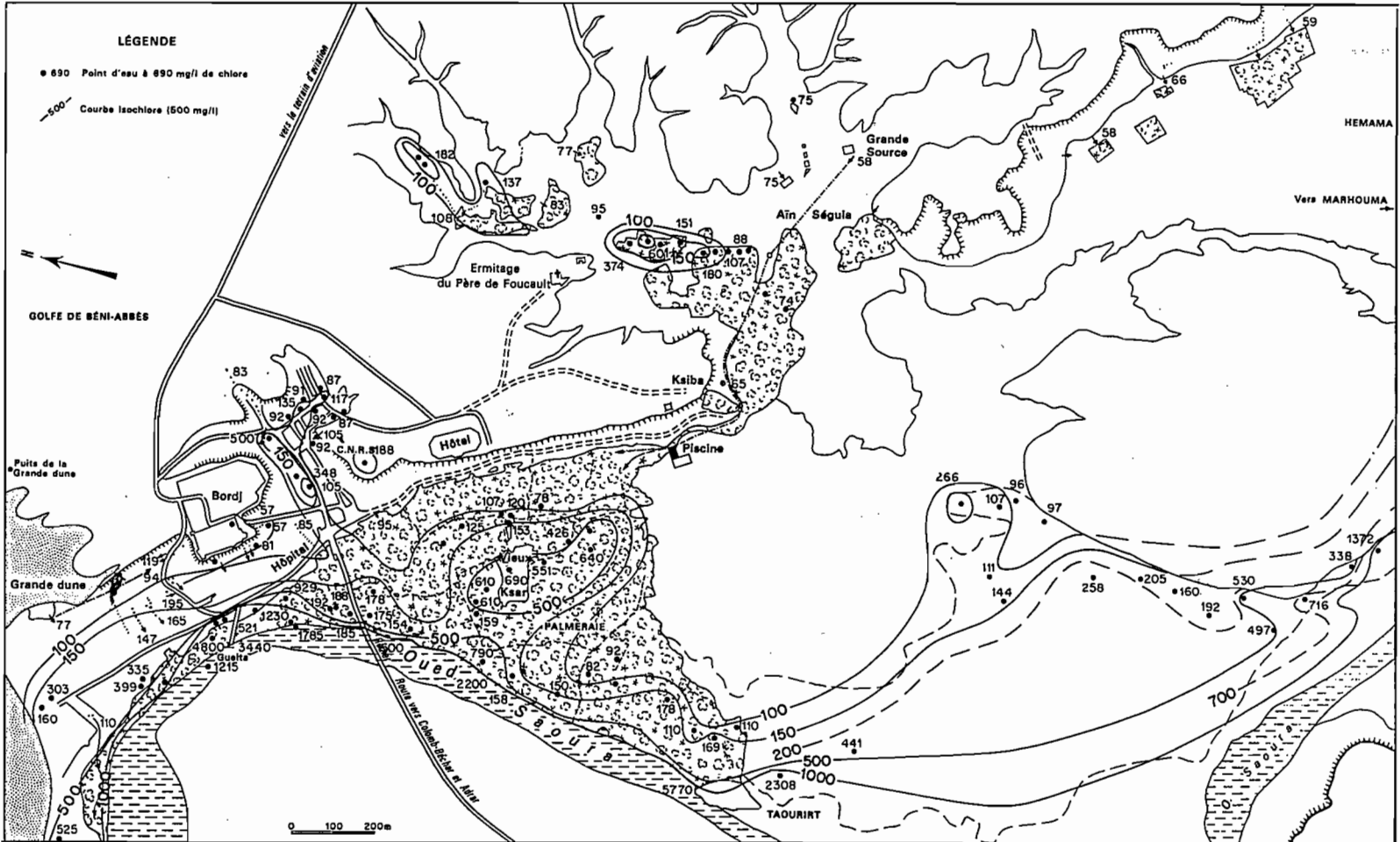


Fig 21. Béni-Abbès. Courbes isochlores de la nappe (en mg/l).

On retrouve une disposition des courbes isochlores analogue à celle des courbes d'égale valeur de résidu sec.

Les teneurs minimales, inférieures à 100 mg/l, se rencontrent dans le Mio-Pliocène, dans une partie du Saourien située en contrebas et à l'est d'He-mama. Quelques séguias, creusées dans la *torba*, fournissent cependant des eaux à teneurs légèrement supérieures à 100 mg/l, ce sont des points d'eau à très faible débit.

Dans la zone irriguée, jusqu'en bordure de l'Oued, les teneurs restent faibles et la courbe 150 mg/l passe très près de la rive. En dehors de cette zone, les concentrations peuvent atteindre plusieurs milliers de mg/l. Aux alentours du vieux ksar, les eaux contiennent plus de 500 mg/l, 690 mg/l étant le maximum pour le puits de la mosquée.

#### 2.4. PALMERAIES D'EL OUATA

El Ouata, la plus grande des oasis de l'Oued Saoura, est en fait constituée d'un groupe de palmeraies. Du nord-ouest au sud-est, ce sont : Bou Hadid, Boukhoulouf, El Ouata (*sensu stricto*), Kser el Ma (au sud d'El Ouata), Ammès et El Maja.

L'oasis s'étale entre le Grand Erg et l'Oued, sur le Guirien et un palier moyen du Saourien. La disposition même de ces gradins fait qu'elle dessine approximativement un triangle dont la base serait la rive de l'Oued. Les palmiers se suivent ici sur 5 kilomètres. La hauteur de ce triangle, d'environ 2 kilomètres, se situerait au niveau d'Ammès où les palmiers passent les premières dunes importantes du Grand Erg.

Les études hydrogéologiques de la nappe des palmeraies d'El Ouata représentent la synthèse d'un inventaire de 230 points d'eau.

##### 2.4.1. CONDITIONS DE GISEMENT DE LA NAPPE

Les formations de la Petite Hamada (Plio-Villafranchien et Villafranchien supérieur) reposent en discordance sur le Dévonien schisteux qui forme le soubassement de la palmeraie avec un pendage de 30° NNE (fig. 22).

La Saoura s'encaisse dans ces dépôts hamadiens et entaille parfois largement le Paléozoïque. Dans la vallée, les terrasses saourienne et guirienne et les alluvions actuelles sont en position emboîtée. Au nord-est, l'Erg recouvre rapidement ce Quaternaire. Il est probable qu'un certain nombre de

petites crêtes, déterminées par les minces bancs durs, existent sous le Quaternaire de la palmeraie, parallèlement à la lisière de l'Erg comme on peut l'observer en amont de Bou Hadid.

La nappe apparaît en rive gauche dans le Saourien et le Guirien, le Dévonien supérieur constituant un mur imperméable efficace. Une coupe relevée à Bou Hadid permet l'étude des terrains aquifères (fig. 22, pl. III).

##### a) Les formations de la Petite Hamada

Au-dessus des schistes dévoniens (I), en rive droite, la Petite Hamada débute par le Plio-Villafranchien (1), représenté par une série essentiellement calcaréo-gréseuse d'épaisseur variable suivant les endroits mais pouvant atteindre 15 à 20 mètres. Le Mazzérien (2 à 6), constitué par des grès, des conglomérats, des sables, des passées d'argiles et de calcaires gréseux ravine cet ensemble.

Les 4 mètres de sables grossiers (2 à 4), à stratifications entrecroisées, présentent de très nombreux boyaux de dissolution de dimension centimétrique à décimétrique. Les parois de ces boyaux sont revêtues d'un enduit carbonaté. L'existence de ces conduits, dans des sédiments possédant une perméabilité en petit importante, doit être interprétée comme une preuve de l'abondance des circulations hydriques et un reflet de l'activité karstique du plateau aux périodes humides quaternaires.

Au-dessus de l'ensemble calcaire (6), on observe l'encroûtement bréchiq, rougeâtre, discontinu q1-2. L'existence d'une dalle calcaire ondulée, parfois dédoublée est assez constante de Bou Hadid à Aguedal.

En rive gauche, cette formation doit se rencontrer dans l'Erg, elle forme alors le soubassement des dunes (fig. 43).

Ce sont les terrains mazzériens qui, par leur perméabilité en petit et en grand, doivent pratiquement fournir le total du débit. Le Plio-Villafranchien plus compact présente en effet une perméabilité très faible et les boyaux de dissolution y sont très peu développés.

##### b) Les terrasses quaternaires, alluvions récentes et sables dunaires.

###### Le Saourien

Plusieurs coupes ont été relevées en bordure de l'Oued, dans les puits et berdas de la palmeraie.

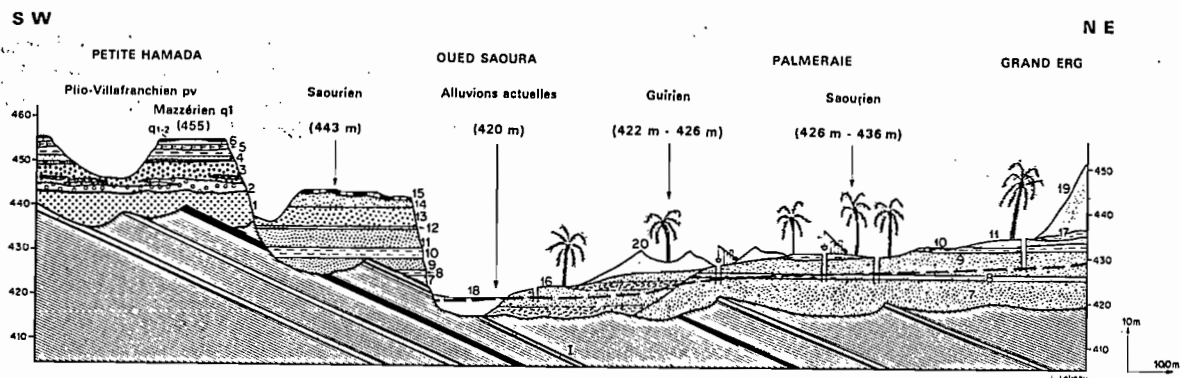


Fig. 22. El Ouata. Coupe hydrogéologique (A.B) à Bou Hadid.

La terrasse, attaquée par l'érosion guirienne, présente trois paliers morphologiques principaux.

Le palier inférieur est généralement déterminé par un premier niveau marno-sableux blanc (8) qui recouvre au moins 5 mètres de sables gris ou verts (7) suivant les endroits.

Au-dessus, se retrouvent des sables gris ou verts (9) avec parfois des passées de graviers. La partie haute de la palmeraie s'établit sur ces sables. Au-dessus, un deuxième niveau marneux (10), d'un mètre d'épaisseur, constitue le niveau blanc qui s'ennoie sous l'Erg de Bou Hadid à Ammès. Il détermine généralement le deuxième palier morphologique. Des sables noirs s'y rencontrent en position de cuvette, représentant des sédiments marécageux d'âge guirien ; une partie des marnes blanches qui y sont associées pourraient également être du même âge, comme G. Conrad (1965) l'a montré en différents points du Sahara nord-occidental et de la région en particulier.

L'épaisseur de ce premier ensemble, recouvrant le Dévonien, doit atteindre 12 à 15 mètres. C'est dans ces dépôts sableux à bonne perméabilité en petit et dans les couches marno-sableuses que se situe la nappe dans la partie nord-est de la palmeraie. L'eau des alluvions actuelles de l'Oued se répand également dans la base de cet ensemble en rive droite, au sud du radier. Le Primaire schisteux doit cependant stopper rapidement la nappe, étant plus élevé sous les dépôts quaternaires que la surface piézométrique.

Sur les marnes blanches (10), viennent ensuite des sables fins, gris, jaune clair, bistres ou bruns (11 à 14) et des débris de croûte de grès calcaire en baguettes appelée *gô* qui jonchent le sommet de la terrasse (15). Leur épaisseur atteint une quin-

zaine de mètres. Ils forment le palier supérieur qui s'étend au nord-ouest et au sud-est de la palmeraie. Ils existent probablement sous les dunes, en arrière de la palmeraie, où ils sont alors aquifères.

#### Le Guirien

Il est constitué de sables bruns fluviaux, à passées de cailloutis essentiellement schisteux qui peuvent prendre une grande importance et jouent alors un grand rôle dans la circulation des eaux.

En surface s'observent des niveaux de sables bistres à stratifications entrecroisées sur une épaisseur de 1 à 1,50 mètre puis se rencontrent des sables bistres sans stratifications apparentes.

*Les sables du Grand Erg et les alluvions récentes de l'Oued* n'ont ici rien de particulier par rapport à ceux observés dans le reste de la Saoura. Les sables du Grand Erg sont toutefois aquifères à Ammès.

#### 2.4.3. PROFONDEUR DE LA SURFACE PIEZOMETRIQUE

225 mesures de la profondeur du niveau de l'eau par rapport au sol, effectuées du 18 au 26 février 1964, ont permis de tracer la carte en courbes d'égale profondeur de la surface piézométrique (fig. 23).

La profondeur de la nappe, dans le secteur de la palmeraie et de l'Oued, varie de 0 à 8 mètres.

Elle peut atteindre 8 mètres (à Bou Hadid) au pied de l'Erg, et décroît ensuite globalement de l'Erg vers l'Oued sur la rive duquel elle n'est plus que de 3 mètres environ.

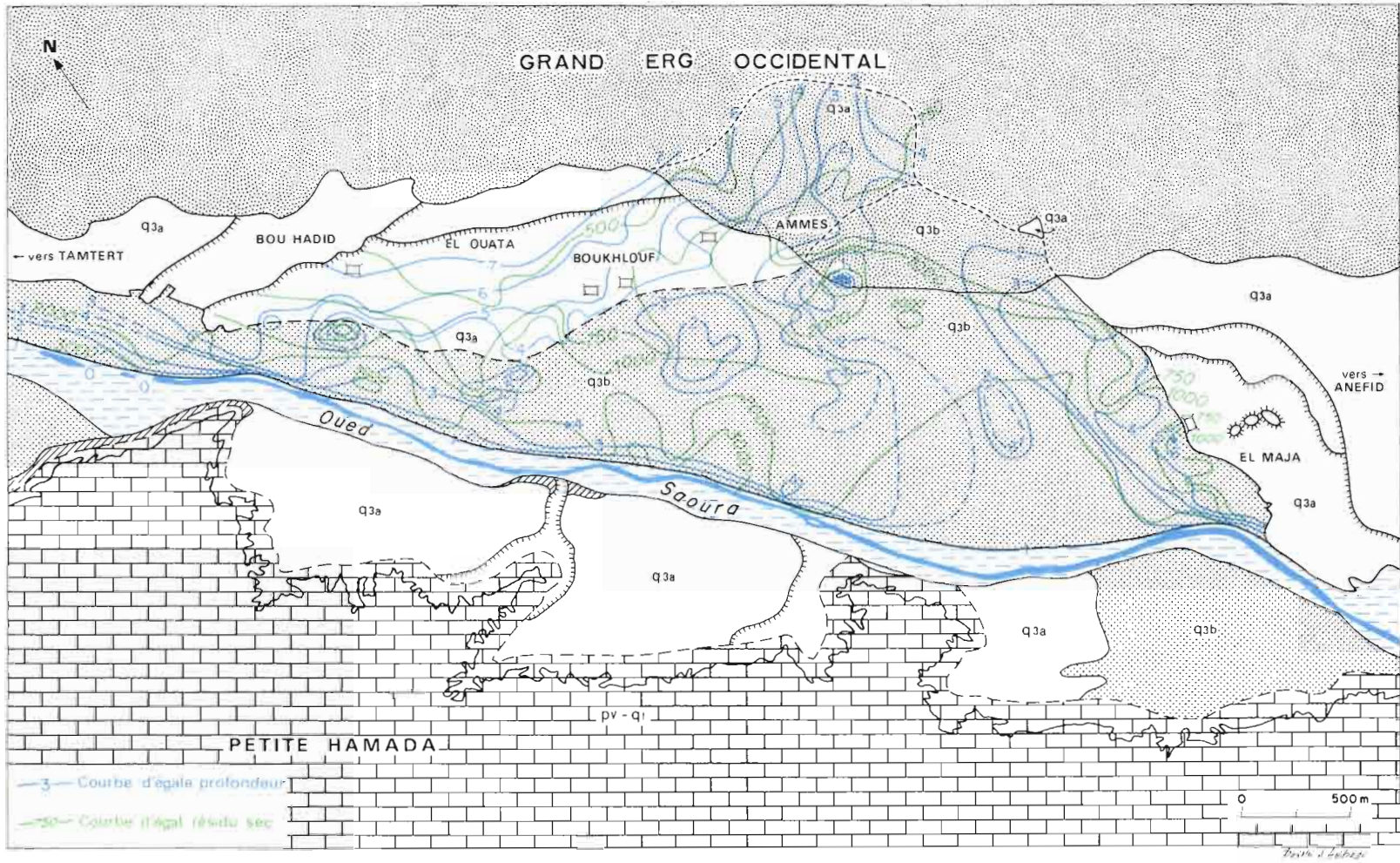


Fig. 23 : El Ouata. Courbes d'égale profondeur de la surface piézométrique (en m) et d'égale teneur en résidu sec (en mg/l) de la nappe.

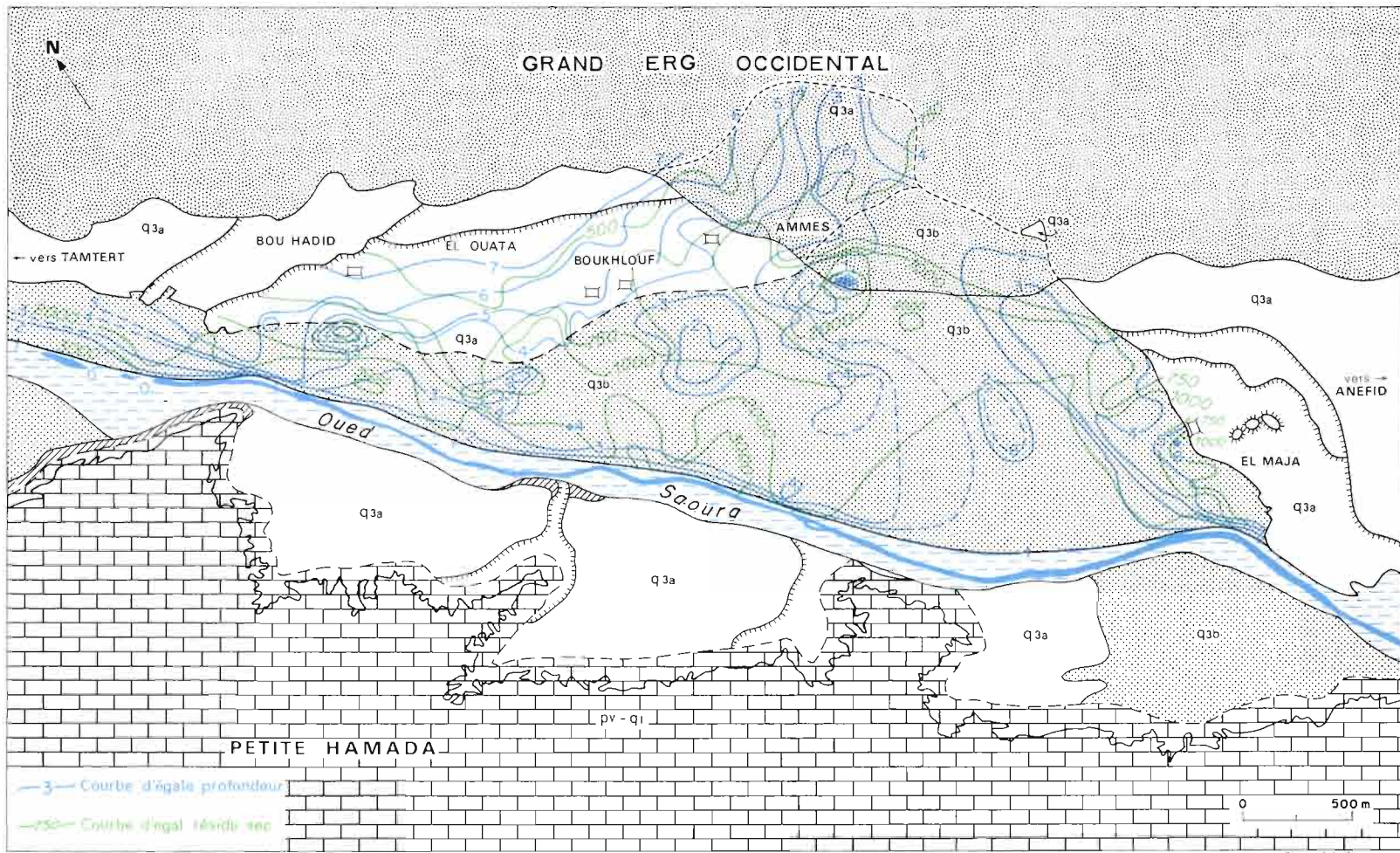


Fig. 23 : El Ouata. Courbes d'égal profondeur de la surface piézométrique (en m) et d'égal teneur en résidu sec (en mg/l) de la nappe.

De Bou Hadid à Ammès, la courbe de 4 mètres correspond grossièrement à la limite des terrasses guirienne et saourienne.

La profondeur la plus fréquente, 3,5 mètres, correspond à la majeure partie de la terrasse guirienne. Cependant entre Ammès et El Maja, l'eau se situe à environ de 2 mètres sous le sol, soit dans le Guirien, soit dans les creux des dunes de l'Erg.

Dans les zones marécageuses d'Ammès et Kser el Ma, l'eau se rencontre à moins d'1 mètre. En deux endroits la nappe affleure, donnant naissance à des mares ou *merjas*.

#### 2.4.4. PIEZOMETRIE DE LA NAPPE

##### A. CARTE PIEZOMETRIQUE

Nous avons effectué une campagne de nivellement des puits, par circuits fermés, pour tracer la carte en courbes isopièzes et les lignes de courant de la nappe (pl. III) pendant la période du 10 au 30 septembre 1964.

a) Il apparaît immédiatement que les eaux de l'Erg alimentent toute la palmeraie. Même en bordure de l'Oued, les puits ne font pas appel à l'inféro-flux, mais au contraire, les alluvions actuelles sont alimentées par la nappe de l'Erg.

b) Au nord-est de la palmeraie, le niveau piézométrique de la nappe de l'Erg, domine de 13 mètres l'inféro-flux de l'Oued ; le gradient hydraulique moyen est de 7 pour 1 000. D'Hassi Zekri à l'Oued, le niveau piézométrique s'abaisse de 40 mètres sur 6 kilomètres soit avec un gradient de 7 pour 1 000.

c) L'examen des courbes piézométriques permet de séparer deux zones hydrogéologiques :

Une zone de Bou Hadid à Kser el Ma, où, en première approximation, la nappe est cylindrique.

Une zone de Kser el Ma à El Maja, où les courbes sont à concavité orientée vers l'aval.

— De Bou Hadid à Kser el Ma, les courbes ne présentent que de faibles sinuosités, mettant par exemple en relief l'apport en eau des séguias du Caïd et de Kser el Ma. Dans l'ensemble, la forme de la nappe est cylindrique. Les eaux de l'Erg descendent vers le sud-sud-ouest jusqu'à la rive de l'Oued avec un gradient moyen de 7 pour 1 000. Ce gradient augmente au passage de la nappe du Saourien au Guirien. Ainsi à El Ouata, dans le Saourien, il est voisin de 4 à 5 pour 1 000 et dans le Guirien de 8 à 9 pour 1 000.

— La zone entre Kser el Ma et El Maja, topographiquement déprimée, exerce un drainage sur la nappe.

A Kser el Ma, les lignes de courant s'incurvent du sud-sud-ouest au sud-sud-est, tandis qu'à El Maja les eaux de la terrasse saourienne passent latéralement au Guirien, s'écoulant vers le sud-ouest.

Le gradient hydraulique est seulement de 3 pour 1 000 dans cette zone où la surface piézométrique, située à faible profondeur, doit subir une évapotranspiration intense. La diminution de débit pourrait en partie expliquer ce faible gradient.

En bordure de l'Erg, au contraire, la nappe présente des gradients élevés. A Ammès ils sont de 10 pour 1 000 dans le Saourien et de 24 pour 1 000 dans les sables dunaires dans lesquels l'eau débouche depuis le talus saourien.

Dans les alluvions actuelles de l'Oued, l'écoulement des eaux souterraines est stoppé en rive droite par le Dévonien supérieur qui crée une barrière étanche. Du sud-sud-ouest, les eaux se dirigent vers le sud-est. Elles peuvent cheminer dans les terrasses ou la Petite Hamada, en rive droite, sur une largeur déterminée par la topographie du Dévonien. Le gradient hydraulique dans la Saoura est très faible : 0,7 pour 1 000 de Bou Hadid à El Maja.

En conclusion, le gradient hydraulique de la nappe de l'Erg sous les palmeraies d'El Ouata n'est pas constant suivant les zones. Pour un même terrain les valeurs sont très variables, ce qui traduit des variations latérales de perméabilité fort concevables dans ces dépôts de terrasses, des variations de section d'écoulement en rapport avec la topographie du mur dévonien, des variations du débit de la nappe dues à l'alimentation, à l'évapotranspiration et à l'exploitation des eaux qui ne sont pas homogènes sur toute la surface de la palmeraie.

##### B. VARIATIONS DU NIVEAU PIEZOMETRIQUE EN 1964

Deux campagnes de mesures de la profondeur de la surface piézométrique ont été menées en 1964, l'une du 18 au 26 février (fin de la saison froide), l'autre du 10 au 30 septembre (fin de la saison chaude). Nous avons eu également l'occasion d'effectuer quelques observations isolées, à différentes autres dates.

La dernière crue remonte à juillet 1963. Deux pluies de l'ordre du millimètre sont tombées en janvier ; les dernières pluies importantes tombées sur la région remontent à 1960 (52,2 mm à Béni-Abbès en hiver). Les mesures ont donc été effectuées sur une période non influencée.

Les remarques suivantes peuvent être faites :

— Pour l'ensemble de la palmeraie, les mesures communes à 34 puits en février puis en septembre, montrent des variations du niveau piézométrique comprises entre  $\pm 0,70$  mètre suivant les points, la médiane des valeurs étant un abaissement de 0,18 mètre. Il est curieux de trouver, pour une même date, des abaissements ou des remontées suivant les points de la palmeraie.

— En bordure de l'Erg, les variations sont particulièrement réduites. Les mesures effectuées sur 10 mois en trois puits indiquent des variations non orientées de 0,13 m, 0,14 m et une valeur nulle.

— C'est dans les zones marécageuses que l'abaissement réel a été le plus fort : 0,5 mètre de décembre 1963 à octobre 1964. Les *merjas* se sont asséchées.

— Dans l'Oued l'abaissement en octobre 1964 par rapport à décembre 1963 a été de 0,3 mètre. Il s'est produit une légère remontée à partir de novembre, due à la diminution de l'évaporation pendant la saison froide.

#### C. VARIATIONS GENERALES DE LA SURFACE PIEZOMETRIQUE

Le profil de dépression de la nappe est déterminé par les conditions d'alimentation et de drainage, les autres facteurs, en particulier la perméabilité  $K$ , étant constants dans le temps.

##### *Alimentation*

L'alimentation détermine le point haut du profil de dépression de la nappe sous la palmeraie. Celui-ci peut être défini comme le niveau piézométrique à la lisière des grandes dunes où les variations semblent difficilement décelables sur une année.

On peut négliger l'apport dû aux pluies sur la palmeraie même.

##### *Drainage.*

Par drainage, on entend la somme de toutes les pertes aux exutoires naturels ou artificiels et du déversement souterrain dans les nappes adjacentes.

Deux modes se distinguent :

a) Un drainage qui s'effectue globalement sur toute la surface de la palmeraie par évapotranspiration et exploitation de la nappe. L'évaporation est importante de mai à septembre tandis que l'irrigation est pratiquée d'octobre à avril, ce qui tend ainsi à régulariser ces pertes au cours de l'année.

b) Un drainage qui s'effectue par l'Oued, lequel détermine le niveau de base de la nappe.

Ce niveau est variable, cependant en période non influencée par les crues, les variations du niveau piézométrique  $y$  sont faibles (inférieures à 0,30 mètre pour l'année 1964). Elles sont liées à son alimentation par sa rive gauche et à l'évapotranspiration qui s'exerce par toute sa surface. On observe fort bien une diminution des filets d'eau superficiels dès l'arrivée des fortes chaleurs en avril et souvent leur réapparition en octobre-novembre. Le drainage par le Dévonien supérieur schisteux est exclu. On peut écrire :

$Q_{\text{Erg}} = Q_{\text{évapotranspiré}} + Q_{\text{Exploité}} + Q_{\text{drainé par l'Oued}}$   
soit finalement :

$Q_{\text{Erg}} = Q_{\text{évapotranspiré}} + Q_{\text{drainé par l'Oued}}$

En période non influencée par les crues, les variations des points haut et bas du profil de dépression de la nappe de la palmeraie étant très faibles, le profil de dépression varie donc très peu sous la seule influence de l'exploitation et de l'évapotranspiration.

Il s'en suit que la carte en courbes d'égale profondeur de la surface piézométrique de la nappe, tracée en février 1964 et la carte piézométrique tracée en septembre 1964, à équidistance des courbes de 1 mètre, peuvent être considérées comme valables pour des périodes non influencées par les crues.

#### 2.4.5. HYDRODYNAMIQUE DE LA NAPPE

##### A. CALCUL DE LA PERMEABILITE DES DEPOTS QUATERNAIRES PAR FORMULES

Les  $d_{10}$  de 4 échantillons de sables (de 0,141 à 0,159 mm), prélevés en divers endroits de l'Erg, permettent de calculer la perméabilité  $K$  à partir de formules établies par différents auteurs. Ces méthodes sont évidemment sujettes à critique, cependant les résultats de trois formules ne varient que dans le rapport 1 à 2,5, ce qui n'est pas excessif compte tenu de la dispersion de  $d_{10}$  :

$$1,0 \cdot 10^{-2} \text{ cm/s} < K < 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ cm/s}$$

La formule qui fournit les valeurs moyennes est  $K = 65 d^2 \cdot 10$ .

Cette même formule donne une valeur  $K = 2,6 \cdot 10^{-3} \text{ cm/s}$  pour les sables saouriens d'El Ouata avec  $d_{10} = 0,06 \text{ mm}$ .

B. ESSAIS DE DEBIT

*Puits n° 259 de Boukblouf (Saourien)*

C'est un puits à parois cimentées étanches, ouvert à la base. L'essai de pompage a duré 86 h. 4 paliers suffisamment stabilisés permettent de tracer la courbe caractéristique (fig. 24) et de déterminer un débit spécifique de 11 m<sup>3</sup>/h/m, au moins pour les rabattements inférieurs à 1,1 m.

En régime de non-équilibre, au début du pompage, les points représentatifs du rabattement spécifique en fonction du logarithme du temps définis-

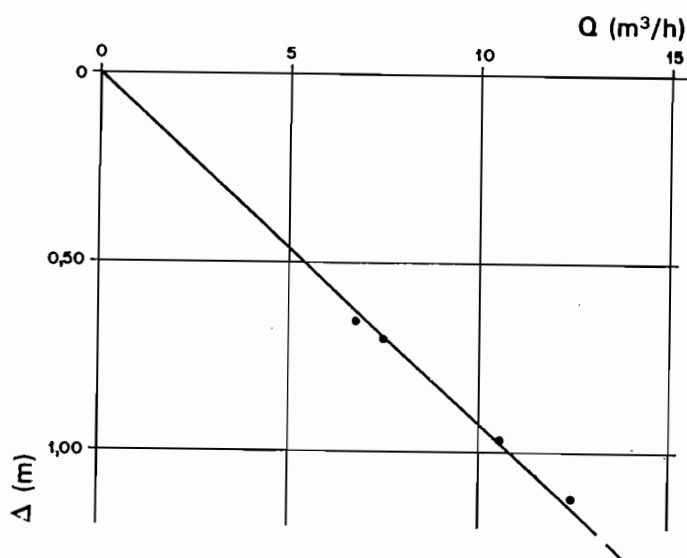


Fig. 24. — Puits 259. Courbe caractéristique

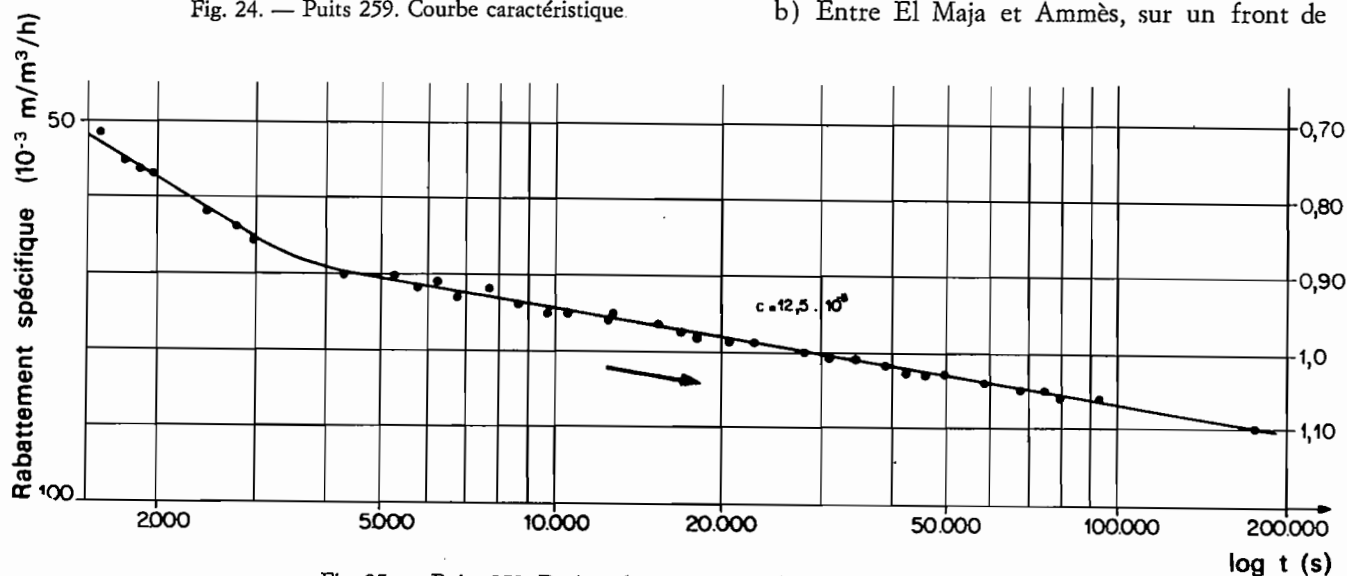


Fig. 25. — Puits 259. Droite rabattement spécifique — logarithme du temps

sent deux segments de droite (fig. 25). La condition restrictive  $t > \frac{25 r^2}{T}$  permet de déterminer comme valable le segment de droite pour lequel  $c = 12,5 \cdot 10^{-3}$  et  $T = 4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ .

L'observation de la remontée, après un pompage de 6,8 m<sup>3</sup>/h, permet de tracer la courbe rabattement résiduel-logarithme du rapport du temps écoulé depuis le début du pompage au temps écoulé depuis l'arrêt (fig 26). Compte tenu de la condition restrictive, le dernier segment de droite donne  $c = 0,29$  et  $T = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Les valeurs de transmissivité sont ainsi  $4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  et  $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , cependant la première valeur, déterminée par le procédé rabattement spécifique - logarithme du temps, est certainement préférable.

C. DEBITS DE LA NAPPE EN DIFFERENTS POINTS.

Les valeurs de transmissivité et de perméabilité vont permettre d'estimer un ordre de grandeur du débit de la nappe en deux zones du front d'alimentation de la palmeraie.

a) De Bou Hadid à Ammès, par la formule  $q = Li T$ , on peut estimer deux débits, fonction de la valeur de la transmissivité choisie, avec  $i = 5$  pour 1 000.

Pour  $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s} < T < 4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  on calcule  $22 \text{ m}^3/\text{h}/\text{km} < q < 74 \text{ m}^3/\text{h}/\text{km}$

b) Entre El Maja et Ammès, sur un front de

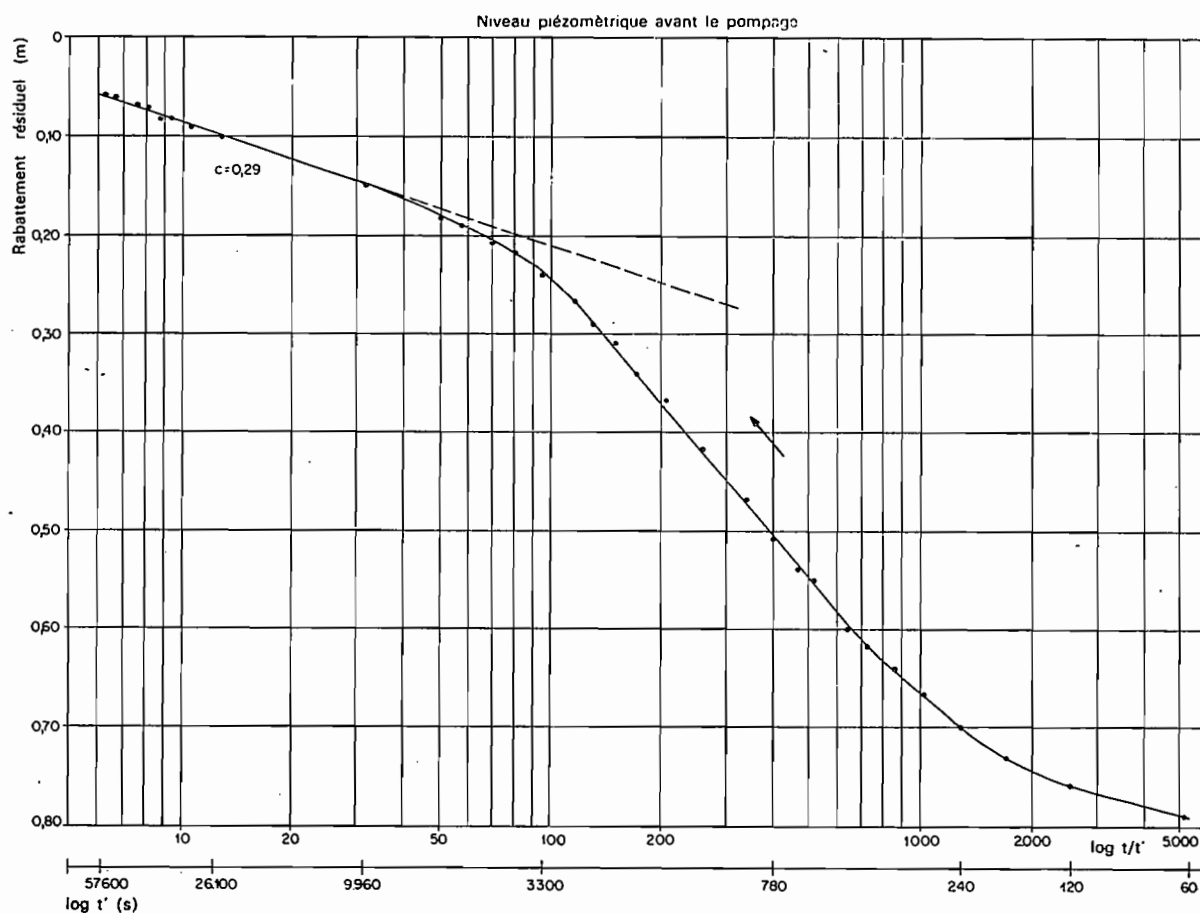


Fig. 26. Puits 259. Courbe de remontée.

700 m, une partie des eaux de la nappe s'écoule dans les sables dunaires, l'autre partie dans le Guirien sur lequel reposent les dunes. Ces eaux proviennent directement du Saourien. Le nivellement montre que la surface du Guirien, en cette zone, est pratiquement horizontale, ce qui représente une épaisseur de sables dunaires aquifères de 5 mètres. Le rôle du Guirien est ainsi très réduit.

Le gradient hydraulique est élevé : 24 pour 1000.

La perméabilité moyenne a été calculée  $K = 1,5 \cdot 10^{-4}$  m/s.

$$q(700 \text{ m}) = L K H i$$

$$q(700 \text{ m}) = 47 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$q(1 \text{ km}) = 67 \text{ m}^3/\text{h}$$

On retrouve donc une valeur du même ordre de grandeur que celle déduite des essais de pompage

par le procédé rabattement spécifique — logarithme du temps.

Une estimation des débits exploités peut se situer aux environs de  $100 \text{ m}^3/\text{h}$  sur l'ensemble des palmeraies.

A la suite d'essai de pompage dans le Saourien de Boukhlouf, les débits ont été estimés entre 22 et  $74 \text{ m}^3/\text{h}/\text{km}$ . En contrebas du Saourien, entre Ammès et El Maja, le débit dans les sables dunaires et le Guirien sous-jacent pourrait être d'environ  $70 \text{ m}^3/\text{h}/\text{km}$ .

Ces débits de l'ordre de  $70 \text{ m}^3/\text{h}/\text{km}$  nous paraissent un peu élevés.

*Pour conclure*, nous dirons que les débits de la nappe de l'Erg, à El Ouata, sont compris entre 25 et  $70 \text{ m}^3/\text{h}/\text{km}$ . Sur un front de 5 km le débit total alimentant les palmeraies est donc compris entre 125 et  $350 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Ceci représente sur les 630 ha que couvrent les palmeraies et l'Oued, une lame d'eau de 0,5 à 1,3 mm/j.

On conçoit alors aisément que, dans ces régions où l'évaporation est de plusieurs mm/j, la totalité de cet apport soit évaporé sur place par évapotranspiration au cours de l'écoulement sous la palmeraie et par simple évaporation dans l'Oued. Une évaporation de 4 à 10 mm/j suffirait à évaporer cette quantité d'eau sur la seule surface de l'Oued. Le fait est qu'on y observe une variation saisonnière du débit des filets d'eau et qu'en été seules subsistent quelques mares en surface.

#### 2.4.6. PHYSICO-CHIMIE DES EAUX

22 eaux, dont les analyses portent sur les principaux ions, ont été prélevées sur l'ensemble de la palmeraie, les 28 et 31 décembre 1963. Du 18 au 26 février 1964, l'étude hydrochimique détaillée de la nappe a été entreprise par l'inventaire de 225

points d'eau. Du 10 au 30 septembre 1964, 48 mesures supplémentaires de température d'eau ont été effectuées.

#### A. TEMPERATURES DES EAUX

Les comparaisons sont basées sur l'étude de 48 points d'eau.

Les eaux de la nappe de la palmeraie, situées dans la zone d'hétérothermie annuelle, subissent l'influence des conditions climatiques. Leur température varie suivant un régime annuel. Il apparaît une corrélation brute entre la profondeur de la surface piézométrique et la température. Il faudrait cependant apporter une correction, fonction du diamètre du puits et de la hauteur d'eau. Il ne s'agit là que des températures de la partie supérieure de la nappe dans les puits où s'exercent les influences climatiques directes.

Les valeurs d'ensemble, à différentes dates, sont présentées dans le tableau suivant :

Date	Températures extrêmes		Ecart extrême pour l'ensemble de la nappe
	Saurien	Guirien	
décembre 1963	16° à 25,5°	12° à 21°	13,5°
février 1964	15° à 25,5°	14° à 24°	11,5°
septembre 1964	22° à 26,7°	22° à 27°	6°

Les températures extrêmes, mesurées sur l'ensemble de la nappe, sont donc 12° en décembre et 27° en septembre. L'écart absolu maximal observé est de 15°.

Dans le Saurien, en bordure de l'Erg, la température varie peu. Les eaux d'un puits y représentent bien la nappe en cet endroit : 25,5° en décembre 1963 et février 1964 et 26,6° en septembre 1964. L'écart, de 1,6°, est vraisemblablement inférieur sous le Grand Erg, où il doit tendre vers zéro.

Dans la palmeraie, la température des eaux en février 1964 apparaît en moyenne supérieure de 1 à 2° par rapport à décembre 1963. Cet accroissement tend vers zéro pour les températures déjà élevées (25,5°). Le minimum annuel, compte tenu des facteurs climatiques, est probablement atteint en janvier. Les températures de septembre 1964 sont en moyenne supérieures de 6° à celles de février 1964. Les écarts pour un même point d'eau sont échelonnés de 0 à 12,5°. Le maximum est probablement atteint en août.

Sur l'ensemble de la nappe, l'écart moyen de décembre à septembre est de 7 à 8°.

La dispersion des températures est plus élevée en hiver qu'en été.

#### B. pH DES EAUX.

225 mesures du pH des eaux ont été effectuées sur place, quelques jours après leur prélèvement en février 1964.

Les valeurs se dispersent assez régulièrement de 7,0 à 8,5, la valeur la plus fréquente est 7,6. Les eaux sont donc légèrement basiques, mais leur pH diminue dans l'ensemble en direction de l'Oued ; celles venant de l'Erg ont généralement des valeurs supérieures à 8.

#### C. TENEURS TOTALES EN SELS.

222 mesures de résistivité d'eaux, prélevées en février, permettent de tracer une carte détaillée en courbes d'égale résidu sec (fig. 23) en se basant sur

la relation 
$$rs \text{ (mg/l)} = \frac{65.10^4}{\rho \text{ } 18^\circ \text{ (}\Omega \text{. cm)}}$$

Eaux	dh	rs mg/l	r Cl	r SO <sub>4</sub>	r CO <sub>3</sub>	r Cl- r Na	$\frac{r SO_4}{r Cl}$	$\frac{r CO_3}{r SO_4}$	$\frac{rMg}{r Ca}$	$\frac{r Na}{r Mg}$
Eaux du Saourien (Eaux de l'Erg) (9 échantillons)	26	470	2,25	1,79	1,70	>0	0,89	1,29	0,33	1,05
	30	560	3,12	2,36	2,36	>0	0,73	1,02	0,45	1,28
	43	715	4,94	3,83	3,48	<0	0,56	0,61	0,72	1,45
Eaux du Guirien El Maja (4 échantillons)	35	755	4,16	3,34	3,13	>0	1,23	1,34	0,70	1,27
	44	800	5,49	4,04	4,39	>0	0,86	1,00	0,78	1,41
	45	955	6,27	5,19	4,94	<0	0,68	0,82	1,25	1,55
Bou Hadid Kser el Ma (7 échantillons)	58	1040	6,14	4,51	2,20	>0	0,81	1,54	0,39	1,15
	87	2140	15,67	7,15	6,30	>0	0,56	0,53	0,74	1,41
	150	3240	25,56	17,09	13,22	>0	0,45	0,21	1,74	2,52
Bordure de l'Oued (1 échantillon)	184	3890	34,57	19,73	3,74	>0	0,57	0,19	0,99	1,29

Tableau VIII : Intervalles de variation et médiane de différentes caractéristiques hydrochimiques de la nappe à El Ouata

La concentration totale en sels croît globalement de l'Erg vers l'Oued.

Les zones de concentration minimale, inférieure à 500 mg/l, se situent en bordure de l'Erg, dans la partie nord de la terrasse saourienne de Bou Hadid à Ammès. Dans le Saourien, les teneurs demeurent inférieures à 750 mg/l. L'apport latéral de la terrasse saourienne d'El Maja apparaît nettement, les résidus secs y sont inférieurs à 750 mg/l.

Les zones de concentration maximale, supérieure à 2000 mg/l et pouvant dépasser 4 000 mg/l, se cantonnent en bordure de l'Oued, dans les zones marécageuses où le sol est couvert d'efflorescences salines et entre Kser el Ma et El Maja où l'évapotranspiration est intense à cause de la faible profondeur de la nappe.

Les concentrations des eaux coulant dans l'Oued varient de 1 300 à 3 000 mg/l.

Le gradient chimique est élevé ; sur le profil AB (fig. 35), de la courbe 500 mg/l à l'Oued, il atteint 3,5 mg/l/m.

La comparaison des cartes en courbes isopièzes et d'égale profondeur de la surface piézométrique avec la carte en courbes d'égale concentration en sels montre que l'augmentation de la concentration s'effectue dans le sens de l'écoulement et qu'il existe une corrélation avec la profondeur de la surface piézométrique.

Ceci souligne le rôle prépondérant de l'évapotranspiration dans la concentration en sels.

La concentration s'accélère d'amont en aval et la courbe isobathe 4 mètres coïncide approximativement avec le début de cette accélération.

Entre Ammès et El Maja, où la nappe se rencontre à moins de 3 mètres dans le creux des dunes, les teneurs demeurent cependant faibles, ce qui illustre le rôle efficace des sables dunaires contre l'évaporation.

Les terrains aquifères paraissent aussi influencer : dans le Saourien, les résidus secs croissent de 470 à 750 mg/l. Dans le Guirien, ils sont toujours supérieurs à 500 mg/l et y atteignent en moyenne 3000 mg/l. Le terrain intervient dans l'évaporation par ses caractères physiques (granulométrie, porosité, nature lithologique...) et le Guirien, outre la faible profondeur de la nappe, semble plus favorable à ce phénomène.

#### D. REPARTITION SPATIALE DES TENEURS IONIQUES

Les diagrammes logarithmiques (fig. 27 et 28) présentent les résultats d'analyses des prélèvements de décembre 1963. Le tableau VIII indique les intervalles de variation et la médiane des différentes caractéristiques hydrochimiques. Les eaux ont été classées suivant leur origine : celles du Saourien en provenance directe de l'Erg et celles du Guirien déjà très évoluées. L'étude portera sur les différents ions.

##### a) Les chlorures

La carte en courbes isochlores (fig. 29) a été

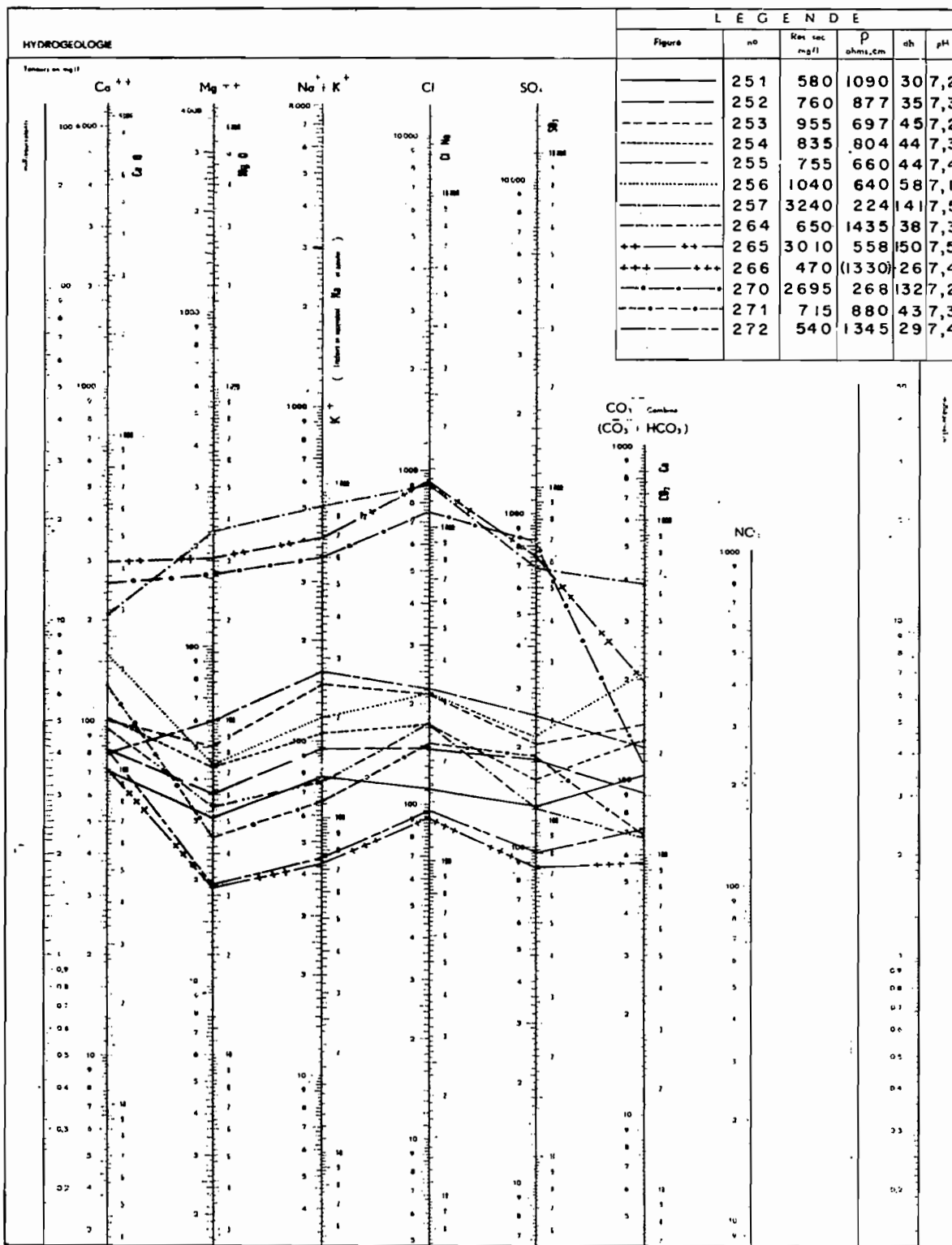
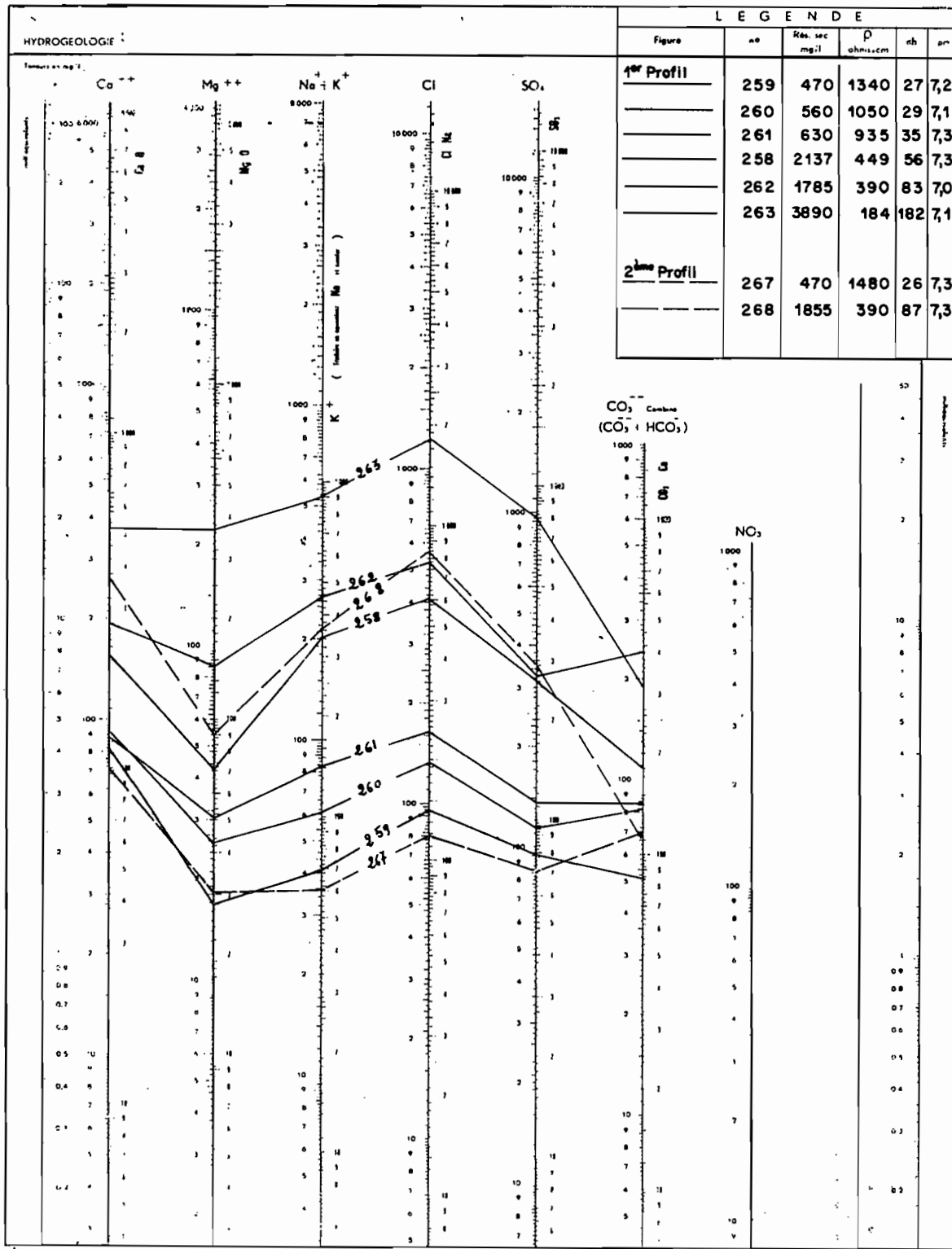


Fig. 27. Diagramme d'analyses d'eaux des palmeraies d'El Ouata.



ca-tion  
saie

Fig. 28. Diagramme d'analyses d'eaux des palmeraies d'El Ouata. Evolution chimique sur deux profils dans le sens d'écoulement de la nappe.

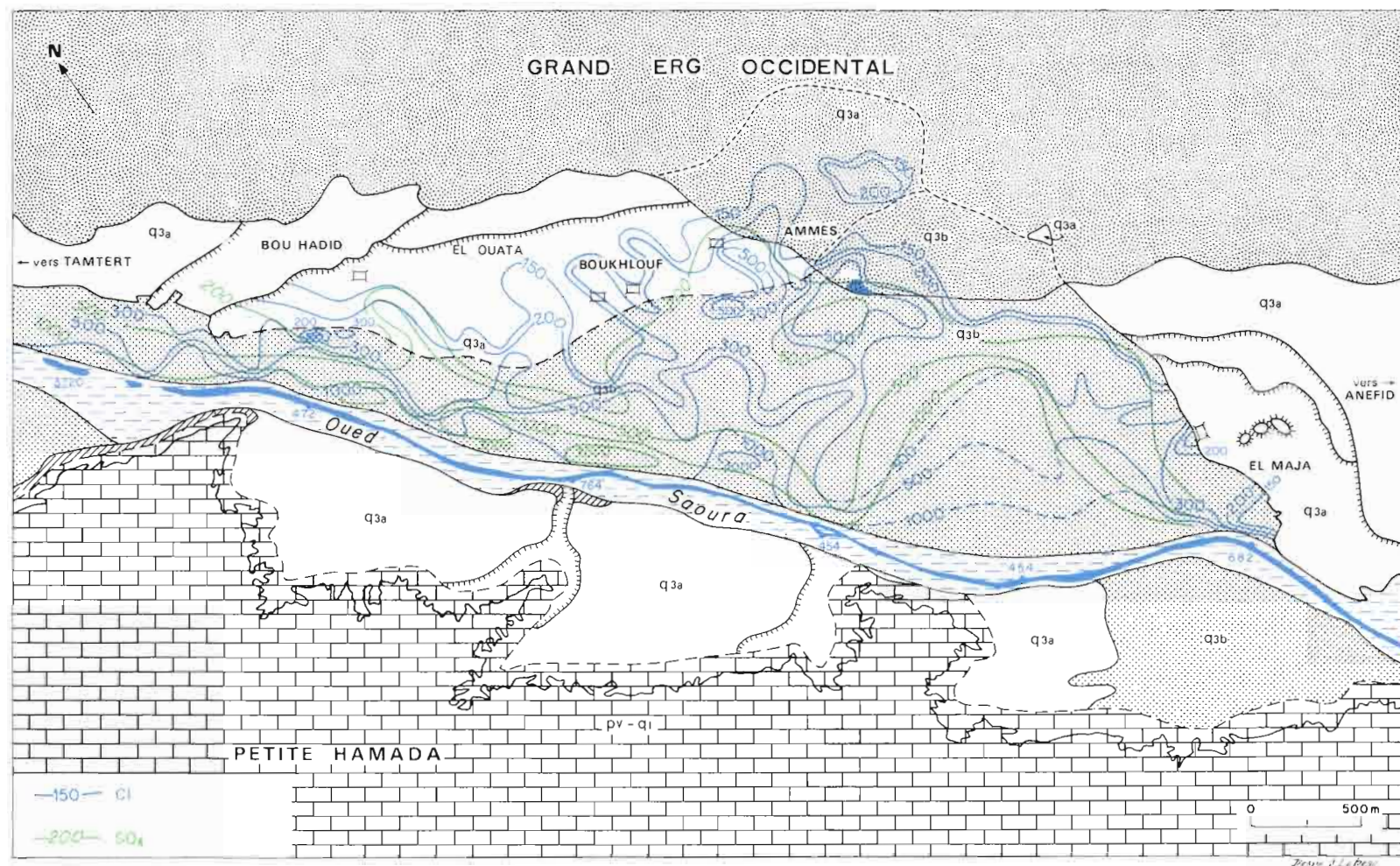


Fig. 29 : El Ouata. Courbes isochlores et isosulfates de la nappe (en mg/l).

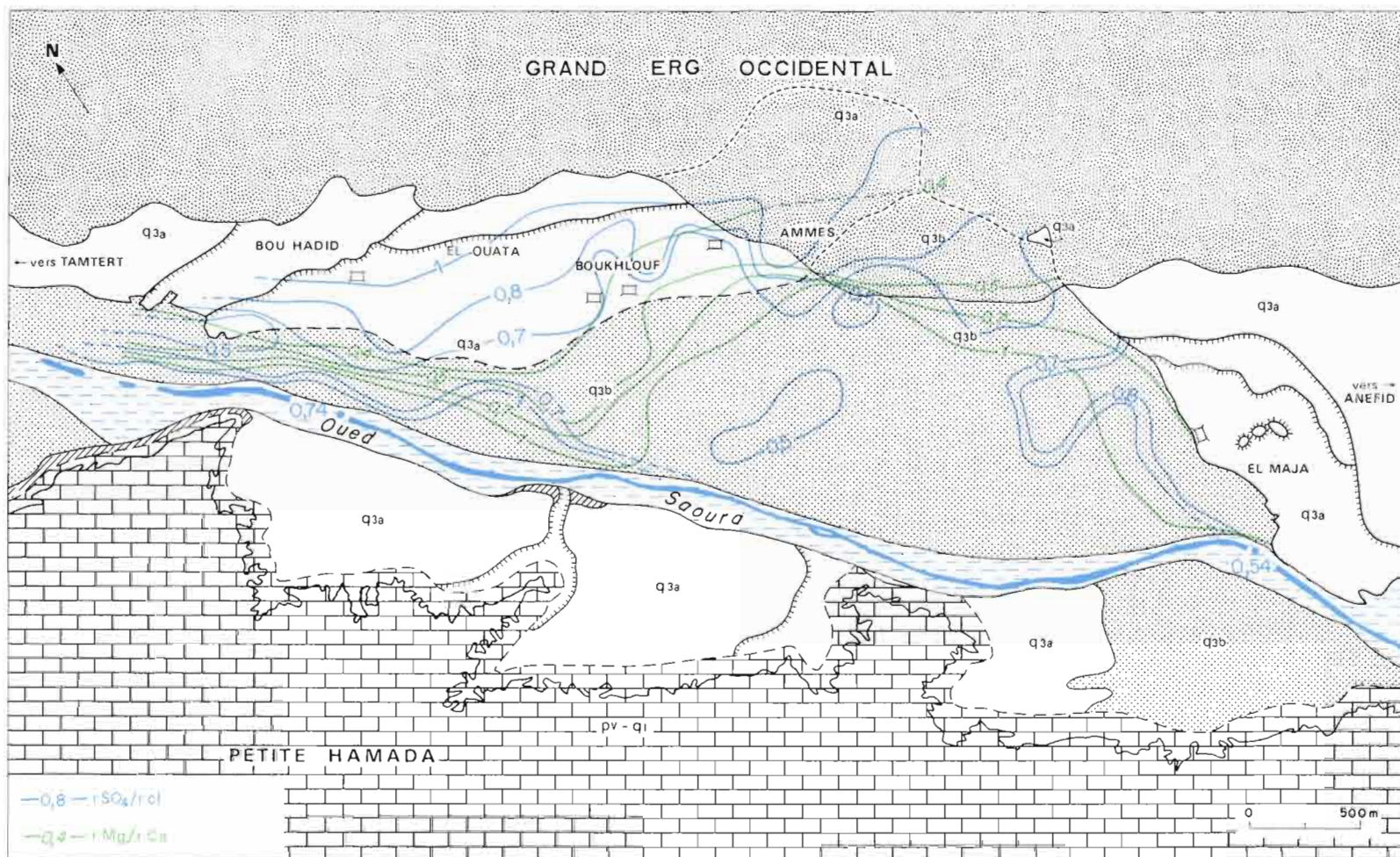


Fig. 30 : El Ouata. Courbes des rapports  $r \text{ SO}_4 / r \text{ Cl}$  et  $r \text{ Mg} / r \text{ Ca}$  de la nappe.

dressée à partir de 225 dosages de l'ion Cl d'eaux prélevées en février 1964.

— *Concentrations minimales* : Dans le Saourien, à proximité de l'Erg, les eaux ont des teneurs en Cl inférieures à 150 mg/l (4,2 me/l). Celles inférieures à 100 mg/l y sont fréquentes, 80 mg/l (2,2 me/l) étant les minimums pour quelques puits de la partie nord d'Ammès. De Bou Hadid à Ammès, la courbe 250 mg/l (7 me/l) correspond approximativement au passage du Saourien au Guirien. Dans les sables dunaires, entre Ammès et El Maja, les concentrations sont inférieures à 150 mg/l. A El Maja, les eaux arrivant latéralement de la terrasse ont également des teneurs inférieures à 150 mg/l.

— *Concentrations maximales* : Dans le Guirien les concentrations croissent rapidement et peuvent atteindre 1000 mg/l (32 me/l) en bordure de l'Oued. La courbe 1000 mg/l et la berge de la Saoura déterminent des zones où les concentrations peuvent atteindre plusieurs milliers de mg/l.

Dans l'Oued, les concentrations en chlorures sont souvent moins élevées que celles de la rive. Nous avons également constaté ce phénomène pour les concentrations totales en sels. Ceci s'explique par le fait que les puits du bord de l'Oued sont très mal entretenus et peu profonds et les terrains riches en limon, ce qui facilite l'évaporation des eaux de la surface de la nappe.

#### b) *Les sulfates.*

La carte en courbes isosulfates (fig. 29) a été dressée à partir de 68 dosages de l'ion  $\text{SO}_4$  d'eaux prélevées en février 1964.

— *Les concentrations minimales* : Les eaux du Saourien ont des teneurs échelonnées de 77 à 200 mg/l (1,6 à 4,2 me/l). Dans cette zone, le gradient de concentration est pratiquement imperceptible. Au début de leur écoulement dans le Guirien, les eaux ont généralement des teneurs encore inférieures à 200 mg/l.

— *Les concentrations maximales* : Au-delà de la courbe 200 mg/l, la concentration s'accélère rapidement pour atteindre 1000 mg/l (21 me/l) à proximité de l'Oued. En bordure de la rive, on rencontre des teneurs maximales de 3700 mg/l (77 me/l). Dans la Saoura, les concentrations sont plus faibles : 470 à 495 mg/l (9,8 à 10,3 me/l).

#### c) *Les rapports sulfates — chlorures*

La carte en courbes  $r \text{SO}_4/r \text{Cl}$  (fig. 30), tracée d'après 65 valeurs, permet de suivre l'évolution relative de ces deux anions dans l'ensemble de la nappe.

Dans la terrasse saourienne, de Bou Hadid à Ammès, en bordure de l'Erg,  $r \text{SO}_4/r \text{Cl}$  est généralement supérieur ou égal à 1. Mais, dans le sens de l'écoulement de la nappe, la concentration en Cl croît plus rapidement que celle en  $\text{SO}_4$  et le rapport décroît. Au voisinage du Guirien le rapport atteint 0,7 et dans cette terrasse oscille de 0,7 à 0,45.

A Bou Hadid et El Ouata, dans la zone de forte salinité en bordure de la Saoura, les sulfates prédominent soudainement à nouveau sur les chlorures. Dans l'Oued les rapports observés sont 0,74 et 0,54 ; c'est-à-dire qu'ils sont équivalents à ceux généralement existant dans l'ensemble du Guirien.

L'évaporation de la nappe augmente avec la diminution de la profondeur de la surface piézométrique, amenant une concentration des sels d'autant plus importante qu'ils sont plus solubles. Il est donc normal que d'amont en aval, la concentration en Cl soit plus rapide que celle en  $\text{SO}_4$ . D'autre part, les palmiers prélèvent dans les eaux de la nappe une certaine quantité de sels, mais ils absorbent préférentiellement certains ions et influent ainsi sur la composition ionique des eaux.

#### d) *Les carbonates*

D'après les résultats d'analyses des eaux prélevées en décembre 1963, les teneurs en  $\text{CO}_3$  combiné sont comprises entre 51 mg/l et 238 mg/l (1,7 et 7,9 me/l). Une teneur exceptionnelle de 389 mg/l est à noter.

#### e) *Les alcalino-terreux et rapports magnésium-calcium*

La carte en courbes d'égale valeur de  $r \text{Mg}/r \text{Ca}$  (fig. 30), tracée d'après les analyses de décembre 1963, montre une évolution simple du rapport.

Dans la terrasse saourienne de Bou Hadid à Ammès, on observe  $0,3 < r \text{Mg}/r \text{Ca} < 0,4$ . La courbe 0,4 se situe aux environs de la limite des deux terrasses quaternaires. Cependant, il semble qu'au sud de Boukhlof, le Mg se concentre plus vite et le rapport atteint 0,7 à l'arrivée des eaux dans le Guirien. En bordure de la Saoura, les concentrations en Mg deviennent supérieures à celles en Ca. Ceci se produit également dans les zones marécageuses d'Ammès et entre Kser el Ma et El Maja. On peut expliquer ceci par le fait que le  $\text{CO}_3 \text{Ca}$  atteint rapidement sa limite de solubilité. La concentration en  $\text{SO}_4 \text{Ca}$  est également moins rapide que celle en  $\text{SO}_4 \text{Mg}$  et  $\text{Cl}_2 \text{Mg}$ .

#### f) *Les formules caractéristiques.*

Les analyses des prélèvements de décembre 1963

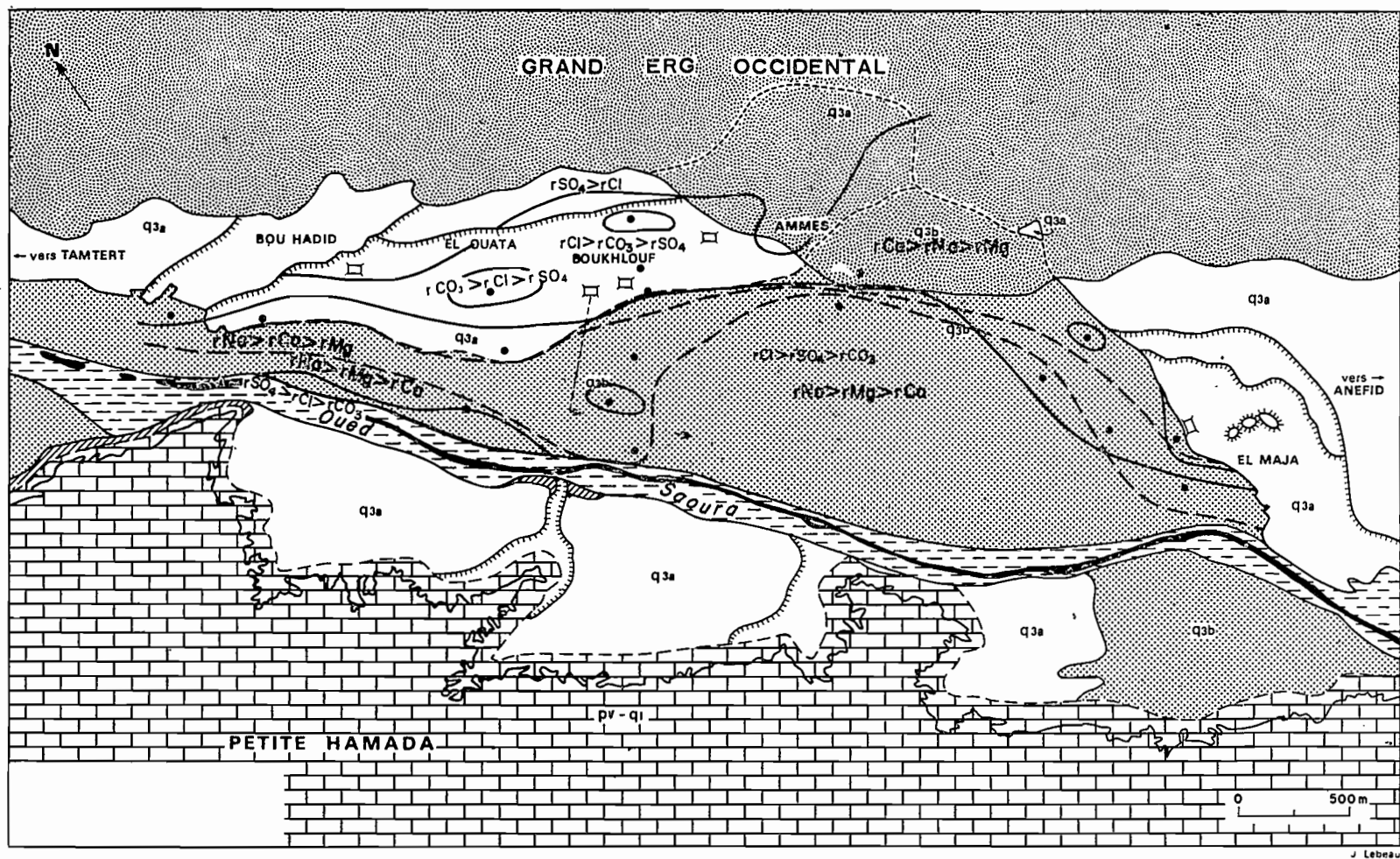


Fig. 31. El Ouata. Carte des formules caractéristiques de la nappe.



permettent de tracer une carte (fig. 31) qui résume l'évolution des formules caractéristiques sur l'ensemble de la nappe de la palmeraie.

En amont, on observe d'abord

$r \text{ SO}_4 > r \text{ Cl}$   
 puis  $r \text{ Cl} > r \text{ CO}_3 > r \text{ SO}_4$  avec généralement  
 $r \text{ Ca} > r \text{ Na} > r \text{ Mg}$  et enfin  $r \text{ Cl} > r \text{ SO}_4 >$   
 $r \text{ CO}_3$

avec  $r \text{ Ca} > r \text{ Na} > r \text{ Mg}$   
 ou  $r \text{ Na} > r \text{ Ca} > r \text{ Mg}$   
 ou  $r \text{ Na} > r \text{ Mg} > r \text{ Ca}$

Des formules intermédiaires se rencontrent cependant.

#### 2.4.7. COMPOSITIONS ISOTOPIQUES DE L'OXYGENE DES EAUX DE LA PALMERAIE

L'analyse de 36 échantillons (fig. 32), prélevés du 10 au 30 septembre 1964, montre des valeurs de rapport isotopique  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  assez bien groupées entre  $\delta^{18}\text{O} = -5,8\text{‰}$  et  $\delta^{18}\text{O} = -3,2\text{‰}$ ,

avec une moyenne de  $-4,4\text{‰}$  pour l'ensemble de la palmeraie. Cette valeur est plus faible que celles des eaux de la nappe de l'Erg qui alimentent la palmeraie dans la zone de Bou Hadid à Ammès.

Aucune évolution dans l'espace ne se détache de la carte des valeurs de  $\delta^{18}\text{O}$  : Les valeurs les plus élevées supérieures à  $-4\text{‰}$ , apparaissent cependant dans la terrasse saourienne de Bou Hadid à Ammès. Des valeurs inférieures à  $-5\text{‰}$  se rencontrent localement dans la palmeraie et sur la bordure de la falaise saourienne d'El Maja.

Aucune corrélation n'existe entre les compositions isotopiques et la résistivité, mesurée simultanément.

La répartition des valeurs reste pour l'instant difficile à interpréter, mais il se confirme que l'évaporation de la nappe dans la palmeraie se produit essentiellement par capillarité, sans fractionnement notable.

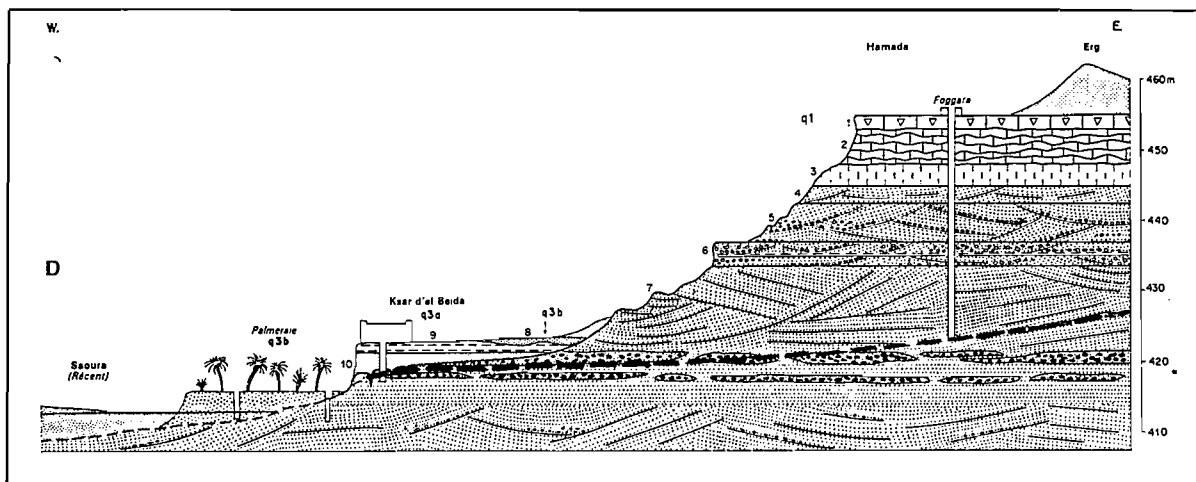


Fig. 33. Coupe hydrogéologique de la Petite Hamada et des terrasses quaternaires de la Saoura en rive gauche à El Beïda (d'après G. CONRAD et M.A. ROCHE - 1965).

- 1) croûte calcaréo-gréseuse, bréchique, q 1 ;
- 2) calcaire gréseux, noduleux ;
- 3) calcaire sableux, tufacé, blanc ;
- 4) grès grossier, à stratification entrecroisée ;
- 5) grès et conglomérat à boyaux de dissolution ;
- 6) conglomérat à chenaux et intercalation d'argile ;
- 7) grès grossier ;
- 8) sable noir, q 3 b ;
- 9) calcaire crayeux, blanc, q 3 a ;
- 10) sables verts, q 3 a.

## 2.5. PALMERAIES D'ANEFID, AGUEDAL ET EL BEIDA

La palmeraie d'Anefid se situe en rive gauche, 2 kilomètres en aval d'El Maja. Elle s'étend sur la terrasse guirienne, avec cependant quelques jardins et berdas sur le premier palier morphologique saourien. Sa superficie est d'environ 90 hectares, toutefois les palmiers se suivent sur le Guirien jusqu'aux oasis d'Aguedal et El Beïda, 3 kilomètres en aval.

Aguedal, par sa disposition géologique est fort comparable à Anefid, mais elle est cultivée beaucoup plus intensivement sur une superficie légèrement plus faible.

El Beïda, petite palmeraie de 5 à 6 hectares, fait suite à Aguedal 500 mètres en aval. Elle s'établit en rive gauche sur le Guirien, cependant des jardins se développent également en rive droite. Dans cette petite oasis existe une foggara unique dans la Saoura : Creusée dans les sables du Villafranchien supérieur q1, elle est actuellement morte, mais amenait auparavant les eaux de l'Erg sur le Guirien. Elle est divisée en deux branches. Sur la cinquantaine de puits, qui ont servi à son creusement, 19 d'entre eux traversent 28 mètres de calcaire puis de grès et poudingues. Sa longueur dépasse 300 mètres.

### 2.5.1. CONDITIONS DE GISEMENT DE LA NAPPE

La géologie et la situation géologique de la nappe phréatique des palmeraies d'Anefid et Aguedal sont très semblables à celles d'El Ouata.

Le substratum paléozoïque n'affleure pas mais se situe à faible profondeur. Il s'agit du Dévonien moyen et inférieur constitué de grès, de schistes et de calcaires. Les formations de la Petite Hamada et les dépôts guiriens et saouriens de la vallée le recouvrent totalement.

A Anefid et Aguedal, la nappe phréatique s'écoule dans le Saourien et le Guirien, et à El Beïda dans le Villafranchien supérieur et le Guirien (fig. 33).

#### a) Les formations hamadiennes pv et ql.

Elles apparaissent pour la première fois en rive gauche à Aguedal et El Beïda (G. CONRAD et M.A. ROCHE - 1965).

A Aguedal, en rive droite, 8 à 10 mètres au-dessus de l'Oued, un niveau conglomératique ravine une série argilo-gypseuse datant du Plio-Villafranchien inférieur (pv).

30 mètres d'argiles gréseuses passant à des grès, des niveaux de sables à stratifications entrecroisées et des conglomérats couronnés par une dalle essentiellement calcaire, appartiennent au cycle villafranchien supérieur q1.

A El Beïda, en rive gauche, on n'observe plus de témoin des formations du Plio-Villafranchien inférieur à la base des coupes.

La nappe de l'Erg s'écoule à la base des formations de la Petite Hamada qui sont des sédiments détritiques grossiers : sables, grès, poudingues fluviaux à stratifications entrecroisées (7 à 4). Les eaux circulent préférentiellement dans les niveaux sableux et dans les nombreux boyaux qui s'observent dans les dépôts détritiques plus ou moins cimentés.

Au sommet, des calcaires terminent la série avec une dominance de calcaire tufacé blanc (3 à 1). Sous le Grand Erg ce dernier niveau doit être aquifère.

#### b) Les terrasses quaternaires.

Le Saourien q3a. La stratigraphie est comparable à celle observée à El Ouata, avec toutefois une plus grande importance des couches marno-calcaires blanches par rapport aux sables gris ou verts. Le gypse y forme de petites roses de sables.

Le Guirien q3b. A Anefid et Aguedal, les crues ont déterminé trois paliers d'érosion dans la terrasse guirienne. Celle-ci est constituée de sables fluviaux fins, limoneux, bruns, à passées argileuses. Le sommet est formé de sables jaune clair à stratifications entrecroisées. Elle repose directement sur le Villafranchien supérieur.

### 2.5.2. PROFONDEUR DE LA SURFACE PIEZOMETRIQUE

La carte en courbes d'égale profondeur de la surface piézométrique par rapport au sol (fig. 34) a été dressée à partir des mesures effectuées sur 108 points d'eau, du 14 au 20 mars 1964.

A Anefid et Aguedal, dans le palier inférieur du Saourien, le niveau piézométrique se situe entre 8 et 4 mètres et, dans le Guirien, entre 5 et 2 mètres. Sur cette basse terrasse, l'érosion et les travaux de terrassement, particulièrement développés pour l'aménagement des jardins, déterminent des courbes d'égale profondeur très sinueuses.

La berge de la Saoura détermine une brusque variation de la profondeur de la surface piézométrique. Alors que sur la rive gauche la nappe se ren-

contre aux alentours de 3 mètres, elle se situe à moins de 1 mètre dans les alluvions actuelles et affleure généralement, donnant naissance à un fin filet d'eau ou à des gueltas.

A El Beïda, en bordure du talus hamadien, la nappe apparaît au fond de quelques puits de la grande foggara. Le niveau piézométrique est à 28 mètres en dessous du sommet de la Petite Hamada. Dans le palier saourien l'eau se rencontre entre 7 et 5 mètres, et dans le Guirien aux alentours de 3 mètres. L'eau coule en permanence dans l'Oued tout le long de cette palmeraie.

### 2. 5. 3. PIEZOMETRIE DE LA NAPPE

#### A. CARTE PIEZOMETRIQUE

Nous avons effectué une campagne de nivellement des puits, du 8 au 14 octobre 1964 par cheminement fermé, rattaché à celui d'El Ouata, afin de tracer la carte en courbes isopièzes.

La carte piézométrique (pl. IV) permet un certain nombre de remarques :

A Anefid, les eaux arrivent du nord est, perpendiculairement au talus de la terrasse saourienne. Dans le Guirien, apparaissent des zones de surexploitation ; en cours de pompage, l'eau des alluvions actuelles de la Saoura est légèrement sollicitée. La pente moyenne de la surface piézométrique est de 20 pour 1 000 dans le Saourien et de 8 pour 1 000 dans le Guirien. La pente moyenne observable dans cette palmeraie est de 10 pour 1 000.

A Aguedal, à la lisière de l'Erg, les eaux proviennent du Saourien sur le bord nord et du Villafranchien supérieur sur le bord est. Le gradient hydraulique dans le Guirien est de 3 à 4 pour 1 000.

A El Beïda, les lignes de courant sont perpendiculaires au talus hamadien et le gradient hydraulique élevé. Les suintements à partir du Villafranchien supérieur se situent plusieurs mètres au-dessus de l'Oued.

En rive droite, les cotes piézométriques des puits se sont révélées inférieures à celles de l'eau de l'Oued. Il apparaît donc ici que l'inféro-flux passe dans les terrasses et formations hamadiennes de la rive droite. L'eau doit être définitivement stoppée vers l'ouest par les assises imperméables du Dévonien.

### B. VARIATIONS DU NIVEAU PIEZOMETRIQUE EN 1964.

A Aguedal, la profondeur de la surface piézométrique a été mesurée du 8 au 14 octobre 1964 sur 16 points d'eau déjà étudiés en mars 1964 : Le rabattement de la nappe le plus élevé, observé en octobre par rapport à mars, est de 0,42 mètre. La remontée extrême est de 0,30 mètre. La médiane des variations du niveau piézométrique est un rabattement de 0,06 mètre. Comme nous l'avons déjà montré pour les régions plus septentrionales et en particulier pour El Ouata, les variations ont été très faibles de la fin de la saison froide à la fin de la saison chaude. Il apparaît donc que les cartes bathymétriques et piézométriques, dressées en 1964, possèdent une valeur générale pour des périodes non influencées, comparables à celles pendant lesquelles ont été effectuées les mesures.

### 2. 5. 4. PHYSICO-CHIMIE DES EAUX

#### A. DIFFERENTES CATEGORIES D'EAU.

Dans les palmeraies d'Anefid, Aguedal et El Beïda, 21 eaux prélevées le 27 décembre 1963 ont été classées en trois catégories, d'après leurs caractéristiques physico-chimiques et gisements géologiques.

— Les eaux typiques de l'Erg, prélevées dans le Villafranchien supérieur, le Saourien et au contact du Saourien et du Guirien.

— Les eaux à caractères physico-chimiques évolués, prélevées dans le Guirien.

— Les eaux de l'Oued.

Les diagrammes logarithmiques (fig. 35 et 36) présentent les résultats d'analyses ; le tableau IX indique les intervalles de variation et la médiane de différentes caractéristiques hydrochimiques de ces trois catégories.

#### a) Les eaux typiques de l'Erg.

La température maximale mesurée est de 21°.

Les résidus secs sont supérieurs à 500 mg/l et inférieurs à 800 mg/l.

Comparées aux autres eaux de la bordure de l'Erg, depuis la région d'Igli, celles-ci présentent les caractères chimiques les plus évolués, c'est-à-dire :

— les résidus secs les plus élevés.

— les teneurs en tous les ions analysés les plus élevées.

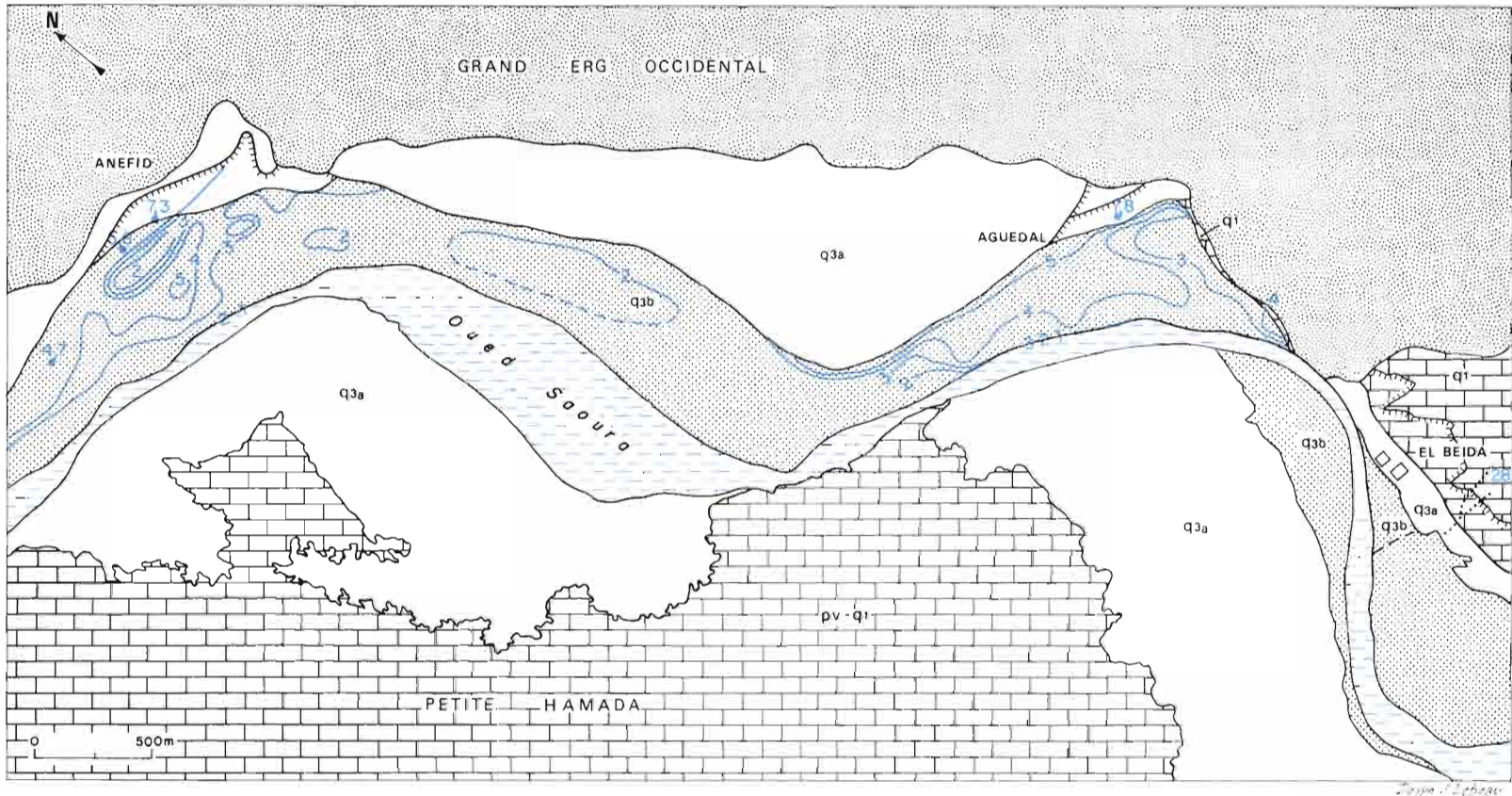


Fig. 34 : Anefid et Aguedal. Courbes d'égal profondeur de la surface piézométrique de la nappe.

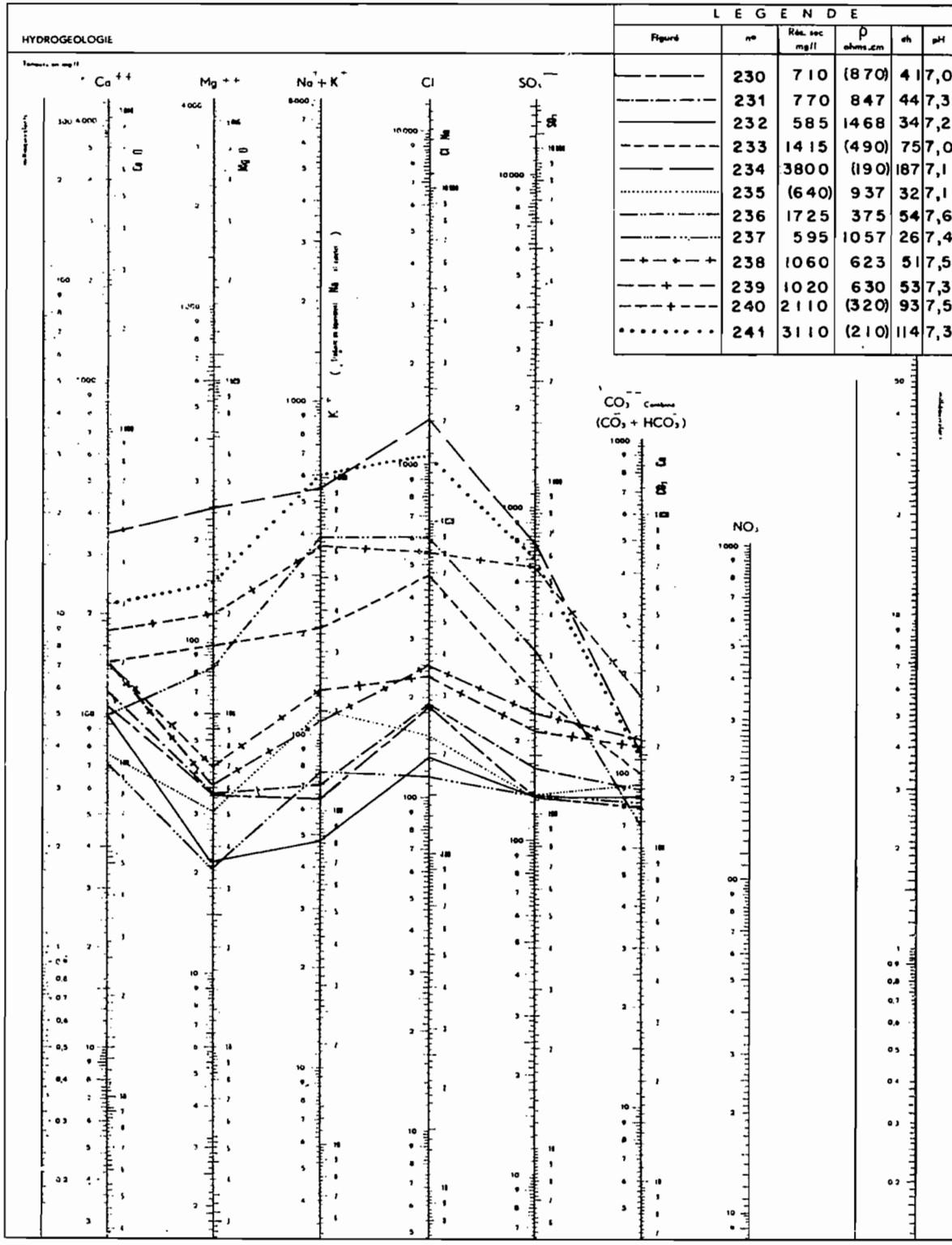


Fig. 35. Diagramme d'analyses d'eaux de la palmeraie d'Anefid.

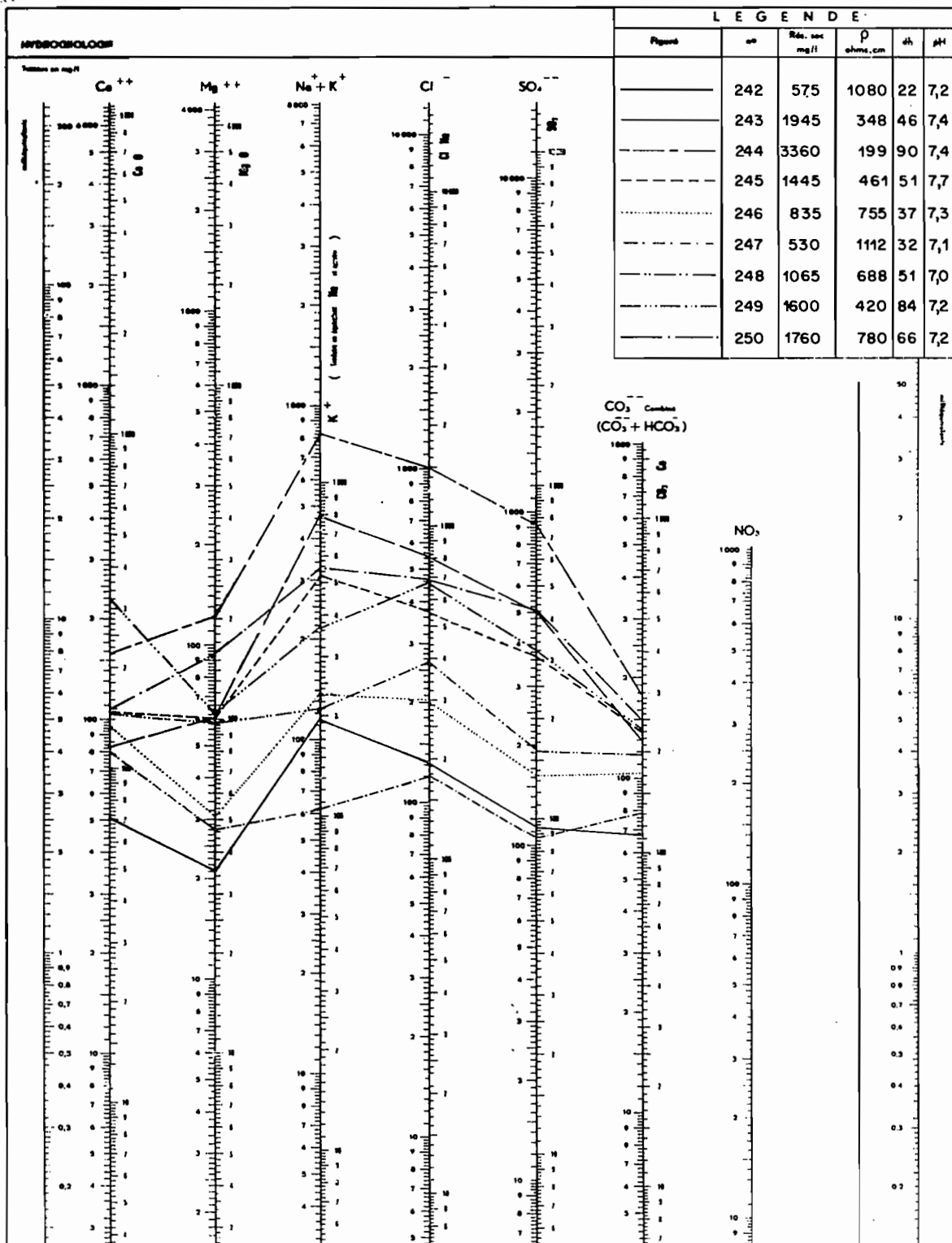


Fig 36. Diagramme d'analyses d'eaux de la plmeriaie d'Aguedal et d'El Beïda.

- $r\text{CO}_3/r\text{SO}_4$  les plus faibles.
- $r\text{Na}/r\text{Mg}$  les plus faibles.
- $r\text{Mg}/r\text{Ca}$  les plus élevés.

Les formules caractéristiques traduisent cette évolution relative :

$$r\text{Cl} > r\text{CO}_3 > r\text{SO}_4 \quad r\text{Ca} > r\text{Na} > r\text{Mg}$$

$$\text{ou } r\text{Na} > r\text{Ca} > r\text{Mg}$$

$$\text{et } r\text{Cl} > r\text{SO}_4 > r\text{CO}_3 \quad r\text{Ca} > r\text{Na} > r\text{Mg}$$

$$\text{ou } r\text{Na} > r\text{Ca} > r\text{Mg}$$

$$\text{ou } r\text{Na} > r\text{Mg} > r\text{Ca}.$$

Les limites des différents rapports sont données dans le tableau IX.

La potabilité est de la classe 2.

Eaux	rs mg/l	r Cl	rSO <sub>4</sub>	rCO <sub>3</sub>	rNa rCl-	r SO <sub>4</sub> rCl	rCO <sub>3</sub> rSO <sub>4</sub>	rMg rCa	rNa rMg
Eaux de l'Erg.	530	3,32	2,20	2,26	>0	0,87	1,20	0,35	0,97
Plio-Villafranchien	595	3,73	2,88	2,71	>0	0,65	0,95	0,53	2,18
Saourien (7 échantillons)	770	5,33	3,49	3,16	<0	0,55	0,87	0,68	2,86
Eaux évoluées	835	5,77	3,37	3,40	>0	0,90	1,02	0,42	1,11
Guirien	1600	13,1	8,02	4,20	<0	0,68	0,58	1,10	2,81
(13 échantillons)	3800	38,7	19,4	5,86	<0	0,43	0,23	1,46	4,17
Eau de l'Oued (1 échantillon)	1725	17,1	7,99	2,40	>0	0,47	0,30	1,59	2,52

Tableau IX : Intervalles de variation et médiane de différentes caractéristiques chimiques des eaux d'Anefid, Aguedal et El Beïda.

b) *Les eaux à caractères physico-chimiques évolués.*

Certaines de ces eaux présentent des caractères chimiques analogues et même parfois plus évolués que ceux de l'eau de l'Oued. La carte piézométrique (pl. IV) montre que le niveau de la nappe dans ces puits est supérieur à celui de l'Oued et il ne s'agit donc pas d'eaux venues des sables actuels de la Saoura. Ces puits se situent dans des zones d'irrigations intensives où l'évolution hydrochimique s'effectue rapidement par recyclage des eaux de la nappe et évapotranspiration.

Les températures des eaux de cette catégorie s'échelonnent de 22 à 11°.

Les résidus secs s'accroissent de 835 à 3800 mg/l.

c) *Les eaux de l'Oued.*

L'eau prélevée dans l'Oued apparaît par ses caractères physico-chimiques comme un échantillon moyen des eaux les plus évoluées du Guirien.

Son résidu sec de 1725 mg/l est relativement faible, mais en mars 1964 il avait sensiblement augmenté, étant alors de 2280 mg/l.

La formule caractéristique est :

$$r\text{Cl} > r\text{SO}_4 > r\text{CO}_3 \quad r\text{Na} > r\text{Mg} > r\text{Ca}$$

Sa potabilité est de la classe 3.

B. REPARTITION DANS L'ESPACE DES TENEURS TOTALES EN SELS ET EN CHLORURES.

Une deuxième série de 109 échantillons a été prélevée du 14 au 20 mars 1964. La résistivité a été mesurée et le Cl dosé. Ces résultats ont permis de tracer une carte en courbes d'égale teneur en résidu sec (les résistivités ayant été traduites en résidus secs) et en courbes isochlores.

a) *Répartition dans l'espace des teneurs totales en sels.*

D'après la carte en courbes d'égale teneur en résidu sec (fig. 37), il apparaît que le Saourien contient des eaux à concentration totale en sels généralement inférieure à 750 mg/l. Dans le Guirien, la concentration croît rapidement dans le sens de l'écoulement de la nappe jusqu'à 2000 mg/l. Au-delà, des zones de fortes concentrations se dessinent nettement. Les teneurs y dépassent 2000 et parfois 3000 mg/l. A Anefid, en bordure de la Saoura, elles redeviennent inférieures à 2000 mg/l.

Dans l'Oued, les concentrations augmentent vers l'aval, de 1040 à Anefid à 2280 mg/l à Aguedal.

b) *Répartition dans l'espace des teneurs en chlorures.*

La carte en courbes isochlores (fig. 38) confirme la répartition précédente.

Les teneurs les plus faibles (110 mg/l) se rencontrent dans le Saourien, elles y demeurent généralement inférieures à 200 mg/l.

Dans le Guirien, les teneurs passent rapidement de 150 à 500 mg/l. La rive de l'Oued et la courbe 500 mg/l déterminent une zone où les teneurs peuvent dépasser 1000 mg/l et atteindre, dans certains puits, plusieurs milliers de mg/l.

Dans l'Oued des teneurs oscillent de 540 à 752 mg/l.

## 2.6. INFERO-FLUX DE L'OUED SAOURA

### 2.6.1. ALIMENTATION DE L'INFERO-FLUX

Les crues de l'Oued Saoura saturer périodiquement les sables actuels de son lit. Cependant, il ressort des études hydrogéologiques régionales, piézométriques en particulier, que la nappe de l'Erg et très secondairement celle de la Hamada du Guir contribuent très largement à l'alimentation permanente de cet inféro-flux de la Saoura qui constitue le niveau de base des eaux souterraines.

On peut donc penser que si les crues ne déferlaient plus dans la Saoura à la suite de barrages en amont, le niveau piézométrique garderait un aspect proche de celui que nous avons observé après seize mois sans crue. En effet un équilibre saisonnier s'établit entre l'évaporation, fonction de la profondeur du niveau piézométrique, et l'apport latéral de l'Erg. C'est ainsi qu'après s'être abaissé pendant les fortes chaleurs, le niveau piézométrique de l'inféro-flux est remonté à partir d'octobre et novembre 1964 et en bien des endroits sont apparus des filets d'eau superficiels sans que les crues soient mises en cause.

### 2.6.2. PROFONDEUR DE LA SURFACE PIEZOMETRIQUE - PIEZOMETRIE.

La profondeur du niveau piézométrique varie généralement de zéro à 3 mètres par rapport au sol, en conséquence, le gradient hydraulique de l'inféro-flux peut être assimilé, à petite échelle, à la pente du profil longitudinal de l'Oued qui est en moyenne de 0,9 pour mille d'Abadla au Foum Marhouma puis de 0,65 pour mille jusqu'à la Sebket el Melah.

### 2.6.3. MATERIAUX AQUIFERES ET PERMEABILITE

Tout le long du cours de la Saoura, nous avons observé la similitude des sables actuels de l'oued. Cependant, il y a localement abondance de débris schisteux et de boules d'argile de quelques millimètres à plusieurs centimètres de diamètre. Ces sables sont très thixotropiques.

Une valeur approximative de la perméabilité des sables est obtenue en employant la formule de A. Hazen :  $K \text{ (cm/s)} = 100 d_{10}^2 \text{ (cm)}$ . Parmi les formules donnant K en fonction de  $d_{10}$ , cette dernière fournit les valeurs maximales :

$$\text{Pour } d_{10} = 0,0055 \text{ cm} \quad K = 3 \cdot 10^{-3} \text{ cm/s}$$

Elle correspond de manière satisfaisante à celles données par différents auteurs pour des sédiments analogues.

### 2.6.4. MESURE DU DEBIT DE L'INFERO-FLUX

Les mesures nécessaires à l'estimation du débit d'inféro-flux de la Saoura ont été réalisées dans le Foum Marhouma, du 10 au 15 novembre 1964. Le choix de cette station présente un double avantage. D'une part, les pertes latérales sont des plus réduites et peuvent être considérées comme négligeables car les terrains stromiens, constitués d'alternance de grès fins argileux, de schistes, et de calcaires de pendage  $10^\circ$  N, créent un barrage pratiquement étanche. Des quartzites forment le substratum des sables thixotropiques sur la section de mesure. D'autre part, le lit de l'Oued y est extrêmement bien défini et de faible largeur.

Une tige de fer pour béton armé s'enfonce par simple battage dans les sables saturés. Les passées riches en graviers et le substratum sont nettement repérés. Grâce à de tels sondages, répartis tous les 5 mètres la coupe transversale du lit a été déterminée au milieu du foum (fig. 39). La section totale a ainsi été évaluée à  $235 \text{ m}^2$  et celle de la section saturée par l'inféro-flux à  $153 \text{ m}^2$  dont environ  $25 \text{ m}^2$  riches en graviers.

Des sondages ont été effectués longitudinalement tous les 25 ou 50 mètres : la longueur du foum est de 700 mètres et la largeur maximale de 150 mètres. La profondeur du substratum n'y dépasse pas 4 mètres.

Un cheminement fermé, de 300 mètres de part et d'autre de la section choisie, a permis de mesurer un gradient hydraulique longitudinal de 0,9 pour 1 000.

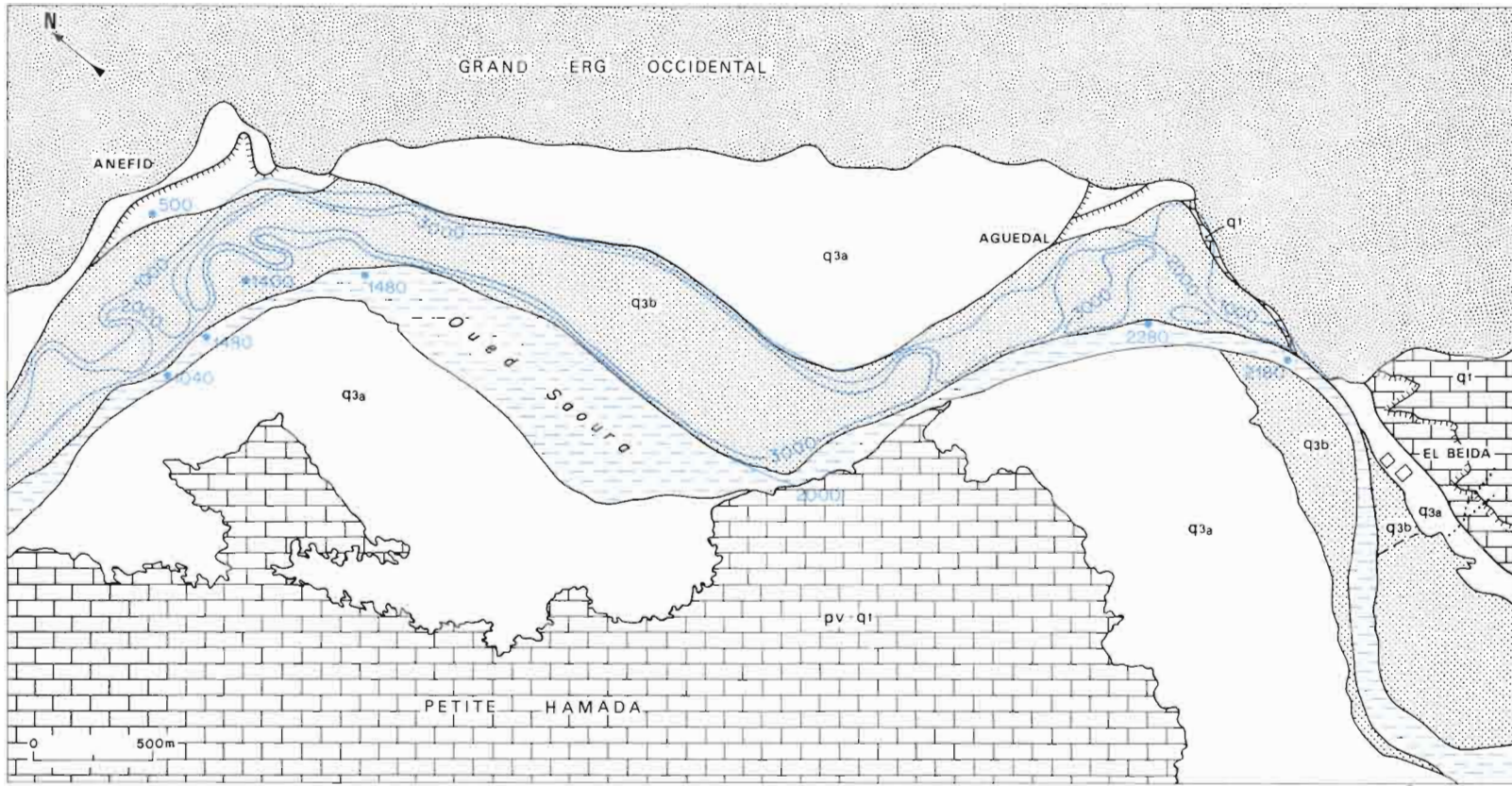


Fig. 37 : Anefid et Aguedal. Courbes d'égale valeur de résidu sec de la nappe (en mg/l).

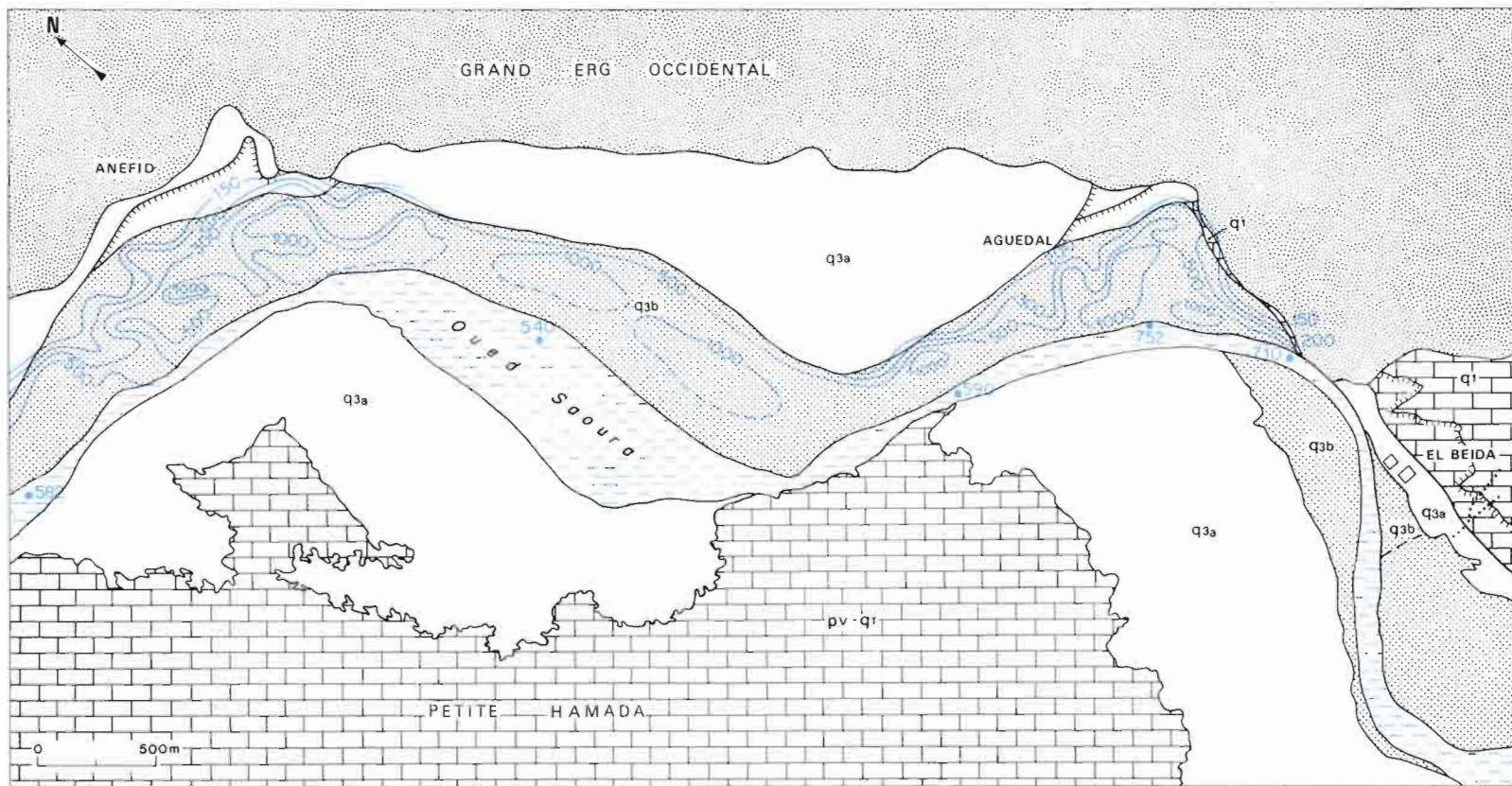


Fig. 38 : Anefid et Aguedal. Courbes isochlores de la nappe (en mg/l).

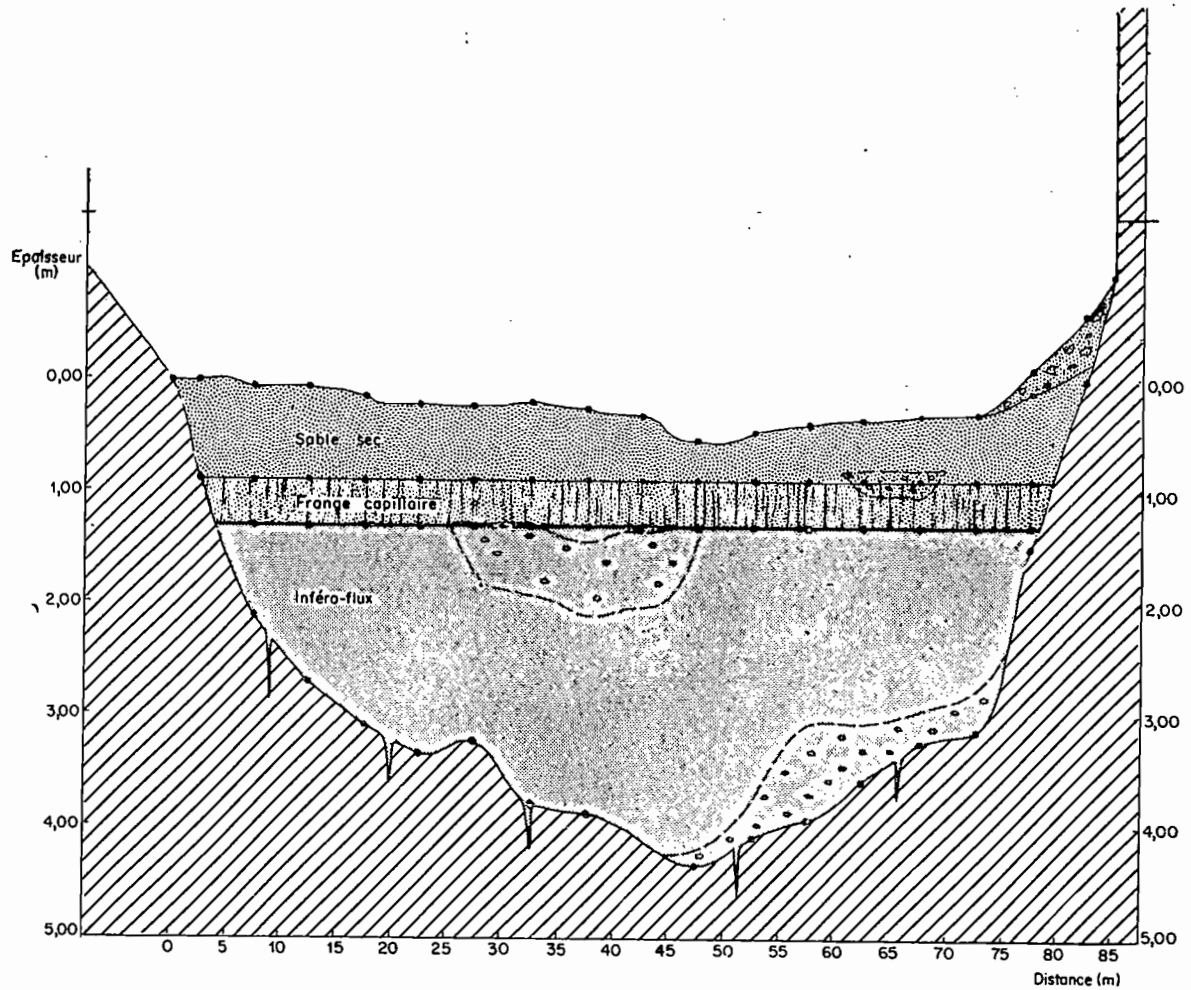


Fig. 39. Coupe transversale de l'Oued Saoura au Foun Marhouma.

En appliquant la formule de Darcy  $Q = Ki A$ , avec  $K = 3.10^{-3}$  cm/s,  $i = 0.9.10^{-3}$  et  $A = 153$  m<sup>2</sup>, on calcule  $Q = 0,015$  m<sup>3</sup>/h.

Ce résultat est extrêmement faible, aussi peut-on penser que la valeur choisie pour  $K$  est trop faible, notamment à cause des lentilles riches en graviers. En choisissant  $K = 0,1$  cm/s, très probablement trop fort,  $Q = 0,5$  m<sup>3</sup>/h, et le débit n'en demeure pas moins très faible.

Ces résultats confirment que toutes les eaux de la nappe de l'Erg, dont le débit est relativement élevé à la lisière des dunes, s'évaporent pratiquement en totalité en arrivant dans les terrasses quaternaires puis dans l'Oued.

#### 2.6.5. PHYSICO-CHEMIE DES EAUX

##### A. VARIATIONS LOCALES DES TENEURS EN SELS

Le 6 décembre 1963 à Béni-Abbès, sur une distance de 2 kilomètres d'amont en aval, 7 échantillons ont été prélevés soit dans des gueltas soit dans des filets d'eau courante où nous avons toujours observé des débits inférieurs à 5 l/s :

Points de prélèvement	Cl (mg/l)	θ (°C)
1 Guelta	3280	12,0
2 —" —	1220	14,5
3 Filet d'eau	1990	16,0
4 —" —	2220	13,0
5 Guelta	5770	14,0
6 —" —	7 000	14,5
7 —" —	6200	14,5

Du 18 au 26 février 1964, à El Ouata, sur 6 kilomètres et du 14 au 20 mars 1964, d'Anefid à El Beïda, nous avons procédé à des prélèvements d'eau rapprochés :

Site	Points de prélèvement	rs (mg/l)	Cl (mg/l)
El Ouata d'amont en aval	1 Guelta	—	3720
	2 Filet d'eau	—	472
	3 Guelta	3050	764
	4 Filet d'eau	1300	454
	5 — " —	1300	454
	6 Guelta	2020	682
d'Anefid à El Beïda	1 Filet d'eau	—	582
	2 " "	1040	—
	3 " "	1480	—
	4 " "	1480	—
	5 " "	—	540
	6 " "	—	590
	7 " "	2280	752
	8 " "	2160	710

De ces études locales, il ressort que :

— Sur un même filet d'eau de surface, les salinités varient sensiblement sur quelques centaines de mètres.

— Les eaux de l'inféro-flux apparaissent souvent moins chargées en aval qu'en amont.

— La charge des eaux dépend principalement de leur mode de gisement et de circulation auquel est liée l'évaporation. Les eaux des gueltas, stagnantes, sont les plus chargées. Ces mares constituent de véritables appareils à évaporation ; ailleurs les eaux de l'inféro-flux sont protégées par la couverture de sable mais surtout par une croûte, plus ou moins bien formée, de sels et de sable qui ralentit considérablement l'évaporation.

#### B. VARIATIONS DES COMPOSITIONS CHIMIQUES D'AMONT EN AVAL DE L'OUED SAOURA.

L'étude générale de tout le cours de l'Oued Saoura s'avère délicate, compte tenu des remarques précédentes.

9 prélèvements ont été effectués d'Igli à El Beïda du 20 au 30 décembre 1963 et de Kerzaz à la Sebkheth el Melah du 24 au 30 janvier 1964. Le tableau X présente les valeurs des résidus secs et les teneurs en chlore de ces eaux.

Dans l'Oued Saoura proprement dit, les eaux les moins chargées ont été prélevées à Aguedal et Kerzaz. En certains endroits, le résidu sec est voisin de 1 000 mg/l. Les eaux les plus chargées pro-

0	Site	rs mg/l	Cl mg/l
24°	Igli	9070	4013
—	Mazzer	(5700)	2728
—	Béni-Abbès	4580	1932
—	Béni-Abbès	7025	2980
17°	El Ouata	1725	605
20°	Aguedal	3110	1053
17°	Filet d'eau au Foum Keraz	1870	1032
20,5°	Inféro-flux au Foum el Kheneg	—	2428
13°	Inféro-flux de l'Oued es Souireg	25.10 <sup>3</sup>	11 108
21°	Nappe au sud de la Sebkheth el Melah	338.10 <sup>3</sup>	191.10 <sup>3</sup>
18°	Nappe au milieu de la Sebkheth el Melah	330.10 <sup>3</sup>	190.10 <sup>3</sup>
15,5°	Nappe au nord de la Sebkheth el Melah	325.10 <sup>3</sup>	188 10 <sup>3</sup>

Tableau X : Résidus secs et teneurs en chlore des eaux de l'inféro-flux de l'Oued Saoura.

viennent d'Igli avec 9070 mg/l. A l'échelle de la Saoura, il apparaît donc aussi que les eaux peuvent être moins chargées en aval qu'en amont. C'est là un phénomène normal puisque les eaux de l'Erg viennent alimenter l'inféro-flux tout le long de sa rive gauche. Dans les palmeraies, nous avons vu que les eaux atteignent la berge avec des concen-

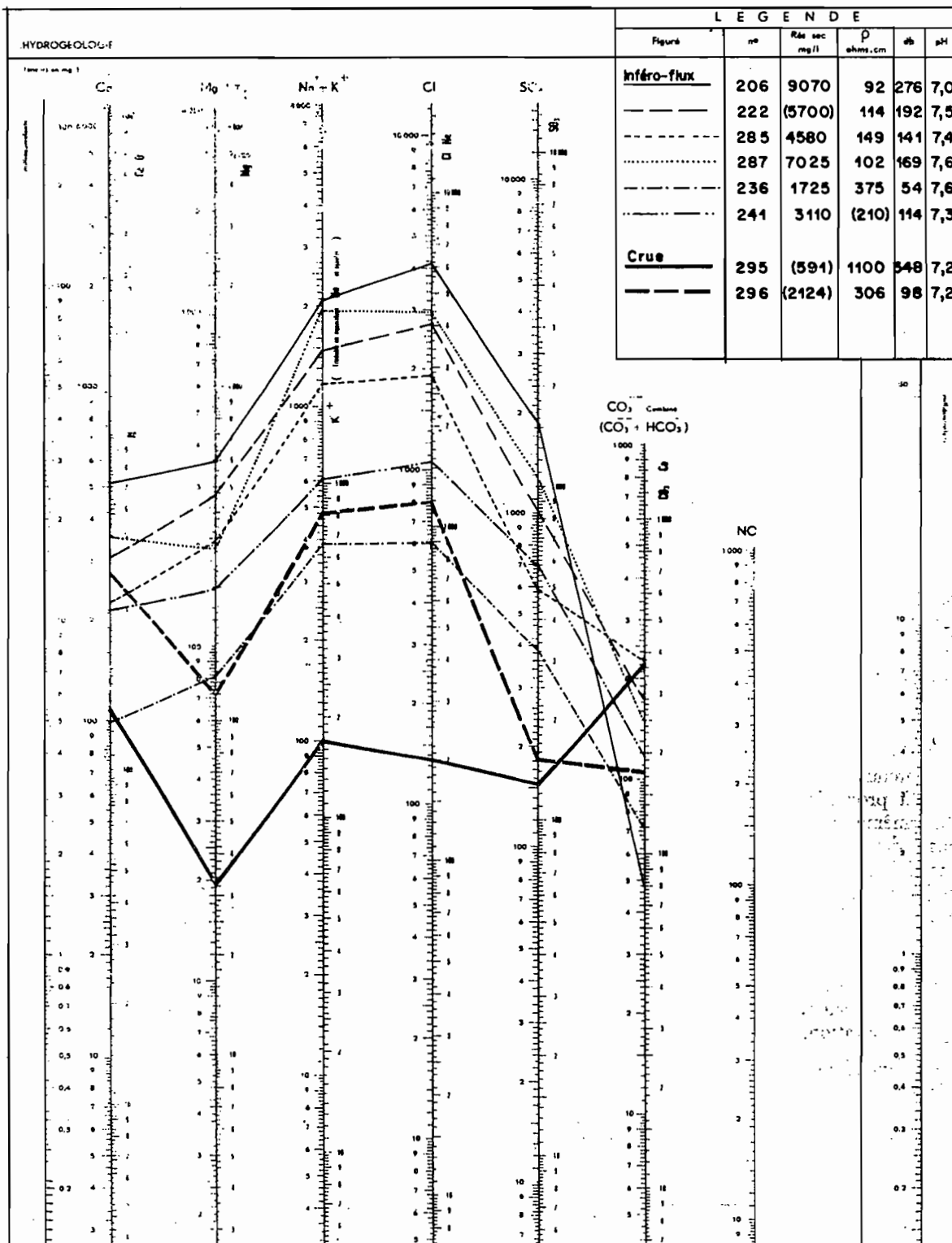


Fig. 40. Diagramme d'analyses d'eaux de crue et de l'inféro-flux de l'Oued Saoura.

trations comprises généralement entre 2 000 et 3 000 mg/l, teneurs certainement moins élevées là où le Saourien forme la rive même de l'Oued.

A partir du Foum el Kheneg, l'inféro-flux n'est plus alimenté par la nappe de l'Erg et la concentration commence à croître vers l'aval dans l'Oued es Souireg pour atteindre des valeurs très élevées dans la Sebkhet el Melah (338.10<sup>3</sup> mg/l), où les sels, apportés par les crues, demeurent après l'évaporation des eaux.

Le diagramme (fig. 40) présente les résultats d'analyses des eaux de l'inféro-flux prélevées en décembre 1963.

Les rapports caractéristiques présentent des valeurs très groupées, d'où un faciès chimique bien individualisé.

La formule caractéristique est

$r \text{ Cl} > r \text{ SO}_4 > r \text{ CO}_3$        $r \text{ Na} > r \text{ Mg} > r \text{ Ca}$  ;  
notons cependant une eau avec  $r \text{ Na} > r \text{ Ca} > r \text{ Mg}$ ,

A Igli, elles ne sont pas potables ; ailleurs nous avons relevé des potabilités de la classe 3 à 5. Elles servent couramment à l'alimentation du bétail.

*En conclusion*, les salinités des eaux de l'inféro-flux ne sont pas très élevées. Ceci apparaît d'autant plus curieux qu'elles s'évaporent rapidement dès leur arrivée dans les sables actuels. En fait, les sels contenus dans les remontées capillaires se déposent à proximité de la surface du sol ou à la surface même et sont dissous par les crues pour se déposer dans la Sebkhet el Melah ou en aval dans l'Oued Messaoud et les sebkhas du Touat. Le vent peut jouer également un rôle secondaire, enlevant une petite partie des sels déposés en surface. Enfin, même dans l'Oued, l'évapotranspiration par les tamaris doit représenter une petite part des pertes d'eau, or la plante absorbe en même temps certains sels et l'eau se concentre alors moins que par simple évaporation.

C'est cependant le « balayage » par les crues qui est le phénomène essentiel et les sels s'accumuleraient certainement dans le lit de l'Oued en quantité dangereuse pour la végétation, si les crues ne déferlaient plus dans la Saoura.

## 2.6.6. COMPOSITIONS ISOTOPIQUES DES EAUX ET EVAPORATION

### A. ISOTOPES DE L'OXYGENE : <sup>18</sup>O et <sup>16</sup>O

Les résultats d'analyses des compositions isotopiques de l'oxygène sont présentés dans le tableau XI (G. Conrad, R. Letolle, J. Ch. Fontes et M.A. Roche - 1965).

#### L'inféro-flux.

Les valeurs — 3,0 ‰ et — 3,2 ‰ confirment l'apport latéral de la nappe de l'Erg, mais il s'est déjà produit une évaporation. Il semble que l'arrêt de cet apport dès le Foum el Kheneg soit responsable des valeurs plus élevées dans cette cluse et dans l'Oued es Souireg, l'évaporation s'effectuant alors sur un volume d'eau non réalimenté.

#### Les gueltas.

Le plan des gueltas est généralement en équilibre avec le niveau piézométrique du sous-écoulement et les apports en eau se réduisent au rétablissement de l'équilibre du niveau statique que l'évaporation tend à rabattre. Les conditions correspondent à celles d'un lac en état d'évaporation à niveau constant sans émissaire ; si l'on néglige l'apport par condensation, étant donné la faible humidité relative de l'air, il vient :

$$\delta_B = \delta_N + (\alpha - 1) 1\ 000$$

où  $\delta_B$  est la composition isotopique de l'eau du bassin en état stationnaire. On sait que pour une telle situation, le nombre d'atomes d'oxygène 18 enlevé au système par l'évaporation est à chaque instant égal au nombre d'atomes d'oxygène 18 apporté au système, par unité de temps ;  $\delta_N$  est la composition isotopique de la nappe qui alimente les gueltas (ici l'inféroflux  $\delta = -3,0$  ‰,  $\alpha$  est le facteur de fractionnement entre le liquide et la

$$\text{vapeur } (\alpha = \frac{{}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O} \text{ liquide}}{{}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O} \text{ vapeur}})$$

$\delta_B$  pour l'eau des gueltas prélevés avant la pluie du 6 septembre 1964 montre deux valeurs + 10,9 et + 13,5 ‰, ce qui donne pour  $\alpha$  respectivement 1,014 et 1,016. Ces valeurs sont certainement très entachées d'incertitude, cependant on peut noter, comme dans le cas des lacs soumis à évaporation, que  $\alpha$  est nettement supérieur aux valeurs d'équilibre pour la température considérée (1,009 à 1,008 entre 25 et 35°).

Si les gueltas n'ont pas atteint l'état stationnaire, leur composition isotopique doit tendre vers des valeurs plus élevées (compte tenu du faible échange possible avec la vapeur d'eau atmosphérique) et  $\alpha$

calculé dans l'équation doit tendre également vers des valeurs plus grandes. Il s'agit là d'un fractionnement intense de type cinétique qui rend compte des conditions d'évaporation en milieu désertique.

#### *La Sebket el Melah.*

La composition isotopique des eaux d'alimentation est celle des eaux de crues qui s'y déversent. La valeur faible de l'échantillon IV (— 4,9 ‰) peut s'expliquer par la présence d'une couverture de 1,40 m d'argile au-dessus de la nappe. Cette disposition détermine une évaporation par capillarité vraisemblablement sans fractionnement isotopique. La valeur est plus faible que celle obtenue pour l'Oued en période normale, car les crues atteignent la Sebkhha sans avoir subi une évaporation excessive. Inversement, l'échantillon III montre une valeur forte (+ 9,6 ‰) car les 0,40 m de sable qui recouvrent la nappe ne suffisent pas à maintenir une évaporation de type capillaire et les eaux s'enrichissent localement en  $^{18}\text{O}$ . Dans ce cas, il n'y a vraisemblablement pas intervention de la vapeur, et l'évaporation peut se produire dans les conditions

de distillation de Rayleigh (sans échange entre la fraction restante et la vapeur qui s'en dégage).

L'équation s'écrit

$$\delta - \delta_0 = -(\alpha - 1) 1000 \log f$$

où  $\delta$  est la composition isotopique du liquide ;  $\delta_0$  sa composition isotopique initiale et  $f$  la fraction restante.

L'équation donne  $\alpha_{\text{cin}} \approx 1,015$ , et l'on a vu plus haut que  $\delta_0 = -4,9$  ‰. Pour  $\delta = +9,6$  ‰, il vient  $f \approx 0,37$ . La réduction calculée (2/3 du volume initial) ne correspond pas à l'augmentation de la salinité observée dans la Sebkhha ; en effet, les eaux des crues pénètrent dans le bassin d'évaporation et dissolvent la croûte saline abandonnée par la crue précédente. Celle-ci se reforme ensuite par évaporation des remontées capillaires à partir de la nappe.

#### B. TRITIUM.

L'eau d'une guelta, prélevée en septembre 1964 à Béni-Abbès, a une teneur élevée en tritium :  $981 \pm 29$  TU. Ce résultat met en évidence le rôle des crues dans l'alimentation de l'inféro-flux et plus particulièrement de certaines gueltas.

Gisements	Station	Date	$\theta$	Niveau dynamique ou débit	r s mg/l	$\delta^{18}\text{O}$ (‰) SMOW	
Crue Inféro-flux	Abadla	11.11.64		60 m <sup>3</sup> /s	590	— 9,3	
	Béni-Abbès	31. 1.64	16°3	5 l/s	—	— 3,0	
	Kerzaz	30. 1.64	16°8	5 l/s	1870	— 3,2	
	Foum el Kheneg	29. 1.64	20°5	2,5 m	(5000)	— 0,7	
	Oued es Souireg	28. 1.64	13°5	0,40 m	25.10 <sup>3</sup>	+ 0,9	
Gueltas	Guelta à Béni-Abbès	31. 8.64	28°0	—	—	+ 10,9	
		27. 9.64	—	—	$\approx 60.10^3$	+ 7,9	
		15.10.64	—	—	—	+ 6,2	
	Guelta Taourit El Ouata	31. 8.64	—	—	—	—	+ 13,5
		12. 9.64	32°0	—	—	—	+ 3,7
		25. 8.64	23°0	—	—	—	— 4,3
	El Ouata Aguedal	25. 9.64	—	—	—	—	+ 7,9
		3. 9.64	—	—	—	—	+ 4,4
	Sebket el Melah	V sud	24. 1.64	21°0	1,60 m	327.10 <sup>3</sup>	+ 19,6
IV centre		24. 1.64	17°5	1,40 m	330.10 <sup>3</sup>	— 4,9	
III nord		24. 1.64	15°3	0,40 m	325.10 <sup>3</sup>	+ 9,6	

Tableau XI : Compositions isotopiques des eaux de l'inféro-flux de l'Oued Saoura et de la Sebket el Melah.



## HYDROGEOLOGIE DES FORMATIONS HAMADIENNES

## 3.1. HYDROGEOLOGIE DE LA HAMADA DU GUIR

H. Schœller (1945 b) n'a pas admis l'existence d'une nappe d'eaux souterraines dans la Hamada du Guir. Bien que l'importance des ressources paraisse faible, l'étude des 4 points d'eau en rive droite de l'Oued Saoura (Hassi Zguilma es Srir et el Kébir, Hassi et Aïn Boulmane) conduit à affirmer l'existence d'une nappe au moins au nord de Ouarourout (G. Conrad et M.A. Roche - 1965).

## 3.1.1. CONDITIONS DE GISEMENT DE LA NAPPE

A Hassi Zguilma es Srir (fig. 41), en bordure de la vallée de la Saoura, le Mio-Pliocène repose sur le Tournaisien gréseux et schisteux de pendage 20° NNE (G. Conrad et M.A. Roche - 1965). Il débute par des grès calcaires blancs, à gros éléments de primaire dans lesquels est creusé le puits (13 et 11). Un passage de sables à taches rouilles et vertes vient s'y intercaler (13). Au-dessus, des sables rouges à ciment marneux (10) et des marnes sableuses vertes (8) s'imbriquent de façon très curieuse. L'ensemble se termine par un calcaire gréseux (7).

A partir d'un niveau de calcaire gréseux à grenailles de limonite (6), les dépôts sont à rattacher soit au cycle plio-villafranchien, soit au Villafranchien supérieur. Ce sont des sédiments grossiers (sables et poudingues), puis calcaires et gréseux. Le calcaire gréseux du sommet est bréchique ; il appartient au cycle villafranchien supérieur et surmonte des sables gypseux, clairs, (q1).

Les puits sont creusés dans le fond de talwegs qui entaillent le bord est de la Hamada, avant d'affluer à la Saoura.

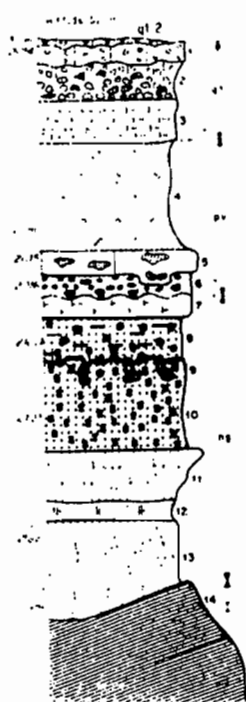
A Hassi Boulmane, 1,5 km à l'ouest de la Saoura, l'eau passe dans des limons noirs que surmontent des travertins. Ces dépôts probablement holocènes reposent ici sur une assise de calcaire organodétritique du Viséen supérieur. Aïn Boulmane sourd des travertins, peu épais, qui reposent alors directement sur ce banc primaire.

Ces travertins et limons noirs se retrouvent également aux deux Hassi Zguilma et dans ce type d'oueds qui entaillent la bordure de la Hamada du Guir. Les travertins remontent jusqu'à la dalle calcaire pliocène qui devait déterminer un premier niveau de source aux périodes humides quaternaires. Le fait qu'à proximité de chaque point d'eau existant en rive droite se rencontrent ces travertins et parfois ces limons, amène à supposer que l'on pourrait trouver ailleurs, l'eau à la base du Mio-Pliocène, au-dessous des lieux où sont observés ces types de dépôts.

De nombreux boyaux de dissolution s'observent dans la dalle pliocène. Dans Hassi Zguilma es Srir, l'arrivée d'eau par des boyaux de quelques centimètres de diamètre montre qu'une perméabilité en grand s'ajoute à la perméabilité en petit. Il est donc probable là encore que ces eaux souterraines bénéficient actuellement d'un système de conduits, particulièrement développé en dessous des talwegs, par l'infiltration des eaux de ruissellement aux périodes quaternaires plus humides. Enfin signalons qu'à Hamaguir, des forages ont rencontré l'eau dans les terrains néogènes.

Le Paléozoïque qui forme le substratum de la Hamada du Guir joue un rôle important dans l'écoulement des eaux souterraines. L'érosion paléogène de ces terrains, constitués d'alternances de schistes, grès et calcaires à pendage NNE (Zguilma), N (Boulmane), SW ou NE (Zerhamra, dans les Djebels d'Ougarta), a déterminé un relief structural de vallées (schistes) et de crêtes (grès ou calcaires), perpendiculaires à l'Oued Saoura sur la bordure orientale de la Hamada du Guir et orientées.

vers le sud-est est en bordure des Monts d'Ougarta (Zerhamra). Les eaux de la Hamada pourraient être drainées localement par les assises perméables en relief, ennoyées dans le Néogène, pour



- 1) croûte calcaréo-gréseuse, d'aspect colonnaire ;
- 2) conglomérat à ciment calcaréo-gréseux et éléments siliceux remaniés ;
- 3) tuf calcaréo-sableux ;
- 4) sédiment blanc, pulvérulent, gypseux, verdâtre ;
- 5) calcaire gréseux, à plages silicifiées ;
- 6) grès microconglomératique, mal consolidé, à grenaille de limonite et gravillons de quartz ;
- 7) marno-calcaire gréseux ;
- 8) torba blanc verdâtre, à nodules oxydés ;
- 9) digitations dans la torba ;
- 10) torba à nodules gréseux ;
- 11) calcaire gréseux, blanc, à silicifications (palier morphologique) ;
- 12) sable tacheté, rouille et vert (494 m, niveau d'Hassi-Zguilma) ;
- 13) torba calcaréo-gréseuse, blanche ;
- 14) schistes carbonifères.

Fig. 41. — Coupe de la Hamada à Hassi Zguilma (rive droite) - d'après G. Conrad et M.A. Roche 1965.

gagner l'inféro-flux de la Saoura et peut-être le Cambro-Ordovicien des Monts d'Ougarta.

Le banc calcaire de Boulmane draine la Hamada et alimente le puits et la source. L'eau de la source, bien que s'écoulant en aval du puits, est légèrement moins chargée en sels. Ce phénomène peut s'expliquer par le fait que l'exsurgence est alimentée, pour l'essentiel, directement par l'assise de calcaire viséen alors que l'eau du puits provient des limons noirs. Notons qu'en 1961, à 15 km à l'ouest-nord-ouest d'Igli, un forage a rencontré l'eau dans les calcaires paléozoïques à la cote 561 m.

La nappe de la Hamada du Guir semblerait finalement plus développée vers le nord-ouest et subirait vers l'est des pertes au profit du Paléozoïque sous-jacent.

### 3.1.2. PIEZOMETRIE ET PROFONDEUR DE LA SURFACE PIEZOMETRIQUE.

Les niveaux piézométriques ont été estimés, pour Hassi Zguilma es Srir à 494 mètres, pour Hassi Zguilma el Kébir à 495 mètres, soit une trentaine de mètres au-dessus de l'inféro-flux de la Saoura. Pour la Source Boulmane il a été estimé à 488 mètres et pour Hassi Boulmane à 492 mètres, soit 9 et 13 mètres au-dessus de l'Oued Saoura. Les

eaux ne peuvent provenir logiquement que de l'ouest.

La profondeur de la surface piézométrique dans les puits est faible : 1 mètre dans Hassi Zguilma es Srir et Boulmane, 2 mètres dans Hassi Zguilma el Kébir.

Aucune variation importante des niveaux piézométriques n'a été notée de décembre 1963 à novembre 1964.

### 3.1.3. DEBITS DES POINTS D'EAU

Les débits sont faibles mais suffisent largement à l'alimentation de quelques nomades et de leurs troupeaux.

A Hassi Zguilma es Srir, nous avons pompé avec un débit moyen de 0,40 m<sup>3</sup>/h pendant deux heures et obtenu un rabattement de 0,17 m. Le niveau piézométrique continuait à s'abaisser très lentement en fin de pompage.

Hassi Zguilma el Kébir fournirait, aux dires des nomades, le plus gros débit.

### 3.1.4. PHYSICO-CHIMIE DES EAUX

Le diagramme logarithmique (fig. 42) présente les résultats d'analyses d'eaux prélevées le 20 décembre 1963, plus ceux de prélèvements effectués à des époques antérieures.

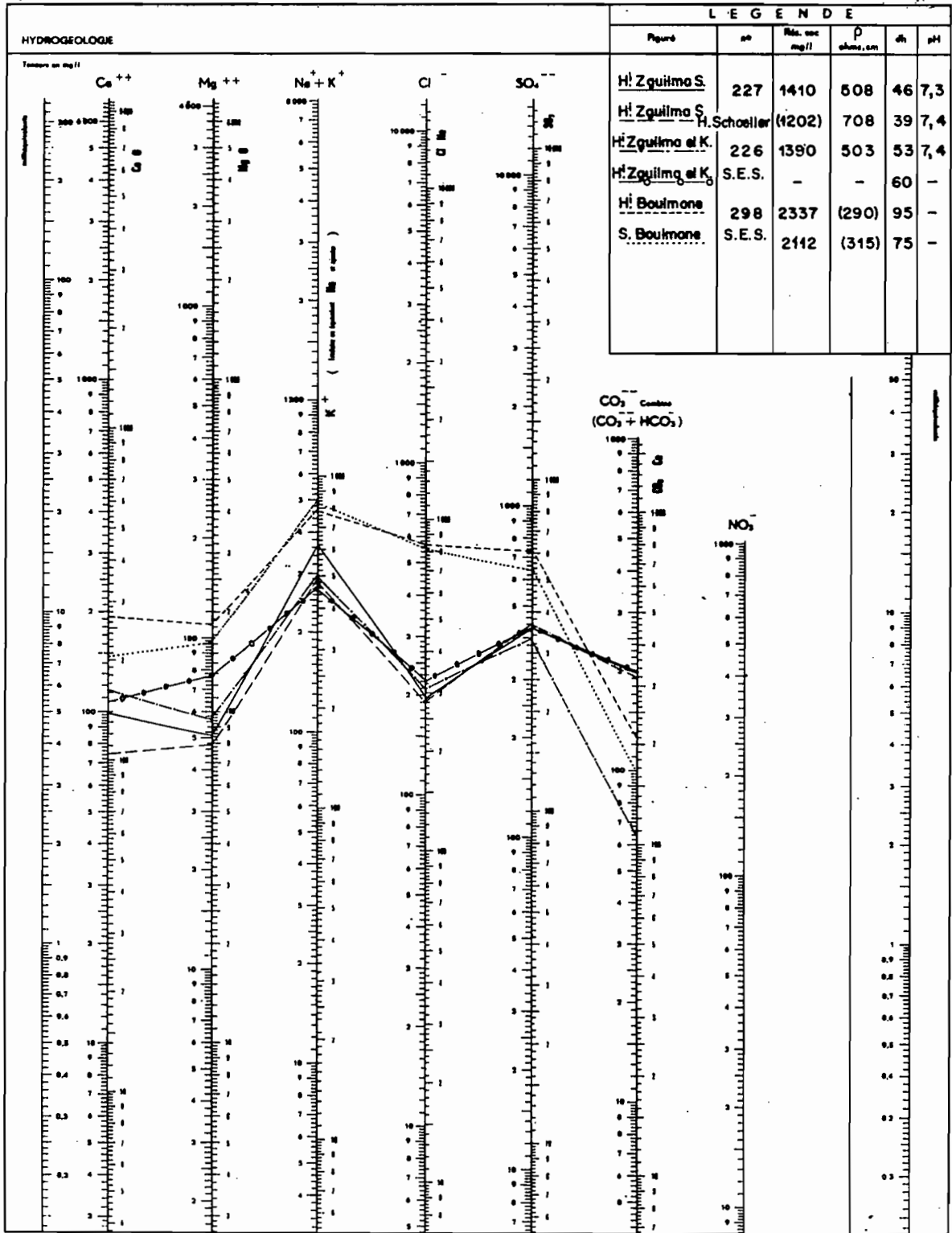


Fig. 42. Diagramme d'analyses d'eaux de la Hamada du Guir.



Les résultats des eaux échantillonnées aux deux puits de Zguilma sont homogènes avec un maximum de  $\delta^{18}O = -10,4\text{‰}$  et une moyenne de  $-9,4\text{‰}$ . L'évaporation subie par les eaux de la Source Boulmane apparaît. L'ensemble de cette nappe se trouve bien individualisée, par sa composition isotopique, de celle du Grand Erg Occidental ( $-5,4\text{‰}$  d'écart en moyenne).

Pour expliquer cet appauvrissement relatif en  $^{18}O$ , on pourrait invoquer une alimentation plus septentrionale et provenant d'une altitude plus élevée ; la Hamada du Guir atteint 1200 m au nord-ouest. Cependant quelle que soit l'époque des précipitations qui ont alimenté les diverses nappes de la Haute Saoura, les différences de composition isotopique des eaux souterraines de l'Erg et de la Hamada pourraient être imputables aux caractéristiques hydrogéologiques des terrains de surface qui conditionnent en premier lieu l'évaporation des eaux en cours d'infiltration.

Il semblerait préférable d'envisager, là encore, le tarissement d'une nappe dont les réserves maximales se seraient constituées au Néolithique, avec une alimentation par les pluies globalement décroissante jusqu'à nos jours, mais certainement encore effective certaines années. On pourrait même penser qu'elle est peut-être suffisante pour correspondre aux débits actuels.

## B. TRITIUM

Les eaux d'Hassi Zguilma es Srir et el Kébir, prélevées en septembre 1964, n'ont pas montré de tritium décelable après un enrichissement de l'ordre de 10 ( $<26$  et  $30$  TU).

Il semble difficile d'interpréter ces résultats à cause du mélange des eaux d'infiltration éventuelle, riches en tritium, aux réserves de la nappe qui en sont très pauvres, et au temps d'infiltration puis d'écoulement jusqu'aux exurgences. On peut seulement dire que les échantillons « moyens » analysés ont un âge « moyen » supérieur à une dizaine d'années.

## 3.2. HYDROGÉOLOGIE DE LA PETITE HAMADA

Des coupes géologiques de la Petite Hamada ont été aussi étudiées en même temps que l'hydrogéologie des palmeraies s'étendant d'El Ouata à El Beida (fig. 22 et 23).

Une coupe NE-SW de la Petite Hamada au droit de Bou Hadid (fig. 43) rappelle les grands traits géologiques de cette formation.

Aucun point d'eau n'est rencontré en rive droite dans la Petite Hamada (G. Conrad et M.A. Roche - 1965). Un puits creusé dans ces terrains, au milieu de l'Erg el Atchane, s'est révélé être un échec.

La perméabilité en petit des sédiments villafranchiens supérieurs est élevée ; de plus, on observe un très grand développement des boyaux de dissolution, le plus souvent verticaux. Ce sont, comme pour la Hamada du Guir, les vestiges d'écoulement des eaux au Quaternaire. Les diamètres de ces boyaux vont de quelques millimètres à plusieurs centimètres. Ils sont souvent tapissés d'une couche de carbonates. Il est curieux de rencontrer un tel développement de boyaux dans des grès fluviatiles

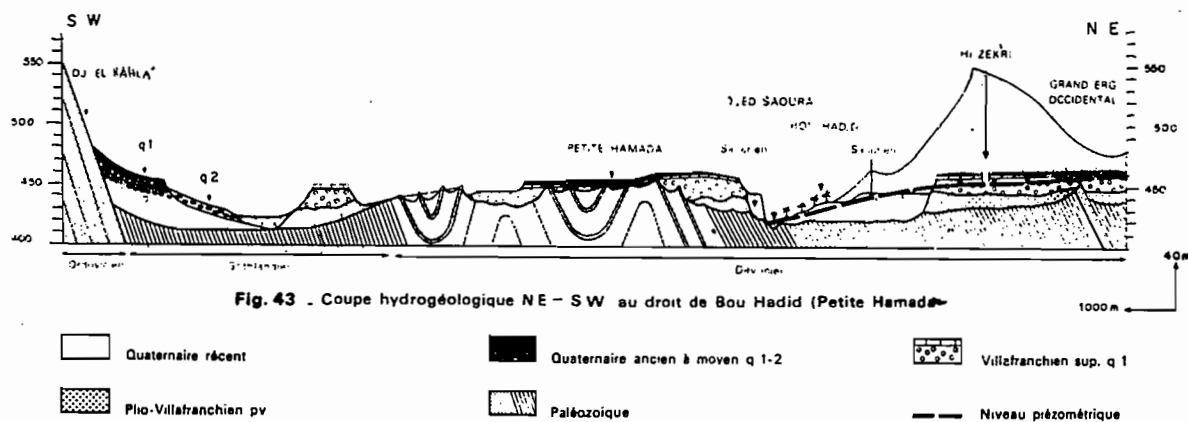


Fig. 43 - Coupe hydrogéologique NE - SW au droit de Bou Hadid (Petite Hamada)

et des conglomérats à perméabilité en petit très suffisante à la circulation des eaux.

Le Plio-Villafranchien, bien cimenté et à granulométrie fine, possède une perméabilité beaucoup plus faible. Nous n'y avons pas observé de boyaux sauf à Aguedal où quelques fins canaux existent dans les niveaux de calcaires marneux de la base de la coupe.

Le caractère très évolué des daïas de la Petite Hamada (surtout à l'ouest) qui sont de type doline avec parfois effondrements de la dalle calcaire supérieure par soutirage (G. Conrad - 1959 b), tra-

duit qu'il s'y est produit des circulations hydriques.

Pourtant il n'existe pas de nappe dans la Petite Hamada. On peut l'expliquer par la pluviométrie très faible sur une surface relativement petite (inférieure à 30 mm pour la période 1926-1950), le volume peu important de terrain, la grande perméabilité du Dévonien inférieur et moyen qui constitue des drains et un réseau hydrographique de surface bien développé qui évacue rapidement les pluies importantes vers le sud. Enfin les terrains trop perméables n'auraient pu aussi retenir jusqu'à nos jours les eaux de la dernière phase humide.

## HYDROGEOLOGIE DES MONTS D'UGARTA

De petites oasis, ne comportant souvent que quelques palmiers, existent dans les Monts d'Ougarta et sur leur bordure orientale. Comme partout au Sahara, cette végétation est liée à la présence d'eau à faible profondeur ou à une irrigation importante. Ces eaux proviennent des grès cambro-ordoviciens qui abritent trois unités aquifères.

## 4.1. CONDITIONS DE GISEMENT

En concordance sur les rhyolites, présumées infracambriennes, une succession de couches monoclinales de schistes, grès et quartzites a déterminé un relief de type appalachien. Les grès et quartzites, dont l'épaisseur est de 300 à 500 m, constituent trois crêtes parallèles qui séparent des vallées établies dans les schistes. Des cluses (foum) relient parfois une vallée à l'autre. Les deux crêtes supérieures sont ordoviciennes, la première est considérée comme cambrienne. Les terrains siluriens se localisent dans quelques synclinaux et sur la bordure orientale des reliefs. En concordance sur les quartzites ordoviciennes, ils sont représentés par des grès assez grossiers (20 m) par des grès quartzitiques (7 m) puis par une série de sédiments fins de plus de 900 m qui débute par 15 m de schistes carburés alunifères (N. Menchikoff, A. Poueyto - 1952, C. Arbey...).

Les ressources aquifères se répartissent dans les trois assises gréseuses et quartzitiques constituant trois unités hydrogéologiques isolées par les couches schisteuses. Les nappes sont ainsi en partie libres et en partie captives sous les toits schisteux imperméables. Dans les synclinaux, tel celui que couvre en partie l'Erg el Djemel, les réserves doivent être importantes, avec des eaux ascendantes ou peut-être localement artésiennes. Les points d'eau exploitant actuellement ces nappes se situent généralement au contact des grès et des schistes

ou plus rarement dans les foums. La perméabilité des terrains aquifères est soit d'interstice (grès) soit de fissures (grès et quartzites). Les seules communications possibles d'une unité à l'autre sont celles de sub-surface par l'intermédiaire des dépôts extrêmement grossiers et souvent chaotiques des vallons longitudinaux et des cluses. Au nord, le Paléozoïque (Djebel Zerhamra) s'ennoie sous la Hamada du Guir. Il ne serait pas totalement impossible, comme nous l'avons dit au paragraphe précédent, qu'il se produise ou se soit produit des pertes d'eaux du Mio-Pliocène au profit du Cambro-Silurien.

A. - L'unité, dont les débits aux exurgences sont les plus importants, se localise dans la dernière formation gréseuse (Ordovicien et Silurien inférieur) dont la crête domine les schistes siluriens. Les points d'eau se répartissent en deux zones géographiques : La bordure orientale des Monts d'Ougarta où les couches présentent généralement un pendage de 30° NE et le synclinal de Bou M'haoud.

La Séguet Ougarta est typique des exurgences de la bordure orientale du massif (fig. 44) : De profondes tranchées, creusées par les ksouriens dans les schistes carburés alunifères atteignent le sommet des quartzites siluriennes, très diaclasées et riches en petites failles et en filons de quartz, pour capter l'eau au contact des deux formations. Cette séguia se situe à la terminaison périclinale d'un petit anticlinal qui modifie localement la monotonie du pendage NE. A une centaine de mètres de là, deux puits traversent les schistes jusqu'aux quartzites où ils rencontrent la nappe, alors captive et ascendante.

La Séguet Draa Oued Ali se trouve dans une situation analogue, à la terminaison périclinale d'un anticlinal.

Le principe du captage de Zerhamra est tout à fait semblable. Il s'agit d'une foggara qui traverse les schistes siluriens jusqu'aux quartzites, à la terminaison périclinale de l'anticlinal de Zerhamra.

Plus au sud, à El Kseïb, existent 4 séguïas analogues à celle d'Ougarta bien que de dimensions plus petites. Deux d'entre elles exploitent encore l'eau des quartzites et irriguent quelques jardins et palmiers établis en contrebas sur les schistes siluriens altérés.

Dans le synclinal de Bou M'haoud les points d'eau se trouvent en position géologique analogue, au contact des grès et quartzites de la troisième crête avec les schistes siluriens.

B. - La deuxième unité hydrogéologique a des débits modestes et seuls, au Kheneg el Aaténe, le

mince filet d'eau et les deux puits de la cluse, permettent de la mettre en évidence. Ces eaux proviennent des grès de la seconde crête, mais peut-être aussi en partie de la première par l'intermédiaire des dépôts quaternaires de l'oued. Après le défilé, elles disparaissent entre les blocs de roches qui encombrant la dernière vallée monoclinale. Hassi el Aouïne, près de Guerzim est un point d'eau comparable.

C. - L'unité hydrogéologique, située dans les grès de la première crête, fournit des débits encore plus faibles que ceux des deux précédentes. Deux points d'eau se situent au pied de la crête, sur la bordure ouest de la Sebkhet el Melah : Aïn ed Dhobb serait ensablé, nous ne l'avons pas visité ; Aïn Néchéa n'est plus représenté que par des efflorescences salines, une végétation de phréatophytes et quelques palmiers malades.

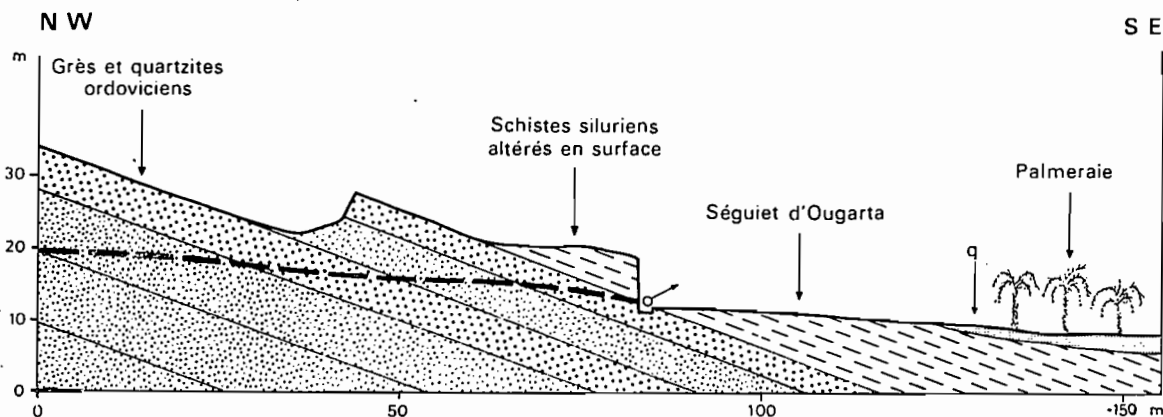


Fig. 44. Coupe hydrogéologique au contact de l'Ordovicien et du Silurien à Ougarta.

#### 4.2. PIEZOMETRIE

Les altitudes des points d'eau ont été estimées ainsi :

Zerhamra	500 m
Ougarta	407 m
El Kseïb	400 m
Bou M'haoud	500 m
Kheneg el Aaténe	477 m
Hassi el Aouïna	452 m
Aïn ed Dhobb	340 m
Aïn en Néchéa	335 m

Les eaux s'écoulent vers le sud-est, dans le sens

de la pente générale des terrains. L'altitude de la ligne de contact des grès et quartzites avec les schistes détermine les exurgences. Aux terminaisons périclinales des anticlinaux, l'altitude de cette ligne de contact est particulièrement basse et y explique la présence des sources. De même, au Kheneg el Aaténe, l'altitude relativement faible permet à la nappe d'apparaître.

#### 4.3. DEBITS DES POINTS D'EAU

Les mesures ont été effectuées le 21 novembre 1964 et les estimations au cours de passages en 1963 et 1964.

Le débit de la Foggara de Zerhamra, mesuré par remplissage d'un seau, est de 1,2 l/s. D'après les ksouriens, cette valeur ne varierait pas au cours des saisons mais aurait cependant baissé de moitié au cours de ces dernières années. Si cela est exact, la cause peut en être autant un ensablement du captage qu'une évolution des réserves d'eaux souterraines.

Le débit de la Séguet Ougarta, non jaugeable est estimé à 2 ou 3 l/s, celui de la séguia nord d'El Kseïb à 0,3 l/s et celui du filet d'eau du Kheneg el Aatène à 0,1 l/s.

#### 4.4. PHYSICO-CHIMIE DES EAUX

Les échantillons d'eau ont été prélevés le 21 novembre 1964. Un premier prélèvement avait été effectué à Zerhamra le 16 décembre 1964.

Les températures sont très élevées, 34° est de beaucoup supérieure à la température moyenne annuelle de l'air. Ces eaux peuvent être qualifiées

de thermales au sens propre du mot ; elles ont dû passer à des profondeurs assez importantes.

Avec des résidus secs échelonnés de 795 à 1255 mg/l, elles n'apparaissent pas très chargées. Les puits du Kheneg el Aatène offrent les eaux les plus douces. Le diagramme logarithmique (fig. 45) montre la similitude du faciès chimique de ces eaux et de celles de la première unité hydrogéologique.

Les intervalles de variation et la médiane de différentes caractéristiques hydrochimiques sont indiqués dans le tableau XIII.

Les formules caractéristiques sont pour Zerhamra, Ougarta, et le Kheneg el Aatène :

$r \text{ Cl} > r \text{ SO}_4 > r \text{ CO}_3$        $r \text{ Ca} > r \text{ Na} > r \text{ Mg}$

et pour El Kseïb :

$r \text{ Cl} > r \text{ SO}_4 > r \text{ CO}_3$        $r \text{ Na} > r \text{ Ca} > r \text{ Mg}$

L'abondance des cristaux d'alun dans les schistes au contact des quartzites ne semble pas influencer sur les compositions chimiques des eaux de la première unité dont les concentrations en sulfates, sodium et potassium n'ont rien d'anormal.

r s mg/l	dh	r Cl	r SO <sub>4</sub>	r CO <sub>3</sub>	r Cl-r Na	$\frac{r \text{ SO}_4}{r \text{ Cl}}$	$\frac{r \text{ CO}_3}{r \text{ SO}_4}$	$\frac{r \text{ Mg}}{r \text{ Ca}}$	$\frac{r \text{ Na}}{r \text{ Mg}}$
(795)	35,8	5,09	3,12	3,03	<0	0,87	1,24	0,21	7,24
(915)	47,9	6,28	5,20	3,68	<0	0,75	0,72	0,25	4,41
1255	49,0	12,76	5,39	4,70	>0	0,33	0,63	0,31	2,56

Tableau XIII : Intervalles de variation et médiane de différentes caractéristiques chimiques des eaux des Monts d'Ougarta.

Par contre, les eaux du Kheneg el Aatène sont remarquables par leur pauvreté en potassium. Ces eaux sont moins chargées que celles de la Hamada du Guir et leur faciès chimique est sensiblement différent.

La potabilité de ces eaux est de la classe 2, celle d'El Kseïb entre toutefois dans la classe 3.

#### 4.5. COMPOSITIONS ISOTOPIQUES DES EAUX - ALIMENTATION

##### A. ISOTOPES DE L'OXYGENE : <sup>18</sup>O et <sup>16</sup>O

Le tableau ci-dessous indique les compositions isotopiques de l'oxygène des eaux des Monts d'Ougarta :

Points d'eau	Date	$\delta^{18}\text{O}$ ‰ SMOW
Foggara de Zerhamra N° 282	3. 9.64	— 8,6
	12. 9.64	— 8,4
Séguet Ougarta N° 288	12. 9.64	— 7,4
	21.11.64	— 6,9
Séguet El Kseïb	21.11.64	— 7,5

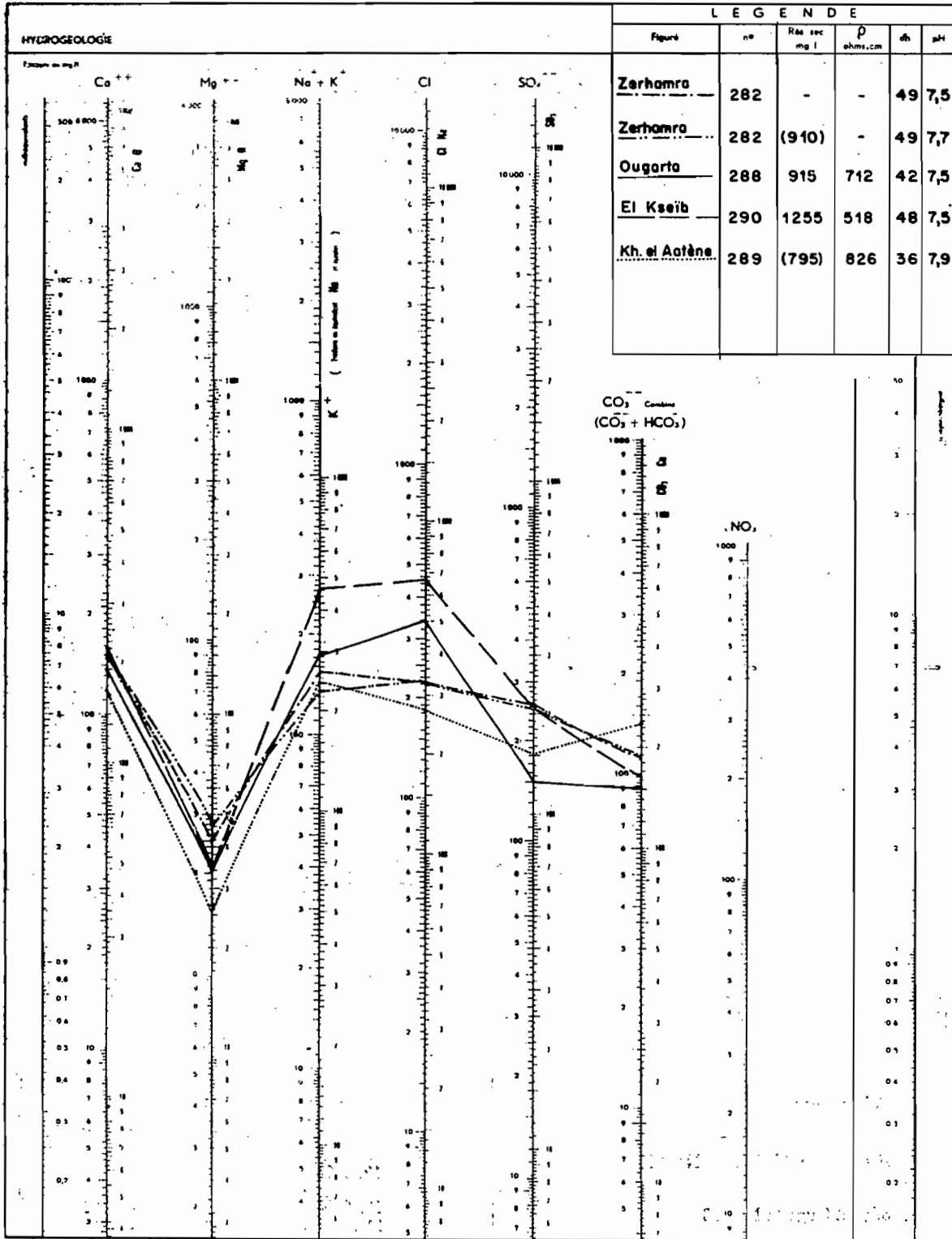


Fig. 45. Diagramme d'analyses d'eaux des Monts d'Ougarta.

L'homogénéité des résultats est nette, ceux-ci variant de  $-6,9$  à  $-8,6$  ‰ avec une moyenne de  $-7,7$  ‰. Rappelons que pour la nappe de la Hamada du Guir ces valeurs s'échelonnaient de  $-7,2$  à  $-10,4$  ‰ avec une moyenne de  $-9,4$  ‰. Avec des variations de  $-3,6$  à  $-4,8$  ‰, la moyenne des eaux du Grand Erg était de  $-4,0$  ‰ (G. Conrad, J. Ph. Fontes, R. Letoille, M.A. Roche - 1965).

Le tritium n'a pu être décelé dans les eaux de la Séguet Ougarta (prélevées le 12 septembre 1964) malgré un enrichissement de l'ordre de 10.

Les réserves d'eaux souterraines des synclinaux ne semblent pouvoir être qu'un héritage des phases humides quaternaires ou plus anciennes (la dernière étant celle du Néolithique). L'âge des eaux doit être d'ailleurs différent suivant les points considérés des structures. Il est possible qu'il en soit autrement des eaux qui s'écoulent aux exurgences. Celles-ci pourraient avoir diverses origines : L'infiltration actuelle des pluies ; ou comme nous avons été amené à le penser pour les autres nappes, le tarissement de l'héritage néolithique secondé par une alimentation par les pluies globalement décroissante jusqu'à nos jours mais encore effective. Bien que s'individualisant assez bien, les compositions isotopiques se rapprochent de celles des eaux de la Hamada du Guir, ce qui peut étayer l'hypothèse de relations entre les systèmes aquifères ou tout au moins inciter à penser à une histoire commune.

Comme celles de la Hamada du Guir, les compositions isotopiques sont différentes de celles des eaux de l'Erg. Cependant quelles que soient les époques, phases humides ou actuelle, pendant les-

quelles les pluies ont alimenté ces diverses nappes, il est certain que l'évaporation s'exerce plus ou moins intensément sur les eaux en cours d'infiltration et le facteur principal dans une même région en est les caractéristiques des sols et des terrains proches de la surface. Il nous semble ainsi logique de penser que les eaux s'infiltrant dans des fissures profondes de grès et quartzites, échappent plus rapidement à l'évaporation que celles tombées sur les dunes de l'Erg et qu'il en résulte pour les premières des valeurs de  $\delta^{18}O$  plus faibles.

Si l'on admettait une alimentation actuelle, bien sûr accidentelle dans le temps et peut-être dans l'espace, on ne pourrait constater que sa faiblesse compte tenu de la surface de l'impluvium et des débits observés. Toutefois, il n'est pas impossible qu'il existe vers l'aval des exutoires dans d'autres nappes. L'absence de tritium n'apporte guère de renseignements sur ce type de nappe dont les ressources semblent fort importantes vis-à-vis des débits et où un apport actuel par infiltration des eaux de pluie serait dilué dans un volume d'eau disproportionné et sans tritium. D'autre part les temps de cheminement entre les sites d'infiltration et les exurgences peuvent être relativement longs. Une alimentation actuelle par les pluies pourrait d'ailleurs fournir des eaux d'âge croissant, car l'infiltration des pluies sur le bord le plus élevé et opposé du synclinal amènerait, par rétablissement de l'équilibre des pressions, des eaux de plus en plus profondes et anciennes aux exurgences situées sur l'autre bord. Ce phénomène expliquerait aussi les températures assez élevées des eaux.

Des mesures de radiocarbone contribueraient certainement à préciser ces hypothèses.



## CONCLUSION

### ALIMENTATION ET CAUSES DES DIFFERENCES DE DEBIT DES NAPPES D'EAUX SOUTERRAINES DE LA HAUTE SAOURA

Les diverses hypothèses d'alimentation et de perte des nappes d'eaux souterraines du Grand Erg Occidental (pour la partie drainée par l'Oued Saoura), de la Hamada du Guir et des Monts d'Ougarta ont été présentées. Nous nous sommes appuyés sur les études concernant la géologie, la piézométrie et l'écoulement, la profondeur de la surface piézométrique, les variations de niveau piézométrique et de débit, la physico-chimie, les compositions isotopiques (oxygène et tritium) et la climatologie, plus particulièrement la pluviométrie.

Nous avons conclu pour les différentes nappes que leurs caractéristiques actuelles pouvaient représenter la résultante du tarissement des réserves héritées des pluviaux et phases humides quaternaires, avec un dernier grand maximum au Néolithique (6500 à 4000 ans B.P.) et d'une alimentation par infiltration des pluies globalement décroissantes jusqu'à nos jours. Ce serait cette alimentation postérieure qui aurait freiné le tarissement des ressources. Actuellement l'alimentation par infiltration des eaux de pluie doit être toujours effective à la suite d'années particulièrement pluvieuses et pourrait être suffisante pour accroître les débits pendant certaines périodes.

Rappelons que les réserves d'eaux souterraines des synclinaux des « Grès d'Ougarta » pourraient avoir des origines plus anciennes.

L'absence de tritium en quantité notable indique que l'échantillon « moyen » de chaque nappe qui a été analysé avait un âge « moyen » supérieur à une dizaine d'années.

On peut alors se demander pourquoi il existe une telle différence entre les débits que fournissent les différentes nappes de la région, et en particulier de part et d'autre de l'Oued Saoura où les systèmes aquifères de la Hamada du Guir et du Grand Erg Occidental possèdent, à première vue, un certain nombre de points communs.

On peut invoquer plusieurs causes d'ordre surtout géologique :

— Les caractéristiques des sols et terrains proches de la surface conditionnent l'évaporation et l'infiltration des eaux de pluie. Or elles sont très différentes pour les trois types de nappe envisagés. *L'erg semble jouer un rôle essentiel. Il favoriserait l'infiltration des pluies et protège efficacement la nappe de l'évaporation.* Au Sahara Occidental on est frappé de constater que les sédiments lacustres néolithiques sont presque toujours associés aux ergs, incitant à penser que les sables dunaires étaient la cause d'une telle activité des nappes souterraines et en particulier leur permettaient d'affleurer pour donner naissance aux lacs interdunaires.

— La nappe des « Grès d'Ougarta » s'écoule vers le sud-est dans le sens de la pente générale. La nappe de la Hamada du Guir semble être drainée par les assises paléozoïques perméables, en relief dans le Mio-Pliocène, tandis que celle du Grand Erg bénéficierait d'un mur imperméable plus efficace mais surtout d'un exutoire mieux défini puisqu'il est limité au flanc est de la vallée de la Saoura.

— On doit également prendre en considération la superficie d'alimentation par les pluies. Elle est plus difficile à préciser dans le cas de la Hamada que dans celui de l'Erg.

— A cette dernière notion, vient se rattacher celle du volume de terrain aquifère situé au-dessus du niveau des exurgences, en première approximation, il pourrait être proportionnel à la surface pour les nappes de la Hamada du Guir et du Grand Erg. Il représente, avec bien sûr le coefficient d'emmagasinement, un des facteurs principaux du tarissement des ressources. L'Erg a ainsi pu jouer encore un rôle particulier car la base des dunes, et par suite la partie supérieure de leur substratum, ont constitué au début du tarissement, un volume de terrain aquifère supplémentaire dont n'aurait pas bénéficié la nappe de la Hamada du Guir.

### EXPLOITATION DES RESSOURCES

Le principe général de conservation des eaux souterraines doit s'appliquer au Sahara plus que partout ailleurs. Il paraîtrait en effet peu conseillable de développer inconsidérément l'agriculture, par une augmentation des débits exploités dans les nappes, si après quelque temps les réserves s'épuisent et ne pouvaient plus fournir les débits suffisants aux réalisations entreprises.

Nous pensons cependant que l'exploitation des différentes nappes de la Haute Saoura peut être accrue. On peut en fait utiliser le débit naturel des exurgences et l'équivalent d'une partie des pertes qui se produit inutilement par évaporation, à condition que l'exploitation supprime effectivement ces pertes. Parallèlement il est indispensable que les débits et cotes piézométriques soient surveillés très attentivement pour suivre l'évolution des réserves.

Lors de l'étude de la vallée de la Saoura, nous avons estimé un débit moyen de la nappe de l'Erg compris entre 10 et 20 m<sup>3</sup>/h/km sur l'ensemble du front d'écoulement entre Igli et El Beïda. On pourrait ainsi commencer, par endroits, à exploiter des débits légèrement inférieurs à ces valeurs puis augmenter éventuellement, en fonction de l'évolution des ressources que l'on aura observée. Il ne faut pas non plus utiliser totalement le débit de la nappe sur un front déterminé afin qu'une partie des eaux souterraines s'écoule toujours jusqu'à l'Oued Saoura et y amène les sels assez vite avec elle. Ceci remplace en effet un drainage artificiel qui ne semble pas nécessaire ici, en prenant cette précaution. Cependant il serait alors sage de contrôler cette évolution des concentrations et que de temps à autre une crue balaye les sels déposés dans l'Oued. Dans les palmeraies actuellement cultivées, il serait préférable de se limiter à une amélioration des captages existants.

Dans la région de Mazzer et Béni-Abbès, certaines galeries, creusées dans le Mio-Pliocène, pourraient être allongées. Les amenées d'eau et les bassins collecteurs devraient être tous bétonnés pour éviter les infiltrations. Il serait souhaitable d'examiner et de refaire éventuellement le captage (enterré) de la Grande Source où il est possible que des pertes se produisent. Un approfondissement des puits permettrait au besoin d'accroître les pompages et de diminuer la teneur en sels des eaux.

La création de points d'eau nouveaux s'entend surtout dans les zones encore non exploitées, tels

certaines paliers morphologiques saouriens, moyennement élevés, situés entre les palmeraies. La profondeur de la surface piézométrique y est généralement supérieure à 7 m et il devient difficile d'y puiser l'eau sans moyens matériels suffisants. Pourtant des eaux de bonne qualité physico-chimique s'y écoulent puis s'évaporent dans l'Oued sans avoir été utilisées.

Dans la vallée de la Saoura, il serait conseillé, car la topographie le favorise en maints endroits, de développer le système des séguis et des galeries drainantes particulièrement économique à l'exploitation. Ces captages devraient être aménagés, le plus souvent bétonnés, de façon à éviter les inconvénients des anciens du même type qui ont été souvent délaissés à cause des difficultés d'entretien, des effondrements et du manque de main-d'œuvre spécialisée.

Dans le cadre d'une mise en valeur à plus grande échelle, les puits fourniraient des débits plus élevés mais leur ensablement et l'entretien des pompes posent beaucoup plus de problèmes aux cultivateurs.

L'expérience du barrage sur l'Oued Saoura, qui devait alimenter la ferme d'Igli pendant les crues et leur tarissement, paraît être excellente. Les débits, relativement forts et constants, pompés dans certains puits en bordure de l'Erg, tel le N° 201, risquent d'être trop élevés et d'épuiser les réserves, tout en stoppant localement le drainage des sels vers la Saoura. Pendant le temps d'utilisation des eaux de crue, relativement long certaines années, l'exploitation de la nappe pourrait être arrêtée. Le niveau piézométrique autour du puits remonterait alors, les réserves se reconstituant dans les environs immédiats : la nappe reprendrait pour un temps son écoulement naturel vers l'Oued. La teneur en sels des eaux de crue doit être en général inférieure à celle des eaux utilisées à la ferme. Il semblerait n'y avoir de difficulté que pour le captage dans le lit même de l'Oued, mais c'est une réalisation technique qui ne paraît pas impossible.

En fait, l'entretien des jardins, constamment envahis par les sables, crée en bien des endroits plus de soucis aux cultivateurs que les débits fournis par la nappe qui semblent actuellement suffire à leurs besoins. À ce propos, l'utilisation rationnelle des eaux d'irrigation est une question importante qui ne paraît pas toujours être réalisée dans les palmeraies de la Haute Saoura et serait à envisager en premier dans une planification de mise en valeur,

pour connaître les besoins exacts de ce type de palmeraie. La collaboration d'Agronomes serait indispensable en ce domaine.

En traversant la Hamada du Guir, il suffit d'avoir été arrêté fréquemment par les nomades en quête d'eau, pour penser aux grands problèmes qu'y pose l'absence de puits. Elle gêne les déplacements en saison chaude et empêche en particulier de profiter pleinement des paturages souvent intéressants qui se développent dans les daïas et certains oueds. Il serait très apprécié de foncer quelques points d'eau sur le « plateau ». Ces puits ou forages rencontreraient l'eau dans le Mio-Pliocène et le Paléozoïque perméable.

Dans les Monts d'Ougarta, nous avons vu que les réserves d'eaux souterraines, contenues dans les synclinaux de grès et quartzites cambro-ordoviciens, n'étaient pas proportionnées aux débits observés aux exurgences. Dans le but de développer les petites palmeraies de la bordure orientale, une exploitation supplémentaire, avec là encore une surveillance de l'évolution des ressources, peut y être

effectuée. Elle aurait pour conséquence une baisse du niveau piézométrique par rapport aux lignes de contact des schistes et des quartzites, et pourrait utiliser l'équivalent des pertes qui s'y produisent localement par infiltration dans les dépôts quaternaires et par évaporation. Elle pourrait également exploiter une partie des pertes qui se produisent par écoulement général de la nappe vers le sud-est. Le système des séguias, par tranchées relativement courtes dans les schistes siluriens jusqu'aux quartzites aquifères, semble être le plus adapté et le plus économique pour l'irrigation des jardins. En certains points, des puits creusés dans les schistes siluriens rencontreraient au contact des quartzites la nappe ascendante et peut-être artésienne au début de l'exploitation. Ceci pourrait être précisé par un nivellement préalable mais, à première vue, ne semble pas très intéressant, compte tenu des cotes que l'on connaît de la surface libre des nappes et de celles du sol. Enfin des puits pourraient être créés dans les fous d'altitude relativement basse, avec des chances d'y rencontrer l'eau à profondeur acceptable. Ils favoriseraient quelques pasteurs isolés et les déplacements.

**Planches photographiques**

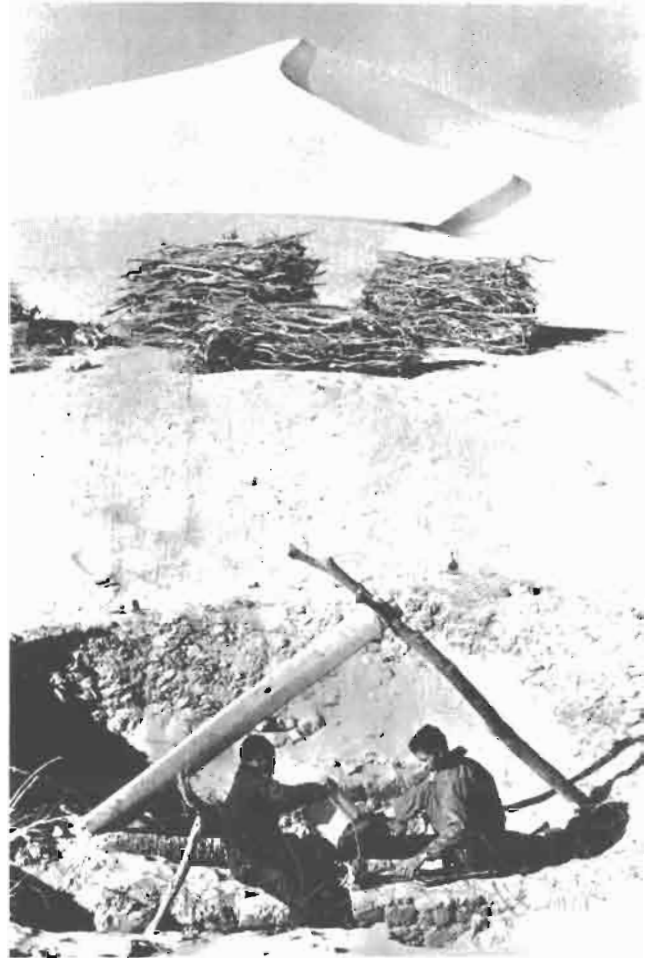


Photographie 1 : *Béni-Abbès et sa palmeraie principale*, vus de la Grande Dune. La palmeraie s'étend en rive gauche sur le Saourien et le Guirien, au pied du talus hamadien. De l'autre côté de l'Oued Saoura commence la Hamada du Guir.



Photographie 2 : *Les palmeraies d'El Ouata*, vues de la terrasse saourienne à El Maja. Implantées sur les terrasses saourienne et guirienne, ces palmeraies sont largement envahies par les sables dunaires. Au fond à droite commence le Grand Erg Occidental. Dans les creux de dunes, situés au premier plan, l'eau se rencontre à moins de 2 mètres.

Photographie 3 : Puits de la bordure du Grand Erg Occidental, près de Béni-Abbès. Dans cette région, les terrains aquifères sont rarement les sables dunaires eux-mêmes, mais le Mio-Pliocène et le Plio-Villafranchien.

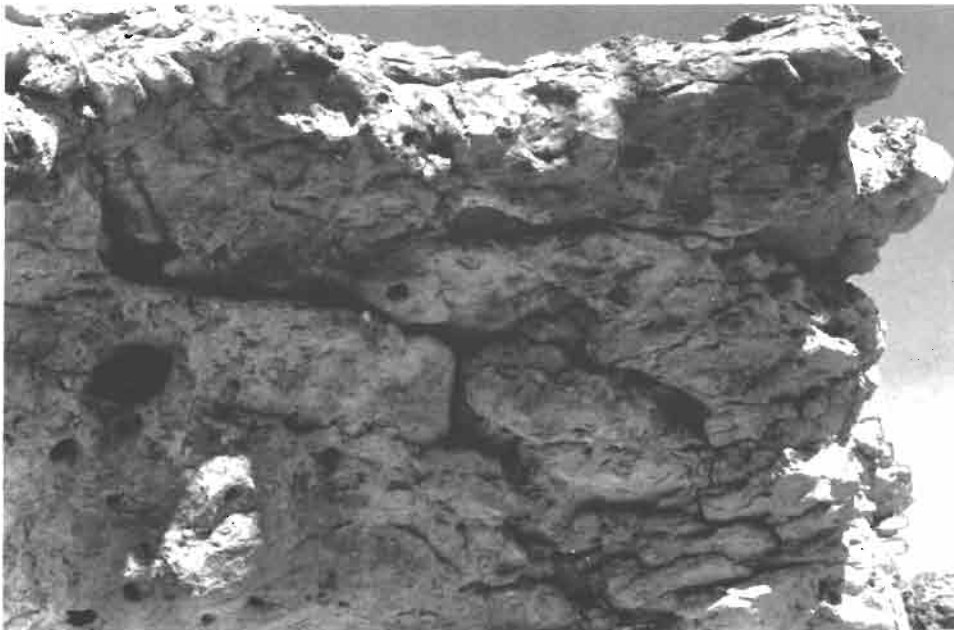


Photographie 4 : Une berda, en bordure du Grand Erg Occidental, entre Ammès et El Maja (palmeraies d'El Ouata). Les sables sont creusés jusqu'à proximité de la surface piézométrique; la culture est alors possible sans irrigation. Le problème n'est plus créé par l'eau mais par le sable qui envahit rapidement le trou.





Photographie 5 : Niveau de grès et de poudingues du Villafranchien supérieur à El Beïda. Ces sédiments, à caractère fluviatile marqué, constituent l'essentiel de la partie supérieure de la Petite Hamada. On les observe de Bou Hadid à Aguedal en rive droite, mais aussi en rive gauche à El Beïda, où ils sont aquifères. Les boyaux dus à l'écoulement des eaux aux périodes humides quaternaires doivent encore jouer un rôle actif sous l'Erg où la nappe s'écoule sur toute l'épaisseur de ces terrains.



Photographie 6 : Aspect de la dalle hamadienne à Mazzer. On distingue nettement les boyaux de dissolution qui représentent les vestiges de l'écoulement de la nappe du Grand Erg aux phases humides quaternaires. Ce système de type karstique est encore utilisé partiellement en bordure et totalement sous l'Erg.



Photographie 7 : *Hassi Zguilma es Srir*, juste en avant des palmiers, est creusé dans les couches inférieures du Mio-Pliocène de la Hamada du Guir. On observe, en arrière plan, la vallée de la Saoura et le Grand Erg Occidental.



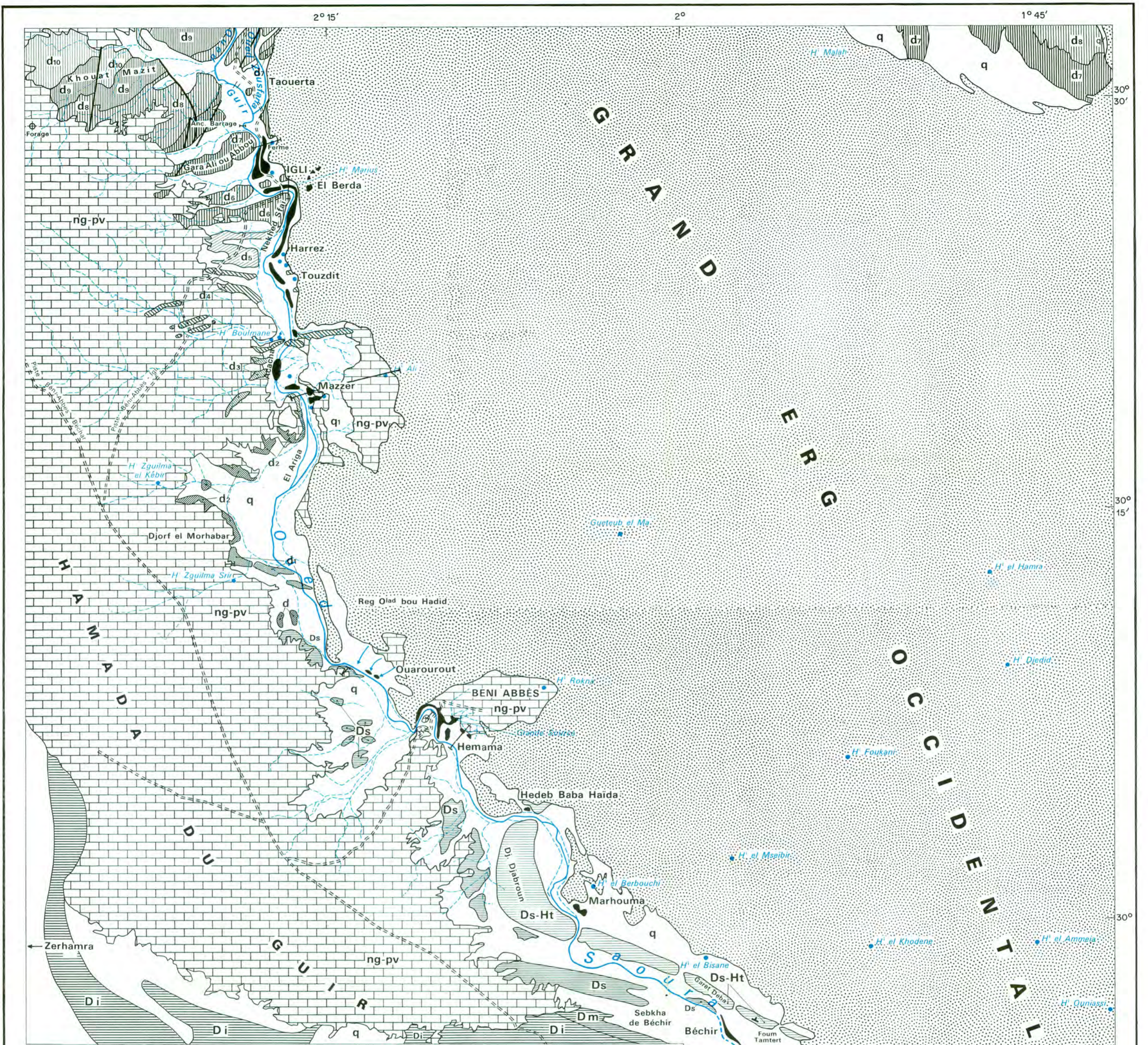
Photographie 8 : *Filet d'eau dans le Kheneg el Aatène*. Cette cluse traverse la deuxième crête des Monts d'Ougarta. Son altitude particulièrement basse permet à la nappe d'y affleurer. Les deux puits sont creusés sous les palmiers.

## BIBLIOGRAPHIE

- ALIMEN, H. 1957 b. — Tertiaire et Villafranchien au Sahara nord-occidental. *C.R. somm. Soc. géol. Fr.*, p. 238-240.
- 1957 c. — Sables quaternaires du Sahara nord-occidental (Saoura-Ougarta). *Publ. Serv. Carte Géol. Algérie*, Bull. n° 15, 207 p., 89 fig., 11 tabl., 8 pl.
- ALIMEN, H., BEUCHER, F. et CONRAD, G. 1966 — Chronologie du dernier Pluvial — Aride au Sahara nord-occidental. *C.R. Acad. Sc.*, Paris, t. 263, pp. 5-8, (4 juillet 1966).
- ALIMEN, H. BURON, M., CHAVAILLON, J. 1958 — Caractères granulométriques des profils transversaux de quelques dunes d'Erg du Sahara nord-occidental. *C.R. Acad. Sc.* t. 247, pp. 1758-1761, 2 fig.
- ALIMEN, H. et DEICHA, G. 1958 — Observations pétrographiques sur les meulière pliocènes. *Bull. Soc. géol. Fr.* 6, t. VIII, pp. 77-90.
- ALIMEN, H. et FENET, D. 1954 a — Granulométries de sables quaternaires de la région Saoura - Ougarta (Sahara occidental). *C.R. Acad. Sc.*, t. 239, pp. 1231-1233, 1 fig.
- ALIMEN, H., LEMAITRE, D., MENCHIKOFF, N., PETER, G., POUHEYTO, A. 1952 — Les chaînes d'Ougarta et la Saoura. 19° *Cong. Géol. Internat. Monogr. Rég.*, 1° s., Algérie, n° 15, 119 p., 1 tabl., 26 fig., 7 pl.
- ALIMEN, H. et PALAU, M. 1956 — Modalités du ruissellement saharien et granulométries des sables (Saoura — Monts d'Ougarta). *C.R. Acad. Sc.*, t. 243, pp. 1540-1542.
- ANONYME 1954 — Radioisotopes in hydrology. *Vienne*, 459 p., 156 fig., 40 tabl., bibliogr.
- BELLAIR, P., POMEROL, Ch. et PROST, A. 1962 — Les hamadas tertiaires du bassin parisien. *C.R. Acad. Sc.* t. 255, pp. 2479-2480.
- BEUCHER, Fr. 1963 — Flores quaternaires au Sahara nord-occidental d'après l'analyse pollinique de sédiments prélevés à Hassi Zguilma (Saoura). *C.R. Acad. Sc.*, t. 256, pp. 2205-2208, 1 fig.
- BEUCHER, F. et CONRAD, G. 1963 — L'âge du dernier Pluvial saharien. Essai sur la flore d'un épisode lacustre. *C.R. Acad. Sc.*, t. 256, pp. 4465-4468, 20 mai 1963.
- BLANC, P. et CONRAD, G. 1968 — Evolution géochimique des eaux de l'Oued Saoura (Sahara nord-occidental). *Rev. Géog. Phys. Géol. Dyn.*, (2), vol. X, fasc. 5, pp. 415-428, Paris.
- CAILLEUX, A. 1949 — Action des écoulements liquides dans la géomorphologie du Sud-oranais. *C.R. Acad. Sc. Paris*, t. 229, pp. 669-671.
- CAPOT — REY, R. 1941 — Observations géologiques à la bordure de l'Erg Occidental. *Bull. Soc. Hist. Nat. Afr. du Nord*, t. XXXII, pp. 47-55, 2 fig.
- CAPOT — REY, R. 1943 — La morphologie de l'Erg Occidental. *Trav. Inst. Rech. sahar.*, t. II, pp. 69-103.
- CASTANY, G. 1963 — Traité pratique des eaux souterraines. *Dunod*, Paris, 657 p.
- CHAVAILLON, J. 1964 — Etude stratigraphique des formations quaternaires du Sahara nord-occidental (de Colomb-Béchar à Reggane). *Thèse*, 393 p., 111 fig., 32 pl., 16 cartes ; *Publ. C.R.Z.A. Serv. Géologie*, n° 5, Paris, C.N.R.S.
- CHEYLAN, G. 1954 — Création d'un point d'eau le long de la piste transaharienne n° 2 entre Igli et Guermiz. *Rapport inédit*, S.E.S., Birmandreis, Alger, Juin 1954, 5 p.
- Création d'un périmètre expérimental à El Ouata. *Rapport inédit*, S.E.S., Alger, Birmandreis, 3 p.
- CHOUBERT, G. et LAVOCAT, R. 1950 — Les déformations et plis de la Hamada du Drâa. *C.R. Acad. Sc.*, t. 231, pp. 451-453.
- CONRAD, G. 1959 b — Observations préliminaires sur la sédimentation dans les daïas de la Hamada du Guir. *Bull. Soc. géol. Fr.*, 7, t. I, pp. 156-162, 2 fig.
- 1963 — Synchronisme du dernier pluvial dans le Sahara septentrional et le Sahara méridional. *C.R. Acad. Sc. Paris*, t. 257, pp. 2506-2509.
- 1963 — Degré d'évolution des sédiments néolithiques et post-néolithiques du Touat. Comparaison avec la Saoura. *Bull. Soc. géol. Fr.*, 7e série, t.V, pp. 635-643.
- 1966 — Données nouvelles sur la stratigraphie de la Hamada Chammar (Gourara, Sahara nord-occidental). *C.R. somm. Soc. géol. Fr.*, fasc. 7, p. 242, 20 juin 1966.
- 1969 — L'évolution continentale post-hercynienne du Sahara algérien (Saoura, Erg Chech-Tanezrouft, Ahnet-Mouydir). *Publ. Centre rech. sur les zones arides C.N.R.S.*, Paris, série géol., n° 10, 527 p., 274 fig., 6 cartes h.t.
- CONRAD, G. et J. 1965 — Précisions stratigraphiques sur les dépôts holocènes du Sahara occidental grâce à la géochronologie absolue. *C.R. somm. Soc. géol. Fr.*, fasc. 7, p. 234, 21 juin 1965.
- CONRAD, G., FONTES, J. Ch., LETOLLE, R. et ROCHE, M.A. 1966 — Etude isotopique de l'oxygène des eaux de la Haute Saoura (Sahara nord-occiden-

- tal). *C.R. Acad. Sc.*, Paris, t. 262, pp. 1058-1061.
- CONRAD, G. et GEZE, B. 1965 — Les grands traits morphologiques récents dans les monts d'Ougarta (Sahara nord-occidental). *C.R. Acad. Sc.*, Paris, t. 261, pp. 4781-4784, 24 novembre 1965.
- CONRAD, G. et ROCHE, M.A. 1965 — Etude stratigraphique et hydrogéologique de l'extrémité méridionale de la Hamada du Guir. *Bull. Soc. géol. Fr.*, 7e série, t. VII, pp. 695-712.
- CORNET, A. 1952 — Essai sur l'hydrogéologie du Grand Erg Occidental et des régions limitrophes. *Trav. Inst. Rech. Sahar.*, t. VIII, pp. 71-122, 18 fig., 1 carte.
- CVIJANOVICH, B.G. 1953 — Sur le rôle des dunes en relation avec le système hydraulique de la nappe souterraine du Grand Erg. *Trav. Inst. Rech. Sahar.*, t. IX, 1er semestre, pp. 131-136, 3 fig.
- DELEAU, P. 1947 — Le Guir et la Saoura, cours d'eau du Sahara oranais. *La Nature*, 15 mars 1947, n° 3132, pp. 89-92.
- DELIBRIAS, G. et HUGOT, H.J. 1962 — Datation par la méthode dite « du C14 » du Néolithique de l'Adrar Bous (Ténéreen). Missions Berliet « Ténééré Tchad ». *Travaux sci.*, pp. 71-72.
- DEMON, L., FELICE (de), P., GONDER, H., KAST, Y., et PONTIER, L. 1957 — Résultats obtenus au laboratoire de Béni-Abbès. *Journ. des Recherches du C.N.R.S.*, 24, 1953, pp. 6-12 et 38, pp. 51-54.
- DERVIEUX, F. 1957 — La nappe phréatique du Souf (Région d'El Oued). Etude du renouvellement de la nappe. Contribution à l'étude des phénomènes capillaires dans un milieu pulvérulent. *Terres et Eaux*, N° 29, pp. 12-39, tabl., 21 fig., 6 photos.
- DOUDOUX - FENET, D. 1954 — Etude granulométrique et morphoscopique des sables sahariens de la région Saoura-Ougarta. *Diplôme d'Etudes Supérieures*, Fac. des Sciences, Paris, dactylo.
- DRESCH, J., JOLY, F. et RAYNAL, R. 1951 — Evolution des versants et creusements à la bordure nord-occidentale du Sahara. *Bull. A.G.F.*, pp. 58-63.
- DRESCH, J. 1953 — Morphologie de la chaîne d'Ougarta. *Trav. Inst. Rech. Sahar.*, t. IX, p. 25-38, carte, photos.
- 1960 — Les changements de climat et les mouvements du sol en Afrique du Nord au cours du Plio-Quaternaire. *Inform. géogr.*, t. XXIV, n° 3, pp. 107-113.
- DUBIEF, J. 1943 — Les vents de sables dans le Sahara français. *Trav. Inst. Rech. Sahar.*, t. III, pp. 11-31.
- 1953 b — Ruissellement superficiel au Sahara. *Colloque internat. du C.N.R.S.*, Alger, mars 1951, XXXV, pp. 303-314.
- 1953 — Essai sur l'hydrologie superficielle au Sahara. Direction du Service de la Colonisation et de l'Hydraulique, *Service des Etudes Scientifiques*, Clairbois, Birmandreis, (Alger), 1953, 457 p.
- 1956 a — Note sur l'évolution du climat saharien au cours des derniers millénaires. *Actes du IVe Congr. internat. du Quatern.*, Rome-Pise, 1953, t. II, pp. 848-851.
- 1960 — Le climat du Sahara - Tome I. Univers. Alger, *Inst. Rech. Sahar.*, Publication C.N.R.S., Paris.
- 1963 — Le climat du Sahara. Tome II. fascicule I. Univers. Alger, *Inst. Rech. Sahar.*, Publication C.N.R.S., Paris, 275 p., 200 fig., 106 cartes, 24 photos.
- DURAND, J.H. 1952 — Etude géologique, hydrogéologique et pédologique des croûtes en Algérie. Service de la Colonisation et de l'Hydraulique, Pédologie n° 1, *Thèse*, 209 p., 15 fig., 70 tabl., 34 photos.
- 1963 — Les boules d'argile de la Saoura à Kerzaz (Sahara occidental). *C.R. somm. Soc. géol. Fr.*, pp. 18-19, 2 fig.
- FAURE, H. 1965 — Evolution des grands lacs sahariens à l'Holocène. *Note présentée au Congr. INQUA*, Denver, Août 1965.
- FLAMAND, G.B.M. 1899 — La traversée de l'Erg Occidental. *Ann. Géograph.*, pp. 231-241, 2 fig.
- 1911 — Recherches géologiques et géographiques sur le « Haut Pays de l'Oranie et sur le Sahara ». (Algérie et Territoires du Sud). *Thèse - Lyon, Rey. ed.*, 1 vol., in - 4°.
- FONTES, J. Ch. et GONFIANTINI, R. 1967 — Comportement isotopique au cours de l'évaporation de deux bassins sahariens. *Earth and planetary science letters*, vol. 3, n° 3, décembre 1967.
- FONTES J. Ch., MAGLIONE G. et ROCHE M.A. (1969). Données isotopiques préliminaires sur les rapports du lac Tchad avec les nappes phréatiques de la bordure nord-est. *Cab. O.R.S.T.O.M.*, sér., hydrol., vol. VI, n° 1, pp. 17-34, 6 fig.
- GAUTIER, E.F. 1908 — Mission au Sahara. t. I (Sahara algérien). Paris, *A. Colin ed.*
- 1928 — Le Sahara — *Payot*, Paris, 232 p.
- GEVIN, P. et CHEYLAN, R. 1957 — Le projet de barrage de Djorf Torba et sa raison d'être. *Terres et Eaux*, n° 21, supplément scient. n° 1, pp. 5-14.
- GOUSKOV, N. 1944 — Les problèmes hydrauliques à Béni-Abbès (Territoires du sud). Rapport inédit, S.E.S., Alger, 17 p.
- GREVIN, E. 1938 — Rivages du Grand Erg. 1 vol., in-12, stock édit., Paris, 244 p., 12 photos, 1 carte.
- HUBERT, J.M. 1948 b — Glacis d'érosion et sous-écoulements ; leur rôle morphologique dans l'Oued Guir. *Bull. A.G.F.* n° 192-193, pp. 55-61.
- JODOT, P. 1955 — Les subdivisions du Pliocène dans le nord de l'Afrique (Algérie - Maroc) d'après les faunes de Mollusques continentaux. *Notes et Mém. Serv. géol. du Maroc*, n° 126, 122 p., I tabl., 9 pl. h.t.
- JOLY, F. 1950 a — Sur le dédoublement de la série tertiaire de la Hamada du Guir au-dessus de Taouz et sur l'extension probable du tertiaire dans les pays de la Daoura (Maroc sud-oriental). *C.R. somm. Soc. géol. Fr.*, pp. 170-172.

- 1950 b — Phénomènes exceptionnels d'écoulement et d'érosion dans le sud-marocain et la vallée de la Saoura en octobre 1950. *C.R. somm. Soc. Sc. Nat. Maroc*, pp. 153-154.
- 1952 b — Le Tafilalt. Le problème des Hamadas. *Notes et M. Serv. géol. Maroc*, n° 96, p. 83-91.
- JOLY, F. 1954 — Les Hamada sud-marocaines. *Trav. Inst. sc. chérifien*, Tanger, 289 p., fig., XIV pl., 1 carte.
- KARPOFF, R. 1952 b — Observations préliminaires sur l'hydrologie du Bas-Sahara. *XIXe Congr. géol. internat. Alger 1952*, section VIII, p. 201-231.
- LAVOCAT, R. 1948 a — Découverte de Crétacé à Vertébrés dans le soubassement de la Hamada du Guir. *C.R. Acad. Sc.*, t. 226, pp. 1291-1292.
- 1948 b — Sur l'existence de plissements affectant les terrains récents de la Hamada du Guir. *C.R. somm. Soc. géol. Fr.*, pp. 134-135.
- 1949 — Quelques observations dans les hamadas du sud-marocain. *C.R. somm. Soc. géol. Fr.*, pp. 158-159.
- 1954 b — Reconnaissance géologique dans les hamadas des confins algéro-marocain du sud. *Notes et M. serv. géol. Maroc*, n° 116, 1 vol., 148 p., 27 fig., 5 pl. h.t., 10 pl. et 20 cartes.
- LE FORT, M. 1965 — Le problème des inféoflux en zones arides. *Revue d'information de l'Organisme Saharien*, septembre, octobre, 7 p., 4 fig., 1 photo.
- LHOTE, H. 1955 a — L'assèchement du Sahara. *Géographie*, Paris, n° 42, mars 1955, pp. 20-25.
- MARCAIS, P. 1955 — Notes de sociologie et de linguistique sur Béni-Abbès. *Trav. Inst. Rech. Sabar.*, Univers. Alger, XIII, pp. 151-174, 7 fig.
- MARGAT, J. 1958 — Les ressources en eaux des palmeraies du Tafilalt. Essai de bilan. *Bull. écon. et soc. Maroc XXII*, n° 77, 24 p.
- 1965 — Evolution des ressources en eaux souterraines en zone aride. Nappes phréatiques du Maroc pré-saharien. Publ. n° 56, *A.I.H.S.*, Eaux souterraines dans les zones arides, pp. 167-171.
- 1962 — Mémoire explicatif de la carte hydrogéologique au 1/50 000e de la plaine du Tafilalt. *Edit. du Serv. géol. du Maroc*. Rabat, 242 p.
- MARGAT, J. et MARTIN, A. 1954 — Essai sur l'évaporation et les variations de concentration des eaux souterraines dans une nappe phréatique, dans un pays présaharien. *A.I.H.S.*, publ. n° 37, pp. 72-84.
- MEYENDORFF, A. (de) 1939 — Relations entre le terrain des Gour et les formations antécénémaniennes de l'Extrême-Sud Oranais. *Rev. Géogr. Phys. et Géol. Dyn.*, Paris, t. XII, pp. 343-345.
- PAREYN, Cl. 1962 — Les massifs carbonifères du Sahara sud-oranais. *Thèse*, Fac. Sci. Paris, 1957. *Public C.N.R.S., Centre de Recherches sahariennes*, n° 1, Série géologie, 2 vol. : t. 1 : Stratigraphie et tectonique, 319 p., 180 fig., carte h.t. ; t. 2 : Paléontologie stratigraphique, 243 p., 27 fig., XVI tabl., 28 pl. h.t.
- REYMOND, A. 1951 — Intérêt de l'étude du cours souterrain de la Saoura entre Abadla et Ksabi. Importance géographique de l'Oued Saoura dans le nord-ouest saharien. *U.N.E.S.C.O.*, Paris, Programme de la zone aride.
- ROCHE, M.A. 1967 — Première estimation des apports en sels au Lac Tchad par le Chari. *Serv. hydrol. O.R.S.T.O.M.*, 50 p., 12 fig.
- 1968 — Ecoulement de surface, alimentation de nappes et transport solide des ouadis Fera, Kadjeur et Sofoya (République du Tchad). Rapport définitif 1965-1966. *Serv. hydrol. O.R.S.T.O.M.*, 140 p., 86 fig.
- 1968 — L'eau dans la Haute Saoura-Sahara nord occidental. *Thèse de troisième cycle*, Paris, 295 p.
- ROGNON, Ph. 1963 — La nappe du Continental intercalaire. 65 fig., 20 photos., *Burgeap*.
- SCHOELLER, H. 1941 — Recherches d'eau dans Lagardette. *Archives Serv. géol. du Méditerranée - Niger, Béni-Abbès*, 5 p. dactyl.
- 1941 — L'influence du climat sur la composition chimique des eaux souterraines vadoses. *B.S.G.F. (5)*, t. 11, pp. 267-289.
- 1945 a — Le Quaternaire de la Saoura et du Grand Erg Occidental. *Trav. Inst. Rech. Sabar.* t. III, p. 57-71, 2 fig.
- 1945 b — L'hydrogéologie d'une partie de la vallée de la Saoura et du Grand Erg Occidental. *Bull. Soc. géol. Fr.*, 5, t. XV, pp. 563-585.
- 1948 a — Les modifications de la composition chimique de l'eau dans une même nappe. *A.I.H.S.*, Assemblée d'Oslo, pp. 124-129.
- 1951 — Relation entre la concentration en chlore des eaux souterraines et les échanges de bases avec les terrains qui les renferment. *C.R., Acad., Sc.*, t. 232, pp. 1432-1434.
- 1955 a — Essai sur la qualité chimique de l'eau destinée à l'alimentation de l'homme dans les pays arides. *Revue Terres et Eaux*, suppl. scientif., Alger, n° 24, pp. 4-11.
- 1962 — Les eaux souterraines. *Masson et Cie*. Paris. 642 p.
- SCHOELLER, M. 1965 — Les lois de la concentration en chlore des eaux souterraines par évaporation et évapotranspiration. *C.R. Ac. Sc.*, Paris, t. 257, III, 1965.
- TEISSIER, M. 1965 — Les crues d'oueds au Sahara algérien de 1950 à 1961. *Travaux de l'I.R.S.*, t. XXIV, pp. 7-29.
- TITS, D.A. 1925 — Un grand fleuve saharien : La Saoura. *La Nature*, Paris, mai, pp. 273-276.
- 1953 a — Diffusion de l'eau de percolation dans les sables sahariens. *Bull. Muséum Hist. natur.*, Paris, 2° série, t. XXV, janvier, pp. 105-109, 2 fig., 4 tabl.
- VANNEY, J.R. 1960 — Pluie et crue dans le Sahara nord-occidental (mars 1959). *Inst. Rech. sabar.*, Alger, Monographies régionales, n° 4, 118 p., 24 fig. 7 tabl., 10 pl. photos.
- VIGUIER, Cl. 1962 — Recherches sur la possibilité d'infiltration des eaux de pluie à travers les dunes du Grand Erg Occidental à Béni-Abbès (Saoura). *Trav. Labo. Hydrogéologie - Géochimie de la Fac. des Sc. de l'Univers. de Bordeaux*, t. IX. 51 p., 4 tabl., 18 pl.

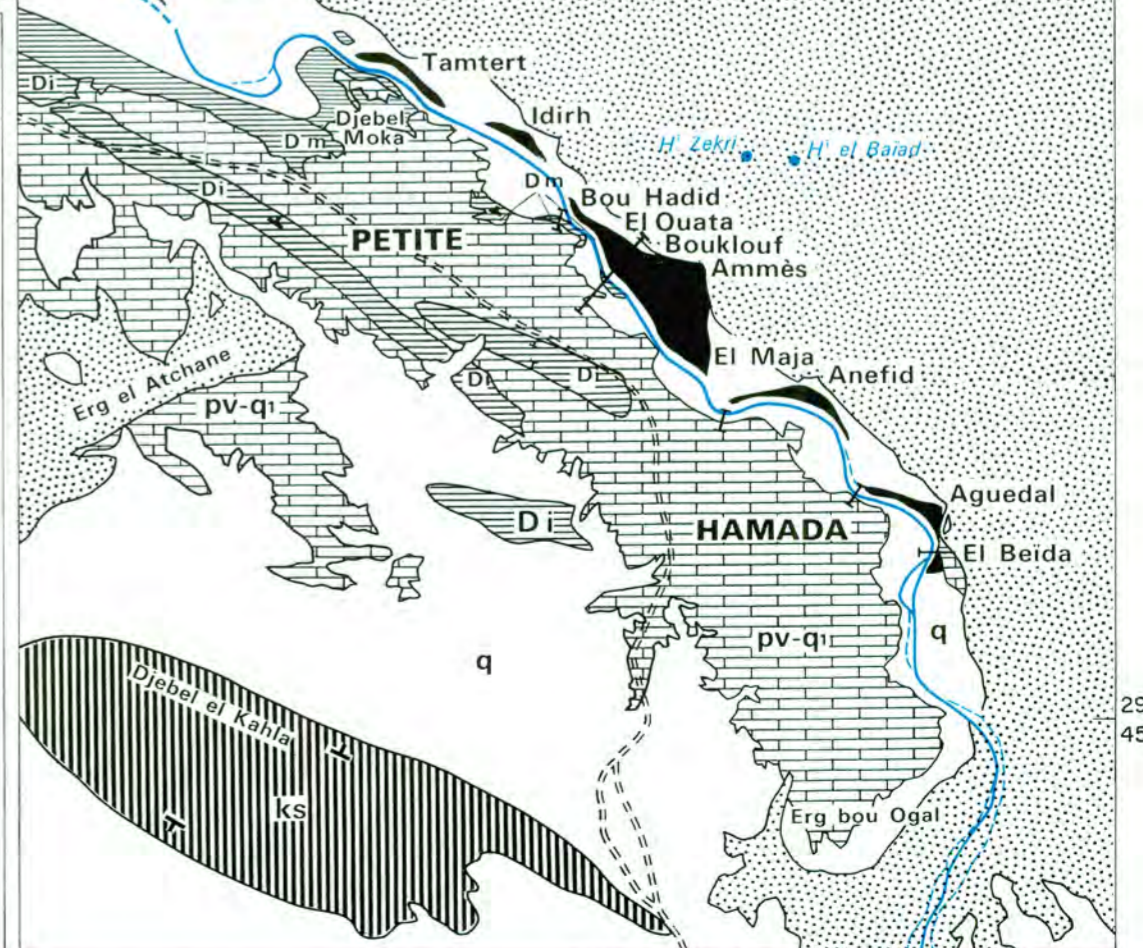


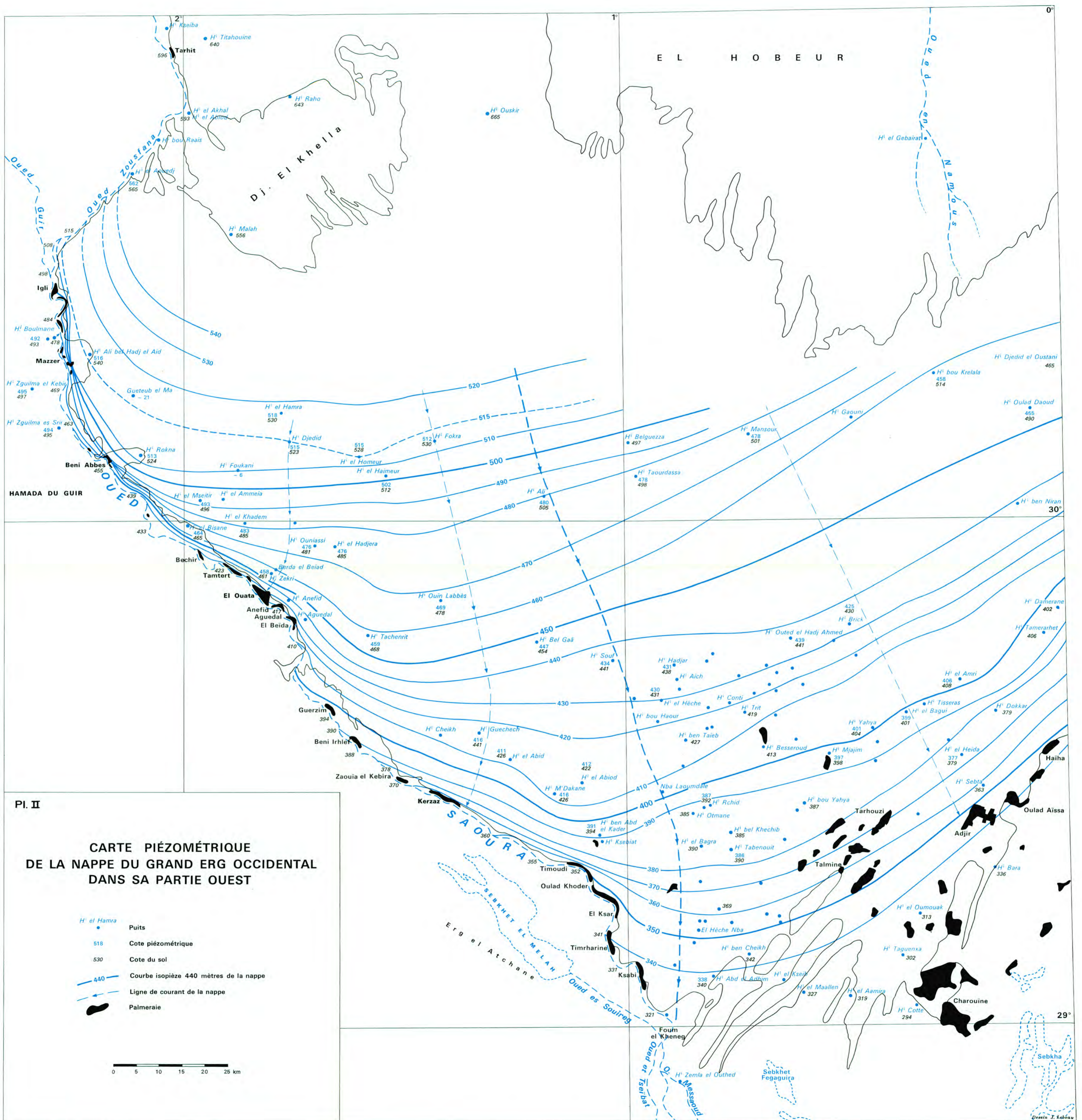
**PI. I - CARTE GÉOLOGIQUE DE LA HAUTE VALLÉE DE L'OUED SAOURA ET SITUATION DES POINTS D'EAU ISOLÉS**

Echelle : 1/200 000

**LÉGENDE**

Ergs	Igli	Dévonien moyen	
Quaternaire	Harrez	Dévonien inférieur	
<b>TERRAINS HAMADIENS</b>			
Plio - Villafranchien	Boulmane	<b>CAMBRO-SILURIEN</b>	
Villafranchien supérieur	Acacha, banc de Mazzer	Ks	Sommet du Viséen sup.
Néogène continental	El Ariga	Coupe étudiée	
Plio - Villafranchien	Hassi Zguilma		Palmeraie
<b>CARBONIFÈRE d'après Cl. Pareyn</b>			
Djenien	Faciès vaseux d'O <sup>ad</sup> Bou Hadid	Dm	Puits
El Guelmouna	<b>DÉVONIEN</b>		
Zousfana	DsHr	Dévonien terminal (?)	
Taouerta	Ds	Dévonien supérieur	
			Seguia



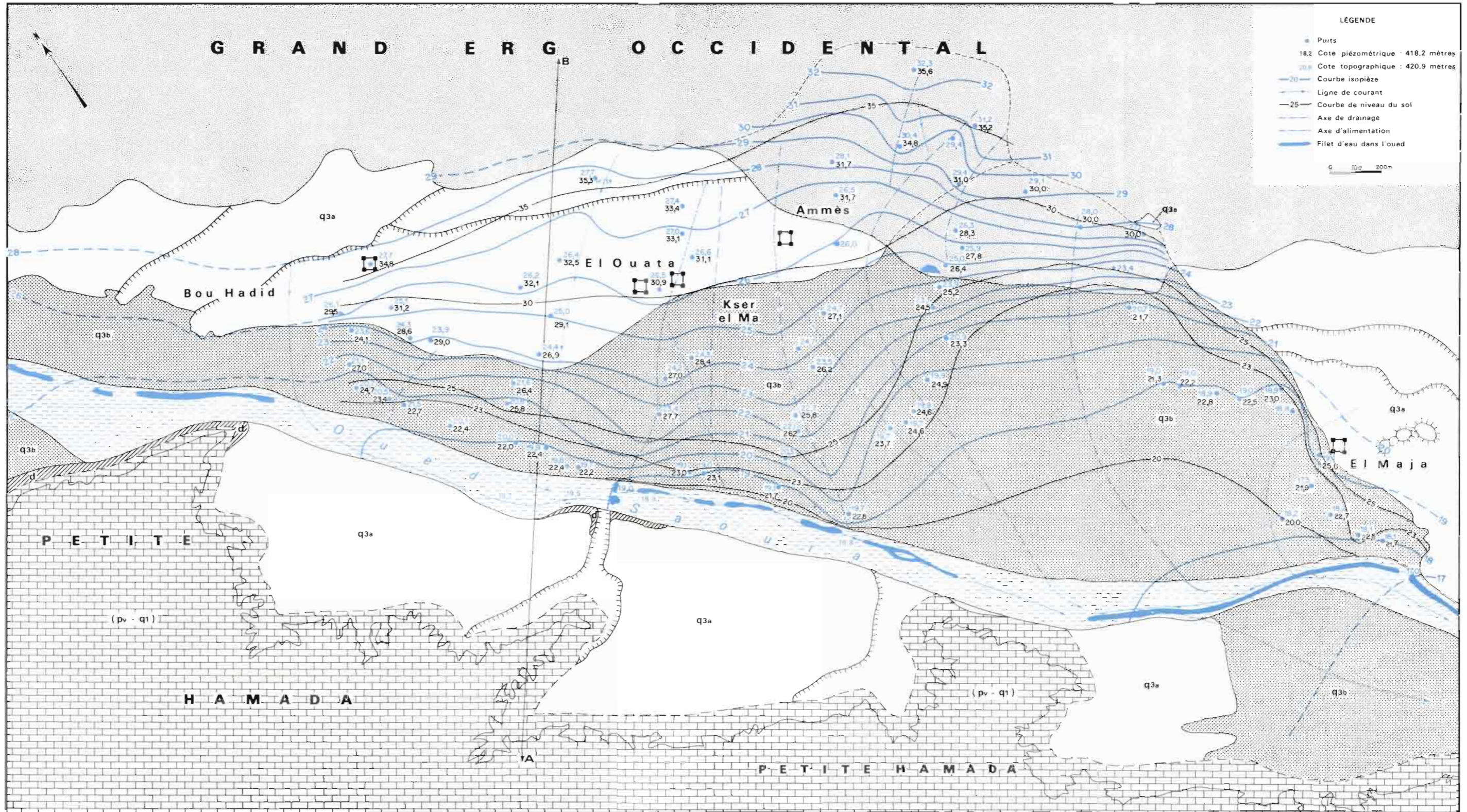


PI. II

CARTE PIÉZOMÉTRIQUE  
DE LA NAPPE DU GRAND ERG OCCIDENTAL  
DANS SA PARTIE OUEST

- H' el Hamra Puits
- 518 Cote piézométrique
- 530 Cote du sol
- 440 — Courbe isopièze 440 mètres de la nappe
- — — Ligne de courant de la nappe
- Palmeraie





Pl. III : El Ouata. Carte piézométrique de la nappe.

