



HAL
open science

Etude hydrogéologique du Sahel des Doukkala (Maroc)

Abdessadek Chtaini

► **To cite this version:**

Abdessadek Chtaini. Etude hydrogéologique du Sahel des Doukkala (Maroc). Géologie appliquée. Université Scientifique et Médicale de Grenoble, 1987. Français. NNT : . tel-00785556

HAL Id: tel-00785556

<https://theses.hal.science/tel-00785556>

Submitted on 6 Feb 2013

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

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



CHTAINI (A.)
Ex. n° 1

THESE
présentée à
L'UNIVERSITE SCIENTIFIQUE TECHNOLOGIQUE ET MEDICALE
DE GRENOBLE

POUR OBTENIR LE TITRE DE
DOCTEUR DE L'USTMG
SPECIALITE: SCIENCES DE LA TERRE
(OPTION HYDROGEOLOGIE)

UNIVERSITE DE GRENOBLE 1
INSTITUT DE GEOLOGIE
DOCUMENTATION
RUE MAURICE GIGNOUX
F 38031 GRENOBLE CEDEX
TEL. (76) 87.46.43

1 SEP. 1987

par
Abdessadek CHTAINI

2

**ETUDE HYDROGEOLOGIQUE DU SAHEL
DES DOUKKALA (MAROC)**

soutenue le 10 juillet 1987 devant la commission d'examen:

- R. MICHEL
- J. SARROT-REYNAULD
- P. CHAUVE
- J. PERRIAUX
- J.C. FOURNEAUX

Professeur à l'USTMG
Professeur à l'USTMG
Professeur à l'Université de Besançon
Professeur à l'USTMG
Maître-assistant à l'USTMG

Président
Directeur de la thèse
Rapporteur
Rapporteur
Examineur

THESE
présentée à
L'UNIVERSITE SCIENTIFIQUE TECHNOLOGIQUE ET MEDICALE
DE GRENOBLE

POUR OBTENIR LE TITRE DE
DOCTEUR DE L'USTMG
SPECIALITE: SCIENCES DE LA TERRE
(OPTION HYDROGEOLOGIE)

par
Abdessadek CHTAINI

UNIVERSITE DE GRENOBLE
INSTITUT DE GEOLOGIE
DOCUMENTATION
RUE MAURICE GIGNOUX
F 38031 GRENOBLE CEDEX
TEL. (76) 87.46.42

**ETUDE HYDROGEOLOGIQUE DU SAHEL
DES DOUKKALA (MAROC)**

soutenu le 10 juillet 1987 devant la commission d'examen:

NNB 10073807 10013403

- R. MICHEL
- J. SARROT-REYNAULD
- P. CHAUVE
- J. PERRIAUX
- J.C. FOURNEAUX

Professeur à l'USTMG
Professeur à l'USTMG
Professeur à l'Université de Besançon
Professeur à l'USTMG
Maître-assistant à l'USTMG

Président
Directeur de la thèse
Rapporteur
Rapporteur
Examineur

Univ. J. Fourier - O.S.U.G.
MAISON DES GEOSCIENCES
DOCUMENTATION
B.P. 53
F. 38041 GRENOBLE CEDEX
Tél. 04 76 63 54 27 - Fax 04 76 51 40 58
Mail : platour@ujf-grenoble.fr

AVANT-PROPOS

Parvenu au terme de ce travail, je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à tous ceux qui ont contribué à sa réalisation et en particulier :

Monsieur le Professeur J. SARROT-REYNAULD qui m'a accueilli dans son laboratoire et m'a soutenu tout au long de cette étude. J'ai ainsi pu profiter de son expérience et de ses précieux conseils dans le domaine de l'hydrogéologie.

Monsieur A. EL HEBJL pour m'avoir confié ce sujet et qui, malgré ses nombreuses occupations, a toujours su trouver le temps nécessaire pour m'aider à résoudre les problèmes matériels et scientifiques qui se sont posés le long de cette étude.

Je remercie également Monsieur le Professeur R. MICHEL qui me fait l'honneur de présider ce jury.

Je tiens à exprimer ma gratitude à Monsieur le Professeur J. PERRIAUX pour ses conseils et pour l'honneur qu'il me fait en participant au jury.

Je remercie également Monsieur le Professeur P. CHAIVE qui a bien voulu faire partie du jury.

Mes remerciements s'adressent à Messieurs M. BENBIBA et J. DAZY dont les conseils m'ont été d'une grande utilité.

Je n'oublierais pas mes amis de la D.R.H. de Tensift et le Personnel des D.P.E. de Safi et d'El Jadida pour l'aide qu'ils m'ont apporté.

Je ne saurais oublier le Personnel du Laboratoire de l'Office du Haouz pour l'incalculable travail analytique qu'il a apporté à cette étude.

Je n'oublierais pas non plus de remercier le Personnel de l'Institut Dolomieu et en particulier Mme N. REVOL pour le soin qu'elle a apporté à la frappe de ce mémoire.

Et bien sur, si mon séjour à Grenoble fut agréable ; c'est grâce à la bonne humeur de mes camarades de l'Institut Dolomieu et mes amis de la résidence du Rabot.

Enfin je dédie ce travail à Amina, à ma famille auprès desquelles j'ai toujours trouvé le soutien nécessaire pour parvenir au terme de ce travail et à tous mes amis.

RESUME

Mots-Clés

Sahel des Doukkala - méséta marocaine - périmètre irrigué - bilan hydrologique - nappes aquifères - piézométrie - physico-chimie des eaux - caractéristiques hydrodynamiques.

Le Sahel des Doukkala, situé entre le périmètre d'irrigation des Doukkala et l'Océan Atlantique fait partie de la grande unité structurale appelée méséta marocaine très peu déformée durant le cycle alpin (atlasique) et qui constitue une plate-forme sub-horizontale. Le socle calédo-hercynien y est sub-tabulaire, pénéplané et recouvert par une couverture où dominent le Trias et le Crétacé.

L'étude géophysique, complétée par les sondages mécaniques a permis le tracé d'une esquisse structurale de la base des formations aquifères (Plioquaternaire et Hauterivien moyen).

L'étude climatologique: pluviométrie, températures et évapotranspiration nous a permis de proposer un essai de bilan hydrologique.

La piézométrie met en évidence deux directions principales d'écoulement et montre qu'il y a très peu de variations de niveau piézométrique entre les hautes et basses eaux en raison de l'infiltration d'eau d'irrigation.

La thermographie a permis la confirmation des résultats obtenus par l'étude piézométrique.

L'étude physico-chimique des eaux a montré deux types de faciès chimiques dominants: chloruré sodique en bordure océanique et au N-E et bicarbonaté sodique ou calcique au Centre du Sahel.

La minéralisation des eaux a pour origine: la dissolution des formations encaissantes, la pollution par les engrais et le mélange avec les eaux marines.

Les résultats d'interprétation des essais de pompage ont permis la détermination des caractéristiques hydrodynamiques (transmissivité et coefficient d'emmagasinement).

ABSTRACT

Keys-words

Sahel of Doukkala - moroccan meseta - perimeter of irrigation - hydrological balance - aquifer reservoir - piezometry - physical chemistry of waters - hydrodynamic characteristics.

The Sahel of Doukkala, located between the Doukkala's irrigation perimeter and the Atlantic ocean, belongs to the great structural unity called Moroccan Meseta, slightly deformed during the alpin cycle (atlasic) and forms a sub-horizontal platform.

The caledono-hercynian basement is sub-tabular peneplated and covered by a mantle where triassic and cretaceous formations are predominant.

The geophysical study, completed by mechanical drillings, allowed the drawing of a structural stretch map of the base of aquifer reservoir (Plio-quadernary and middle Hauterivian).

The climatological study: pluviometry, temperature and evaporespiration allowed us to propose an hydrological balance.

The piezometry points out two principal outflow directions and shows there are very little piezometric level variations between high and low waters because of irrigation water infiltration.

The thermography confirmed the results obtained by the piezometry investigation.

The physical-chemistry of waters shows two principal chemical facies: made of sodic chloride on the ocean ridge and in the N.E and made of sodic or calcic bicarbonate in the center of Sahel. The mineralisation of waters comes from: the dissolution of including formations, the pollution by fertilizers and the mixing with oceanic waters.

The interpretation of pumping tests allowed us to determine the hydrodynamic characteristics (transmissivity and storage coefficient).

SOMMAIRE

INTRODUCTION	
CHAPITRE I - ETUDE HYDROCLIMATOLOGIQUE	21
I.1- INTRODUCTION	23
I.2- SITUATION GEOGRAPHIQUE DES STATIONS	23
I.3- ETUDE DES PRECIPITATIONS	23
I.4- ETUDE DE LA LAME D'EAU PRECIPITEE	30
I.5- ETUDE DES TEMPERATURES	39
I.6- L'HUMIDITE RELATIVE	41
I.7- ETUDE DE L'EVAPOTRANSPIRATION	41
I.8- HYDROLOGIE DE SURFACE	48
I.9- ESTIMATION DU BILAN HYDROLOGIQUE	53
I.10- CONCLUSION	53
CHAPITRE II - GEOLOGIE	55
II.1- GENERALITES	57
II.2- STRATIGRAPHIE	57
II.2.1- Le socle hercynien	57
II.2.2- Le Permo-Trias	61
II.2.3- Le Jurassique	61
II.2.4- Le Crétacé	61
II.2.5- Le Cénomaniens	63
II.2.6- L'Eocène	64
II.2.7- Le Miocène	64
II.2.8- Le Plio-Quaternaire	64
II.3- VARIATIONS LITHOLOGIQUES ET DE PUISSANCE	66
II.4- TECTONIQUE	71
II.5- STRUCTURE DE LA COUVERTURE CRÉTACEE	72
II.6- CONCLUSION	75
CHAPITRE III - PIEZOMETRIE	77
III.1- INTRODUCTION	79
III.2- INVENTAIRE DES POINTS D'EAU	79
III.2.1- Caractéristiques des puits et forages	79
III.2.2- Utilisation des puits et forages	79
III.3- PRINCIPAUX NIVEAUX AQUIFERES	80
III.4- INTERPRETATION DES CARTES PIEZOMETRIQUES	80
III.4.1- Au Sud de Cap Bendouzza (Sahel de Safi)	80
III.4.2- Entre Cap Bendouzza et Sidi Moussa (Sahel Central)	80
III.4.3- Entre Sidi Moussa et El Jadida	85
III.4.4- Entre la plateau mazaganais et l'Oum-er-Rbia	85
III.5- REGIME DE LA NAPPE	85
III.6- FLUCTUATIONS DE LA NAPPE	89
III.7- ZONES D'ALIMENTATION	89
III.8- CONCLUSION	89
CHAPITRE IV - THERMOGRAPHIE	91
IV.1- PRINCIPE DE LA THERMOGRAPHIE	93
IV.2- APPLICATION	93
IV.2.1- Moyens techniques mis en oeuvre	95
IV.2.2- Interprétation des thermophotos	95
IV.2.2.a-Bande 3-Zone de Safi	95
IV.2.2.b-Bande 5 - Cap Beddouzza	95
IV.2.2.c-Bande 6.2- Sud d'El Qualidia	95

Univ. J. Fourier - O.S.U.G.
 M.A.S.C.N. DES GEOSCIENCES
 DOCUMENTATION
 F. 38041 B.P. 53
 38041 GRENOBLE CEDEX
 Tél. 04 76 63 54 27 Fax 04 76 51 40 58
 Mail : phelob@ujf-grenoble.fr

IV.2.2.d- Bande 6.4 - El Oualidia	95
IV.2.2.e- Bande 7.2 - Jorf Lasfar	95
IV.2.2.f- Bande 8 - Embouchure de l'Oum-er-Rbia	95
IV.3- CONCLUSION	95
CHAPITRE V - ETUDE PHYSICO-CHIMIQUE	103
V.1- INTRODUCTION	105
V.2- ETUDE PHYSIQUE DES EAUX-INTERPRETATION DE LA CARTE DE CONDUCTIVITE	105
V.3- CHIMIE DES EAUX SOUTERRAINES	107
V.3.1- Capacité d'échange de base	107
V.3.2- Faciès chimiques et interprétation graphique des analyses chimiques des eaux	108
V.3.3- Etude de l'origine des ions	117
V.3.3.1- Carte des teneurs en chlorures	117
V.3.3.2- Carte des teneurs en sulfates	117
V.3.4- Interprétation des cartes d'équirapport.....	121
V.3.4.1- Carte d'équirapport r SO ₄ / r Cl	121
V.3.4.2- Carte d'équirapport r Mg/ r Ca	121
V.3.5- Détermination graphique du CO ₂ libre et du pH d'équilibre	121
V.3.6- Potabilité des eaux	126
V.4 - CONCLUSION	126
CHAPITRE VI - DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES	131
VI.1- INTRODUCTION	133
VI.2- DEFINITION DES CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES	133
VI.3- DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES PAR ESSAIS DE POMPAGE	133
VI.3.1- Méthode de THEIS	133
VI.3.2- Méthode de JACOB	138
VI.3.3- Méthode de la remontée de THEIS	142
VI.3.4- Méthode de CHOW	146
VI.4- PRINCIPE DE DETERMINATION DU COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT PAR LA METHODE DE RORABAUGH	150
VI.5- CONCLUSION	152
CONCLUSION GENERALE	153
BIBLIOGRAPHIE	155
ANNEXES	157

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Plan de la situation de la région d'étude	19
Figure 2 : Répartition spatiale des stations pluviométriques	24
Figure 3 : Corrélacion double masse des précipitations moyennes annuelles	26-29
Figure 4 : Répartition des précipitations mensuelles	32-34
Figure 5 : Carte des isohyètes	36
Figure 6 : Polygones de THIESSEN	38
Figure 6' : Diagramme de WUNDT	46
Figure 7 : Schéma hydrologique de la plaine des Abda-Doukhala	49
Figure 8 : Carte géologique sommaire de la méséta	58
Figure 9 : Carte géologique du Sahel des Doukhala	59
Figure 10 : Coupe du Crétacé inférieur de Safi	62
Figure 11 : Schéma stratigraphique du Sahel.....	67
Figure 12 : Log stratigraphique de quelques forages.....	69
Figure 13 : Esquisse structurale du Crétacé inférieur	73
Figure 14 : Coupes géologiques à travers le Sahel	74
Figure 15 : Esquisse structurale de la base du Plio-Quaternaire.....	76
Figure 16 : Cartes piézométriques	81-83
Figure 17 : Scénario de l'hydrogéologie du Sahel	86
Figure 18 : Courbes de variation de la profondeur des eaux souterraines	87-88
Figure 19 : Schéma théorique d'un radiomètre à balayage.....	94
Figure 20 : Résultats de l'interprétation des thermophotos.....	96-102
Figure 21 : Carte de conductivité.....	106
Figure 22 : Carte des valeurs de l'i.e.b.....	109
Figure 23 : Diagramme semi-logarithmique de SCHOELLER-BERKALOFF	110-113
Figure 24 : Diagramme d'analyse d'eau de PIPER	114-116
Figure 25 : Carte de répartition des faciès chimiques	118
Figure 26 : Carte des teneurs en chlorures	119
Figure 27 : Carte des teneurs en sulfates	120
Figure 28 : Carte d'équirapport rSO ₄ /rCl	122
Figure 29 : Carte d'équirapport rMg/rCa	123
Figure 30 : Diagramme logarithmique de H. SCHOELLER	124-125
Figure 31 : Diagramme de potabilité des eaux de H. SCHOELLER	127-129
Figure 32 : Courbes interprétatives des essais de pompage d'après la méthode de THEIS	134-135

Figure 33 : Courbes interprétatives des essais de pompage d'après la méthode JACOB	139-140
Figure 34 : Courbes interprétatives des essais de pompage d'après la méthode de la remontée de THEIS	143-144
Figure 35 : Courbes interprétatives des essais de pompage d'après la méthode de CHOW	147-148

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Nomenclature, équipement et période de fonctionnement des stations	25
Tableau 2 : Résultats des corrélations entre stations	31
Tableau 3 : Récapitulation des données pluviométriques	35
Tableau 4 : Récapitulation des données thermométriques	40
Tableau 5 : E.T.P. calculée par la première formule de SERRA	44
Tableau 6 : E.T.P. calculée par la formule de THORNTHWAITE	44
Tableau 7 : Bilan hydrologique d'après THORNTHWAITE	47
Tableau 8 : Valeurs de transmissivités et de coefficients d'emmagasinement d'après la méthode de THEIS	137
Tableau 9 : Valeurs de transmissivités et de coefficients d'emmagasinement d'après la méthode de JACOB	141
Tableau 10 : Valeurs de transmissivités d'après la méthode de la remontée de THEIS	145
Tableau 11 : Valeurs de transmissivités et de coefficients d'emmagasinement d'après la méthode de CHOW	147
Tableau 12 : Récapitulation des valeurs de transmissivité	151

INTRODUCTION

-=-

Le Sahel des Doukkala forme une bande côtière qui s'étend sur une profondeur de 30 à 50 km depuis l'embouchure de l'oued Oum-er-Rbia jusqu'à Safi. C'est une région pauvre où les sols sont squelettiques, peu profonds et inaptes à produire de bonnes récoltes. La vocation de la région est l'élevage. Seule une frange côtière de quelques kilomètres de large, l'Oulja, porte les riches cultures maraîchères (Fig.1).

Les villes sont situées en bordure de l'Océan aux deux extrémités du Sahel et se développent rapidement.

El Jadida: 40 000 habitants en 1960, 92.185 en 1971 et 150.037 en 1982.

Safi: 80.000 habitants en 1960, 162.830 en 1971 et 267.162 en 1982.

La croissance de Safi est due à l'implantation d'un important complexe industriel (Maroc Chimie).

BUT

L'étude des ressources en eaux du Sahel revêt un grand intérêt du fait que cette région connaît un développement socio-économique basé sur:

- Le développement du port phosphatier de Jorf Lasfar
- Le développement des industries chimiques de Safi
- L'intensification des cultures maraîchères de l'Oulja (cultures sous-serres).

A cet effet, une étude par prospection électrique a été réalisée par la Compagnie Africaine de Géophysique (C.A.G.) de novembre 1967 à avril 1968 pour le compte de la Division des Ressources en Eau (D.R.E.).

Dans le but de mettre en évidence les résurgences de la nappe phréatique en milieu marin, la D.R.E. a fait appel à l'Institut Géographique National (I.G.N.) pour l'étude thermographique de la côte atlantique. Cette mission a eu lieu entre janvier 1976 et avril 1976.

Par ailleurs, la Direction Régionale de l'Hydraulique (D.R.H.) de Tensift, dans le souci de renforcer les ressources en eau potable et d'irrigation, a réalisé de nombreux forages de reconnaissance et d'exploitation.

En vue de préparer une Thèse de l'Université de Grenoble, avec l'accord de Monsieur le Professeur J. SARROT REYNAULD et de Monsieur A. EL HEBIL (Direction de la région hydraulique de Tensift), nous avons contribué à l'étude hydrogéologique du Sahel.

METHODES

Etude hydroclimatologique

Sachant que les potentialités en eau des nappes souterraines sont étroitement liées aux conditions hydroclimatologiques, il convenait, à partir des données climatologiques (pluviométrie, température, humidité, etc.), de faire une synthèse et d'essayer de dégager les principales caractéristiques qui s'intègrent dans l'estimation du bilan régional des ressources en eau.

Etude géologique

La région a fait l'objet de plusieurs études entreprises par L. GENTIL (1907), J. BARTHOUX (1920 à 1932), G. LE COINTRE, P. RUSSO, B. YOVANOVICH, E. ROCH, H. TERMIER...

En 1951, M. GIGOUT a repris l'étude géologique du secteur tout en se basant sur les résultats de ses prédécesseurs. Ses travaux ont abouti entre autres à l'établissement des cartes géologiques au 1/200 000 d'El Jadida, de Safi et à la mise à jour d'une monographie géologique régionale qui reste le document de base pour toute la région.

Au cours de l'étude de M. GIGOUT, H. SALVAN a pris à son compte le Crétacé supérieur et l'Eocène du secteur.

Etude piézométrique

La récolte des données piézométriques a nécessité, sur le terrain, le choix d'un réseau de points d'eau. En plus des points mensuellement mesurés par les services de l'eau de Safi et d'El Jadida, 150 points d'eau ont fait l'objet de mesures piézométriques en période de hautes eaux (mars) et basses eaux (septembre).

Ces mesures ont permis le tracé des cartes piézométriques en hautes et basses eaux qui nous permettent de définir les grandes lignes de l'écoulement souterrain, de connaître l'évolution du niveau de la nappe dans le temps et dans l'espace.

Etude physico-chimique des eaux

Sur le réseau des points d'eau préalablement choisis nous avons mesuré la conductivité de 150 échantillons sur le terrain. Une centaine de ces échantillons ont fait l'objet d'une analyse chimique, analyse qui a porté sur le pH et la composition chimique en éléments majeurs à l'exception des nitrates. Ceci permet d'apprécier la qualité des eaux, de préciser l'écoulement souterrain des eaux et de voir l'évolution et la répartition des caractères physico-chimiques des eaux.

Détermination des caractéristiques hydrodynamiques

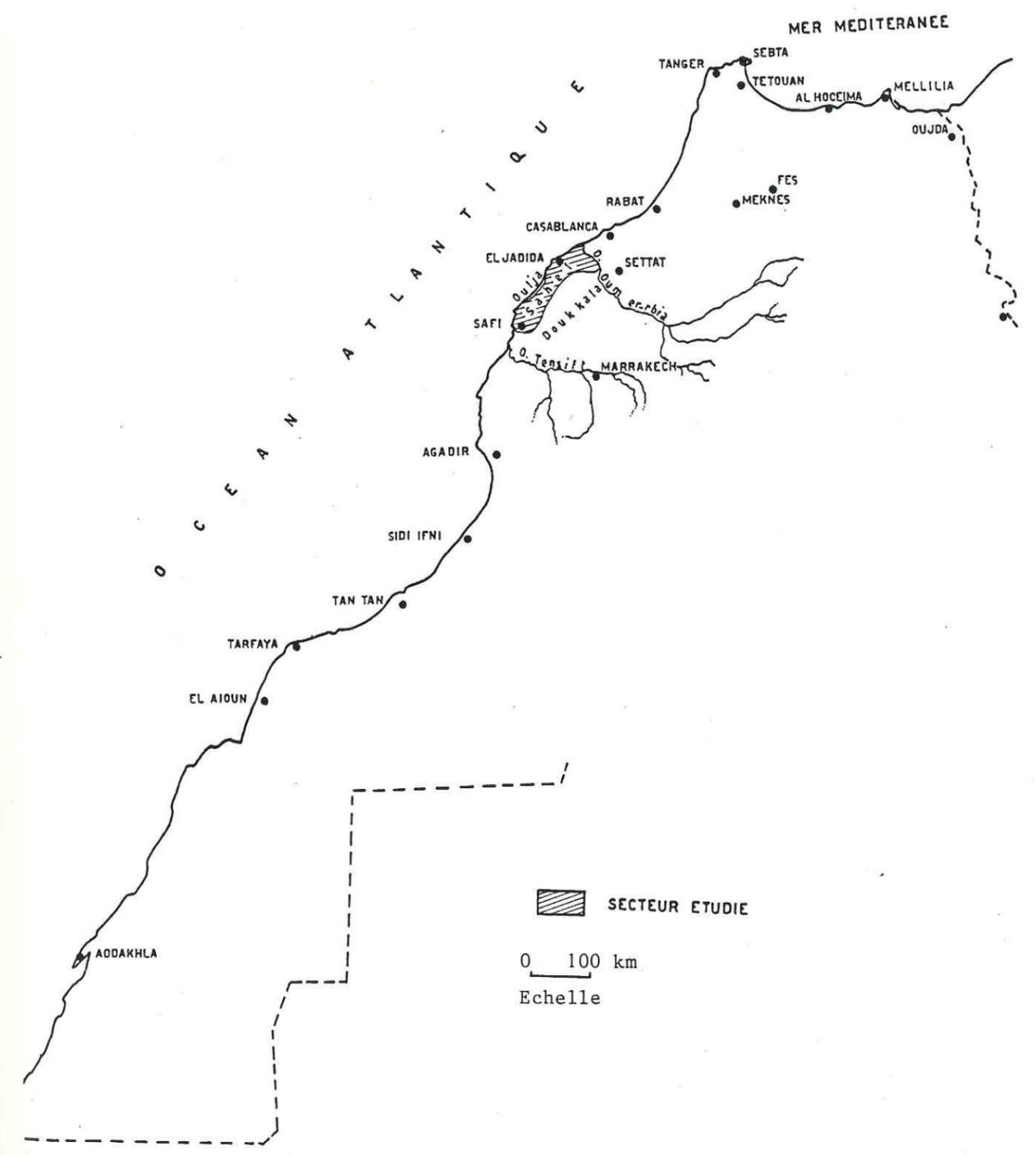
Afin de déterminer la transmissivité et le coefficient d'emménagement des horizons aquifères, une trentaine d'essais de pompage ont été exécutés et interprétés.

Situation géographique

Le territoire qui fait l'objet de cette étude est limité au NE par l'oued Oum-er-Rbia, au NW par l'Océan Atlantique, à l'Est par le périmètre d'irrigation des Doukkala et au Sud par le couloir des Abda.

Du point de vue administratif, cette région chevauche sur la province d'El Jadida au Nord et celle de Safi au Sud. Elle couvre une superficie de 4 600 km².

Figure 1 - PLAN DE SITUATION



CHAPITRE 1

ETUDE HYDROCLIMATOLOGIQUE

- 1.1 - INTRODUCTION
- 1.2 - SITUATION GEOGRAPHIQUE DES STATIONS
- 1.3 - ETUDE DES PRECIPITATIONS
- 1.4 - DETERMINATION DE LA LAME D'EAU PRECIPITEE
- 1.5 - ETUDE DES TEMPERATURES
- 1.6 - L'HUMIDITE RELATIVE
- 1.7 - ETUDE DE L'EVAPOTRANSPIRATION
- 1.8 - HYDROLOGIE DE SURFACE
- 1.9 - ESTIMATION DU BILAN HYDROLOGIQUE
- 1.10 - CONCLUSION

1.1 - INTRODUCTION

On abordera dans ce chapitre l'étude des facteurs intervenant dans l'équation du bilan hydrologique, à savoir l'étude des précipitations, des températures, de l'évapotranspiration et du ruissellement.

1.2 - SITUATION GEOGRAPHIQUE DES STATIONS

La figure 2 montre la répartition spatiale des stations pluviométriques. La nomenclature, l'équipement et la période de fonctionnement des stations sont reportés sur le tableau 1. On dispose donc d'un grand nombre de postes, ce nombre ne doit pas faire illusion, car leur répartition dans l'espace et leur fonctionnement laissent à désirer.

1.3 - ETUDE DES PRECIPITATIONS

Cette étude a été faite à partir de 18 postes dont 11 sont situés dans le Sahel et les autres à sa périphérie. Le choix de la période à retenir pour le calcul de la pluviométrie moyenne annuelle, ou module, a été guidé par un double souci: d'une part celui de disposer d'une période aussi longue que possible, d'autre part d'utiliser le plus grand nombre possible de postes.

Ceci nous a conduit à retenir la période 1951-1980, soit 30 années, ce qui correspond au point de vue durée, aux normes minimales exigées par l'Organisation Mondiale de la Météorologie (O.M.M.).

Par suite du choix de la période 1951-1980, deux catégories de stations apparaissent.

- Des stations qui présentent une série continue d'observations couvrant la période retenue; pour ces stations le calcul des modules pourra être fait directement dans la série d'observation. On appellera stations de référence les deux stations qui répondent à cette définition, à savoir Safi-Aéro et Sidi-Bennour.

- Les autres présentent des périodes d'observations beaucoup plus courtes, les séries inférieures à 10 ans sont à éliminer. Pour les stations présentant des séries de mesures supérieures à 10 ans, nous avons procédé à une homogénéisation avec la station de référence la plus proche.

Le test d'homogénéisation (ou corrélation double masse), consiste à calculer et à reporter les pluies cumulées d'un certain nombre d'années successives communes aux deux stations (la station de référence et la station à tester).

Toutes les stations testées présentent des corrélations linéaires à l'exception de la station de Jémaa Sahim corrélée à celle de Safi Aéro et la station de Boulaouane comparée à celle de Sidi Bennour.

Pour ces deux stations, il y a rupture de pente. L'opération d'homogénéisation consiste à aligner tous les points sur la même droite. Pour ce faire, on a multiplié les valeurs des précipitations mensuelles enregistrées après changement de pente par un coefficient de correction qui dans notre cas est égal au rapport des pentes aD/aD' (Fig.3).

Pour les postes situés au Sud du secteur ayant fonctionné durant une période antérieure à celle retenue, l'homogénéisation a été faite avec le poste de Safi.

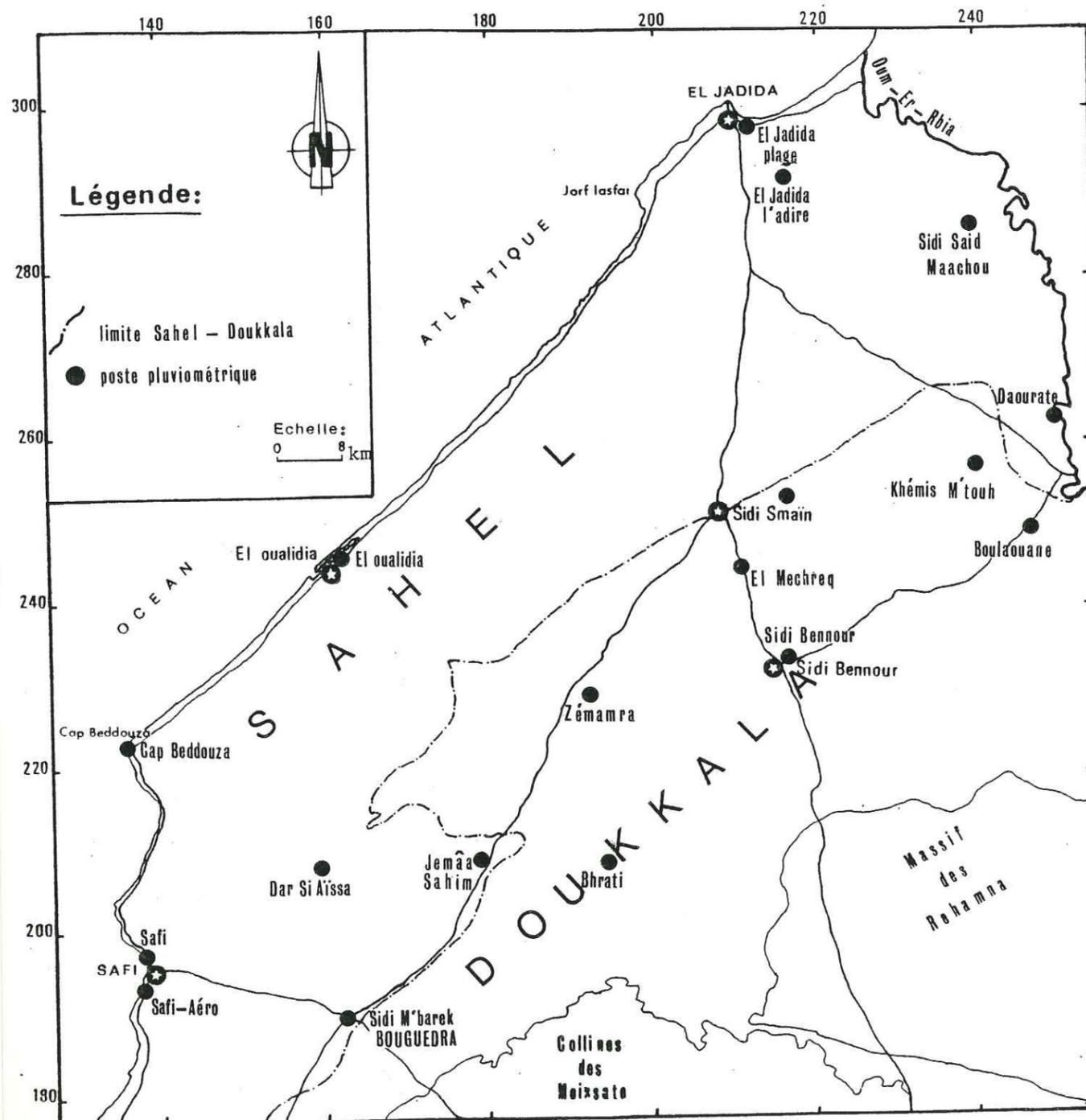


Figure 2 - REPARTITION SPATIALE DES STATIONS PLUVIOMETRIQUES

Tableau 1

NOMENCLATURE, EQUIPEMENT ET PERIODE DE FONCTIONNEMENT DES STATIONS

STATIONS	ALTITUDE (m)	COORDONNEES (X) (Y)		EQUIPEMENT (*)	PERIODE DE FONCTIONNEMENT	OBSERVATIONS
JEMAA SAHIM	170	180.000	210.000	PLU.THE.ANE.	1972-1983	
SIDI BENNOUR	185	216.000	233.000	PLUVIOMETRE	1915-1980	
DRIDRAT	140	165.600	221.800	PLUVIOMETRE	1933-1946	
SAFI	15	138.000	196.500	PLUVIOMETRE	1914-1967	
SAFI-AERO	45	138.200	193.400	P.T.A.PSYCR.	1954-1984	
DAOURAT	160	251.000	263.000	PLUVIOMETRE	1957-1977	
BOULAOUANE	182	246.725	249.425	PLUVIOMETRE	1952-1976	
ZEMAMRA	169	192.000	229.450	PLUVI.THERM.	1926-1955	
KHEMIS M'TOUH	150	239.800	256.750	PLUVI.THERM.	1963-1983	
S.M. BOUGUEDRA	170	162.600	190.200	PLUVIOMETRE	1934-1964	
DAR SI AÏSSA	100	160.000	208.000	PLUVIOMETRE	1928-1956	
BEHRATI	180	194.400	209.200	PLUVIOMETRE	1934-1964	
EL JADIDA L'ADIR	45	216.400	292.500	PLUVI.THERM.	1923-1975	
EL MECHREK	157	211.050	244.300	PLUVI.THERM.	1964-1979	
SIDI SAID MAACHOU	30	239.600	286.600	PLUVI.THERM.	1941-1980	
HAD OULAD FREJ	152	236.550	253.450	PLUVI.THERM.	1960-1981	
OUALIDIA	30	160.500	244.600	PLUVIOMETRE	1932-1937	A ELIMINER
CAP BEDDOUZA	70	136.000	223.000	PLUVIOMETRE	1946-1956	A ELIMINER

(*) : PLU = PLUVIOMETRE , THE = THERMOMETRE , ANE = ANEMOMETRE , PSY = PSYCHROMETRE

Univ. J. Fourier - O.S.U.G.
 MAISON DES GEOSCIENCES
 DOCUMENTATION
 B.P. 53
 F. 38041 GRENOBLE CEDEX
 Tél. 04 76 63 54 27 - Fax 04 76 51 40 58
 Mail : plalour@ujf-grenoble.fr

Figure 3a- Corrélacion double masse des précipitations moyennes annuelles

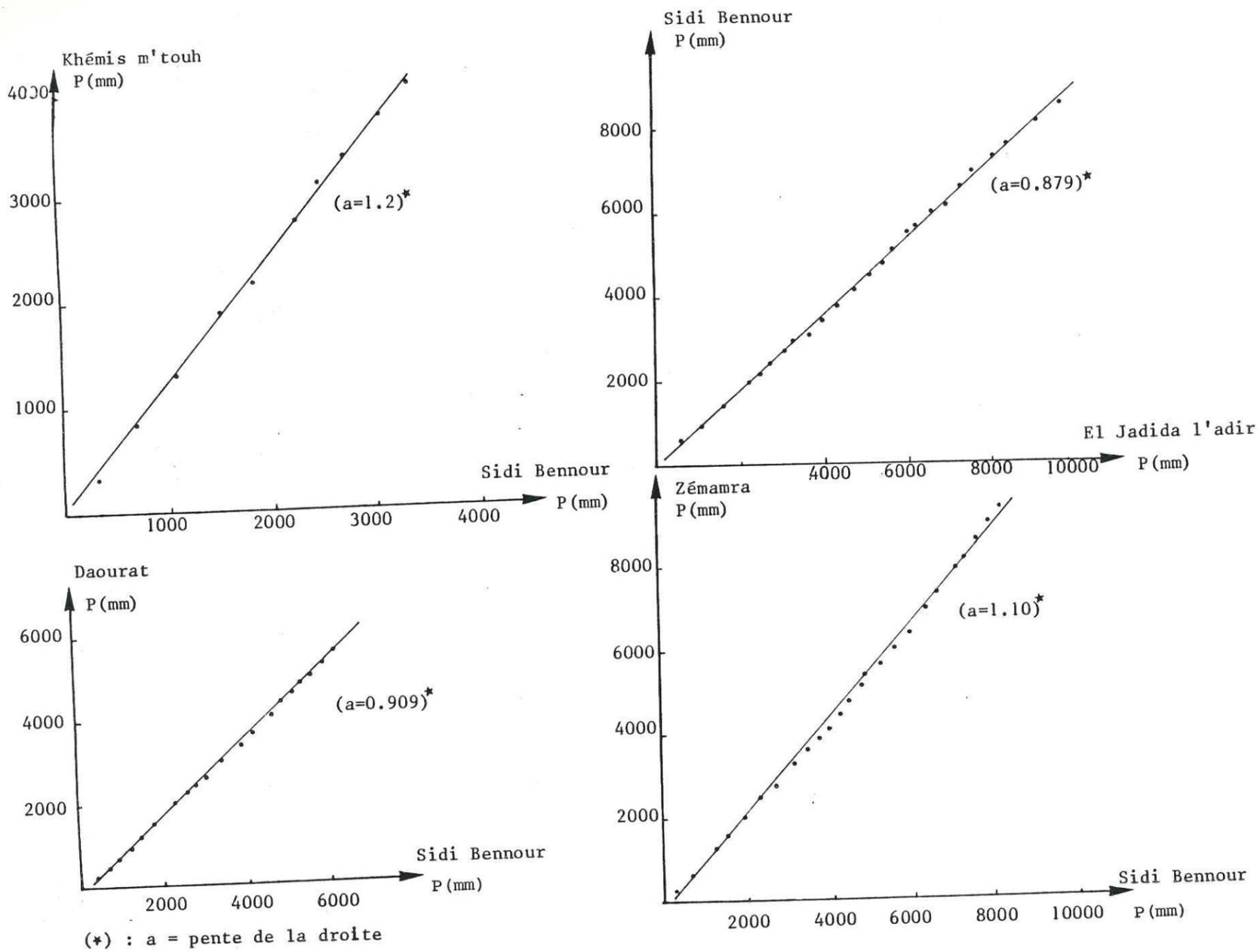


Figure 3b - Corrélacion double masse des précipitations moyennes annuelles

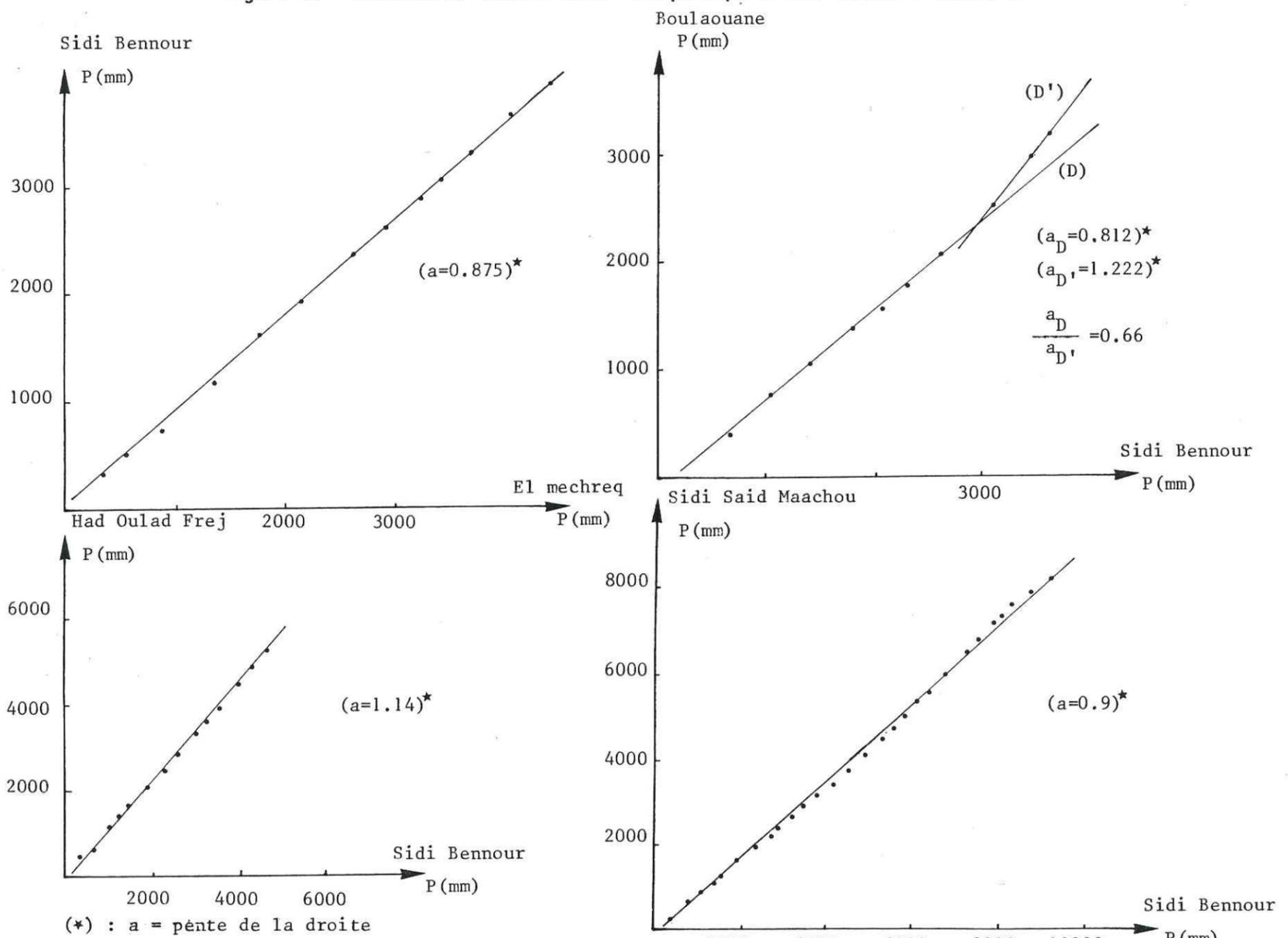


Figure 3c - Corrélation double masse des précipitations moyennes annuelles

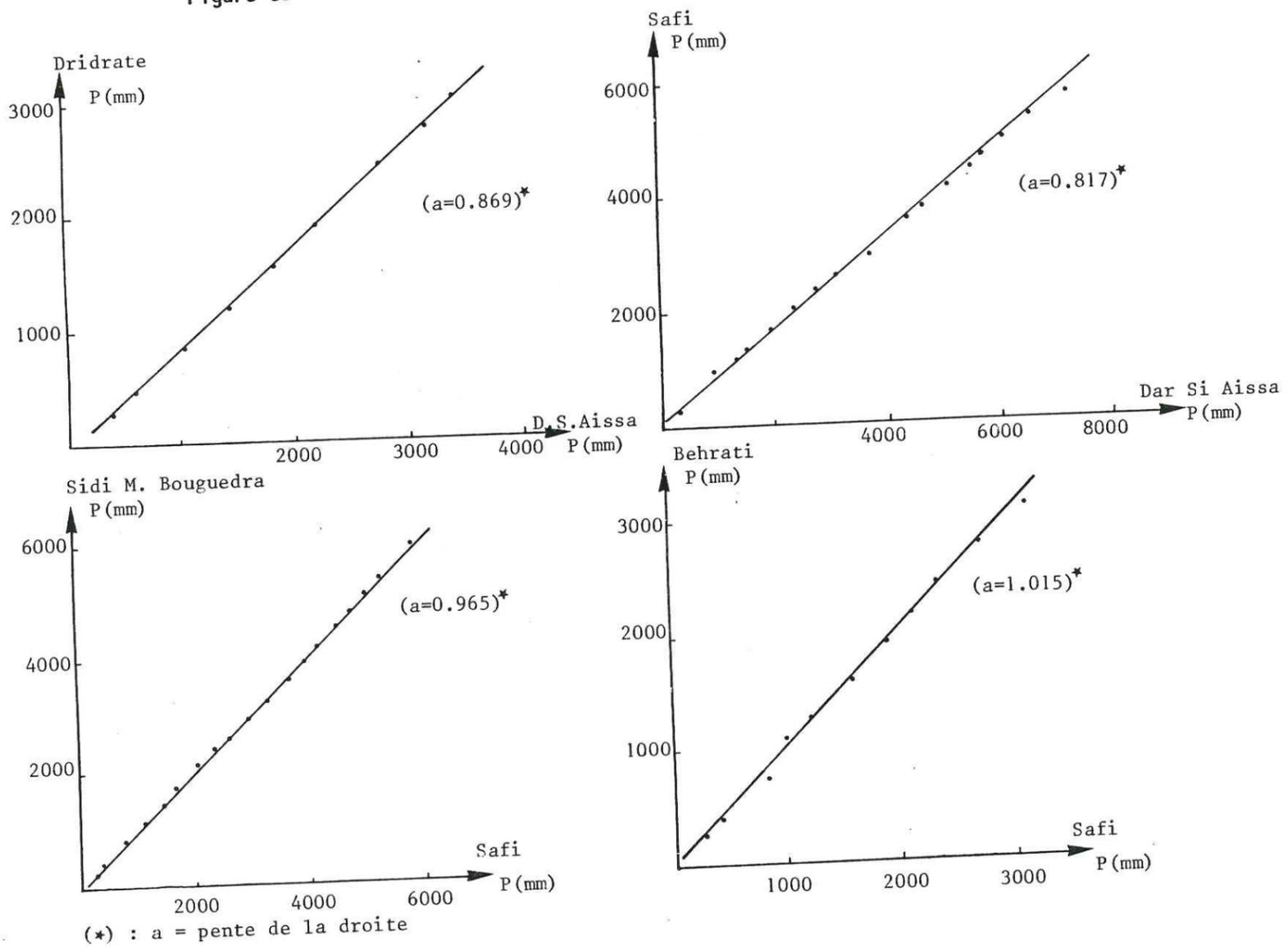
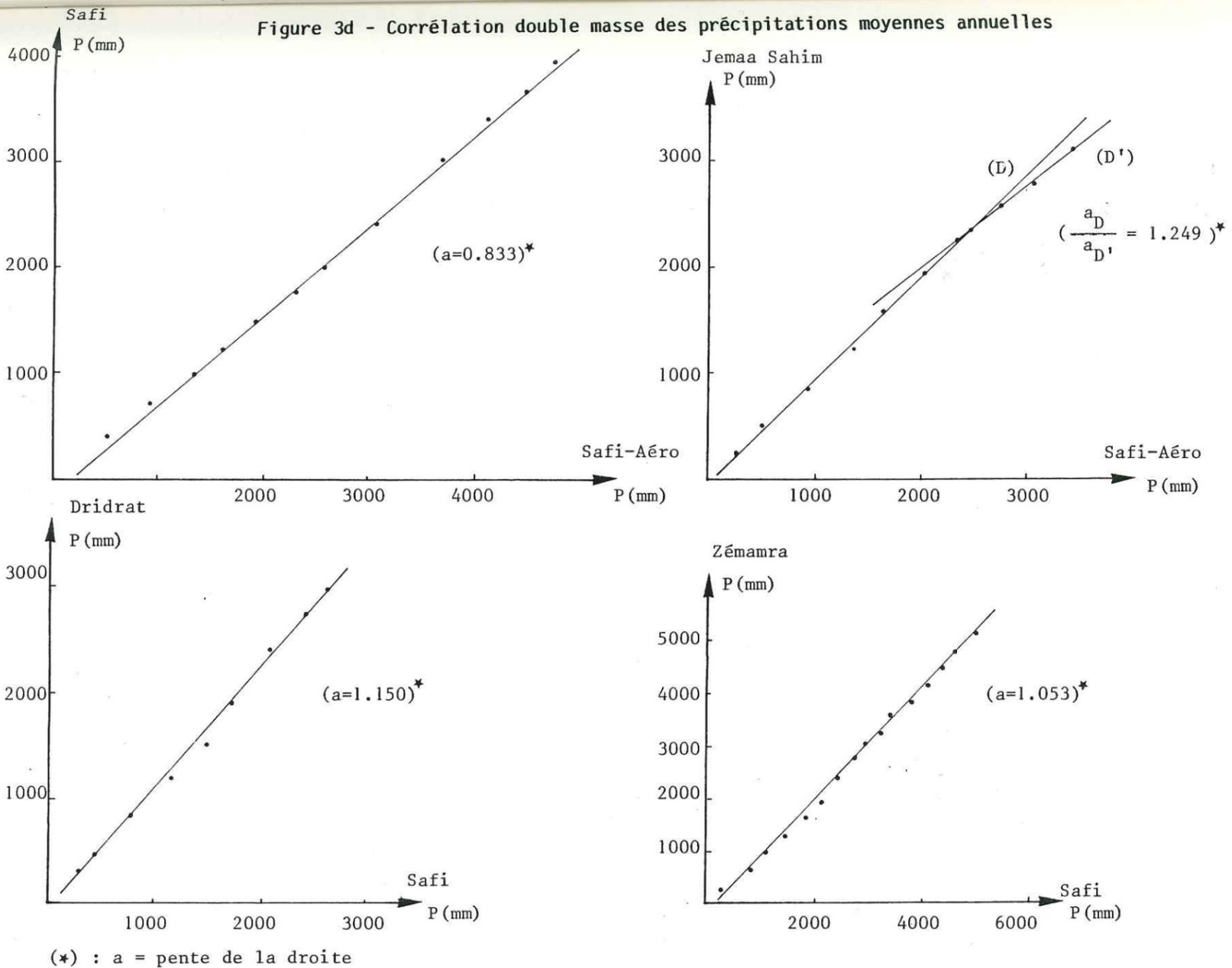


Figure 3d - Corrélation double masse des précipitations moyennes annuelles



Après homogénéisation, nous avons calculé les coefficients de corrélation et déterminé l'équation de régression $Y = a x + b$. Les résultats sont reportés sur le tableau 2.

A partir de ces équations de régression nous avons pu reconstituer les lacunes que présentaient les différents postes utilisés (voir tableau 3 et figure 4).

1.3.1 - Précipitations mensuelles

Le tableau 3 et la figure 4 montrent la répartition mensuelle des précipitations. Nous constatons que les mois les plus pluvieux sont Novembre, Décembre, Janvier et Février alors que les mois de Juin, Juillet et Août sont secs.

Les histogrammes montrent qu'à partir du mois de Mai s'effectue le passage vers la saison sèche et la reprise de la saison humide se fait au mois de Septembre.

1.3.2 - Précipitations annuelles

Les valeurs moyennes annuelles ont servi au tracé de la carte des isohyètes (Fig.5). A cet égard on peut noter:

- un gradient pluviométrique croissant du Sud vers le Nord;
- une augmentation des précipitations vers l'Ouest. Afin de confirmer l'existence du gradient E-W à grande échelle, nous avons calculé la moyenne des précipitations à Chemaïa (260 mm) et à Marrakech (248 mm) (voir Fig.1).

1.4 - DETERMINATION DE LA LAME D'EAU PRECIPITEE

A cet effet trois méthodes ont été utilisées:

- méthode arithmétique
- méthode de THIESSEN
- méthode des isohyètes

1.4.1 - Méthode arithmétique

Cette méthode consiste à calculer la moyenne arithmétique des précipitations observées à chaque station. Nous n'avons utilisé que les postes situés dans le bassin.

La répartition de ces postes renseigne plutôt sur le climat de la bordure est du bassin. Ceci a pour conséquence de minimiser les précipitations.

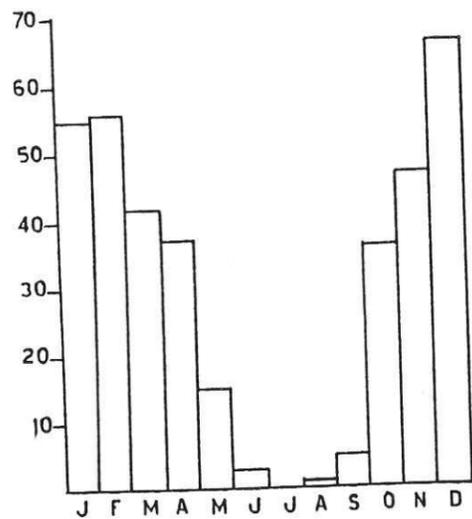
La lame d'eau moyenne tombée sur le bassin déterminée par cette méthode est:

$$P = 353 \text{ mm}$$

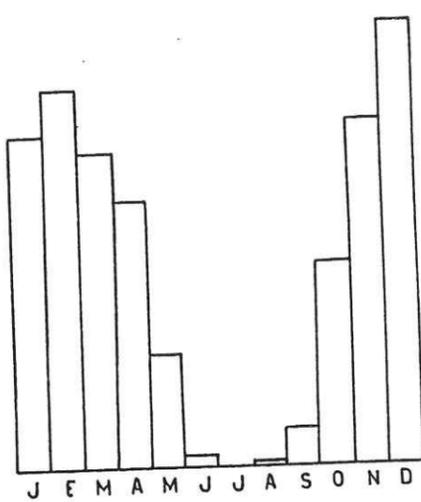
Tableau 2

RESULTATS DES CORRELATIONS ENTRE STATIONS

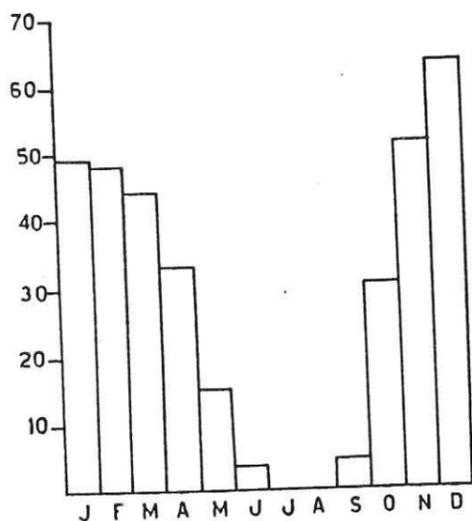
STATION DE REFERENCE (X)	STATION CORRELEE	COEFFICIENT DE CORRELATION	EQUATION DE REGRESSION
SAFI-AERO	SAFI	0.97	$Y = 0.87 * X - 1.42$
SAFI-AERO	JEMAA SAHIM	0.94	$Y = 0.91 * X + 3.22$
SAFI	DRIDRAT	0.92	$Y = 0.99 * X + 3.19$
SAFI	DAR SI AISSA	0.92	$Y = 1.13 * X + 3.15$
SAFI	S.M. BOUGUEDRA	0.90	$Y = 0.91 * X + 3.22$
SAFI	BEHRATI	0.89	$Y = 0.95 * X + 1.17$
SIDI BENNOUR	EL J. L'ADIR	0.87	$Y = 1.03 * X + 3.31$
SIDI BENNOUR	EL MECHREK	0.92	$Y = 1.03 * X + 1.75$
SIDI BENNOUR	ZEMAMRA	0.94	$Y = 1.08 * X + 1.15$
SIDI BENNOUR	KHEMIS M'TOUH	0.91	$Y = 1.07 * X + 3.30$
SIDI BENNOUR	BOULAOUANE	0.81	$Y = 0.76 * X + 1.93$
SIDI BENNOUR	DAOURAT	0.91	$Y = 0.79 * X + 2.49$
SIDI BENNOUR	H. OULAD FREJ	0.89	$Y = 1.04 * X + 2.63$
SIDI BENNOUR	S.S. MAACHOU	0.83	$Y = 0.74 * X + 3.91$



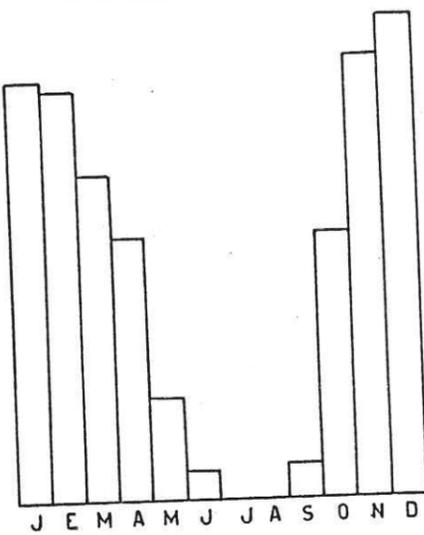
ZEMAMRA



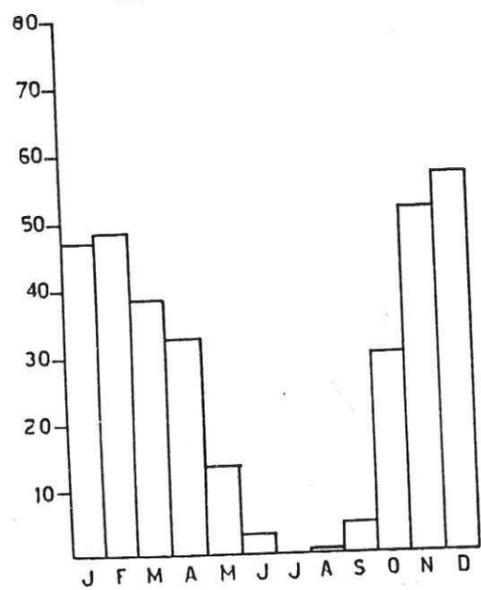
KHEMIS M'TOUH



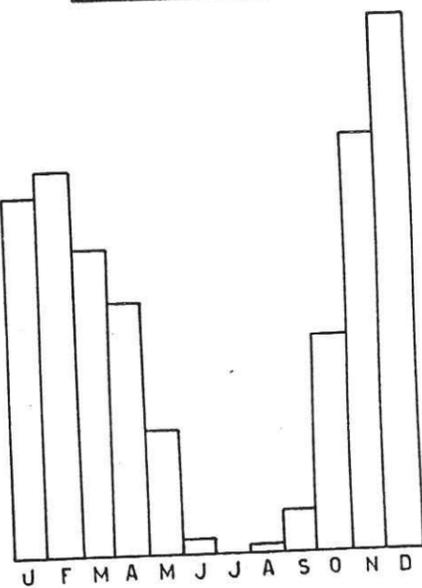
SIDI M BAREK I BOUGUEDRA



DAR SI AÏSSA

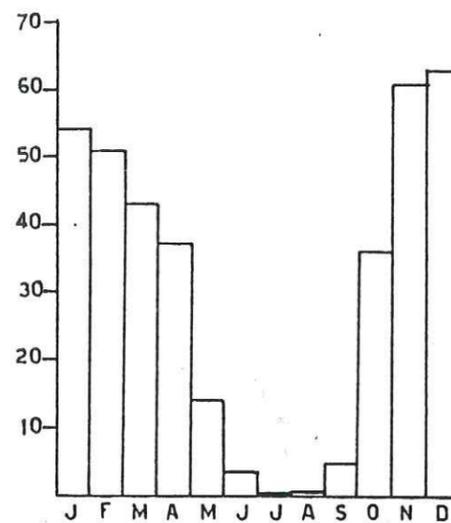


BEHRATI

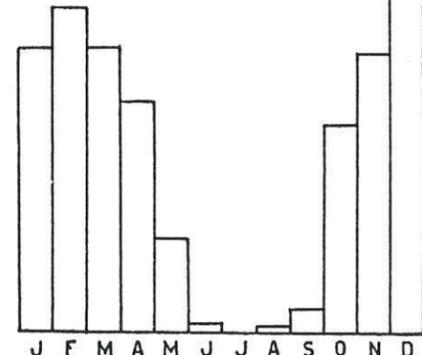


EL JADIDA L'ADIR

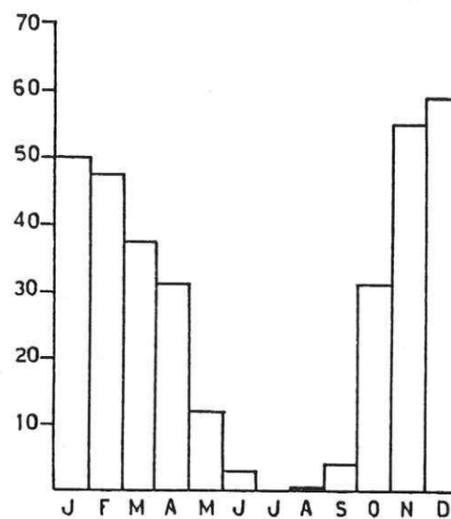
Figure 4 a - REPARTITION DES PRECIPITATIONS MENSUELLES



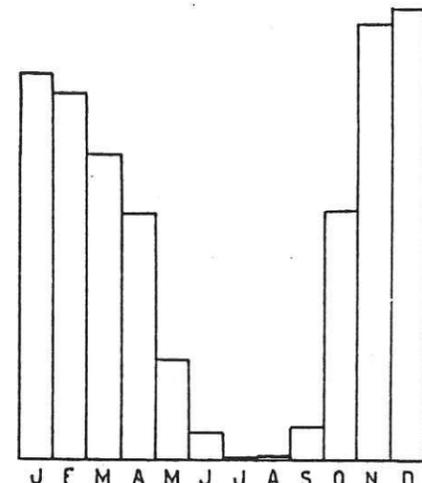
JEMAA SAHIM



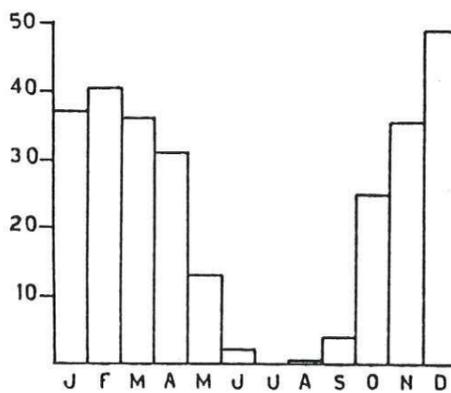
SIDI BENNOUR



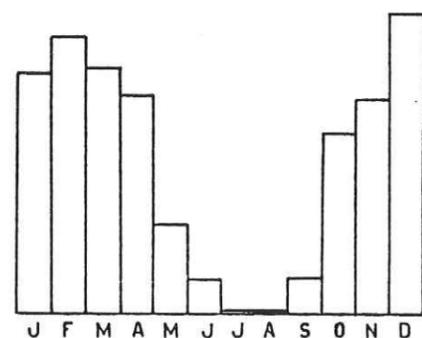
SAFI



SAFI AEROPORT



DAOURAT



BOUL AQUANE

Figure 4b - REPARTITION DES PRECIPITATIONS MENSUELLES

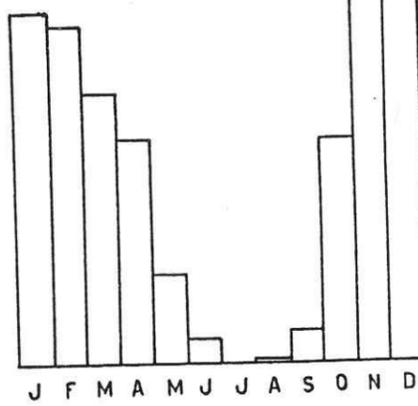
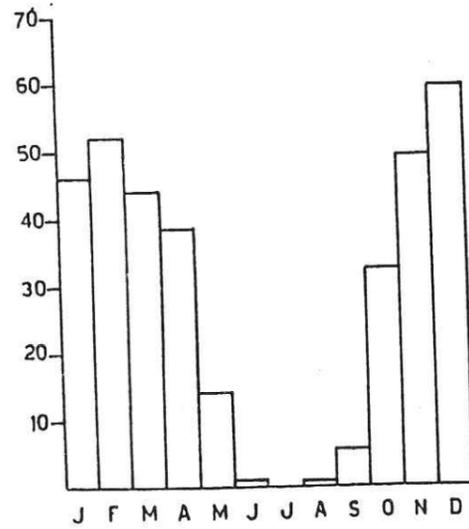
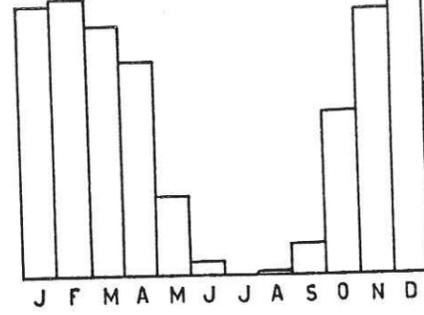
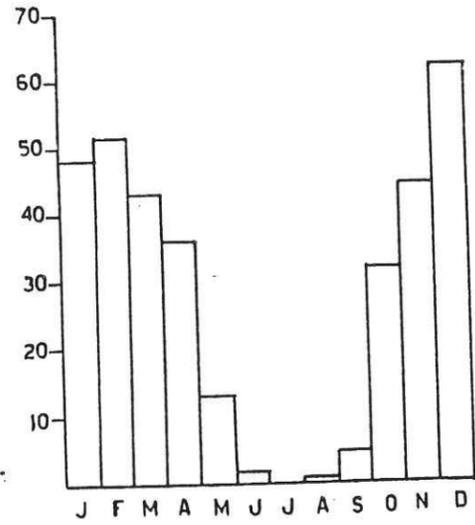


Figure 4c - REPARTITION DES PRECIPITATIONS MENSUELLES

Tableau 3
RECAPITULATION DES DONNEES PLUVIOMETRIQUES

	JANVI.	FEVRI.	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILL.	AOUT	SEPTE.	OCTOB.	NOVEM.	DECEM.	TOTAL	n
JEMAA SAHIM	54.2	50.9	43.1	37.2	13.8	3.5	0.1	0.4	5.2	35.9	60.9	62.7	367.9	89.7
SIDI BENNOUR	42.1	48.1	42.0	33.9	13.7	1.3	0.1	0.8	3.4	30.5	41.0	56.5	313.3	76.2
DRIDRAT	52.2	49.7	39.9	33.2	12.8	3.3	0.0	0.2	4.4	33.1	56.9	61.1	34.7	98.5
SAFI	50.0	47.5	37.6	31.0	11.9	2.9	0.0	0.2	3.7	31.3	54.9	58.9	330.1	98.8
DAOURAT	58.4	54.8	45.6	37.4	15.3	3.9	0.2	0.4	4.9	37.5	64.8	67.3	390.5	106.0
BOULAOUANE	37.0	40.3	36.1	31.3	13.5	2.2	0.1	0.3	4.0	25.1	35.4	49.3	274.7	73.8
ZEMAMRA	35.4	40.5	36.4	31.9	13.3	5.0	0.1	0.1	5.2	26.5	31.6	43.8	270.0	78.5
KHEMIS M'TOUH	49.9	57.2	47.5	39.5	17.1	1.7	0.0	1.0	6.1	30.5	51.6	65.8	368.4	93.1
S.M. BOUGUEDRA	49.2	48.3	43.9	32.9	14.9	3.6	0.0	0.1	4.4	30.0	51.0	63.1	341.5	94.5
DAR SI AISSA	62.4	60.5	48.2	38.5	14.8	4.2	0.0	0.2	4.8	39.1	65.0	71.0	408.7	121.4
BEHRATI	46.7	48.4	38.6	32.6	13.5	2.8	0.0	0.4	4.6	30.2	51.5	56.5	325.4	86.4
EL J. L'ADIR	53.8	57.4	45.9	38.2	19.2	2.2	0.0	0.7	5.7	32.4	62.9	79.5	396.0	124.7
EL MECHREK	47.8	51.4	43.3	35.9	13.0	2.0	0.0	0.9	5.2	32.1	44.4	62.1	339.8	77.0
S. SAID MAACOU	40.2	41.0	36.7	31.4	11.5	2.1	0.0	0.4	4.5	23.8	38.7	61.1	291.7	80.3
HAD OULAD FREJ	47.5	52.1	43.9	38.3	14.0	0.9	0.3	0.7	5.3	32.6	48.9	59.5	345.6	75.9

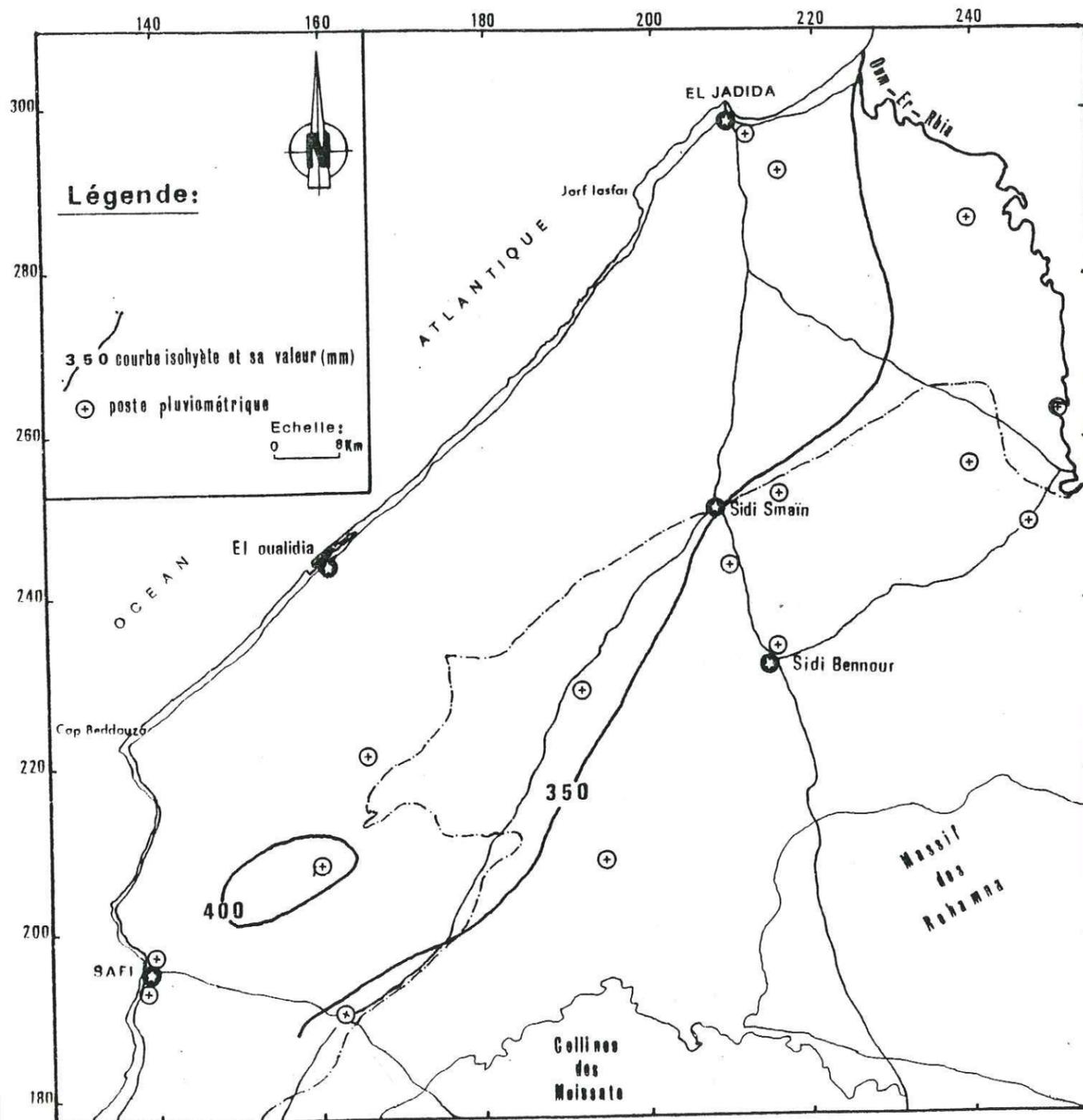


Figure 5 CARTE DES ISOHYETES (1950-1980)

1.4.2 - Méthode de THIESSEN

La méthode de THIESSEN consiste à attribuer à chaque station pluviométrique une zone d'influence de manière qu'un point quelconque situé dans cette surface soit plus près en distance horizontale de ce poste que des autres.

Sur une carte, nous situons les différentes stations que l'on reliera par des droites dont les médiatrices correspondantes déterminent une surface polygonale autour de chaque poste (Fig.6). Le planimétrage de ces polygones permet d'obtenir les résultats reportés dans le tableau ci-dessous.

En supposant que la pluviométrie moyenne annuelle à chaque station est uniformément répartie sur le polygone correspondant, la lame d'eau moyenne précipitée sur le bassin est:

$$P_t = \frac{\sum P_i \cdot S_i}{S} = \frac{V_t}{S} = 364 \text{ mm}$$

Evaluation du volume d'eau tombé sur la région par la méthode de THIESSEN

Stations	Surface du polygone (km ²) S _i	Pluviométrie moyenne (mm) P _i	P _i · S _i = V _i (Hm ³)
Jemaa Sahim	164	367.9	60.3
Safi Aéro	180	390.5	70.3
Zemamra	736	362.4	266.4
Dar Si Aïssa	938	408.7	387.4
Sidi M'Barek Bouguedra	152	341.5	51.9
Sidi Saïd Maâchou	520	291.7	151.7
Daourat	132	274.7	36.3
Boulaouane	20	270.0	5.4
Khemis M'Touh	104	368.4	38.3
El Jadida Ladir	796	396.0	315.2
Had Oulad Frej	608	345.6	210.1
El Mechreq	252	339.8	85.6

Avec: V_t = Volume total tombé sur le bassin
 S = Surface totale du bassin
 P_i = Précipitations moyennes annuelles de la station à l'intérieur du polygone
 S_i = Surface du polygone considéré

Univ. J. Fourier - O.S.U.G.
 MAISON DES GEOSCIENCES
 DOCUMENTATION
 B.P. 53
 F. 38041 GRENOBLE CEDEX
 Tél. 04 76 63 54 27 - Fax 04 76 51 40 58
 Mail: plalour@ujf-grenoble.fr

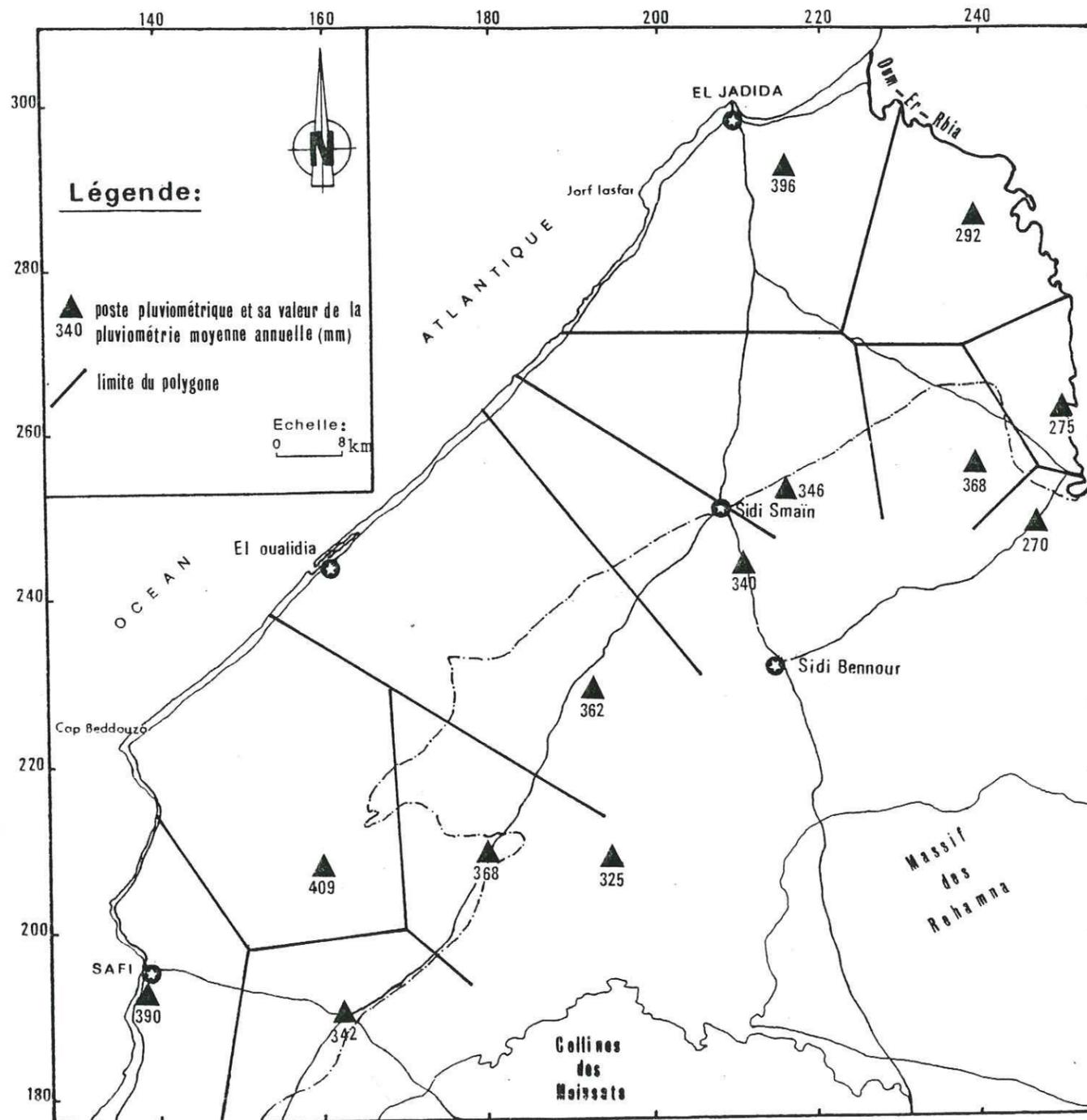


Figure 6 - POLYONES DE THIESSEN

1.4.3 - Méthode des isohyètes

A partir de la carte des isohyètes (Fig.5), nous avons déterminé une lame moyenne annuelle en suivant le raisonnement qui suit: l'isohyète 350 est parallèle à la côte et coïncide grossomodo avec le bord est du secteur. On peut estimer que le long de la côte on a une pluviométrie moyenne annuelle de 390 mm (390 à Safi et 396 à El Jadida). Pour la zone étudiée on peut donc estimer une moyenne de 370 mm.

1.4.4 - Comparaison des résultats

Methode	Moyenne annuelle
Méthode arithmétique	353 mm
Méthode de THIESSEN	364 mm
Méthode des isohyètes	370 mm

Les trois méthodes nous ont permis d'obtenir des valeurs assez proches.

En conclusion, on retiendra comme valeur de la lame d'eau moyenne annuelle; la moyenne des valeurs obtenue par les trois méthodes

$$P = 362 \text{ mm}$$

1.5 - ETUDE DES TEMPERATURES

Après la pluviométrie, le second facteur important qui conditionne l'hydroclimatologie d'une région est évidemment la température atmosphérique.

Ce paramètre conditionne l'évaluation du déficit d'écoulement qui intervient dans l'estimation du bilan hydrologique. Pour cette étude, sept postes ont été retenus. Le tableau 4 résume les valeurs des températures maximales moyennes, minimales moyennes, températures moyennes, écart thermique et la période de fonctionnement des thermomètres.

L'analyse du tableau montre que les mois les plus chauds sont Juillet, Août et Septembre et les plus froids sont Décembre, Janvier et Février.

L'écart thermique est légèrement plus élevé pendant les mois les plus chauds, on note aussi que la proximité de l'océan atténue de façon sensible cet écart.

Tableau 4
THERMOMETRIE

	JANV.	FEVRI.	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILL.	AOÛT	SEPT.	OCTOB.	NOVEM.	DECEM.	mo. annuelle
EL JADIDA L'ADIR (1925-1974)	t° max. moyenne 18.2 t° min. moyenne 7.0 moy. des t° moy. 12.6 écart thermique 11.2	19.0 7.4 13.2 11.6	20.5 8.7 14.6 11.8	21.4 10.2 15.8 11.2	22.7 11.9 17.3 10.8	24.8 14.3 19.6 10.5	26.7 16.2 21.5 10.5	27.1 16.0 21.6 11.1	26.4 14.8 20.6 11.6	24.8 12.8 18.8 12.0	21.8 10.3 16.1 11.5	19.0 7.8 13.4 11.2	22.7 11.5 17.1 11.2
SIDI SAÏD MAACHOU (1968-1975)	t° max. moyenne 18.4 t° min. moyenne 7.7 moy. des t° moy. 13.0 écart thermique 10.7	19.7 8.1 13.9 11.6	19.8 8.6 14.2 11.2	21.8 10.3 16.0 11.5	23.9 12.5 18.2 11.4	26.6 14.9 20.7 11.7	31.8 17.0 24.4 14.8	31.2 17.4 24.3 13.8	29.5 15.2 22.3 14.3	26.9 12.6 19.7 14.3	25.7 10.3 18.0 15.4	17.9 6.9 12.4 11.0	24.2 11.8 18.1 12.6
HAD OULAD FREJ (1964-1979)	t° max. moyenne 18.2 t° min. moyenne 7.2 moy. des t° moy. 12.7 écart thermique 11.0	19.3 7.8 13.6 11.5	21.0 8.5 14.8 12.5	22.6 10.2 16.4 12.4	26.7 13.3 20.0 13.4	29.2 16.1 22.7 13.1	33.8 19.0 26.4 14.8	33.4 19.2 26.3 14.2	31.5 17.5 24.5 14.0	27.8 14.3 21.1 13.5	22.4 10.8 16.6 11.6	18.1 7.5 12.8 10.6	25.3 12.6 19.0 12.7
EL MECHREK (1966-1975)	t° max. moyenne 18.6 t° min. moyenne 6.0 moy. des t° moy. 12.3 écart thermique 12.6	19.2 6.6 12.9 12.6	20.2 7.4 13.8 12.8	22.0 8.8 15.4 13.2	25.0 11.2 18.1 13.8	28.1 14.5 21.3 13.6	32.7 17.6 25.2 15.1	32.8 17.7 25.3 15.1	30.2 15.7 23.0 14.5	27.7 13.0 20.4 14.7	22.2 9.7 16.0 12.5	17.8 5.7 11.8 12.1	24.7 11.2 18.2 13.5
SAFI - AERO (1955-1984)	t° max. moyenne 18.3 t° min. moyenne 7.7 moy. des t° moy. 13.0 écart thermique 10.6	19.0 8.4 13.7 10.6	20.4 9.3 14.9 11.1	21.4 10.8 16.1 10.6	23.5 13.3 18.4 10.2	24.8 15.8 20.3 9.0	28.8 18.2 23.5 10.6	28.5 18.6 23.6 9.9	27.4 17.2 22.3 10.2	25.2 14.5 19.9 10.7	21.5 11.3 16.4 10.2	18.5 8.3 13.4 10.2	23.1 12.8 18.0 10.3
ZEMANRA (1974-1978)	t° max. moyenne 16.7 t° min. moyenne 6.1 moy. des t° moy. 11.4 écart thermique 10.6	17.1 7.1 12.1 10.6	19.5 6.9 13.2 12.6	20.3 8.8 14.5 11.5	21.5 11.5 16.5 10.0	25.8 14.7 20.2 11.1	29.5 16.2 22.8 13.3	30.0 16.9 23.4 13.1	28.2 15.5 21.8 12.7	25.4 12.8 19.1 12.6	20.8 8.1 14.4 12.7	17.1 7.3 12.2 9.8	22.7 11.0 16.8 11.7
JEMAA SAHIM (1974-1984)	t° max. moyenne 17.5 t° min. moyenne 3.5 moy. des t° moy. 10.5 écart thermique 14.0	18.0 4.5 11.2 13.5	19.9 5.2 12.5 14.7	20.6 6.3 13.4 14.3	22.5 8.2 15.3 14.3	26.6 11.3 18.9 15.3	30.5 13.9 22.2 16.6	29.4 14.3 21.8 15.1	28.4 13.3 20.8 15.1	24.2 10.0 17.1 14.2	21.6 6.8 14.2 14.8	17.8 4.6 11.2 13.2	23.1 8.5 15.8 14.6

1.6 - L'HUMIDITE RELATIVE

L'humidité relative ou état hygrométrique est le rapport en pourcentage de la tension de vapeur à la tension maximum correspondant à la température au thermomètre sec.

Les variations moyennes mensuelles de l'humidité relative à la station de Safi Aéro (1969-1984) sont reportées dans le tableau ci-dessous:

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Heures												
6h00	89.4	89.3	90.1	89.1	90.9	85.2	85.2	86.8	88.4	87.3	92.8	91.1
12h00	70.1	68.4	64.3	63.6	60.8	64.2	57.8	70.8	65.2	62.7	60.3	69.4
18h00	76.1	72.9	68.4	66.9	63.9	66.4	62.3	65.7	69.2	71.9	70.8	78.6
Moyenne	78.5	76.9	74.3	73.1	71.9	72.2	68.4	74.4	73.6	74.0	74.6	79.7

Le maximum d'humidité relative moyenne est observé en Décembre et Janvier et le minimum aux mois de Mai, Juin et Juillet. Ce qui correspond approximativement aux valeurs extrêmes de température.

A l'échelle de la journée, le maximum est atteint vers 6 heures et le minimum vers 12 heures.

1.7 - ETUDE DE L'EVAPOTRANSPIRATION

L'évapotranspiration est un phénomène important du cycle hydrologique. Elle englobe l'ensemble des phénomènes d'évaporation directe par retour dans l'atmosphère, à partir des réservoirs de surface (lac, mer, etc.), souterrains (nappes aquifères) et d'évaporation des plantes.

Elle dépend du climat et de ses variations qui sont déterminées par l'humidité de l'air, la vitesse du vent, la température de l'eau et de l'air, le rayonnement solaire et la pression atmosphérique.

On distingue aussi l'évapotranspiration potentielle et l'évapotranspiration réelle.

1.7.1 - Calcul de l'évapotranspiration potentielle (E.T.P.)

Elle correspond à l'évapotranspiration d'une surface qui serait suffisamment approvisionnée en eau, pour évaporer la quantité d'eau maximale permise par les conditions climatiques.

Elle a été estimée par les formules empiriques de SERRA et THORNTWHAITE.

1.7.1.a - Première formule de SERRA

$$E.T.P. \text{ mm} = 16 \left(\frac{10 T}{I} \right)^a$$

avec:

$$I = \sum_{i=1}^{12} i \quad \text{où } i = 0,09 T^{3/2}$$

T = Température moyenne mensuelle

$$a = 1,6 \frac{I}{100} + 0,5$$

Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous:

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
Paramètres													
T°C	12.2	12.9	14.0	15.4	17.7	20.4	23.7	23.8	22.2	19.4	16.0	12.5	
i	3.84	4.17	4.71	5.44	6.70	8.29	10.38	10.45	9.41	7.69	5.76	3.98	80.83
E.T.P. (mm)	33.5	37.0	42.8	50.8	65.2	84.2	110.1	110.0	97.9	76.9	54.4	35.0	79.89

Le même calcul a été fait pour chaque station et les résultats sont présentés dans le tableau (5).

1.7.1.b - Formule de THORNTHWAITE

$$E.T.P. \text{ mm} = 16 \left(\frac{10 T}{I} \right)^a$$

avec:

T = Température moyenne mensuelle

$$I = \sum_{i=1}^{12} i \quad \text{avec } i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1,514}$$

$$a = 0,492 + 1,79 \cdot 10^{-2} I - 7,71 \cdot 10^{-5} I^2 + 6,75 \cdot 10^{-7} I^3$$

Les résultats obtenus par cette méthode sont reportés sur le tableau ci-dessous:

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
Paramètres													
T°C	12.2	12.9	14.0	15.4	17.7	20.4	23.7	23.8	22.2	19.4	16.0	12.5	
i	3.86	4.20	4.75	5.49	6.78	8.41	10.55	10.61	9.55	7.79	5.82	4.00	81.81
E.T.P. (mm)	33.0	36.5	42.3	50.3	64.7	83.6	109.7	110.5	97.5	76.4	53.9	34.5	792.7

Comme pour la première formule de SERRA, nous avons calculé par cette formule l'E.T.P. à l'échelle de chaque station et nous avons reporté les résultats sur le tableau 6.

1.7.1.c - Deuxième formule de SERRA

La deuxième formule de SERRA s'écrit $D = 270 e^{0,0644 T}$

avec:

D = Déficit d'écoulement en mm/an

T = Température moyenne annuelle en degré celcius.

Pour le Sahel T = 17,5°C donc D = 833,3 mm/an.

On dispose aussi des valeurs de l'évaporation mesurées à Safi Aéro. Les évaporomètres utilisés sont l'évaporomètre Piche et le bac "A" (rond). Les résultats de ces mesures sont présentés dans le tableau ci-dessous:

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	TOTAL
Evaporomètre													
Piche	59.2	63.9	89.0	101.0	125.7	125.8	170.1	151.3	125.0	109.7	76.6	58.6	1265.7
Bac "A"	77.0	82.2	118.9	143.2	190.4	188.0	262.1	238.0	194.3	150.9	106.5	75.3	1826.8

1.7.2 - Calcul de l'évapotranspiration réelle (E.T.R.)

On appelle évapotranspiration réelle dans un intervalle de temps donné, l'évapotranspiration qui se produit pendant cette durée dans les conditions réelles de teneur en eau du sol: c'est la lame d'eau effectivement évaporée et transpirée.

Parmi les méthodes de calcul de l'E.T.R., nous avons choisi les formules de TURC, de COUTAGNE, le diagramme de WUNDT et la méthode du bilan de THORNTHWAITE.

1.7.2.a - Formule de TURC

Elle permet d'évaluer l'E.T.R. moyenne annuelle qui est fonction de la température moyenne annuelle et de la hauteur moyenne des précipitations annuelles.

Cette formule s'écrit

$$E.T.R. = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

Avec: P = Pluviométrie moyenne annuelle en °c, L=300 + 25T+0,05T³
ETR = 356,8 mm soit 98,5% des précipitations

1.7.2.b - Formule de COUTAGNE (première formule)

Elle est basée sur les mêmes paramètres que celle de TURC:

$$E.T.R. = P - \lambda P^2$$

$$\lambda = \frac{1}{0,8+1,14T}$$

Tableau 5
ETP CALCULEE PAR LA PREMIERE FORMULE DE SERRA

	JANVIER	FEVRIER	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILLET	AOUT	SEPTEM.	OCTOBRE	NOVEMB.	DECEMB.	TOTAL
JEMAA SAHIM	31.4	34.9	41.6	46.5	57.5	75.9	104.3	101.3	94.0	66.7	51.0	34.9	741.9
SAFI - AERO	36.0	39.7	46.3	53.4	68.2	81.7	106.9	107.8	97.1	78.8	55.2	38.1	809.3
ZEMAMRA	32.0	35.5	41.2	48.4	60.4	85.5	105.3	110.1	97.5	77.7	47.8	36.0	777.4
SIDI SAID MAACHOU	35.4	40.1	41.7	52.1	66.1	84.0	113.1	113.1	96.4	76.6	64.8	32.5	816.6
EL JADIDA L'ADIR	37.4	40.5	48.3	55.4	64.8	80.5	94.6	95.3	87.8	74.9	57.2	41.6	776.4
HAD OULAD FREJ	30.4	34.8	41.0	50.2	74.2	95.2	128.1	127.2	110.6	82.5	51.4	30.9	856.5
EL MECHREK	32.1	35.1	39.8	46.7	65.7	88.8	121.1	122.0	102.3	81.9	52.3	29.8	819.6

Tableau 6 - ETP CALCULEE PAR LA FORMULE DE THORNTHWAITE

	JANVIER	FEVRIER	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILLET	AOUT	SEPTEM.	OCTOBRE	NOVEMB.	DECEMB.	TOTAL
JEMAA SAHIM	30.8	34.1	40.6	45.4	56.1	73.9	101.4	98.5	91.4	66.9	49.8	34.1	723.0
SAFI - AERO	35.6	39.3	45.9	53.1	68.1	81.7	107.4	108.2	97.4	78.8	54.9	37.7	808.1
ZEMAMRA	31.4	34.8	40.4	47.5	59.4	84.1	103.7	108.4	95.9	76.4	47.0	35.3	764.4
SIDI SAID MAACHOU	35.1	39.8	41.4	51.9	66.1	84.3	114.9	114.9	97.0	76.8	64.8	32.1	819.1
EL JADIDA L'ADIR	36.8	39.9	47.5	54.5	63.9	79.4	93.3	94.0	86.6	73.8	56.3	40.9	766.9
HAD OULAD FREJ	30.2	34.7	41.2	50.7	75.9	98.2	133.4	132.4	114.6	84.6	52.0	30.7	870.7
EL MECHREK	31.7	34.7	39.4	48.4	65.6	89.1	122.2	123.1	102.9	82.1	52.0	29.4	860.6

Avec: P = précipitations moyennes annuelles en mètres
T = Température moyenne annuelle en °C

L'E.T.R. donnée par cette formule est:

E.T.R. = 321,6 mm soit 88,8 % des précipitations.

1.7.2.c - Méthode de WUNDT.

Cette méthode qui tient compte des précipitations et de la température a permis à WUNDT de tracer un diagramme pour la détermination de l'E.T.R. qui pour le Sahel donne une valeur de l'E.T.R. égale à 330 mm soit 91,1 % (Fig.6').

1.7.2.d- Calcul de l'E.T.R. selon le bilan de THORNTHWAITE

La méthode du bilan de THORNTHWAITE retrace le schéma des échanges et du transport des eaux à l'intérieur d'une région donnée.

Dans le calcul de l'E.T.R. par la méthode de THORNTHWAITE nous prendrons pour le sol une valeur de la réserve de 100 mm. Cette valeur est discutable, elle correspond à la quantité maximale d'eau que le sol peut retenir ou soustraire à l'écoulement souterrain. Le mois de septembre a été pris comme référence de départ; il correspond à la période où la réserve en eau du sol est généralement épuisée.

Le bilan de THORNTHWAITE fait intervenir l'E.T.P. et d'autre part la pluviométrie (P).

Nous considérons pour le calcul de l'E.T.R., mois par mois, l'effet de la recharge par les précipitations (P) correspondant à chaque mois et la décharge due à l'évapotranspiration potentielle (E.T.P.). Nous pouvons distinguer plusieurs cas:

- E.T.P. = P: dans ce cas toute la pluie est reprise par l'E.T.R., l'évapotranspiration réelle est égale à l'E.T.P.

- $P > E.T.P.$: l'E.T.P. + l'E.T.R.

L'évapotranspiration va se dérouler normalement, mais il reste une certaine quantité d'eau disponible (excédent) qui sera emmagasinée dans le sol jusqu'à saturation, permettant ainsi de reconstituer la réserve du sol.

- $P \gg E.T.P.$: le phénomène d'évapotranspiration se déroule comme précédemment et l'E.T.R. = l'E.T.P., mais l'excédent d'eau emmagasiné a atteint son maximum (100 mm). Le surplus va s'écouler, soit en surface vers les oueds (ruissellement), soit en profondeur (infiltration), c'est ce qu'on appelle l'excédent du bilan.

- $P < E.T.P.$: l'évapotranspiration va se faire non seulement sur la totalité des précipitations, mais également sur les réserves emmagasinées par le sol.
E.T.R. = E.T.P. jusqu'à épuisement des réserves.

- $P \ll E.T.P.$: lorsque les réserves en eau du sol sont épuisées, l'évapotranspiration ne se fera que sur la pluie, il y aura alors un déficit du bilan. Les résultats obtenus par cette méthode sont reportés sur le tableau 7.

Figure 6' - DEFICIT D'ECOULEMENT D'APRES LE DIAGRAMME DE WUNDT

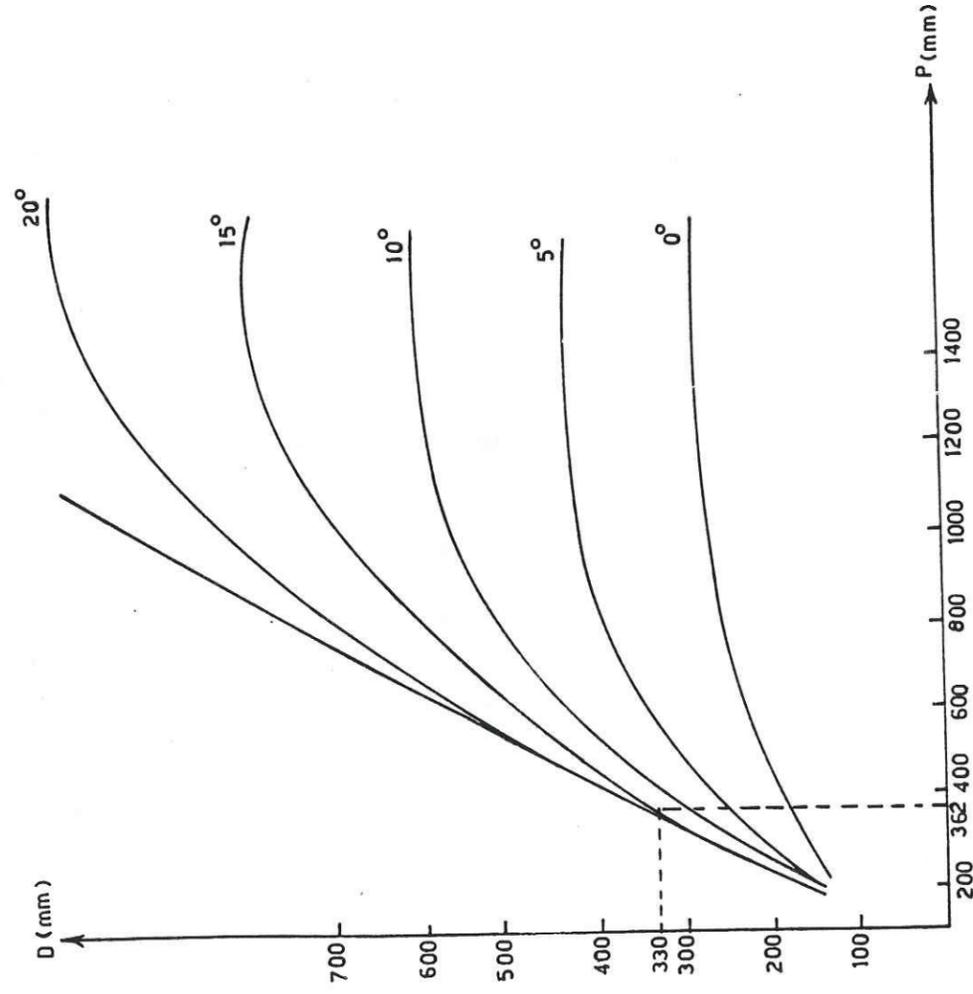


Tableau 7

BILAN HYDROLOGIQUE D'APRES THORNTHWAITE

	SEPTEMB.	OCTOBRE	NOVEMB.	DECEMB.	JANVIER	FEBVRIER	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILLET	AOUT	TOTAL
ETP (mm)	97.5	76.4	53.9	34.5	33.0	36.5	42.3	50.3	64.5	83.6	109.7	110.5	792.9
P (mm)	4.8	31.9	54.0	64.8	50.7	50.5	42.7	53.2	14.7	3.1	0.0	0.3	352.7
STOCK (mm)	0.0	0.0	0.1	30.4	48.1	62.1	62.5	47.4	0.0	0.0	0.0	0.0	
ETP (mm)	4.8	31.9	53.9	34.5	33.0	36.5	42.3	50.5	62.1	3.1	0.0	0.3	352.7
EXEDENT (mm)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
DEFICIT (mm)	92.7	44.5	-	-	-	-	-	-	2.6	80.5	109.7	110.2	

1.7.3 - Discussion des résultats

Nous résumons les résultats obtenus par les différentes méthodes dans le tableau suivant:

	Methode	Année moyenne
E.T.R. (mm)	TURC	361.1
	COUTAGNE 1	325.6
	WUNDT	330.0
	THORNTHWAITE	353 (pour P=353)
E.T.P. (mm)	SERRA 1	798.9
	THORNTHWAITE	792.7
	SERRA 2	833.3
	PICHE	1256.7
	BAC "A"	1826.8

Pour l'E.T.P., on retiendra comme valeur moyenne, la moyenne des trois premières méthodes soit:

$$E.T.P.m \text{ (mm)} = 808$$

Pour l'E.T.R., la méthode de THORNTHWAITE est inadaptée, car elle suppose que toutes les précipitations se réévaporent. La formule de TURC donne également une valeur excessive; on retiendra alors comme valeur moyenne, la moyenne des valeurs données par les méthodes de COUTAGNE 1 et de WUNDT. Soit:

$$E.T.R. = 328 \text{ mm c'est-à-dire } 90,6 \% \text{ des précipitations}$$

1.8 - HYDROLOGIE DE SURFACE

Pour l'étude hydrologique du Sahel nous nous sommes basés sur l'étude de M. FERRE qui a étudié également le régime des oueds issus du massif des Réhamna.

Le Sahel se présente comme un alignement très régulier de crêtes dunaires d'orientation SW-NE, parallèle à la côte. Il constitue par sa morphologie et sa position une barrière naturelle qui empêche tout écoulement superficiel vers l'océan. Par conséquent, aucun des oueds issus du massif des Réhamna et des collines des Moissates ne trouve un exutoire naturel vers l'océan à l'exception de l'oued Felfel.

En effet, vers le Nord la topographie dunaire s'interrompt par les plateformes d'El Jadida (surface remarquablement plane) et offre une issue pour l'oued Felfel (Fig.7). Après les inondations de 1961, le cours de ce dernier a été dévié vers Dayet-El-Hafs. L'oued Faregh se jette dans l'Oum er Rbia par une vallée encaissée.

Ces oueds ont un régime assez particulier. Leur débit d'étiage est nul et l'écoulement se fait sous forme de crues souvent violentes à la suite d'averses importantes. Ils se distinguent entre eux par la taille de leur bassin versant, la pente moyenne, la lithologie des terrains drainés, la nature et la densité de la couverture végétale. Mais le facteur le plus important qui conditionne le ruissellement est l'intensité de la pluie.

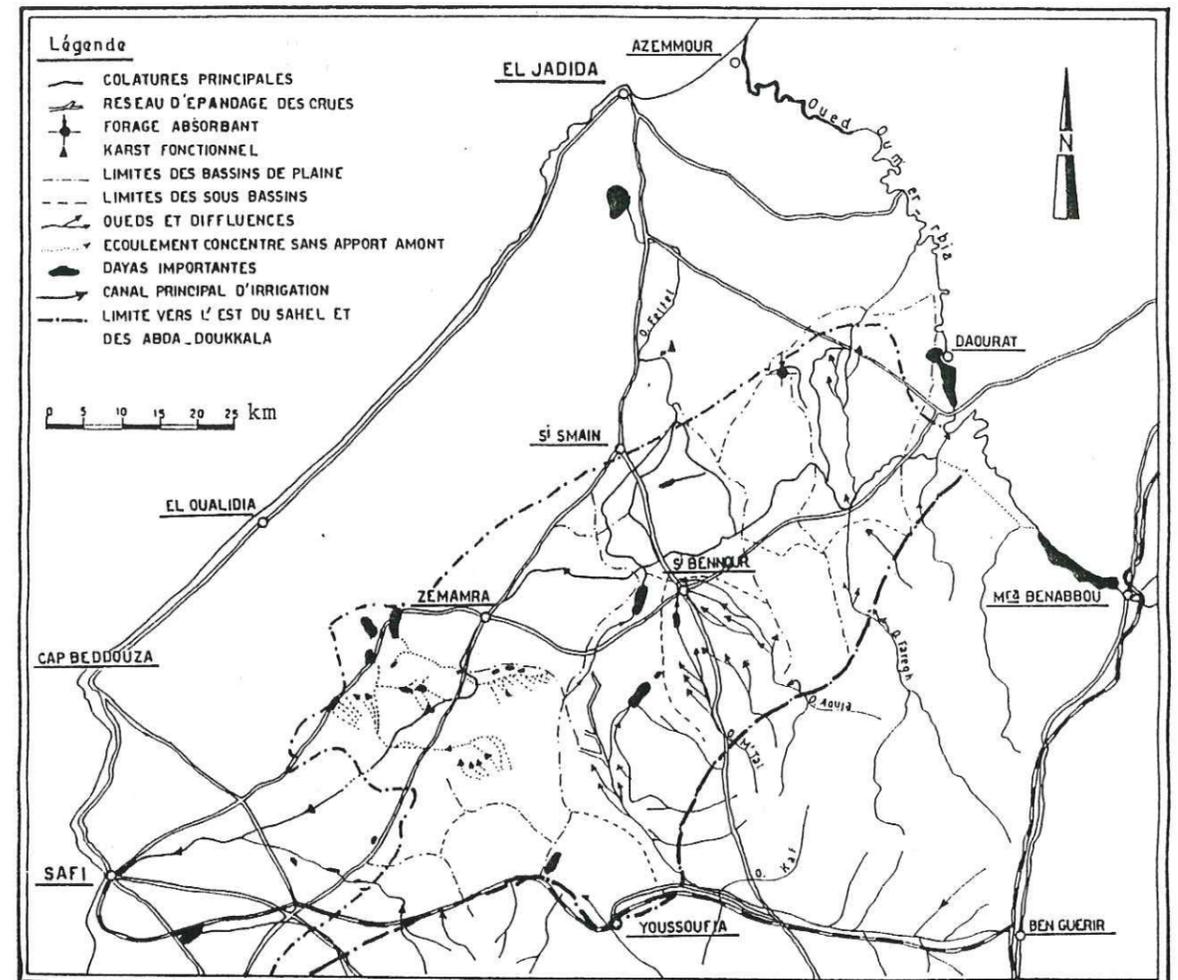


Figure 7 - SCHEMA HYDROLOGIQUE DE LA PLAINES DES ABDA DOUKKALA

RESEAU HYDROGRAPHIQUE ET DECOUPAGE EN BASSINS VERSANTS

Etant donné le nombre de cours d'eau et la similitude de leur régime, un choix s'impose pour l'étude de ces oueds. Trois catégories de bassins peuvent être distinguées et chaque catégorie sera représentée par un bassin de taille similaire.

- Oued M'Tal : pour les petits bassins
- Oued Kaf : pour les bassins moyens
- Oued Faregh: pour les grands bassins

Les seuils pluviométriques à partir desquels on a ruissellement sont:

- Oued M'Tal (S. 37 km²) 4 à 5 mm en 12heures
- Oued Kaf (S. 170 km²) 7 à 10 mm en 12heures
- Oued Faregh (S. 637 km²) 12 à 15 mm en 12heures

On note donc que le seuil augmente avec la surface du bassin versant.

1.8.1 - Caractéristiques dimensionnelles des bassins

Oued	Superficie (km ²)	Périmètre (km)	Longueur (km)	Indice de compacité
M'Tal	37	31	16	1.43
Kaf	170	58	25	1.25
Faregh	637	129	45	1.43

L'indice de compacité de GRAVELIUS est égal au rapport :

$$k = \frac{\text{Périmètre du bassin (P)}}{\text{Périmètre du cercle de surface équivalente}}$$

Soit :

Si A est la surface du bassin

$$K = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

1.8.2 - Altitudes caractéristiques

Oued	Altitude maximum (m)	Altitude à l'exutoire (m)	Altitude moyenne (m)	Altitude la plus fréquente (m)	Altitude de fréquence 1/2 (m)
M'Tal	515	260	350	300-350	350
Kaf	541	310	385	350-400	390
Faregh	697*	240	425	450-500	430

* = point culminant: Jbel Lakhdar

- L'altitude moyenne est l'ordonnée moyenne de la courbe hypsométrique;
- L'altitude la plus fréquente est le maximum de la courbe des fréquences altimétriques;
- L'altitude de fréquence $\frac{1}{2}$ est l'altitude correspondant au point d'abscisse $\frac{1}{2}$ de la courbe de fréquence altimétrique.

1.8.4 - Rectangles équivalents. Pentes

Oued	Longueur (km)	Largeur (km)	Pente moyenne %	Indice de pente
M'Tal	12.5	3.0	2.04	0.118
Kaf	21.0	8.0	1.10	0.106
Foregh	52.0	12.5	0.88	0.096

- Oued M'Tal : 310 mm
- Oued Kaf : 285 mm
- Oued Foregh : 280 mm

Le rectangle équivalent à un bassin est un rectangle de longueur et largeur L et l de même superficie A et de même périmètre P que le bassin réel.

$$\text{Soit } \begin{cases} 2(L + l) = P \\ L.l = A \end{cases}$$

L'indice de pente I_p est défini par:

$$I_p = \frac{1}{L} \approx x_i \cdot \sqrt{\frac{a_i - a_{i-1}}{x_i}}$$

a_i et a_{i-1} : Cotes des lignes de niveau i et i-1

x_i = distance qui sépare les courbes i et i- sur le rectangle équivalent.

1.8.5 - Géologie des bassins versants

Oued	Perméable		Imperméable		Nature et lithologie	
	km ²	%	km ²	%	Perméable	Imperméable
M'Tal	10	26	28	74	Conglomérats grès	Schistes et grès
Kaf	30	3	108	97	Limons	Schistes et grès
Foregh	248	38	308	62	Arène granitique calcaire, grès et limons	Gneiss, micaschistes schistes, quartzites et argiles

* Pluviométrie moyenne annuelle sur les bassins versants (Période 1953-1967)

- Oued M'Tal : 310 mm
- Oued Kaf : 285 mm
- Oued Foregh : 280 mm

1.8.6 - Caractéristiques des crues décennales

Ces caractéristiques sont différentes selon qu'il s'agit d'averses de types cycloniques ou d'orages.

Les pluies cycloniques sont les pluies résultant de l'interaction entre les masses d'air chaud et froid. Le plus souvent ce processus donne de longues pluies, assez uniformes, sur de grandes surfaces s'étendant en avant des fronts chauds.

Par contre, les orages sont des perturbations locales relativement longues, de faible durée, ne comportant pas de systèmes de "fronts". Ils sont caractérisés par des phénomènes électriques (éclairs et coups de foudre) et de fortes averses de pluies souvent accompagnées de rafales de vent.

Crues	Oued M'Tal	Oued Kaf	Oued Faregh

Crue cyclonique			
Q. maxi de pointe	50 m3/s	65 m3/s	85 m3/s
Q. spécifique	1200 l/s/km2	440 l/s/km2	200 l/s/km2
C. r. u.*	55%	25%	20%

Crue d'orage			
Q. maxi de pointe	60 m3/s	100 m3/s	125 m3/s
Q. spécifique	1700 l/s/km2	680 l/s/km2	200 l/s/km2
C. r. u.	50%	30%	20%

* C. r. u. = Coefficient de ruissellement utile

	Oued M'Tal	Oued Kaf	Oued Faregh

Hydrogrammes			
Temps de réponse	3/4 à 1,5 h.	2 à 3 h	8 à 9 h
Temps de base	4 à 5 h	7 à 9 h	12 à 15 h
Temps de Concentration	4 à 6 h	9 à 10 h	18 à 20 h

Temps de réponse: intervalle de temps entre le centre de gravité et la pointe de l'hydrogramme.

Temps de base: durée du ruissellement pur à l'exutoire.

Temps de concentration: temps mis par une molécule d'eau provenant de la partie la plus éloignée du bassin pour parvenir à l'exutoire

C.r.u.: rapport entre la pluie excédentaire et la pluie utile.

Pluie utile: partie de l'averse ayant pu raisonnablement donner lieu à du ruissellement.

Pluie excédentaire: partie de l'averse ayant effectivement ruisselé (se déduit du volume de la crue mesuré sur l'hydrogramme).

I.9 - ESTIMATION DU BILAN HYDROLOGIQUE

L'équation classique du bilan s'écrit:

$$P = E + R + I$$

- P = Pluviométrie moyenne annuelle
- R = Ruissellement moyen annuel
- I = Infiltration moyenne annuelle
- E = Evapotranspiration réelle moyenne annuelle

- Pluviométrie moyenne annuelle

Pour le calcul du bilan hydrologique, la valeur des précipitations moyennes annuelles utilisée est celle obtenue par la moyenne arithmétique de celles déterminées par les méthodes arithmétique, de THIESSEN et des isohyètes. Soit une lame d'eau de 362 mm.

- Evaporation réelle

Nous avons choisi l'E.T.R. moyenne annuelle obtenue par la moyenne arithmétique des valeurs déterminées par les méthodes de COUTAGNE 1 et WUNDT. Soit une lame d'eau évapotranspirée de 328 mm pour une année moyenne.

- Ruissellement

Dans le cas de notre bassin, le ruissellement est quasi inexistant et par conséquent $R = 0$.

- Infiltration

En remplaçant chacun des termes du bilan hydrologique par sa valeur numérique, on obtient une lame d'eau infiltrée de 34 mm, soit 9 % des précipitations.

$$P = E + R + I$$

$$P = 362 \text{ mm} \quad E = 328 \text{ mm} \quad R = 0$$

1.10 - CONCLUSION

Au cours de cette étude nous nous sommes efforcés de dégager les principales caractéristiques hydroclimatologiques de notre région. Il aurait été préférable de disposer de séries de même période, assez longue et de stations réparties uniformément sur le bassin.

Les données des stations utilisées nous ont permis de déterminer une pluviométrie moyenne annuelle de 362 mm dont 328 mm sont évapotranspirées.

Le ruissellement étant considéré comme nul, la lame d'eau infiltrée est la différence entre la pluviométrie et l'évapotranspiration réelle soit 34 mm.

CHAPITRE II

GEOLOGIE

- II.1 - GENERALITES
- II.2 - STRATIGRAPHIE
 - II.2.1- Le socle hercynien
 - II.2.2- Le Permo-Trias
 - II.2.3- Le Jurassique
 - II.2.4- Le Crétacé
 - II.2.5- L'Eocène
 - II.2.6- Le Miocène
 - II.2.7- Le Plio-Quaternaire
- II.3 - VARIATIONS LITHOLOGIQUES ET DE PUISSANCE
- II.4 - TECTONIQUE
- II.5 - STRUCTURE DE LA COUVERTURE CRETACEE
- II.6 - CONCLUSION

II.1 - GENERALITES

Le Sahel appartient à l'unité structurale nommée **Méséta marocaine** (L. GENTIL) et couvre une superficie de 4 600 km². Le domaine mésétien, comme le domaine anti-atlasique, présente une couverture tertiaire tabulaire qui repose sur un socle primaire peu plissé et pénéplané.

D'une façon générale, les mouvements d'âge alpin ont été assez intenses dans le domaine mésétien, mais la méséta côtière est peu déformée comparée à la méséta méridionale, orientale et centrale. Le terme de méséta "petite table" rend compte de la géologie de cette région où le régime tabulaire des dépôts secondaires et tertiaires succède au régime plissé des terrains primaires.

Il est primordial d'avoir à l'esprit cette opposition entre la "tempête" qui a bouleversé les terrains primaires et le calme qui lui succède; calme non absolu puisque les dépôts secondaires et tertiaires se prêtent bien à la tectonique et enregistrent des déformations de faible importance.

Dans le moyen Maroc (domaine mésétien et atlasique), la méséta côtière (et donc le Sahel) est la partie la moins déformée durant le cycle alpin (atlasique): on a affaire à une plate-forme alpine subtabulaire.

La figure 8 présente les grandes unités stratigraphiques du secteur étudié.

II.2 - STRATIGRAPHIE (Voir figure 9)

II.2.1 - Le socle hercynien

Le socle hercynien affleure à l'Est de la région et forme le massif des Réhamna, massif à relief faible au Sud, un peu plus accentué au Nord, il culmine à 711 m au Skhour.

Le faciès le plus courant est le faciès gréseux et quartzitique. Le synclinal d'Inmfout d'une régularité remarquable permet de tracer une partie de la stratigraphie du Primaire.

Au Carbonifère, on a injection de granite situé au S W du massif des Réhamna accompagné par des filons de microgranite, d'aplite et de quartz. A l'Ouest du batholithe granitique on a des auréoles de métamorphisme de contact, tandis que l'Est du batholithe est intéressé par un métamorphisme régional.

A part le massif de Réhamna, le socle hercynien est partout ailleurs masqué par des dépôts plus récents à l'exception du pointement d'El Jadida où YOVANOVICH a signalé une rhyolite à la pointe du cap mais l'état d'altération de cette roche ne permet pas une datation précise. Au-dessus, vient en concordance une roche dure, bleu foncé, exploitée dans plusieurs carrières: c'est une dolomie. On la trouve à l'Ouest de la ville et présente un affleurement plus vaste que la rhyolite.

L'isolement et l'absence de fossiles ont rendu difficile les datations de ce gisement, mais G. CHOUBERT lui trouve une analogie avec les calcaires géorgiens de l'Anti-atlas.

Figure 8 - GEOLOGIE SOMMAIRE DE LA MESETA
D'APRES M. GIGOUT



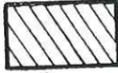
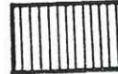
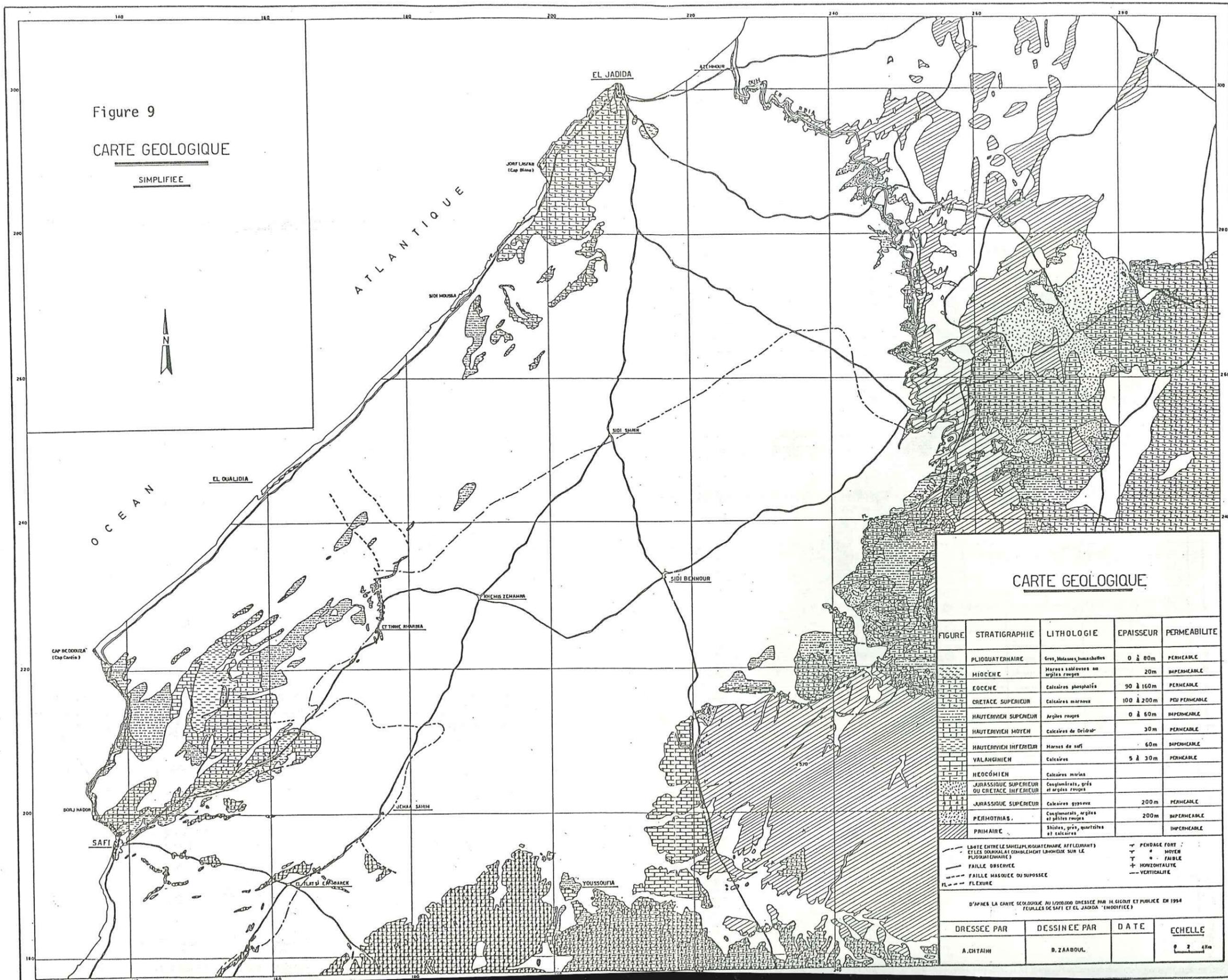
-  PLAINES QUATERNAIRES
-  MANTEAU DE DUNES CONSOLIDEES PLIOCENES ET QUATERNAIRES
-  MANTEAU SECONDAIRE
-  SOCLE ANCIEN

Figure 9
CARTE GEOLOGIQUE
SIMPLIFIEE



CARTE GEOLOGIQUE

FIGURE	STRATIGRAPHIE	LITHOLOGIE	EPAISSEUR	PERMEABILITE
	PLIOQUATERNAIRE	Gres, Molasse, lamelles	0 à 80m	PERMEABLE
	MIOCENE	Marnes à ammonites ou argiles rouges	20m	IMPERMEABLE
	Eocene	Calcaires phosphatés	90 à 160m	PERMEABLE
	CRETACE SUPERIEUR	Calcaires marneux	100 à 200m	PEU PERMEABLE
	HAUTERVIEN SUPERIEUR	Argiles rouges	0 à 60m	IMPERMEABLE
	HAUTERVIEN MOYEN	Calcaires de Drider	30m	PERMEABLE
	HAUTERVIEN INFERIEUR	Marnes de safi	60m	IMPERMEABLE
	VALANGINIEN	Calcaires	5 à 30m	PERMEABLE
	NEOCOMIEN	Calcaires marins		
	JURASSIQUE SUPERIEUR OU CRETACE INFERIEUR	Conglomerats, grès et argiles rouges		
	JURASSIQUE SUPERIEUR	Calcaires gypseux	200m	PERMEABLE
	PERMOTRIAS	Conglomerats, grès et argiles rouges	200m	IMPERMEABLE
	PRIMAIRE	Shistes, grès, quartzites et calcaires		IMPERMEABLE

—	Limite entre sahel-pliocenien, affleurant	—	PENTE FORT
—	Et les observés et complètement l'observé sur le	—	MOYEN
—	PLIOQUATERNAIRE	—	FAIBLE
—	FAULTE OBSERVEE	—	HORIZONTALITE
—	FAULTE MASQUEE OU SUPPOSEE	—	VERTICALITE
FL	FLEXURE		

D'APRES LA CARTE GEOLOGIQUE AU 1/200000 DRESSEE PAR H. GIGOUT ET PUBLIEE EN 1994
(FEUILLES DE SAFI ET EL JADIDA MODIFIEE)

DRESSEE PAR	DESSINEE PAR	DATE	ECHELLE
A. CHATAIN	B. ZAABOUL		1 : 200 000

Sous la plaine des Doukhala, la position du socle est inconnue. D'après la géophysique (sismique), il serait situé entre 1500 et 4000 m de profondeur.

Dans le Sahel, un forage (156,2 x 220,7) semble avoir touché des schistes à 140 m de profondeur, mais ceci est très incertain.

II.2.2 - Le Permo-Trias

Dans la vallée de l'Oum-er-Rbia on connaît des dépôts d'argiles et de pélites rouges qui ont été attribués sans preuve paléontologique au Permo-Trias.

II.2.3 - Le Jurassique

Il correspond à une période d'émersion qui continue le Permo-Trias mais sans laisser comme lui de dépôts continentaux. Au Jurassique supérieur la mer s'engage dans la région de Safi en direction du N-W. Sa limite nord est une ligne joignant Youssoufia à Tnine Rharbia.

Le Jurassique supérieur affleure au Sud du secteur et forme entièrement la colline des Mouissat. On le trouve également en affleurements dispersés ou couverts d'une pellicule plio-quadernaire dans la région de Safi.

Le Jurassique de Safi est une épaisse série de calcaires et marno-calcaires jaunes avec des lits argileux et des bancs de gypse très fréquents et d'épaisseur importante.

L'importance du développement du faciès gypseux est attestée par les forages de la région de SAFI-Jemaa Sahim.

n° 5/34	:	109 m de gypse	sur	154 m de jurassique
n° 6/34	:	70 m de gypse	sur	160 m de jurassique
n° 8/34	:	25 m de gypse	sur	90 m de jurassique

On notera que la partie profonde devient plus argileuse. Cette disposition semble assez générale autour de Safi.

La puissance totale du Jurassique est estimée à 200 m.

II.2.4 - Le Crétacé

Il correspond à une période de transgression marine généralisée sur toute la région.

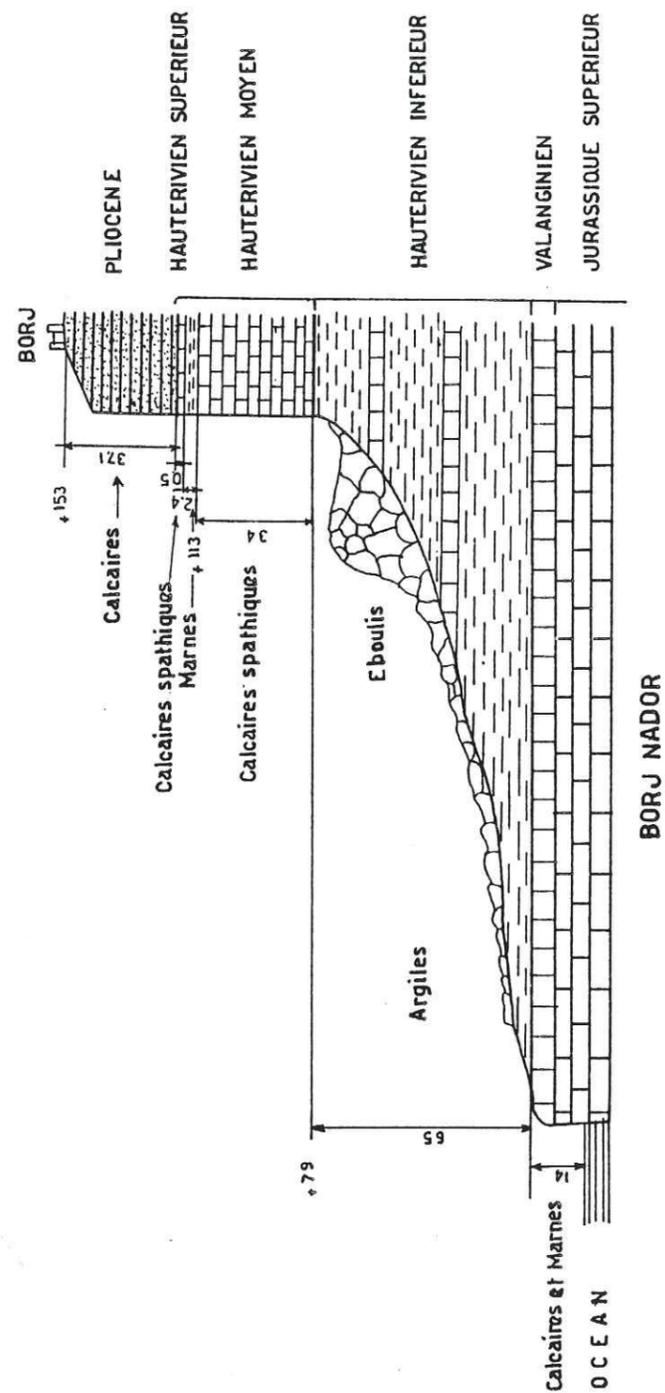
A Safi, le Crétacé inférieur fait suite au Jurassique sans lacune apparente tandis que dans le reste du domaine étudié il repose en discordance sur le socle primaire ou sur le Permo-Trias. Le Crétacé inférieur a montré au cours de l'étude (forages et coupes) de nombreuses variations d'épaisseur et de faciès. Dans le Sahel, les falaises de Bordj Nador offrent une bonne coupe du Crétacé inférieur (fig. 10) et on peut distinguer de bas en haut sur le Jurassique:

. Calcaires inférieurs (Valanginien)

Épais de 5 m, bien stratifiés, blancs ou jaunes, à grain fin et très fossilifères; la faune est caractéristique du Valanginien (polypiers, oursins, brachiopodes, céphalopodes..).

COUPE DU CRÉTACE INFÉRIEUR DE SAFI

Figure 10 -



. Argiles de Safi (Hauterivien inférieur)

Épaisses ici de 65 m, elles sont de couleur beige à bleuâtre. Il s'agit de marnes et argiles gypsifères. Elles comportent plusieurs bancs intercalaires de 1 à 2 m d'épaisseur d'un calcaire roux gréseux très fossilifère ; le fossile le plus courant et le plus caractéristique est *Exogyra couloni* qui date l'Hauterivien inférieur. M. GIGOUT les appelle d'ailleurs argiles à *E. couloni*. Par endroits, le Valanginien et l'Hauterivien inférieur sont représentés par un ensemble de 10 m de grès, argiles et marnes alternants.

Les argiles dites de Safi forment un substratum imperméable dans toute la région, c'est pourquoi d'ailleurs la quasi totalité des forages hydrogéologiques s'arrêtent au sommet de ce niveau.

. Calcaires de "Dridrat" (Hauterivien moyen)

Ces calcaires sont de caractères pétrographiques assez variables, mais le faciès le plus courant est un calcaire blanc à grain fin, moucheté de dendrites de manganèse assez caractéristiques. Ils peuvent devenir marneux soit par banc, soit uniformément sur toute la puissance de la formation.

A Bordj Nador, il est épais de 37 m, il se présente sous l'aspect d'un calcaire blanc jaunâtre assez dur, à grain fin, parfois spathique comportant de petits lits intercalaires d'argiles. M. GIGOUT l'attribue à l'Hauterivien supérieur mais des travaux plus récents en font de l'Hauterivien moyen.

Ces calcaires de Dridrat sont généralement fissurés et karstifiés.

. Argiles "supérieures" (Hauterivien supérieur)

Leur épaisseur est très variable car elles ont été fortement sollicitées par l'érosion à la suite de l'émersion du secteur. Elle va de 80m à l'absence totale. A Safi, elles sont épaisses de 60m. Elles sont bariolées de passées verdâtres ou jaunes et présentent de nombreux niveaux sableux dans leur partie supérieure. La partie inférieure est généralement composée d'argile rouge homogène et compacte.

Sur la coupe de Bordj Nador, elles sont épaisses de 3 m environ et sont argilo-sableuses de couleur rouge. En l'absence de fossiles, elles ne sont pas datées. M. GIGOUT les attribue à l'Hauterivien supérieur.

II.2.5 - Le Cénomaniens

Le Cénomaniens affleure au Nord du secteur pour fermer le plateau mazaganais. Il s'agit d'une série formée d'une alternance de bancs calcaires et de bancs marneux jaunes décimétriques à métriques. L'épaisseur de cette formation sub-horizontale reste inconnue car aucun forage ne l'a entièrement traversé.

A El Jadida, le Cénomaniens repose sur le socle primaire tandis qu'au Sud du plateau mazaganais, il repose en discordance sur les argiles rouges de l'Hauterivien supérieur.

II.2.6 - L'Eocène

Les terrains éocènes, célèbres par leurs gisements de phosphates forment le plateau de Ganntour au Sud et à l'Est de Youssoufia. Ils se trouvent en dehors des limites du secteur qui nous intéresse.

II.2.7 - Le Miocène

Les terrains marins de cette époque jouent un rôle très modeste dans la méséta marocaine.

Au SE d'El Jadida on a deux petits affleurements de marnes sableuses jaunes ou rosées et des argiles rouges ou brunes. Aucun fossile ne permet de les dater avec précision. On y a trouvé de nombreux foraminifères qui ne permettent pas de trancher entre le Miocène et le Pliocène.

II.2.8 - Le Plio-Quaternaire marin et dunaire

Après la transgression marine du Miocène qui n'a recouvert qu'une faible frange côtière, une nouvelle transgression beaucoup plus importante est venue recouvrir tout le Sahel et la plaine des Doukkala. Il s'agit de la transgression pliocène qui a laissé derrière elle des dunes côtières constituées à peu près du même matériau.

Pour M. GIGOUT, il s'agit d'un cycle sédimentaire simple. La transgression a déposé un conglomérat de base peu important, la régression a abouti à l'édification de dunes. G. CHOUBERT distingue : un cycle mio-pliocène et un cycle maghrébin (sensiblement équivalent au Villafrançien inférieur). Il invoque des arguments surtout paléontologiques.

Ce qui est important pour nous c'est que les sédiments, aussi bien marins que dunaires, sont uniformes sur tout le Sahel et constituent un ensemble lithologique unique: c'est pourquoi on adoptera le terme commode de Plio-Quaternaire. Il s'agit d'un calcaire détritique jaune constitué de débris de coquilles triturées et de grains de sable. La puissance totale du Plio-Quaternaire serait d'une soixantaine de mètres. Sa puissance moyenne est de l'ordre de 20 à 30 m. M. GIGOUT limite en gros le Pliocène à la côte 90 m.

Lithologie: Le Plio-Quaternaire joue un rôle hydrogéologique important et il est donc utile de décrire en détail sa lithologie. On y distingue:

- . Un conglomérat de base, grossier, caractéristique de l'ancien estuaire de l'Oum-er-Rbia. Il est certain qu'à l'époque du maximum de la transgression pliocène, l'Oum-er-Rbia déversait ses apports à Boulaouane et que les galets s'accumulaient dans son estuaire. Les galets sont de taille moyenne formés pour l'essentiel d'éléments du Primaire: grès, quartzite et quartz. Le ciment est généralement calcaire et peu abondant.

- . Un calcaire détritique: lumachelique, jaune à roux, tendre et très poreux. C'est le faciès le plus courant qu'on dénomme à tort grès pliocène. On y rencontre:

- . des éléments détritiques essentiellement des grains de quartz de faibles dimensions;
- . des éléments figurés, surtout des coquilles.

L'ensemble est cimenté par un ciment calcitique riche en oxyde de fer. La porosité est fonction de l'arrangement des coquilles et de l'importance du ciment. Elle est assez élevée et est de l'ordre de 20 à 30 %. Cette porosité est maximale dans les lumachelles grossières. Elle est dans l'ensemble fermée.

- . Un sable jaune, grossier: il s'agit du même faciès mais sans ciment.

- . Un calcaire recristallisé: très dur, blanchâtre; l'aspect lumachelique s'observe à la cassure.

La présence de géodes et de cristaux de calcite tapissant les fissures permet de déduire qu'il s'agit d'une zone de circulation d'eau intense et que le ciment calcaire a envahi tous les pores.

- . Un calcaire à grain fin: en général tendre et chargé en éléments argileux. Il est dépourvu de fossiles. Il s'agit du faciès dunaire difficile à distinguer du faciès marin en l'absence de coquilles d'héli-cidés.

- . Des marnes sableuses riches en fossiles.

II.3 - VARIATIONS LITHOLOGIQUES ET DE PUISSANCE (Figures 11 et 12)

Le Valanginien calcaire, quand il affleure (région de Safi), a une épaisseur assez constante. Cette épaisseur est d'ailleurs minimale du fait de l'érosion. En forage, il est difficile d'estimer son épaisseur car on ne peut pas le distinguer du Jurassique supérieur avec lequel il forme une seule masse calcaire.

L'épaisseur des argiles de Safi semble être assez constante: 50 m à Safi même, 54 m au forage 137/26. A Tnine Rharbia, le forage 3/34 a traversé 21 m d'argiles et le 1/34 en indique 51 m. Mais cette épaisseur n'est pas connue avec exactitude dans le reste du Sahel car la plupart des forages hydrogéologiques s'arrêtent au sommet de cette formation. Mais les quelques chiffres cités ci-dessus montrent que ces argiles ont une épaisseur bien suffisante pour justifier leur rôle d'imperméable.

Du point de vue lithologique, on a pu noter que la base de ces argiles est plutôt une marne (effervescence à l'acide chlorhydrique de couleur beige clair et à plasticité faible). A partir de 3 ou 4 m. au-dessus, le caractère argileux s'affirme progressivement et leur couleur devient verte. De nombreuses carrières exploitent actuellement ce niveau pour la fabrication de poteries et de briques.

Contrairement aux formations précédentes, l'épaisseur des calcaires de Dridrat est assez bien connue grâce aux nombreux forages qui le traversent. Elle est en moyenne de 30 m avec des valeurs extrêmes de 20 à 40 m.

Ils sont d'aspect variable; en général ils sont durs à très durs, tantôt jaunes, tantôt nettement gréseux. Les grains sont dans l'ensemble fins. En surface ils sont souvent d'aspect spathique d'une couleur jaune d'or. On y trouve des grains de quartz à extinction roulante, ainsi que de rares cristaux de microlite. Il est réputé être parfois dolomitique. On y trouve à la base des passages argileux.

Si les calcaires de Dridrat sont de puissance constante, les argiles supérieures sont extrêmement discontinues; leur épaisseur varie de 0 à 80 m. Cette variation d'épaisseur est parfaitement normale: étant le dernier terme de la série du Crétacé inférieur il est logique d'expliquer cette variation par l'érosion pendant la période d'émersion entre le Néocomien et le Pliocène.

Leur absence dans la frange côtière peut être due aux mouvements transgressifs et régressifs des mers quaternaires. On peut également supposer que les argiles se sont déposées dans les dépressions du toit des calcaires de Dridrat, ce qui impliquerait l'existence de plissements pendant l'Haute-rivien moyen.

Ce qui est à retenir, c'est le fait qu'elles peuvent être totalement absentes permettant alors un contact direct du Pliocène sur les calcaires de Dridrat.

Un autre point à signaler est leur caractère sableux, très affirmé dans leur partie supérieure. Une détermination de minéraux argileux a montré l'abondance de Montmorillonite qui traduit en général un milieu saturé en cations: lacs, lagune ou mer plus ou moins fermée.

Figure 11 - SCHEMA STRATIGRAPHIQUE

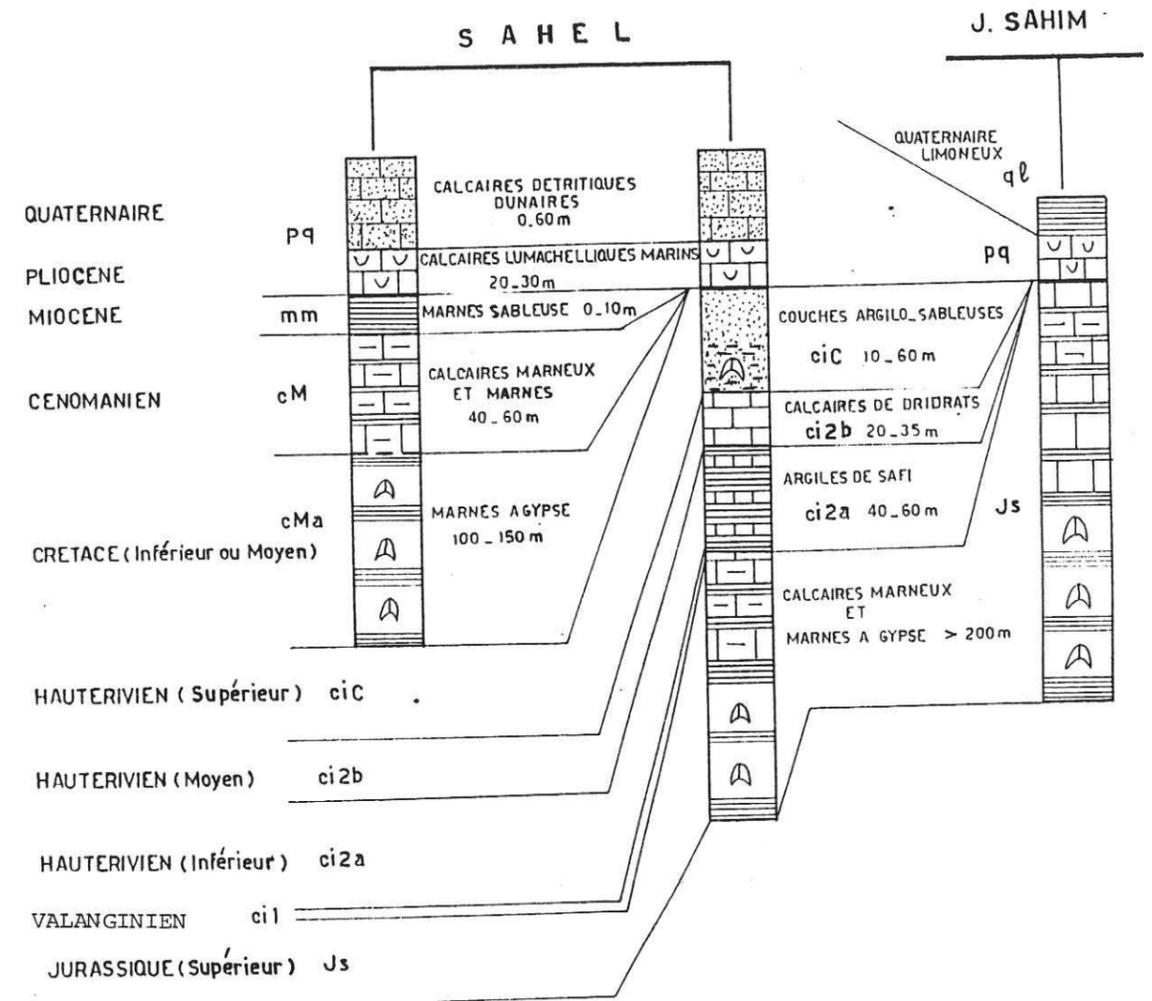
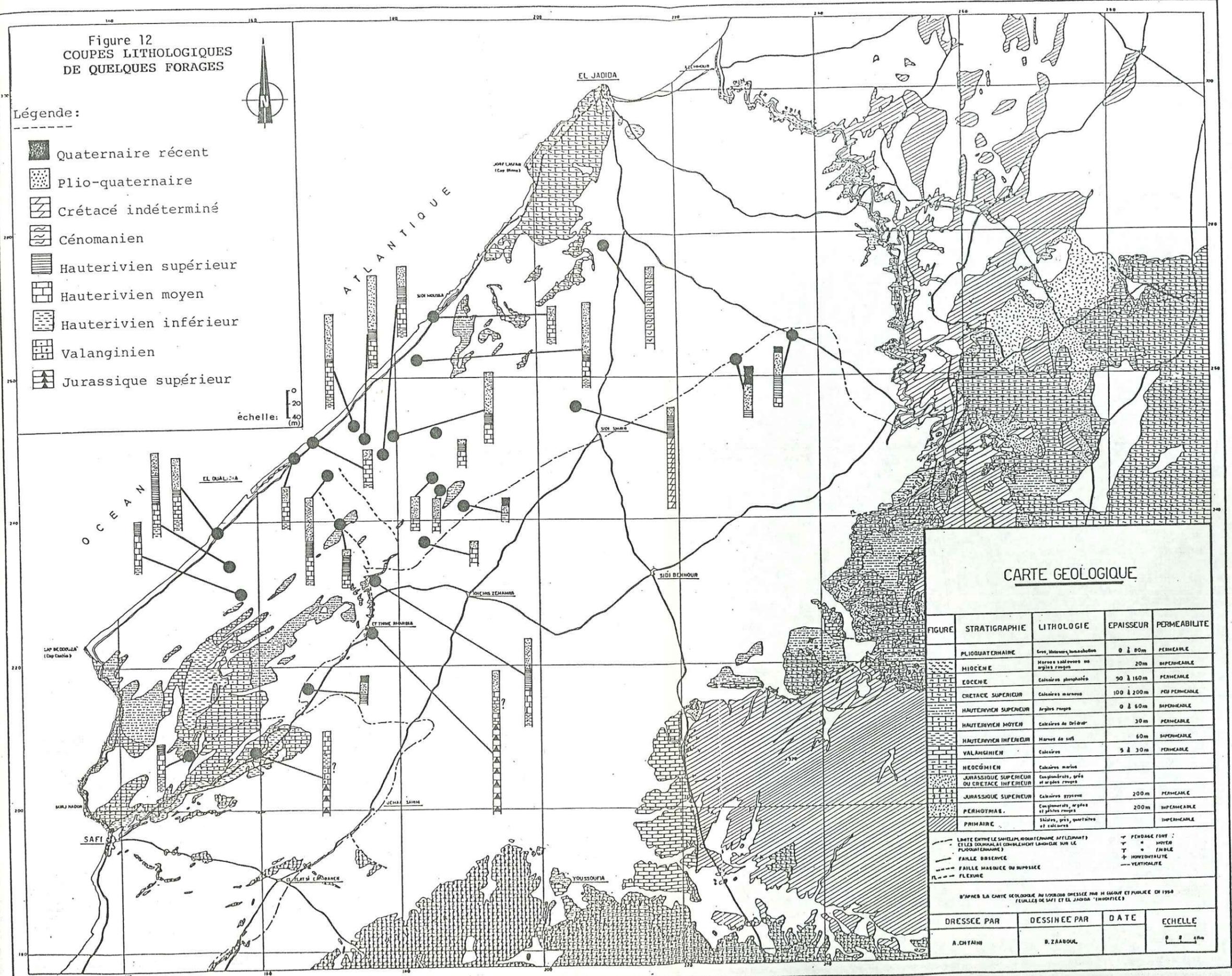


Figure 12
COUPES LITHOLOGIQUES
DE QUELQUES FORAGES

Légende:

- Quaternaire récent
- Plio-quaternaire
- Crétacé indéterminé
- Cénomanién
- Hauterivién supérieur
- Hauterivién moyen
- Hauterivién inférieur
- Valanginién
- Jurassiqué supérieur

échelle: 0 20 40 (m)



CARTE GEOLOGIQUE

FIGURE	STRATIGRAPHIE	LITHOLOGIE	EPAISSEUR	PERMEABILITE
	PLIOQUATERNAIRE	Grès, siltstone, lambeaux	0 à 80m	PERMEABLE
	MIOCENE	Marnes sableuses ou argiles rouges	20m	IMPERMEABLE
	Eocene	Calcaires phosphatés	50 à 160m	PERMEABLE
	CRETACE SUPERIEUR	Calcaires marins	100 à 200m	PEU PERMEABLE
	HAUTERIVIEN SUPERIEUR	Argiles rouges	0 à 60m	IMPERMEABLE
	HAUTERIVIEN MOYEN	Calcaires du Orléans	30m	PERMEABLE
	HAUTERIVIEN INFÉRIEUR	Marnes de sables	60m	IMPERMEABLE
	VALANGINIEN	Calcaires	5 à 30m	PERMEABLE
	MÉCOÏMIEN	Calcaires marins		
	JURASSIQUE SUPERIEUR OU CRETACE INFÉRIEUR	Conglomérats, grès et argiles rouges		
	JURASSIQUE SUPERIEUR	Calcaires sylvains	200m	PERMEABLE
	PERHOVIEN	Conglomérats, argiles et grès rouges	200m	IMPERMEABLE
	PRIMAIRE	Schistes, grès, quartzites et calcaires		IMPERMEABLE

--- LIMITE ENTRE LE SHELLE ET LE MONT (CARRÉ AFFILANT)
 - - - CILLES SOUS-MARINS COMPLETMENT LANCHE SUR LE PLACQUET (CARRÉ)
 --- FAUILLE OBSERVÉE
 - - - FAUILLE MASQUÉE OU SUPPOSÉE
 FL --- FLEXURE

▽ PENTE FORT
 ▼ MOYEN
 ▽ FAIBLE
 + HORIZONTALITÉ
 - - - VERTICALITÉ

D'APRES LA CARTE GEOLOGIQUE AU 1/50000 DRESSÉE PAR H. GUYOT ET PUBLIÉE EN 1950 (FEUILLES DE SAFI ET EL JADIDA - "MOROCQUE")

DRESSEE PAR	DESSINEE PAR	DATE	ECHELLE
A. CHATAIN	B. ZARBOUL		0 2 4 km

Ces observations permettent de penser qu'il s'agit là d'un faciès régressif et que le Néocomien du Sahel peut être englobé dans un cycle simple transgression-régression.

Après le retrait de la mer néocomienne, une nouvelle transgression se produit au Cénomaniens, transgression qui s'est avancée plus loin que la transgression néocomienne. Cette transgression marine a déposé des calcaires marneux jaunes avec des intercalations de quelques bancs de grès.

Mais l'émersion ultérieure a fortement ou même totalement érodé les dépôts cénomaniens sur une plus grande partie du Sahel. Le seul affleurement est le plateau Mazaganais au Sud et au S-W d'El-Jadida (Mazagan).

II.4 - TECTONIQUE

Remarques préliminaires :

La fréquence des lacunes sédimentaires dans la série stratigraphique du Sahel donne une échelle chronologique lâche, défavorable à la détermination précise de l'époque de déformation.

Les séries secondaires, tertiaires et quaternaires n'ont subi que d'amples mouvements plus difficiles à déceler que les véritables fractures ou plissements.

Les accidents tectoniques post-hercyniens présentent deux directions majeures:

- . une direction N-S qui correspond au rejeu des failles hercyniennes;
- . une direction NE-SW en rapport avec l'orogénèse atlasique (alpine).

Notons aussi que certains niveaux, tel que le Jurassique supérieur (très épais), ont un comportement rhéologique plastique. Ces niveaux absorbent l'énergie des déformations du socle primaire, déformations qui ne se traduisent pour les niveaux sus-jacents que par des plis à grand rayon de courbure.

Les niveaux durs (calcaires de Dridrat par exemple) peuvent casser lors du rejeu de ces failles hercyniennes.

La tectonique post-hercynienne, en première approximation, se résume à des mouvements verticaux: soulèvements ou effondrements relatifs de vastes blocs séparés par des failles normales ou des flexures. Il s'agit de mouvements surtout épirogéniques mais qui ont pu s'associer à des déplacements horizontaux (MICHARD, 1975), notamment les plus jeunes (ALLARY, 1972).

Ce sont ces mouvements qui dirigent la sédimentation ou l'érosion. Les mouvements néogènes ne provoquent que localement la déformation des terrains concernés.

L'âge des différentes déformations, établi par l'étude des discordances stratigraphiques serait, selon M. GIGOUT:

- Mouvements hercyniens

- . phase antévisséenne
- . phase antéstéphano-autunienne (la plus importante).
- . phase antépermo-triasique

- Déformations d'âge secondaire
 - . mouvements jurassiques
 - . mouvements antémaestrichiens
- Déformations d'âge tertiaire
 - . mouvements antémiocènes
 - . mouvements antépliocènes
 - . mouvements intrapliocènes
- Déformations d'âge quaternaire
 - . quelques flexures ou failles difficiles à dater avec précision

II.5 - STRUCTURE DE LA COUVERTURE CRETACEE

Sur la plus grande part du Sahel, la couverture plio-quaternaire masque le substratum crétacé.

Les forages assez nombreux et les études géophysiques dont l'interprétation est relativement aisée du fait de la simplicité de la série sédimentaire et du contraste des résistivités des différentes formations (alternance de résistants et de conducteurs) ont permis une étude assez précise de la structure du Crétacé (fig. 13 et 14).

Entre Cap Beddouza et Safi, le Crétacé inférieur affleure largement. Il est affecté par une série d'ondulations synclinales et anticlinales orientées approximativement NE-SW. Du Sud au Nord on a :

1- Flexure Safi - Dar Si Aïssa: de direction NE-SW, elle fait remonter le compartiment S-E où le Plio-Quaternaire repose directement sur le Jurassique supérieur.

2- Anticlinal de Takabrot, peu marqué, qui se poursuit jusqu'à la faille de Tnine Rharbia .

3- Synclinal de Sidi Belkrara - Douar Chleuh: il est de direction NE-SW et se suit sur 15 km environ.

3'- Synclinal de Moul Bergui: il s'agit du prolongement du précédent. Dans ce synclinal, le toit des argiles de Safi a été rencontré à la côte 25 m.

4- Anticlinal de Lièvre Volga: l'axe du pli est d'abord E-W, ensuite NE-SW et devient N-S. Il fait réapparaître le Jurassique bien visible dans la falaise.

Son prolongement est responsable de l'affleurement des argiles de l'Hauterivien inférieur sur une superficie de 12 x 4 km.

5- Anticlinal de Aïn Rhor: il s'agit du prolongement du pli précédent, avec un changement d'orientation de son axe qui devient NE-SW.

6- Anticlinal de Tleta Bouaris de direction NE-SW, il se suit sur 40 km vers le Nord.

Sa remontée vers le N-W est très régulière, elle est assez bien connue par les forages de reconnaissance du calcaire de Dridrat.

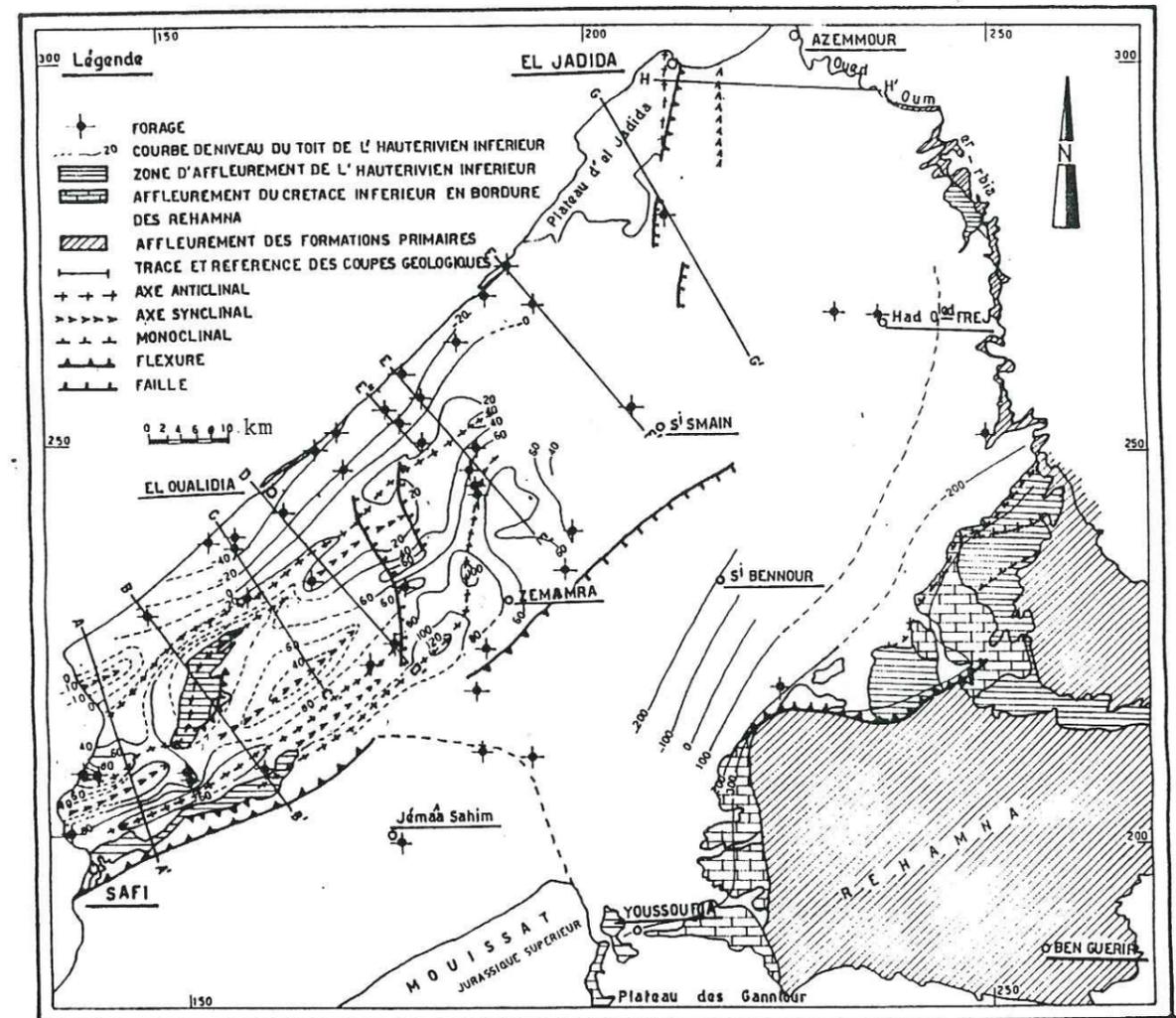
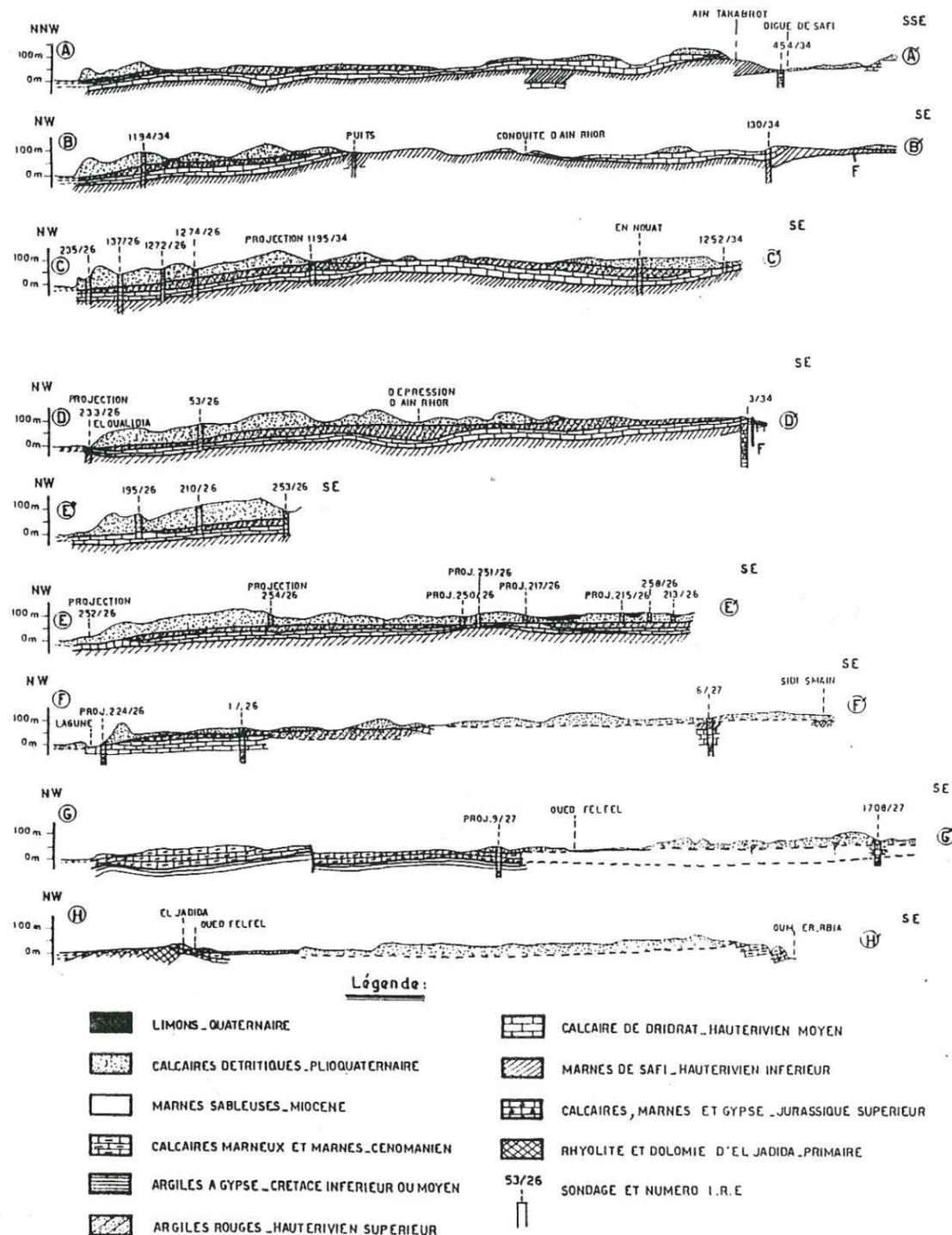


Figure 13 - ESQUISSE STRUCTURALE DU CRETACE INFERIEUR D'APRES
GÉOPHYSIQUE ET FORAGES

Figure 14
COUPES GEOLOGIQUES A TRAVERS LE SAHEL

LES TRACES AA' - BB' ETC... SONT REPERES SUR LA FIG 13



7- Synclinal de Sidi Bouchta: toujours de direction NE-SW, il s'agit d'un pli très dissymétrique. Son flanc sud est plus incliné, tandis que son flanc nord est beaucoup plus redressé.

A l'Ouest de Zémamra, on a l'anticlinal de Tleta Rhanem-Tnine Rharbia (8). On le suit sur plus de 30 km. Sa partie sud est de direction NE-SW et sa partie de direction à peu près N-S.

Dans cet anticlinal l'érosion a entamé la série crétacée, érosion qui a complètement enlevé les argiles supérieures et une partie des calcaires de Dridrat. On a donc là un contact direct du Plio-Quaternaire sur les calcaires de Dridrat tout le long d'une bande large de 5 à 6 km et longue de 30km environ.

8- Synclinal d'Aïn R'Tem: il en résulte un épaissement des argiles supérieures. Les argiles de Safi prennent une forme déprimée constatée par les sondages électriques sur 12 km de longueur. Contrairement au plissement qui n'affecte que le Crétacé inférieur, les failles affectent aussi bien la série crétacée que le Plio-Quaternaire (figure 15).

Ces failles ont un rejet faible qui ne dépasse que rarement 10 à 20 m.

Tout à fait au Nord, en plus de l'anticlinal d'El Jadida (10) on a un synclinal dit synclinal d'Azemmour (11). Il est inconnu dans le détail (manque de forages dans les environs) mais peut se déduire facilement: dans la basse vallée de l'Oum-er-Rbia, les calcaires cénomaniens ont un pendage ouest et réapparaissent au Sud d'El Jadida avec un pendage est (figure 15).

II.6 - CONCLUSION - IDENTIFICATION DES RESERVOIRS POTENTIELS

A partir de la lithologie, de la stratigraphie et des travaux de sondage de reconnaissance, nous avons pu identifier cinq réservoirs potentiels:

- un réservoir Plio-Quaternaire avec un mur argileux (Hauterivien supérieur). Il est caractérisé par une perméabilité essentiellement d'interstices mais également de fissures;
- un réservoir cénomaniens avec un mur non défini;
- un réservoir hauterivien moyen (calcaires de Dridrat) avec un mur marneux (marne de l'Hauterivien inférieur). Les calcaires de Dridrat sont à grain fin et ont une perméabilité de fissures. Ils sont parfois karstifiés;
- un réservoir valanginien qui aurait également une perméabilité de fissures. Ce réservoir n'a pas de relations hydrauliques avec les formations plus récentes étant donné la continuité et l'épaisseur des marnes de l'Hauterivien inférieur;
- un réservoir jurassique supérieur constitué de marno-calcaires gypsifères dont le mur est non défini.

L'inventaire des points d'eau est fonction du gîte ainsi que les travaux de recherche d'eau montrent que les réservoirs plio-quaternaires forment des aquifères quasi continus. Par contre, le nombre limité de sondage ayant touché l'Hauterivien moyen ne permet pas de conclure à la continuité de cet aquifère.

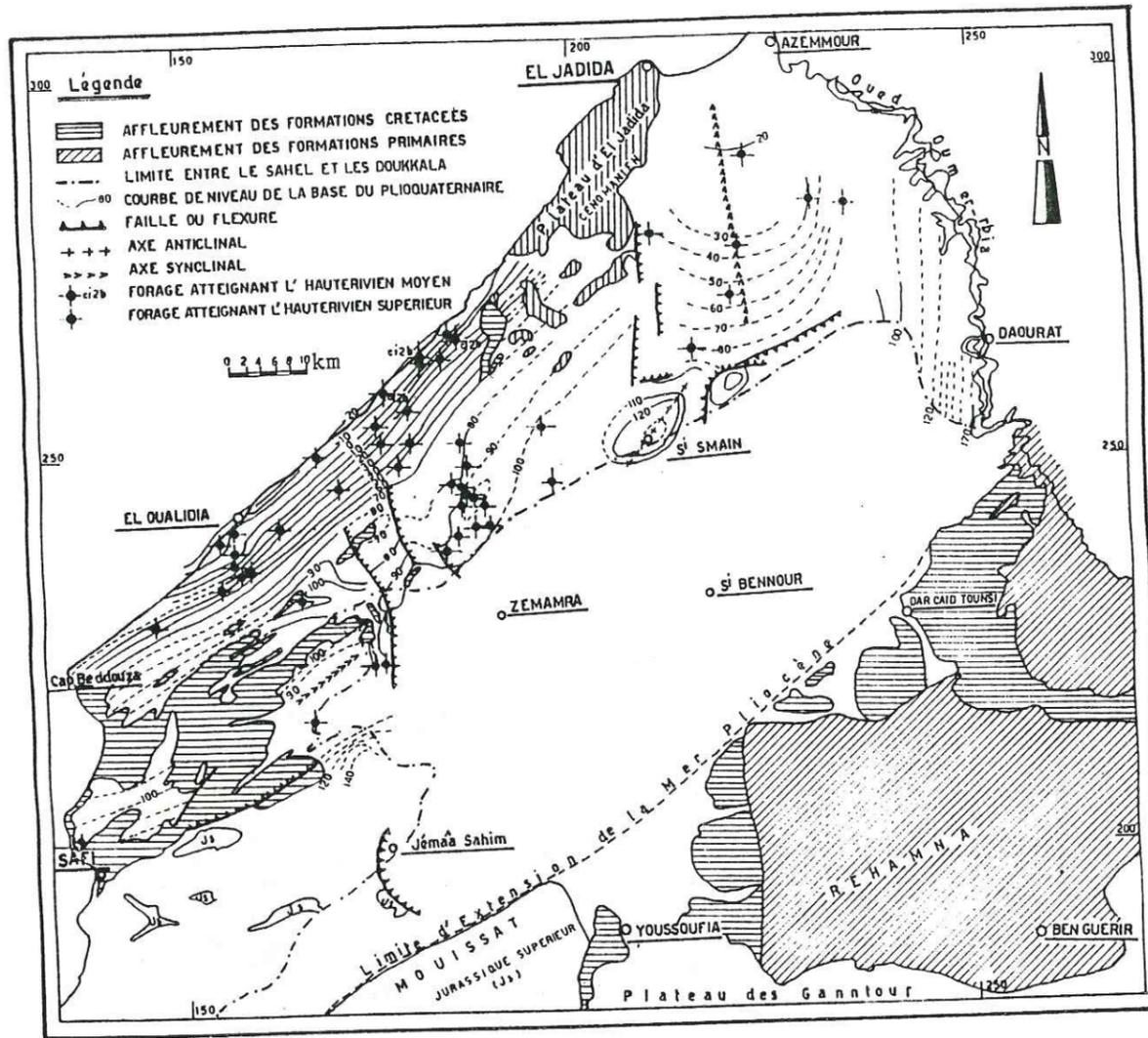


Figure 15 - ESQUISSE STRUCTURALE DE LA BASE DU PLIOQUATERNAIRE D'APRES
GÉOPHYSIQUE ET FORAGES

CHAPITRE III

PIEZOMETRIE

III. 1 - INTRODUCTION

III.2 - INVENTAIRE DES POINTS D'EAU

- III.2.1 - Caractéristiques des puits et forages
- III.2.2 - Utilisation des puits et forages

III.3 - PRINCIPAUX NIVEAUX AQUIFERES

III.4 - INTERPRETATION DES CARTES PIEZOMETRIQUES

- III.4.1 - Au Sud du Cap Beddouza (Sahel de Safi)
- III.4.2 - Entre Cap Beddouza et Sidi Moussa (Sahel Central)
- III.4.3 - Entre Sidi Moussa et El Jadida
- III.4.4 - Entre le plateau mazaganais et l'Oum-er-Rbia

III.5 - REGIME DE LA NAPPE

III.6 - FLUCTUATIONS DE LA NAPPE

III.7 - ZONES D'ALIMENTATION

III.8 - CONCLUSION

III.1 - INTRODUCTION

Avant cette étude, aucune carte piézométrique de la région n'a été établie bien qu'un réseau de piézomètre fasse l'objet de relevés mensuels par les services de l'eau des Directions Provinciales de l'Équipement (D.P.E.) de Safi et d'El Jadida.

Pour l'année hydrologique 1984-1985, nous avons sélectionné 150 points d'eau régulièrement répartis. Ces points ont fait l'objet d'un relevé piézométrique en hautes-eaux (mars 1985) et en basses eaux (septembre 1985). Nous avons ainsi dressé deux cartes hydro-isohypses en hautes et basses eaux (fig.16 et 17).

III.2 - INVENTAIRE DES POINTS D'EAU

Étant donné la grande superficie du secteur, il est quasiment impossible de faire un inventaire systématique des points d'eau dans le Sahel. Néanmoins, la D.R.H. de Marrakech a inventorié plusieurs centaines de puits (surtout ceux creusés récemment).

Les puits de notre région d'étude peuvent se regrouper en deux grandes concentrations:

- a- l'Oulja
- b- le N.E. du Sahel

III.2.1 - Caractéristiques des puits et des forages

À chaque forage est attribué un numéro d'Inventaire des Ressources en Eau (I.R.E.) et les caractéristiques sont reportées sur une fiche comportant:

- . coordonnées
- . nom du propriétaire
- . dessins du puits et de son emplacement
- . nature et hauteur de la margelle par rapport au sol
- . cuvelage
- . profondeur du plan d'eau par rapport à la margelle
- . profondeur totale du puits
- . diamètre du puits
- . équipement et usage

III.2.2 - Utilisation des puits et forages

Par l'importance de l'ouvrage, trois types peuvent être distingués:

a/ Forages destinés à l'alimentation en eau potable, comme les forages T.B.1 et T.B.2 qui contribuent à l'alimentation de la ville de Safi. D'autres sont exploités pour l'alimentation des agglomérations rurales.

b/ Puits destinés à l'irrigation: concentrés essentiellement dans l'Oulja. On compte 1600 puits qui sont tous équipés de motopompes.

c/ Puits à usage domestique: répartis le long du Sahel, ils sont le plus souvent équipés en dalon (seau), parfois en éolienne et rarement en motopompe.

Leur utilisation se résume à:

- l'alimentation humaine
- l'alimentation du bétail
- l'irrigation de petites parcelles

III.3 - PRINCIPAUX NIVEAUX AQUIFERES

L'étude géologique a permis l'identification de cinq réservoirs potentiels.

L'inventaire des points d'eau en fonction des formations stratigraphiques, comme nous l'avons mentionné dans le chapitre "Géologie", nous a permis de conclure à la continuité des réservoirs plio-quadernaires et cénomaniens.

III.4 - INTERPRETATION DES CARTES PIEZOMETRIQUES

Les cartes piézométriques établies vont permettre de définir l'écoulement souterrain des eaux de la nappe phréatique du Sahel, de calculer le gradient hydraulique qui est un paramètre important dans l'estimation des apports latéraux et de voir les relations hydrauliques existant éventuellement entre les niveaux aquifères précédemment décrits.

III.4.1 - Au Sud du Cap Beddouza (Sahel de Safi)

Il nous a été impossible de tracer une esquisse piézométrique de ce secteur car plusieurs niveaux aquifères affleurent. Ces terrains sont très plissés et compartimentés par des failles dont le rôle hydrologique reste inconnu.

Les mesures du niveau hydrostatique effectuées nous amènent à conclure à l'existence de petites nappes perchées indépendantes les unes des autres.

Au Sud de Safi, les relevés piézométriques effectués dans le Jurassique supérieur montrent qu'aucune interpolation n'est possible. Il s'agit d'un aquifère discontinu dont les eaux sont trop chargées, ce qui les rend impropres à tout usage.

III.4.2 - Entre Cap Beddouza et Sidi Moussa (Sahel central)

Ce secteur présente deux aquifères superposés: le Plio-Quadernaire et l'Hauterivien moyen. Le Plio-Quadernaire forme un aquifère continu tandis que le peu de points captant l'Hauterivien moyen ne permet pas de conclure à la continuité de cet aquifère.

Lorsque les argiles rouges de l'Hauterivien supérieur qui jouent le rôle de mur imperméable de la nappe plio-quadernaire sont absentes (voir carte géologique), le Plio-Quadernaire repose directement sur les calcaires de l'Hauterivien moyen. Ces derniers sont dans ce cas alimentés par les eaux circulant dans le Plio-Quadernaire. Par contre, dans la zone située entre Cap Beddouza et El Oualidia, les calcaires plio-quadernaires drainent les calcaires de l'Hauterivien moyen, ce qui explique la valeur élevée du gradient hydraulique dans ce secteur. (Fig. 17)

Les eaux du Sahel central s'écoulent vers l'océan suivant une direction générale NW-SE.

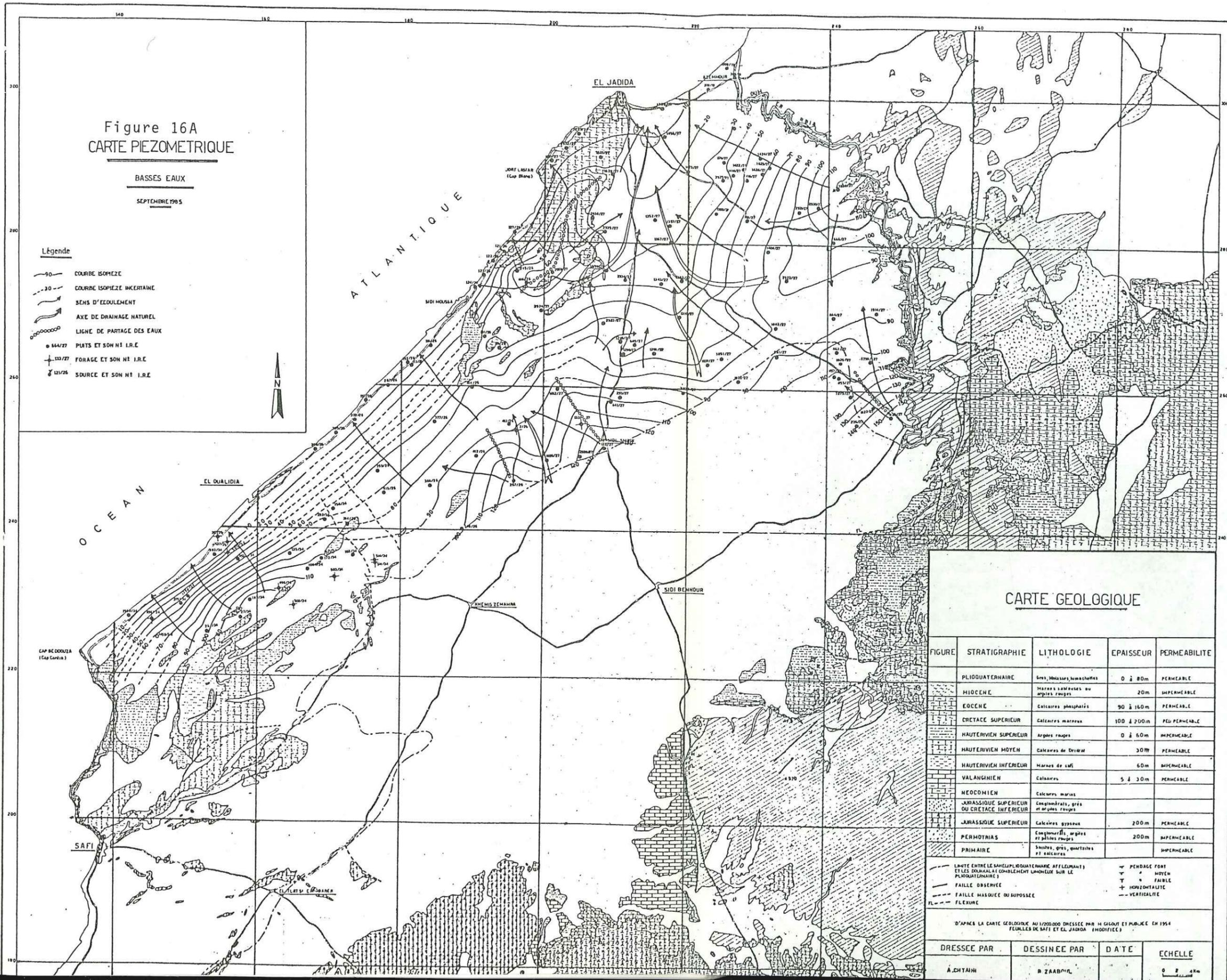


Figure 16A
CARTE PIEZOMETRIQUE

BASSES EAUX
SEPTEMBRE 1985

- Légende
- 90 — COURBE ISOPIEZE
 - - - 30 - - - COURBE ISOPIEZE INCERTAINE
 - SENS D'EGOULEMENT
 - AXE DE DRAINAGE NATUREL
 - LIGNE DE PARTAGE DES EAUX
 - 144/77 Puits et son N° I.R.E.
 - ⊕ 133/77 Forage et son N° I.R.E.
 - ⊕ 121/76 Source et son N° I.R.E.

CARTE GEOLOGIQUE

FIGURE	STRATIGRAPHIE	LITHOLOGIE	EPAISSEUR	PERMEABILITE
	PLIOQUATERNAIRE	Grès, Molasses, Sables et argiles rouges	0 à 80m	PERMEABLE
	MIOCENE	Marnes lamellées ou argiles rouges	20m	IMPERMEABLE
	EOCENE	Calcaires phosphatés	90 à 160m	PERMEABLE
	CRETACE SUPERIEUR	Calcaires marins	100 à 200m	PEU PERMEABLE
	HAUTERIVIEN SUPERIEUR	Argiles rouges	0 à 60m	IMPERMEABLE
	HAUTERIVIEN MOYEN	Calcaires de Dordal	30m	PERMEABLE
	HAUTERIVIEN INFERIEUR	Marnes de Safi	60m	IMPERMEABLE
	VALANGINIEN	Calcaires	5 à 30m	PERMEABLE
	NEOCENIEN	Calcaires marins		
	JURASSIQUE SUPERIEUR OU CRETACE INFERIEUR	Conglomérats, grès et argiles rouges		
	JURASSIQUE SUPERIEUR	Calcaires massifs	200m	PERMEABLE
	PERMIEN	Conglomérats, argiles et sables rouges	200m	IMPERMEABLE
	PRIMAIRE	Schistes, grès, quartzites et calcaires		IMPERMEABLE

— LIMITE ENTRE LE SAHEL (PLIOQUATERNAIRE ATELLEMANI) ET LES DOUKHALI (COMBLEMENT LIMONIEUX SUR LE PLIOQUATERNAIRE)

— FAUILLE OBSERVEE

— FAUILLE MASQUEE OU SUPPOSEE

— FLEXURE

↖ PENDAGE FORT

↘ MOYEN

— FAIBLE

— HORIZONTALITE

— VERTICALITE

D'APRES LA CARTE GEOLOGIQUE AU 1/200000 DRESSEE PAR H. GILLOT ET PUBLIEE EN 1964 (FEUILLES DE SAFI ET EL JADIDA - MODIFIEE)

DRESSEE PAR	DESSINEE PAR	DATE	ECHELLE
A. CHYAH	B. ZAABOUL		0 2 4 km

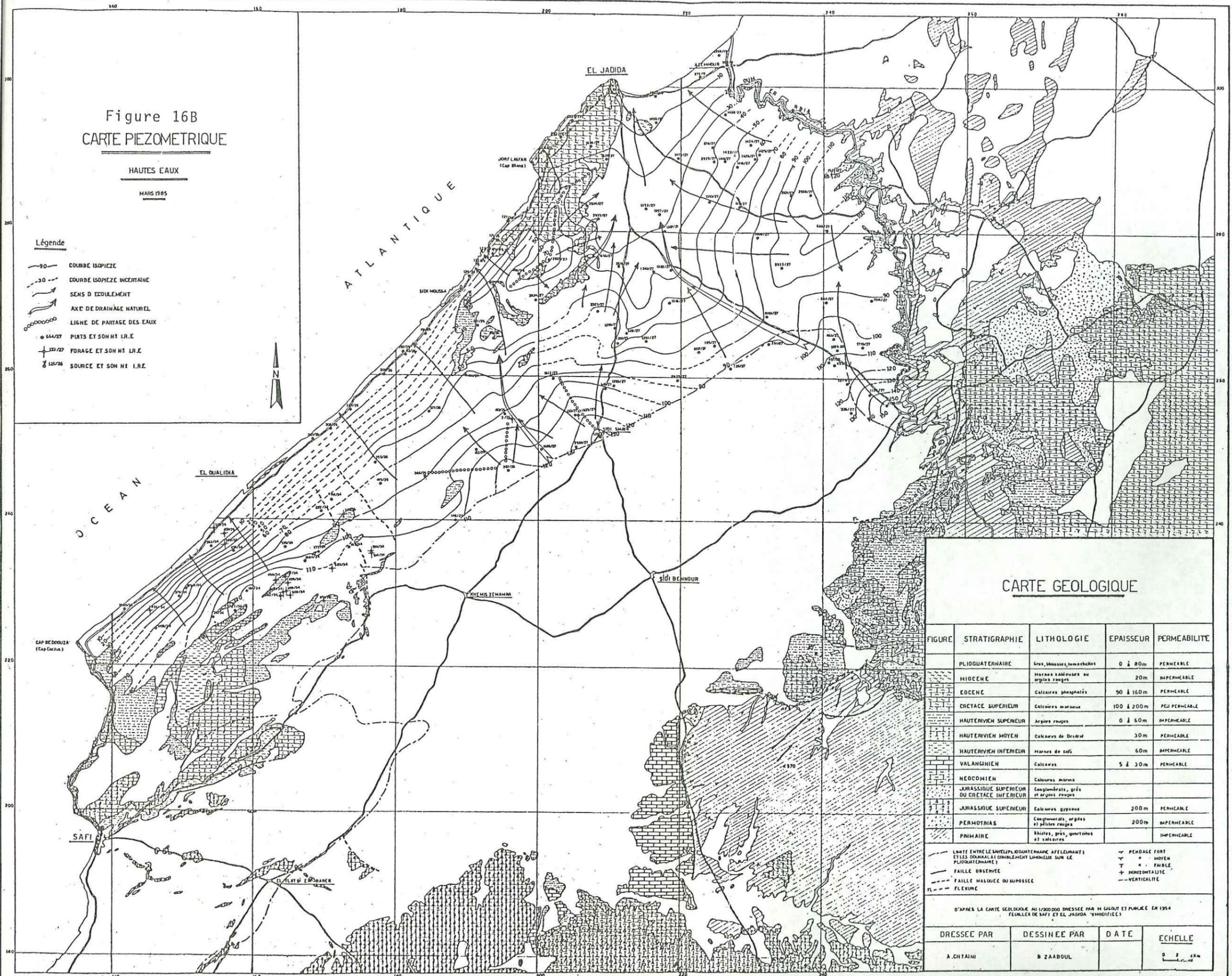
Figure 16B
CARTE PIEZOMETRIQUE

HAUTES EAUX

MARS 1985

Légende

- 90 — COURBE ISOPIEZE
- - - 30 - - - COURBE ISOPIEZE INCERTAINE
- SENS D'ECOLEMENT
- ↗ AXE DE DRAINAGE NATUREL
- ○ ○ ○ ○ LIGNE DE PARTAGE DES EAUX
- 644/77 PUIS ET SON N° I.R.E
- ⊕ 137/77 FORAGE ET SON N° I.R.E
- ⊕ 124/76 SOURCE ET SON N° I.R.E



CARTE GEOLOGIQUE

FIGURE	STRATIGRAPHIE	LITHOLOGIE	EPAISSEUR	PERMEABILITE
	PLIOQUATERNAIRE	Sols, limons, argiles	0 à 80m	PERMEABLE
	MIOCENE	Marnes sablonneuses ou argiles rouges	20m	IMPERMEABLE
	EOCENE	Calcaires phospatés	90 à 160m	PERMEABLE
	CRETACE SUPERIEUR	Calcaires marins	100 à 200m	PEU PERMEABLE
	HAUTERIVIEN SUPERIEUR	Argiles rouges	0 à 60m	IMPERMEABLE
	HAUTERIVIEN MOYEN	Calcaires de Dordal	30m	PERMEABLE
	HAUTERIVIEN INFERIEUR	Marnes de Sidi	60m	IMPERMEABLE
	VALANGINIEN	Calcaires	5 à 30m	PERMEABLE
	NEOCOMIEN	Calcaires marins		
	JURASSIQUE SUPERIEUR OU CRETACE INFERIEUR	Conglomérats, grès et argiles rouges		
	JURASSIQUE SUPERIEUR	Calcaires gypsifères	200m	PERMEABLE
	PERMOTRIAS	Conglomérats, argiles et sables rouges	200m	IMPERMEABLE
	PRIMAIRE	Schistes, grès, quartzites et calcaires		IMPERMEABLE

- LIMITE ENTRE LE SAHEL ET LE SAHARA (LIMITE ALLEMANNE)
- LIMITE SAHARA ET SAHARA OCCIDENTAL (LIMITE SAHARA)
- FAUILLE OBSERVEE
- FAUILLE MASQUEE OU SUPPOSEE
- FLEUVES
- ⊕ PENTE FORT
- ⊕ PENTE MOYENNE
- ⊕ PENTE FAIBLE
- HORIZONTALITE
- VERTICALITE

D'APRES LA CARTE GEOLOGIQUE AU 1/200000 DRESSÉE PAR M. GAZAT ET PUBLIÉE EN 1954 (FEUILLES DE SAFI ET EL JADIDA "MOROCQUE")

DRESSEE PAR	DESSINEE PAR	DATE	ECHELLE
A. CHTAÏNI	B. ZAABOUL		0 2 km

A Sidi Smain et à 14 km au SW de ce dernier, on note une concavité des courbes isopièzes orientée vers l'amont. Il s'agit de deux zones de forte alimentation qui s'expliquent par la morphologie du mur du Plio-Quaternaire.

Pour la zone côtière, l'espacement des courbes piézométriques est constant sur une profondeur de 10 km.

III.4.3 - Entre Sidi Moussa et El Jadida (Sahel d'El Jadida)

Les eaux circulent dans les calcaires marneux du Cénomanien. L'écoulement se fait vers l'océan dans la zone côtière avec une direction NE-SW. A l'Est du plateau cénomanien, l'écoulement se fait vers le continent avec une direction NE-SW. Au Sud du plateau mazaganais (plateau cénomanien), on note une protubérance dans la surface piézométrique. Cette protubérance est constituée par des courbes isopièzes de forme elliptique. Cette structure peut être provoquée par trois causes qui peuvent agir simultanément ou isolément: alimentation locale (profonde ou de surface), variation de la perméabilité ou irrégularité du substratum imperméable.

La perméabilité du Cénomanien est assez constante, ceci est attesté par les coupes de nombreux forages exécutés dans le secteur. Le substratum imperméable a une structure anticlinale et ne peut expliquer cette anomalie. Ne reste donc que l'hypothèse d'une alimentation locale profonde, car l'alimentation de surface est inexistante en cet endroit.

III.4.4 - Entre le plateau mazaganais et l'Oum-er-Rbia (Sahel d'Azemmour)

Le Plio-Quaternaire repose sur les calcaires crétacés et la nappe n'est pas liée à un niveau stratigraphique déterminé. Elle circule tantôt dans le Plio-Quaternaire tantôt dans les calcaires crétacés: il s'agit d'une nappe généralisée.

L'écoulement se fait toujours vers l'océan. Il est d'abord de direction NW-SE puis N-S. Les courbes piézométriques sont perpendiculaires à l'oued: donc la nappe est sans relation hydraulique avec l'Oum-er-Rbia à l'exception de deux zones: au niveau du puits 1126/27 et au niveau de la source Mozgella (1533/27) qui correspondent à deux zones d'alimentation expliquées par le pendage des calcaires crétacés. On note également une zone de convergence des lignes de courant avec un axe de drainage de direction d'abord NW-SE (entre les puits 1080/27 et 1322/27) puis N-S (entre les puits 1322/27 et l'Océan). Cet axe dans sa partie nord coïncide avec l'axe du synclinal d'Azemmour.

III.5 - REGIME DE LA NAPPE

Afin d'observer le régime des eaux souterraines, des mesures de niveau hydrostatique ont été effectuées mensuellement durant l'année hydrologique 1984-1985 dans huit puits.

Deux groupes de puits peuvent être distingués (fig.18).

Le premier où les fluctuations piézométriques sont pratiquement nulles (493/34) ou indépendantes du régime pluviométrique (1398/34). Il s'agit de puits situés à l'aval hydraulique du périmètre d'irrigation et qui sont fortement influencés par l'irrigation (infiltration des eaux issues du barrage d'Imfout).

Le deuxième groupe est situé dans le Sahel de Safi à "l'abri" des perturbations de l'irrigation. Les courbes de variation du niveau des eaux dans ces puits montrent que le niveau le plus bas s'observe en Septembre, Octobre et Novembre alors que le niveau le plus haut se situe à la fin Mars - début Avril.

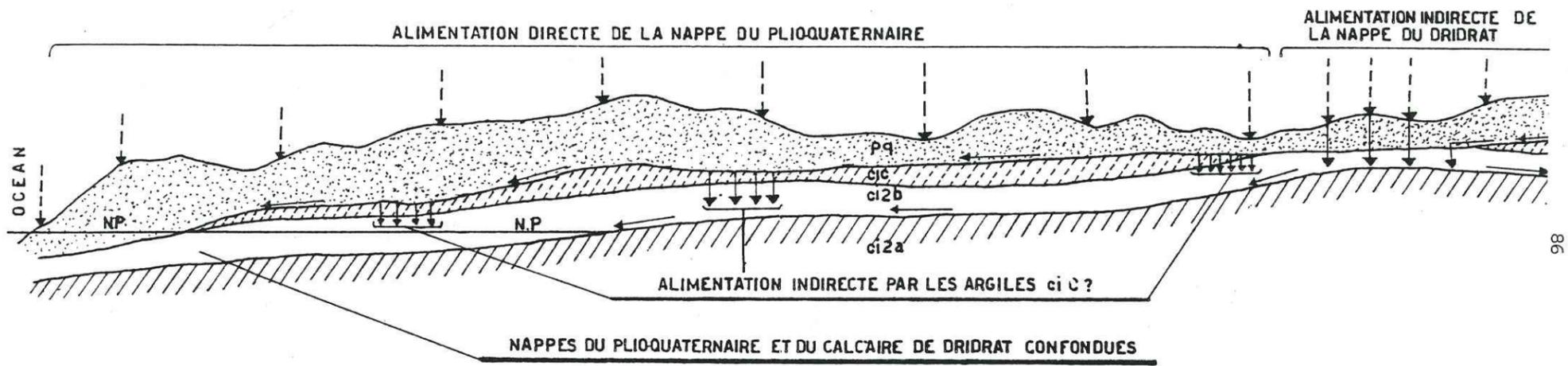
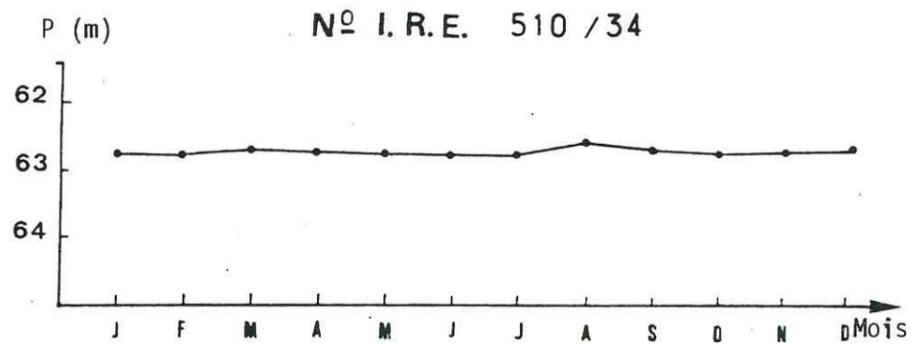
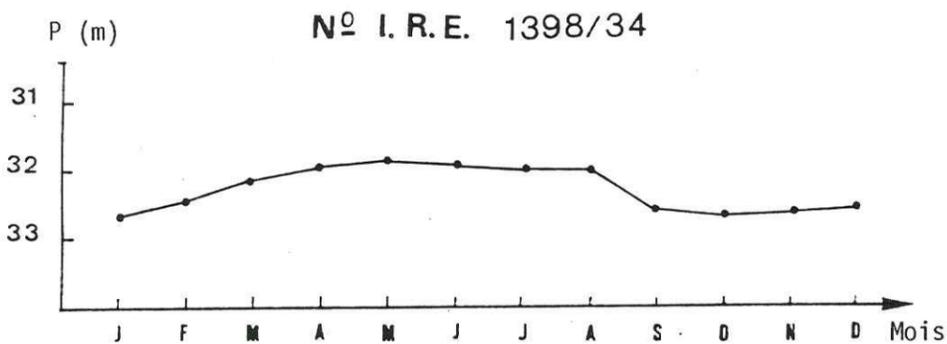
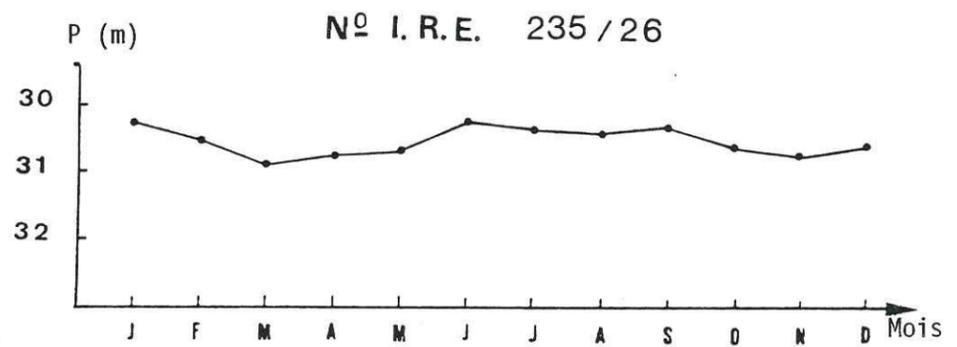
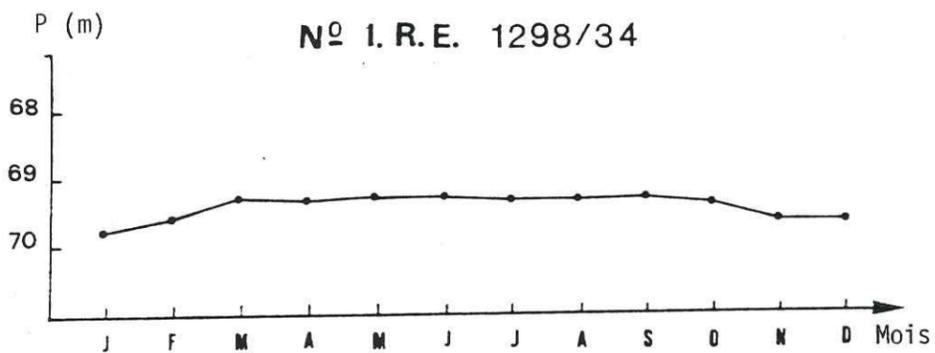


Figure 17 SCHEMA DE L'HYDROGEOLOGIE DU SAHEL

Pq - PLIOQUATERNAIRE, ciC - ARGILES DE L'HAUTERIVIEN SUPERIEUR, ci2b - CALCAIRES DE L'HAUTERIVIEN MOYEN, ci2a - MARNES DE L'HAUTERIVIEN INFERIEUR



P = profondeur

Figure 18a - Courbes de variation de la profondeur des eaux souterraines

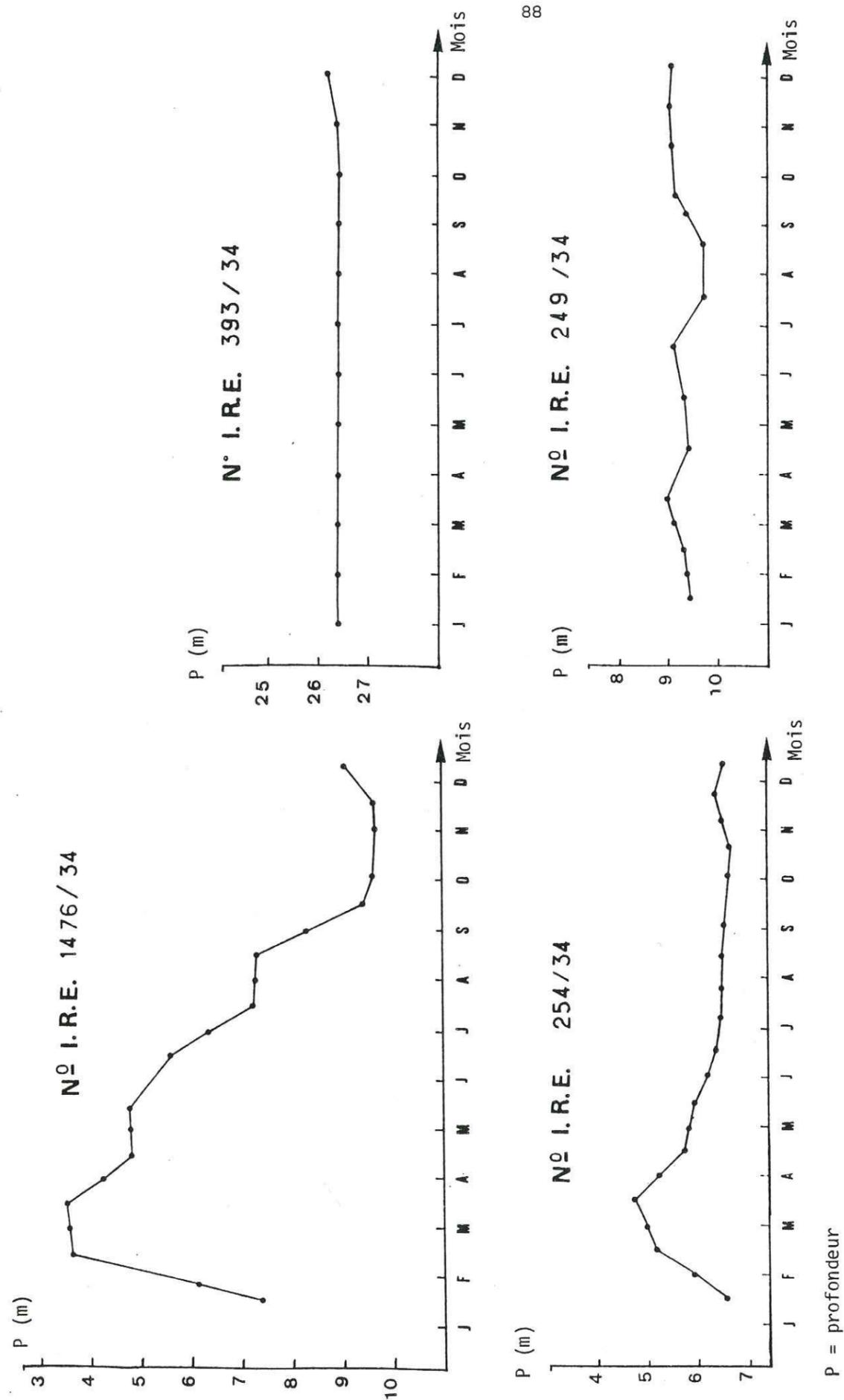


Figure 18b - Courbes de variation de la profondeur des eaux souterraines

Les précipitations mensuelles atteignent leur maximum au mois de Décembre et leur minimum en Juin, Juillet et Août; on note donc un décalage de un à deux mois entre le maximum des précipitations et la montée des eaux souterraines, ce qui montre que ces dernières dépendent essentiellement de la pluviométrie.

III.6 - FLUCTUATIONS DE LA NAPPE

A partir des données piézométriques des hautes et des basses eaux, on aurait pu dresser une carte des fluctuations de la nappe. Mais étant donné que la nappe du Sahel est constamment alimentée par l'infiltration des eaux d'irrigation comme nous l'avons montré, il nous a paru inutile de tracer cette carte qui en aucun cas ne traduirait le régime naturel de la nappe et pourrait nous conduire à l'erreur.

III.7 - ZONES D'ALIMENTATION

L'analyse des cartes piézométriques permet de localiser les zones d'alimentation de la nappe du Sahel.

L'alimentation s'effectue pour une part importante par les eaux d'irrigation surtout dans la région de Sidi Smain, par l'oued Oum-er-Rbia au N-E du Sahel et pour une part moindre par l'infiltration des eaux de pluie.

Au niveau du Sahel d'El Jadida il y a probablement une alimentation d'origine profonde en provenance des calcaires crétacés sous-jacents aux calcaires cénomaniens. Cette hypothèse reste à vérifier par des travaux de sondage.

III.8 - CONCLUSION

L'étude piézométrique de la nappe du Sahel nous a permis de définir les directions de l'écoulement qui s'effectue vers l'océan, de mettre en évidence les relations hydrauliques avec l'Oum-er-Rbia d'une part et avec le périmètre d'irrigation des Doukkala d'autre part.

Les cartes piézométriques permettent également les mesures du gradient hydraulique et de voir sa variation dans le temps et dans l'espace.

Quant à l'alimentation de la nappe aquifère, elle s'effectue essentiellement par l'infiltration des eaux d'irrigation par les apports souterrains de l'Oum-er-Rbia ainsi que par l'infiltration des eaux de pluies.

CHAPITRE IV

THERMOGRAPHIE

IV.1 - PRINCIPE DE LA THERMOGRAPHIE

IV.2 - APPLICATION

IV.2.1 - Moyentechniques mis en oeuvre

IV.2.2 - Interprétation des thermophotos

IV.2.2.a- Bande 3 - Zone de Safi

IV.2.2.b- Bande 5 - Cap Benddouza

IV.2.2.c- Bande 6.2 - Sud d'El Qualidia

IV.2.2.d- Bande 6.4 - El Qualidia

IV.2.2.e- Bande 7.2 - Jorf Lasfar

IV.2.2.f- Bande 8 - Embouchure de l'Oum-Er-Rbia

IV.3 - CONCLUSION

IV.1 - PRINCIPE DE LA THERMOGRAPHIE

Comme toutes les méthodes de télédétection, la thermographie est principalement fondée sur la notion de spectre électromagnétique: les éléments de l'écorce terrestre (roches, sols, végétation et eau), réfléchissent le rayonnement solaire en émettant une quantité d'énergie qui dépend:

- . de la longueur d'onde;
- . de l'intensité du rayonnement incident;
- . des caractéristiques des objets, en particulier des caractéristiques d'absorption.

La mise en oeuvre de la thermographie dépend essentiellement:

- . des vecteurs: avions, satellites..
- . des capteurs et détecteurs associés.

Un capteur est un appareil capable de recevoir le rayonnement qui vient du sol dans une certaine gamme de longueurs d'ondes et de le transformer en un signal permettant la mémorisation de l'information.

Les principaux capteurs sont les suivants:

- . appareil photographique
- . radiomètre à balayage multispectral (visible)
- . radiomètre thermique à balayage mono ou multispectral;
- . radar latéral.

Les trois premiers agissant en mode passif enregistrent un rayonnement réfléchi ou émis naturellement par les objets. Le radar agit en mode actif c'est-à-dire qu'il capte le rayonnement rétrodiffusé d'un faisceau d'ondes qu'il a lui même émis.

Le principe des radiomètres thermiques est de capter séparément, grâce à un dispositif optique, le rayonnement suivant certaines plages de longueurs d'onde et d'enregistrer quantitativement le signal correspondant sur une bande magnétique.

Le dispositif est composé de trois parties (Fig.19):

- . un miroir tournant balayant le sol;
- . des détecteurs qui captent l'énergie et permettent sa transformation en un signal électrique;
- . un système d'enregistrement.

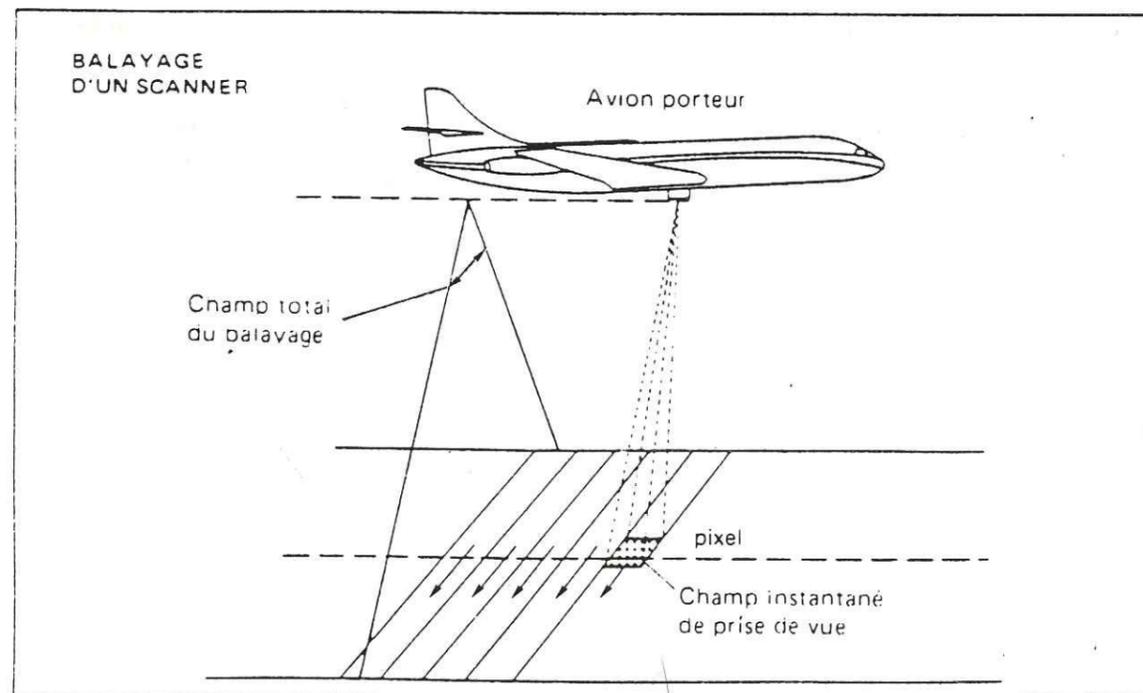
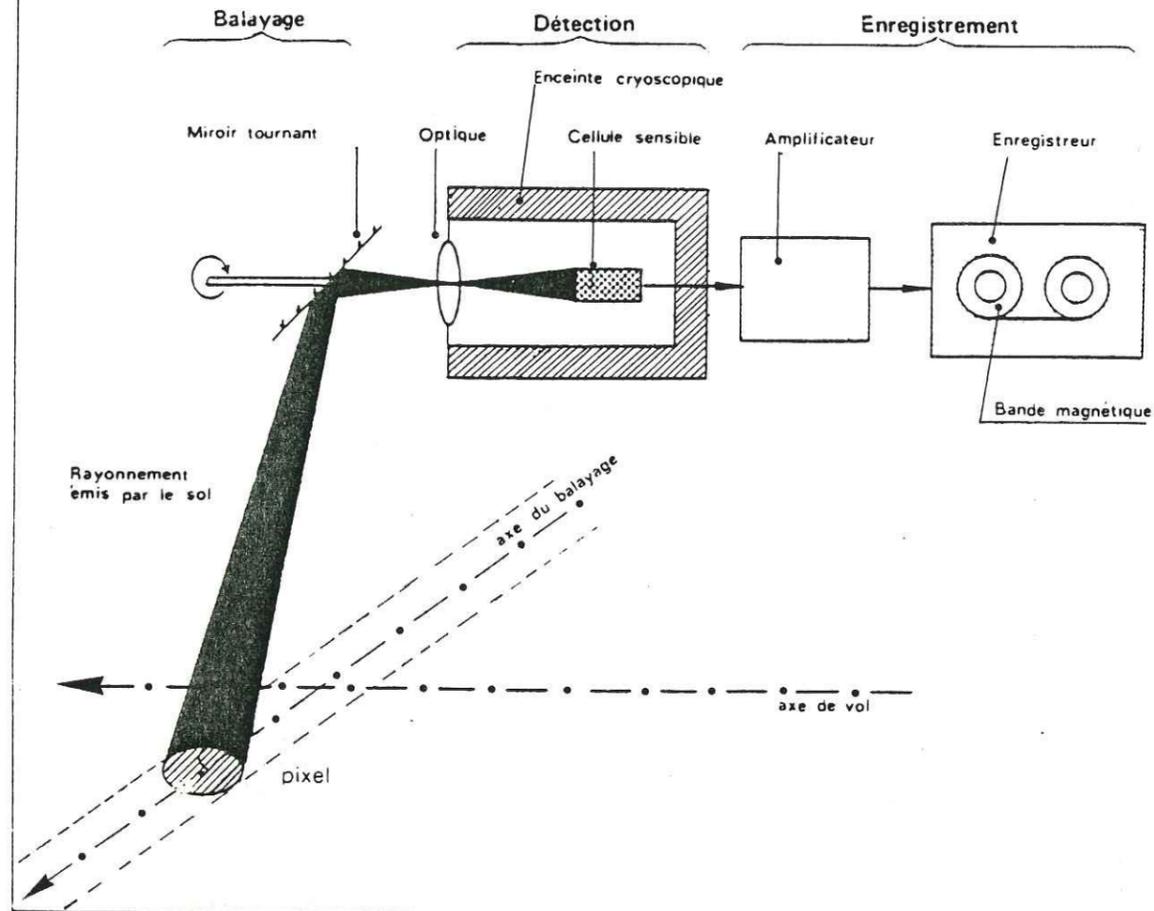
Les radiomètres thermiques sont conçus pour enregistrer les ondes électromagnétiques émises par les objets et matériaux de la surface terrestre entre 3 et 14 microns, c'est-à-dire correspondant à l'infrarouge thermique.

Le procédé, utilisé en milieu homogène, permet de mettre en évidence des variations très fines de la température (le même objet émet des rayonnements différents selon sa température).

IV.2 - APPLICATION

Dans le but de rechercher d'éventuels déversements à la mer des nappes côtières marocaines, la D.R.E. a fait appel à l'I.G.N. pour une étude thermographique de la côte atlantique, le Sahel faisant partie des secteurs prospectés.

Figure 19 - SCHEMA THEORIQUE D'UN RADIOMETRE A BALAYAGE (SCANNER)



La succession des opérations s'établit comme suit:

- étude préliminaire des conditions thermiques (janvier, février, 1976);
- exécution de l'enregistrement systématique à 1/80 000 aux deux périodes de marée (haute et basse) (mars, avril 1976);
- choix des périmètres à reprendre à 1/30 000 (avril 1976);
- exécution de l'enregistrement à 1/30 000 (avril 1976).

IV.2.1 - Moyens techniques mis en oeuvre

Le vecteur utilisé est un avion de l'I.G.N. de type B.17. L'altitude du vol est de 9500 pieds environ, ce qui correspond à une échelle de 1/80.000 pour une restitution sur film 70 mm.

Le vecteur équipé d'un appareil à balayage DAEDALUS, version D1230 travaillait dans deux canaux de l'infrarouge thermique: de 3 à 5 m et de 8 à 14 m.

Le dispositif est composé essentiellement d'un miroir tournant à une vitesse de 80 tours/seconde, un miroir parabolique localisant le flux et le renvoyant sur le détecteur.

Les informations sont enregistrées sur bande magnétique à l'aide d'un enregistreur SANGAME, SABRE III.

La résolution radiométrique est supérieure à ce qui est nécessaire pour obtenir une précision thermique de 0,2°C. Après la mission, un document photographique a été livré avec un commentaire provisoire.

IV.2.2 - Interprétation des thermophotos

La température des eaux souterraines varie avec la profondeur de la nappe. Pour la nappe du Sahel on a:

. la nappe à -1 m	: 17°5 C
. la nappe à -4 m	: 18°5 C
. la nappe à -5 à -6 m	: 19°5 C
. la nappe à -30 m	: 23° C

La température de la mer varie entre 15°5C et 16°5C; celle de la lagune d'Eloualidia atteint 17°C. Donc la température des eaux de la nappe du Sahel est plus élevée que celle des eaux marines et la thermographie permet de localiser ces anomalies thermiques qui sont interprétées comme les zones de déversement des eaux de la nappe dans la mer.

L'interprétation des thermophotos consiste à délimiter ces anomalies thermiques. Ceci apparaît en trait continu lorsqu'il s'agit de fronts nettement apparents, en tireté pour les limites indécises.

L'interprétation est d'autant plus aisée que le contraste de température est grand et que le débit déversé est élevé.

IV.2.2.a - Bande 3 - zone de Safi (fig.20 a)

Les enregistrements thermographiques sur cette région ne permettent pas de discerner des sorties éventuelles de sources sous-marines étant donné le nombre élevé d'égouts qui se jettent directement dans l'océan.

IV.2.2.b - Bande 5 - cap Beddouza (fig.20b)

A part la baie de Sidi Ali Their, où un apport continental d'eau douce a été mis en évidence, les renseignements sont d'ordre courantologique. On constate un changement dans la répartition des masses océaniques autour de Cap Beddouza. Aucun exutoire possible n'est envisageable sur cet enregistrement à l'exception de la zone située au niveau d'une source disparue sous les éboulis.

Figure 20a - THERMOGRAPHIE
 RESULTAT DE L'INTERPRETATION DES THERMOPHOTOS

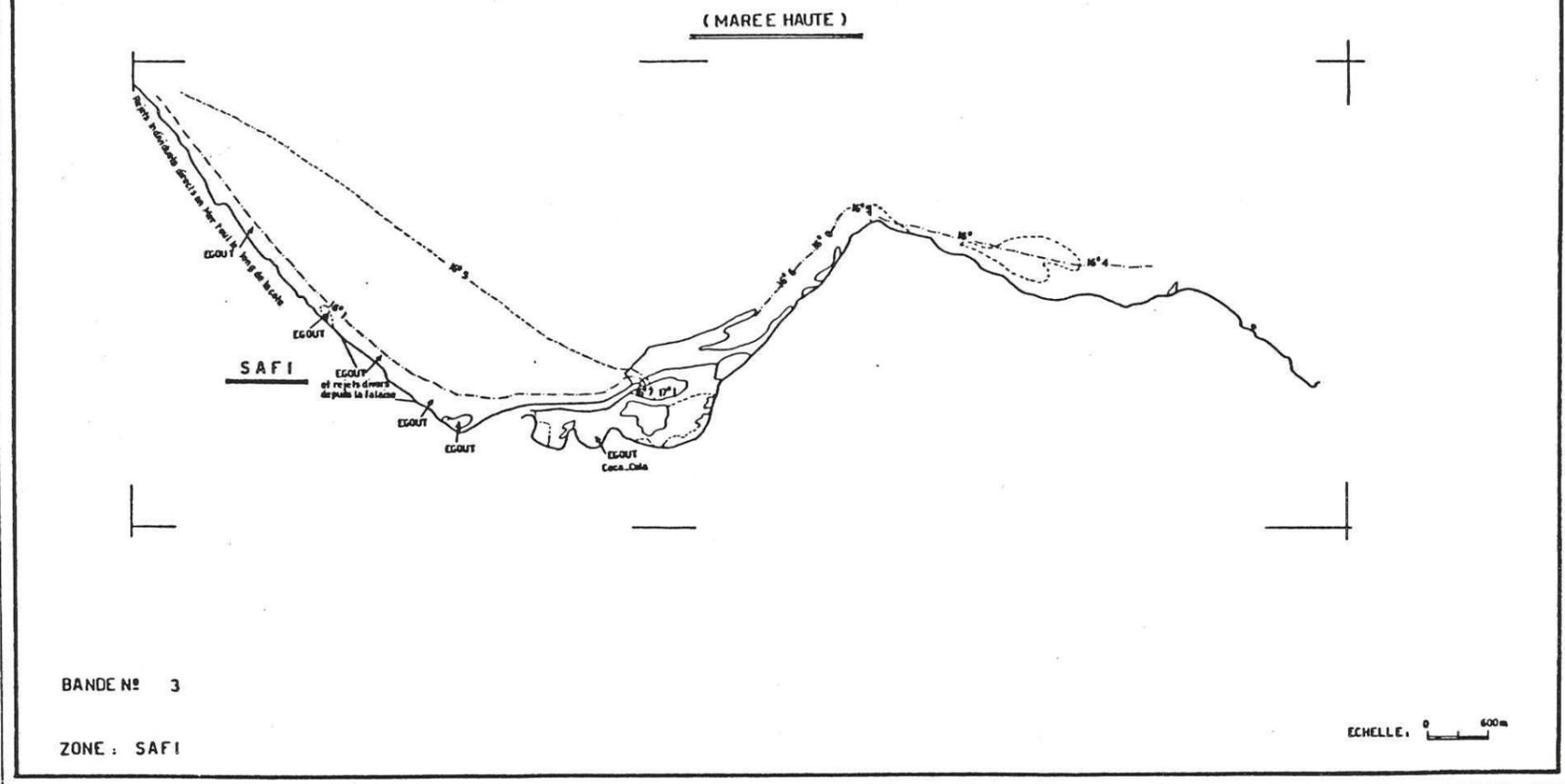
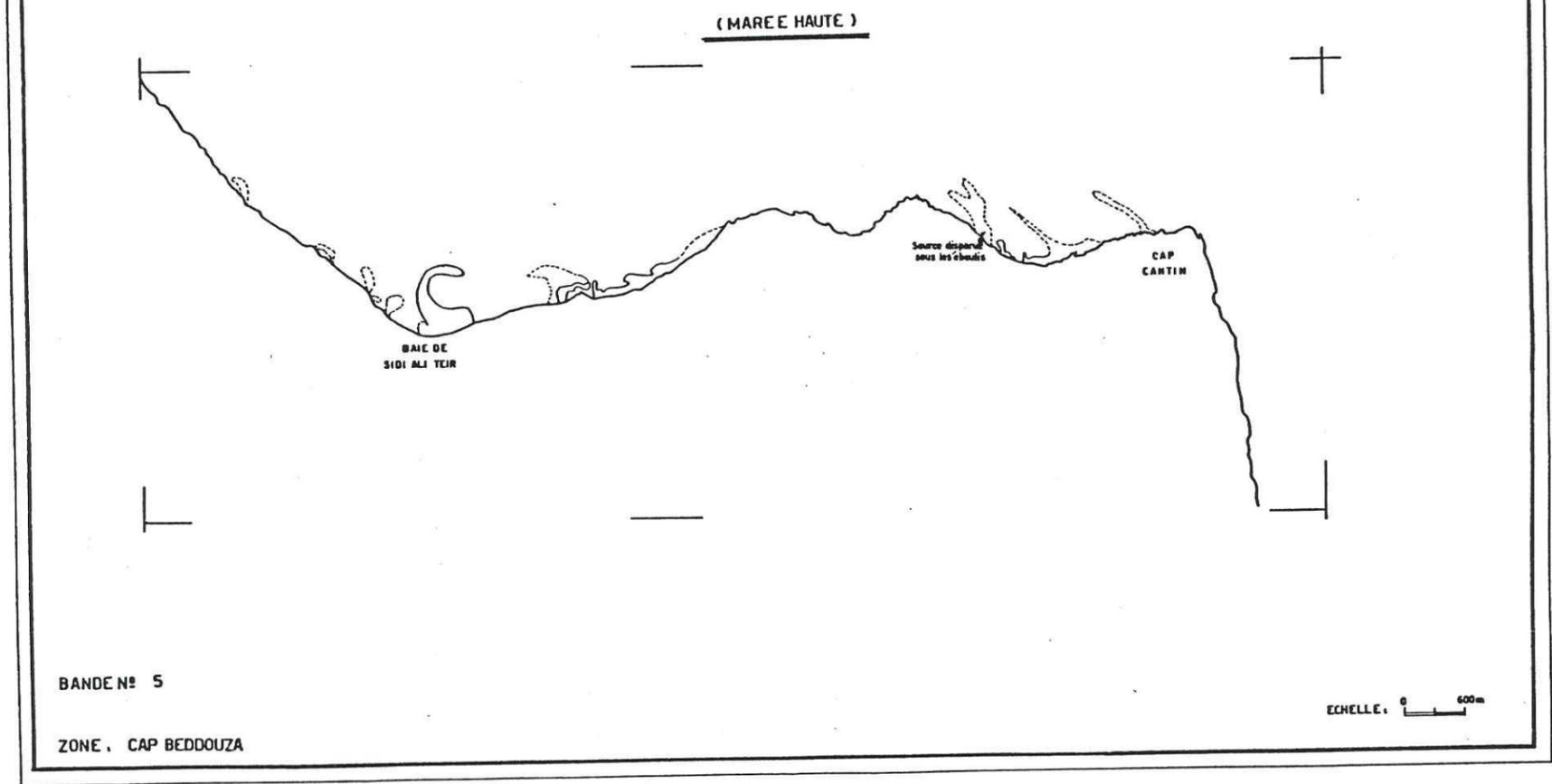


Figure 20b - THERMOGRAPHIE
 RESULTAT DE L'INTERPRETATION DES THERMOPHOTOS



IV.2.2.c - Bande 6.2 - Sud d'El Oualidia (fig.20 c)

Un examen minutieux des enregistrements fait sentir quelques traces de densité de gris plus fortes.

Ces panaches sont d'ailleurs représentés par trait tireté pour montrer l'imprécision des contours, mais leur existence est confirmée par la valeur élevée du gradient hydraulique de la nappe dans cette zone.

IV.2.2.d - Bande 6.4 - El Oualidia (fig. 20d)

Au Nord d'El Oualidia, les écarts de température et de résistivité étaient compris dans le demi-degré et les $10 \mu s/cm$. La température de la lagune est supérieure de $1^\circ C$ à l'eau de mer. De plus sa résistivité est plus grande. L'apport d'un égout reconnu sur le terrain peut justifier une résistivité plus élevée que celle de l'eau de mer.

IV.2.2.e - Bande 7.2 - Jorf Lasfar (fig. 20e)

Cette bande est celle qui offre le plus de contrastes, donc de renseignements. Toute cette partie de la côte est bordée d'une masse chaude d'où sortent quelques panaches de grande étendue. C'est la zone où le déversement de la nappe est maximal.

On peut observer un fort écoulement qui proviendrait de la vidange de la marée mélangée à de l'eau douce. Mais partout la résistivité reste très élevée et les températures, bien qu'irrégulières, ne descendent pas en-dessous de $17^\circ C$.

La présence massive d'algues vertes, le long de la côte, témoigne également d'une arrivée d'eau douce.

IV.2.2.f - Bande 8 - Embouchure de l'Oum-Er-Rbia (fig.20f)

L'analyse des enregistrements thermographiques décèle quelques anomalies thermiques positives. Mais il est difficile de conclure qu'il s'agit d'écoulement de la nappe, car il peut s'agir de l'écoulement d'eaux usées ou d'apport partiels de l'oued.

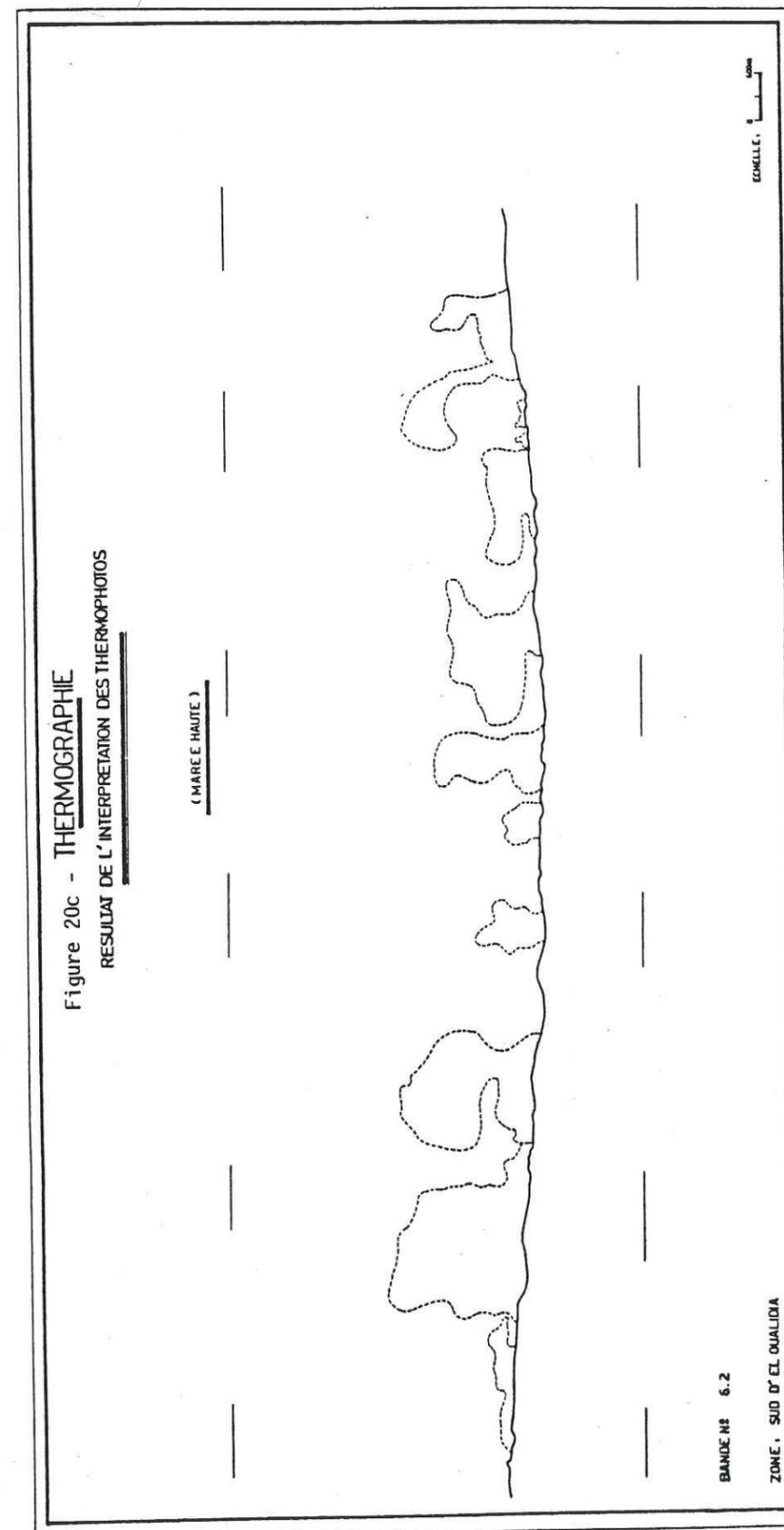
Le faible gradient hydraulique de la nappe et la présence d'un biseau salé avancé en ce secteur sont en faveur de la seconde hypothèse.

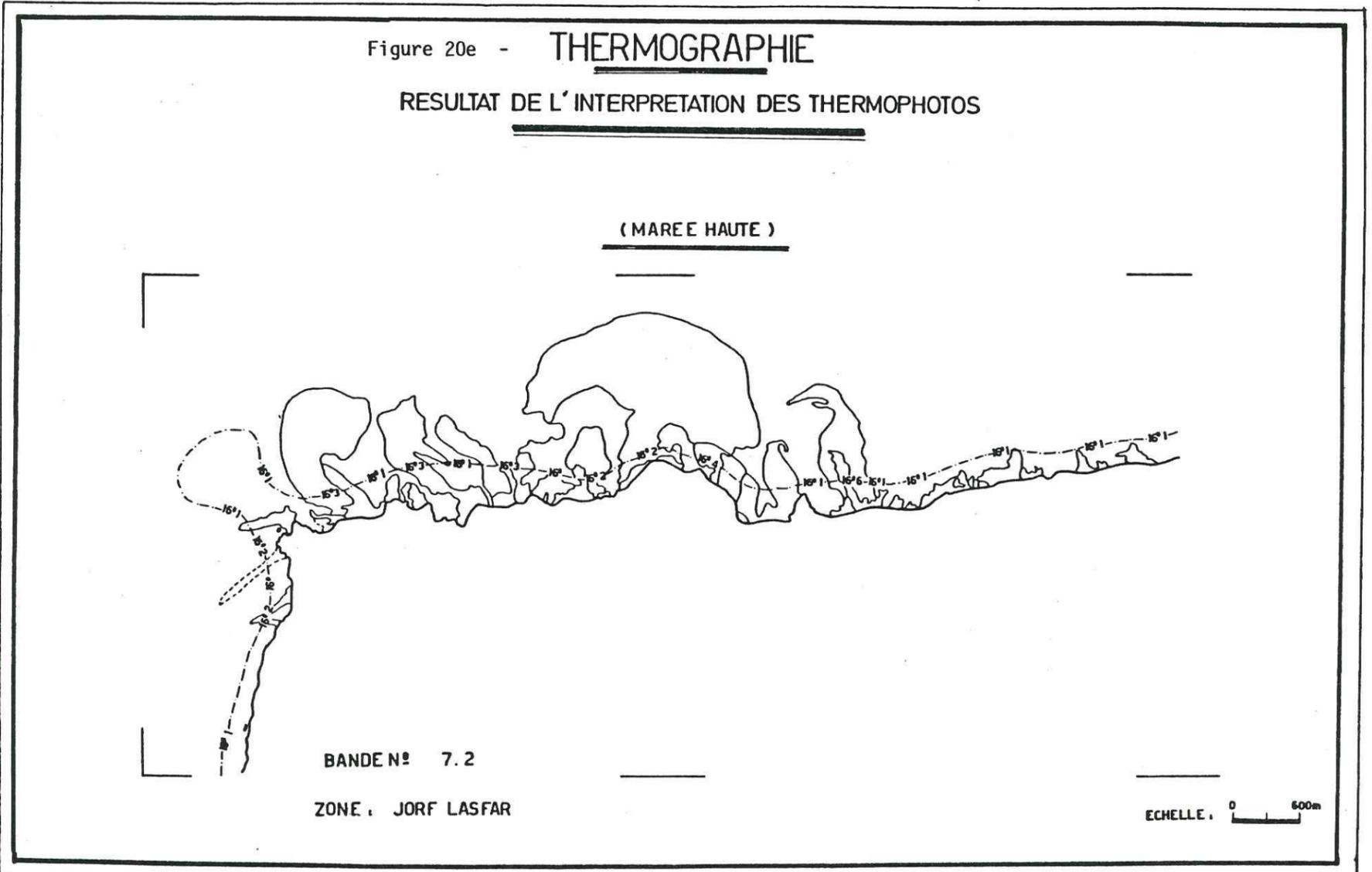
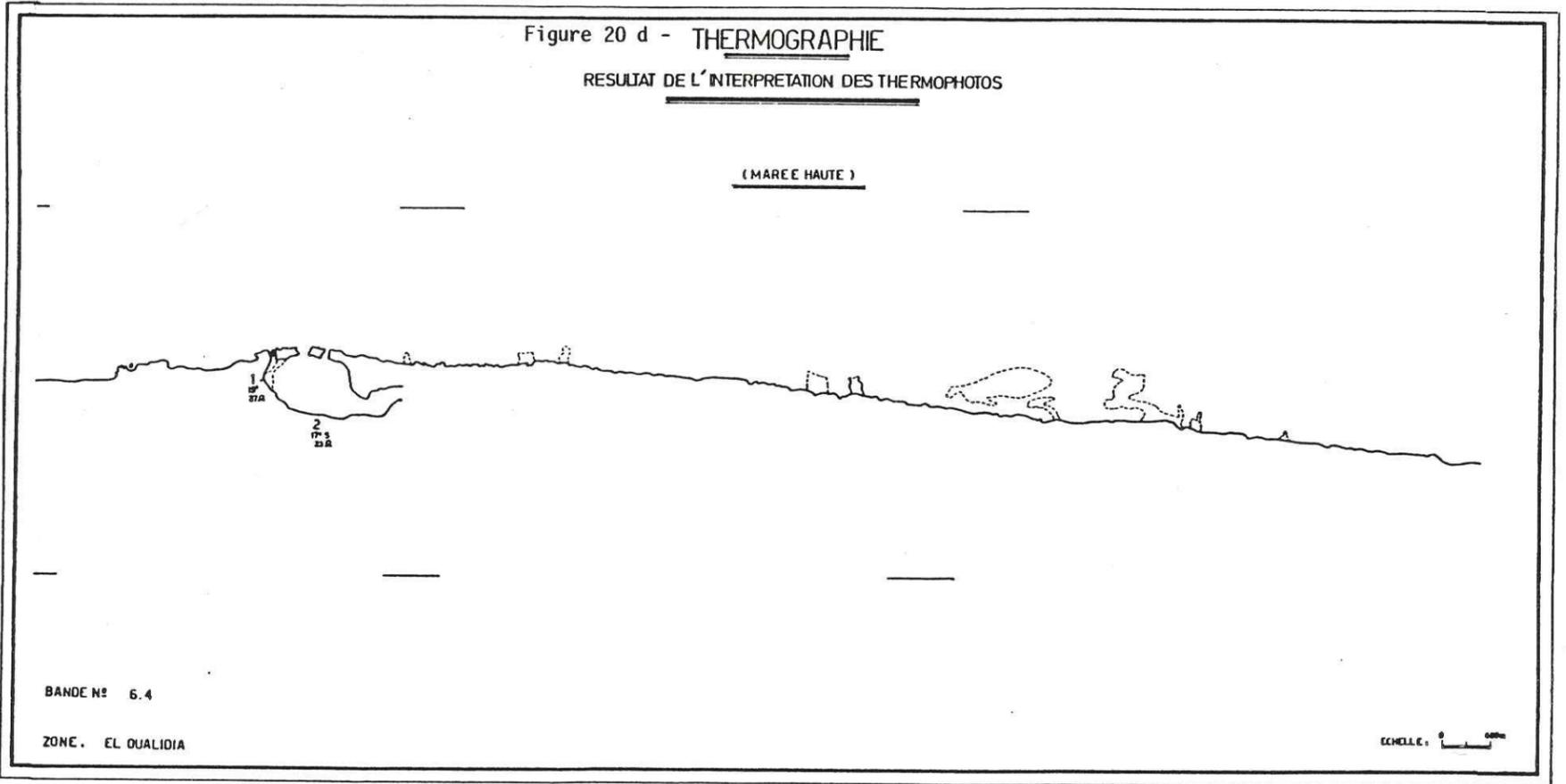
IV.3 - CONCLUSION

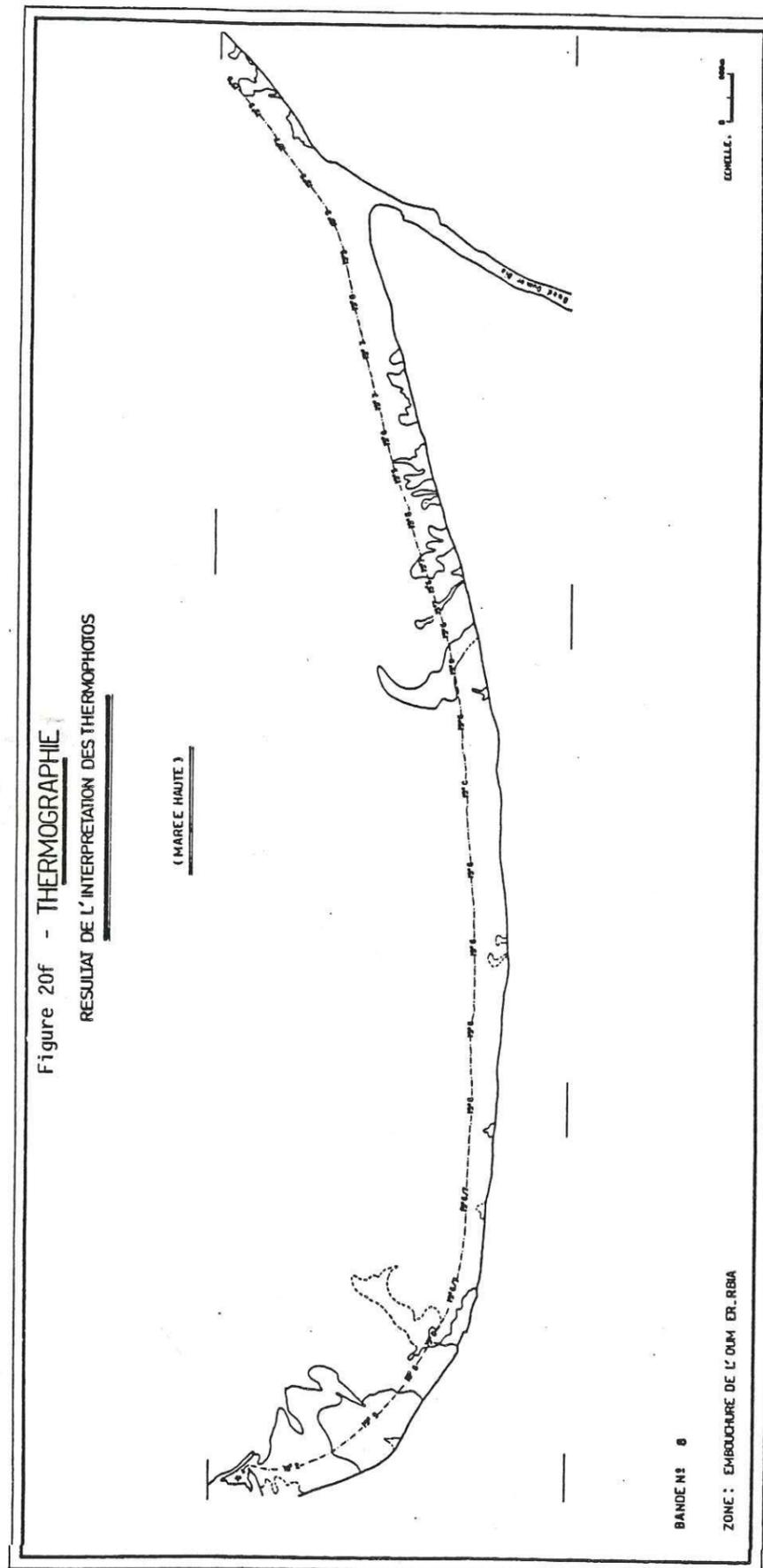
La thermographie à l'aide des mesures physiques de l'eau, a permis la mise en évidence et la localisation d'un apport d'eau douce en milieu marin dans quelques cas.

Les écoulements les plus importants d'eau douce se font au niveau de Jorf Lasfar (Bande 7.2).

Les résultats obtenus par l'interprétation des thermophotos semblent confirmer ceux obtenus par la piézométrie. Une photo-interprétation d'ordre géomorphologique et technique, sur une profondeur de quelques kilomètres à l'intérieur des terres, permettrait une approche complémentaire souhaitable.







CHAPITRE V

ETUDE PHYSICO-CHIMIQUE

V.1 - INTRODUCTION

V.2 - ETUDE PHYSIQUE DES EAUX - INTERPRETATION DE LA CARTE DE CONDUCTIVITE

V.3 - CHIMIE DES EAUX SOUTERRAINES

V.3.1 - Capacité d'échange de bases

V.3.2 - Faciès chimiques et interprétation graphique des analyses chimiques des eaux

V.3.3 - Etude de l'origine des ions

V.3.3.1- Carte des teneurs en chlorures

V.3.3.2- Carte des teneurs en sulfates

V.3.4 - Interprétation des cartes d'équirapport

V.3.4.1- Carte d'équirapport r S04/r Cl

V.3.4.2- Carte d'équirapport r Mg/ rCa

V.3.5 - Détermination graphique du CO₂ libre et du pH d'équilibre

V.3.6 - Potabilité des eaux

V.4 - CONCLUSION

V.1 - INTRODUCTION

Les caractères physico-chimiques des eaux de la nappe phréatique sont déduits des mesures directes sur le terrain et d'analyses réalisées ultérieurement en Laboratoire.

Les mesures directes concernent essentiellement la conductivité et la température des eaux. Les appareils de mesure sont étalonnés avant chaque campagne de mesure. La température est prise au 1/10°C.

Les analyses de laboratoire ont été effectuées à l'Office du Haouz et ont porté sur la détermination du résidu à sec et les teneurs en principaux ions des eaux prélevées.

Toutes les analyses sont répertoriées et classées à la D.R.H. de Marrakech. Les caractéristiques de chaque eau analysée sont reportées sur fiche comprenant:

- . le numéro du laboratoire;
- . le numéro I.R.E. du point d'eau;
- . la date et l'heure du prélèvement;
- . la température de l'eau lors du prélèvement;
- . la conductivité électrique ramenée à 25° C;
- . le pH;
- . le résidu à sec;
- . les teneurs de chaque ion (K^+ , Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{--}) exprimées en meq/l et en mg/l;

Ces données vont permettre d'une part d'apprécier la qualité des eaux et d'autre part d'établir des cartes physico-chimiques qui apporteront des indications supplémentaires sur l'écoulement, l'influence des eaux marines, les zones d'alimentation des eaux souterraines ainsi que sur l'origine des ions contenus dans ces derniers.

V.2 - ETUDE PHYSIQUE DES EAUX - INTERPRETATION DE LA CARTE DE CONDUCTIVITE (fig.21)

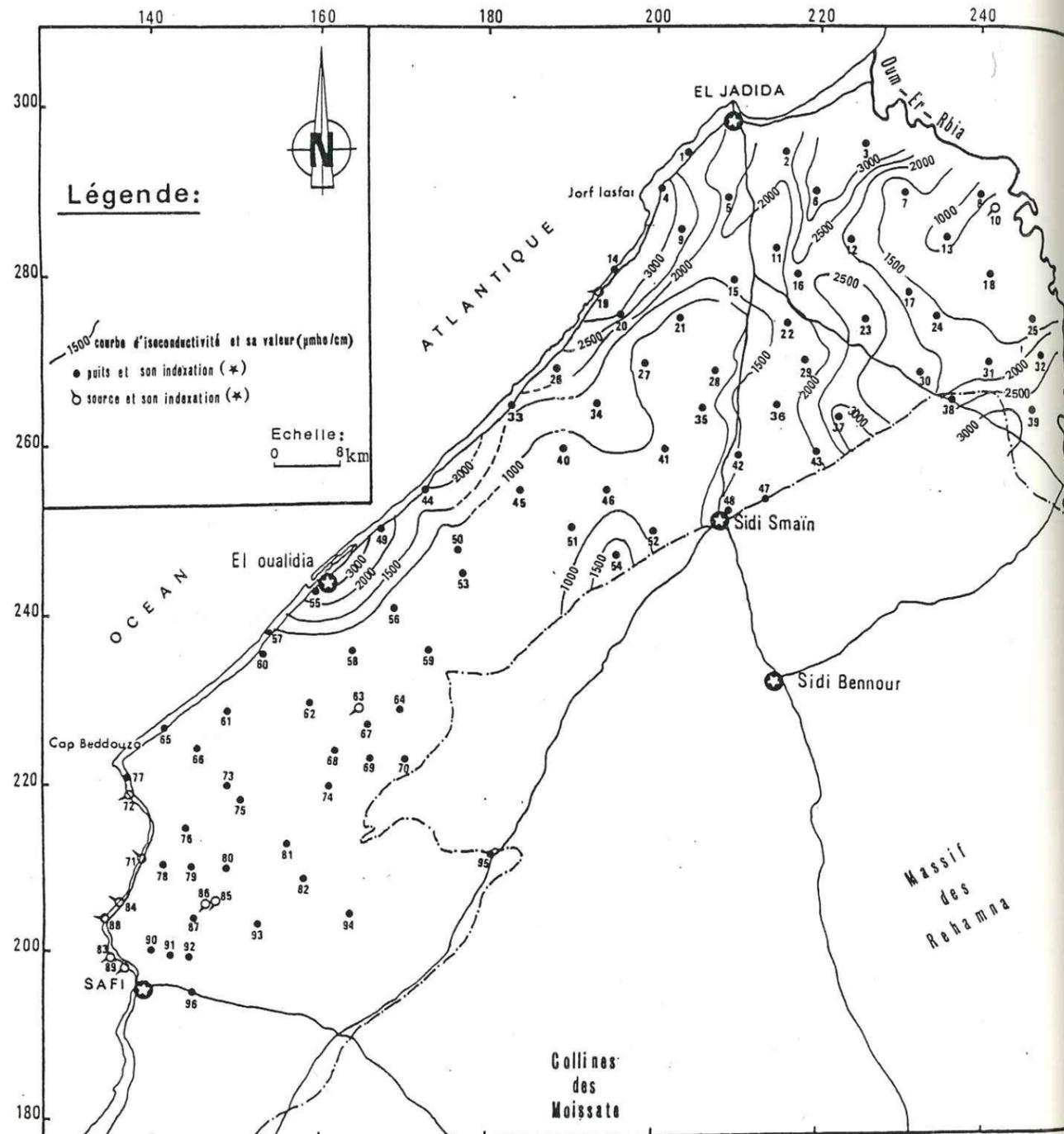
La conductivité d'une eau traduit sa teneur en sels dissous. A partir des mesures de la conductivité des eaux de la nappe aquifère effectuées sur le terrain, nous avons dressé une carte d'isoconductivités. L'analyse de cette carte permet de dégager les remarques suivantes:

- Dans la zone d'El Oualidia, l'augmentation progressive de la conductivité peut être expliquée par le jeu combiné de deux facteurs: la dissolution des calcaires et l'influence marine d'autant plus que la nappe phréatique dans cette zone est fortement sollicitée.

- Dans la zone située entre Sidi Moussa et Jorf Lasfar la conductivité atteint et dépasse 3000 mho/cm. Dans le secteur, en plus de l'influence marine, la perméabilité très faible des calcaires marneux du Cénomaniens permet de prolonger le temps de séjour des eaux souterraines et par conséquent l'augmentation de leur conductivité.

- Dans le secteur situé entre El Jadida et l'embouchure de l'Oumer-Rbia, la conductivité des eaux est très élevée et l'influence marine se fait sentir loin de la côte. Ceci pourrait être expliqué par la qualité des eaux en amont hydraulique (eaux très minéralisées) et par le gradient hydraulique très faible permettant l'avancée du biseau salé loin dans le continent.

Au niveau du synclinal d'Azemmour, on constate une augmentation de la conductivité dans le sous-écoulement des eaux souterraines mis en évidence par la carte piézométrique. Cette augmentation peut être aisément



(*) LA CORRESPONDANCE INDEXATION - N° I.R.E. FIGURE EN ANNEXE

Figure 21 - CARTE DE CONDUCTIVITE (hautes eaux: mars 1985)

expliquée par la dissolution des calcaires. Les eaux se chargent en sels dissous tout au long de leur trajet.

A Sidi-Smaïn et au Sud-Ouest de ce dernier, les courbes d'isoconductivité ont une concavité dirigée vers le périmètre d'irrigation. La conductivité diminue dans le sens d'écoulement ce qui permet de conclure qu'il s'agit bien de l'infiltration des eaux issues du périmètre irrigué de Doukkala; ces eaux étant chargées par les engrais abondamment utilisés dans ce dernier.

En résumé, la minéralisation des eaux a une triple origine:

- . l'invasion du biseau salé;
- . l'infiltration des eaux chargées en engrais;
- . la dissolution des formations aquifères.

Ces facteurs peuvent agir, bien sûr, isolément ou simultanément.

En conclusion, l'analyse de la carte de conductivité permet la confirmation des résultats déjà obtenus par l'étude piézométrique. Les courbes d'isoconductivités ont pratiquement la même allure que les courbes isopièzes.

V.3 - CHIMIE DES EAUX SOUTERRAINES

Les ions qui ont fait l'objet d'analyses chimiques sont:

- . cation: K^+ , Na^+ , Ca^{++} et Mg^{++}
- . anions: Cl^- , HCO_3^- et SO_4^{--}

Les résultats de ces analyses nous ont permis de dresser un certain nombre de cartes chimiques qui permettent d'avoir des indications intéressantes quand à l'origine des ions.

V.3.1 - Capacité d'échange de bases (H. SCHOELLER, 1962)

Certaines substances contenues dans les terrains sont capables d'absorber et d'échanger des cations. Les minéraux argileux et les substances organiques sont les plus gros échangeurs (H. SCHOELLER les appelle permutolites).

La capacité d'échange varie avec le type d'argile:

Kaolinite-Illite-Montmorillonite-Vermiculite

Pouvoir échangeur croissant

Le degré de fixation dépend de la nature des cations (encombrement valence). Quand le numéro atomique croît, l'affinité augmente de même:

$Li > Na > K > Ca$

Les échanges ioniques entre les eaux et les terrains encaissants seront étudiés en considérant l'indice des échanges de bases (i.e.b.) de SCHOELLER qui détermine le sens dans lequel se font les échanges.

$$i.e.b. = \frac{Cl^- - (Na^+ + K^+)}{Cl^-}$$

C'est le rapport entre les ions échangés et les ions de même nature primitivement existants.

Si nous admettons que dans l'eau primitive il y avait autant de rCl^- que de $r(Na+K)$, on peut expliquer la différence entre rCl^- et $r(Na+K)$ par le phénomène d'échange de bases.

Si i.e.b. est positif, les eaux échangent des ions Na^+ contre des ions Ca^{++} et Mg^{++} .

Si i.e.b. est négatif, les eaux échangent des ions Ca^{++} et Mg^{++} contre Na^+ de l'aquifère.

Lorsqu'il y a échange des alcalino-terreux de l'eau contre les alcalins, il est préférable de calculer l'i.e.b. par la formule:

$$\text{i.e.b.} = r \frac{\text{Cl}^- (\text{Na} + \text{K})}{\text{SO}_4 + \text{HCO}_3 + \text{NO}_3}$$

Comme les nitrates n'ont pas été dosés on va se contenter de calculer cet indice par la première formule.

Dans le cas des eaux de la nappe du Sahel de Doukhala, l'i.e.b. est presque toujours négatif et donc les eaux échangent leurs ions Ca et Mg contre l'ion Na qui proviendrait des argiles rouges de l'Hauterivien supérieur (Fig.22).

Dans les zones d'alimentation de la nappe (puits 267/26, 1710/27, 469/27, 666/27 et 1430/27), les eaux ont un indice d'échange de bases positif et échangent leurs ions Na contre les ions Ca et Mg de l'encaissant.

Dans la zone côtière, l'indice d'échange de bases augmente (tout en restant négatif); ceci est dû au mélange des eaux de la nappe avec l'eau de mer dont l'indice est positif.

V.3.2 - Faciès chimiques et interprétation graphique des analyses chimiques des eaux

Pour la représentation graphique des résultats des analyses chimiques nous avons utilisé le diagramme semi-logarithmique de SCHOELLER-BERKALOFF (Fig.23). L'analyse de ces diagrammes montre que les eaux issues d'une même formation géologique et ayant une situation géographique similaire appartiennent à la même famille (courbes parallèles).

Pour définir les classes des eaux analysées, nous avons reporté les résultats des analyses sur le diagramme de PIPER (Fig.24). Les eaux issues de chaque formation sont représentées sur le même diagramme. Les pourcentages des échantillons sont à titre indicatif et n'ont aucune valeur statistique.

On peut distinguer deux grandes classes:

- les eaux chlorurées sodiques;
- les eaux bicarbonatées sodiques et calciques.

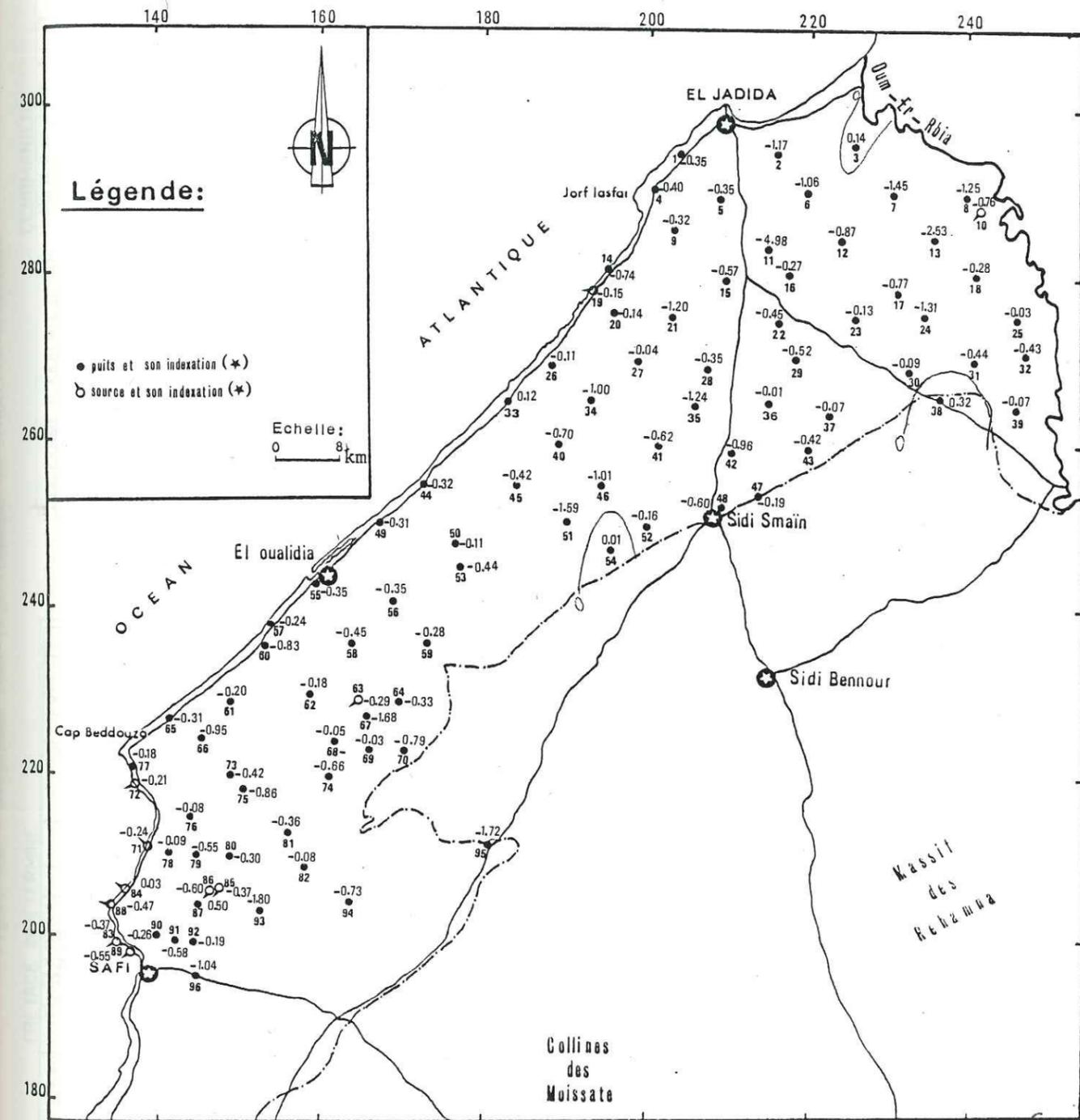
a/ Les eaux chlorurées sodiques: les formules caractéristiques de cette classe sont:

$$r \text{Cl} > r \text{HCO}_3 > r \text{SO}_4 \quad \text{ou} \quad r \text{Cl} > r \text{SO}_4 > r \text{HCO}_3$$

et

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

Ce faciès domine évidemment dans la bordure atlantique, mais également dans le NE du secteur étudié à l'exception de la zone d'alimentation de la nappe par l'Oum-er-Rbia.



(*) LA CORRESPONDANCE INDEXATION - N° I.R.E. FIGURE EN ANNEXE

Figure 22 - CARTE DES VALEURS DE L'i.e.b. ET COURBE i.e.b. = 0 (mars 1985)

Figure 23a - Diagramme semi-logarithmique de SCHOELLER-BERKALOFF

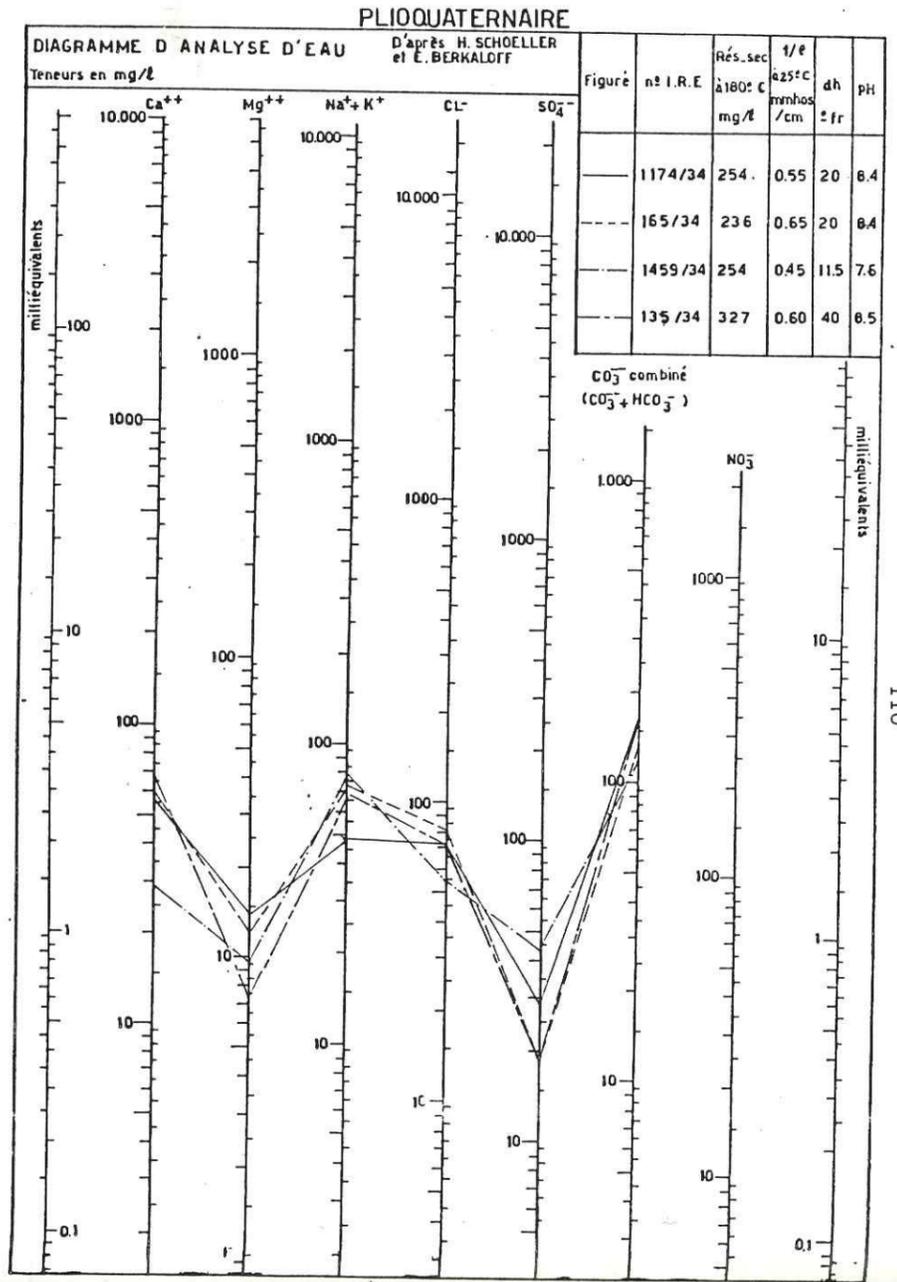
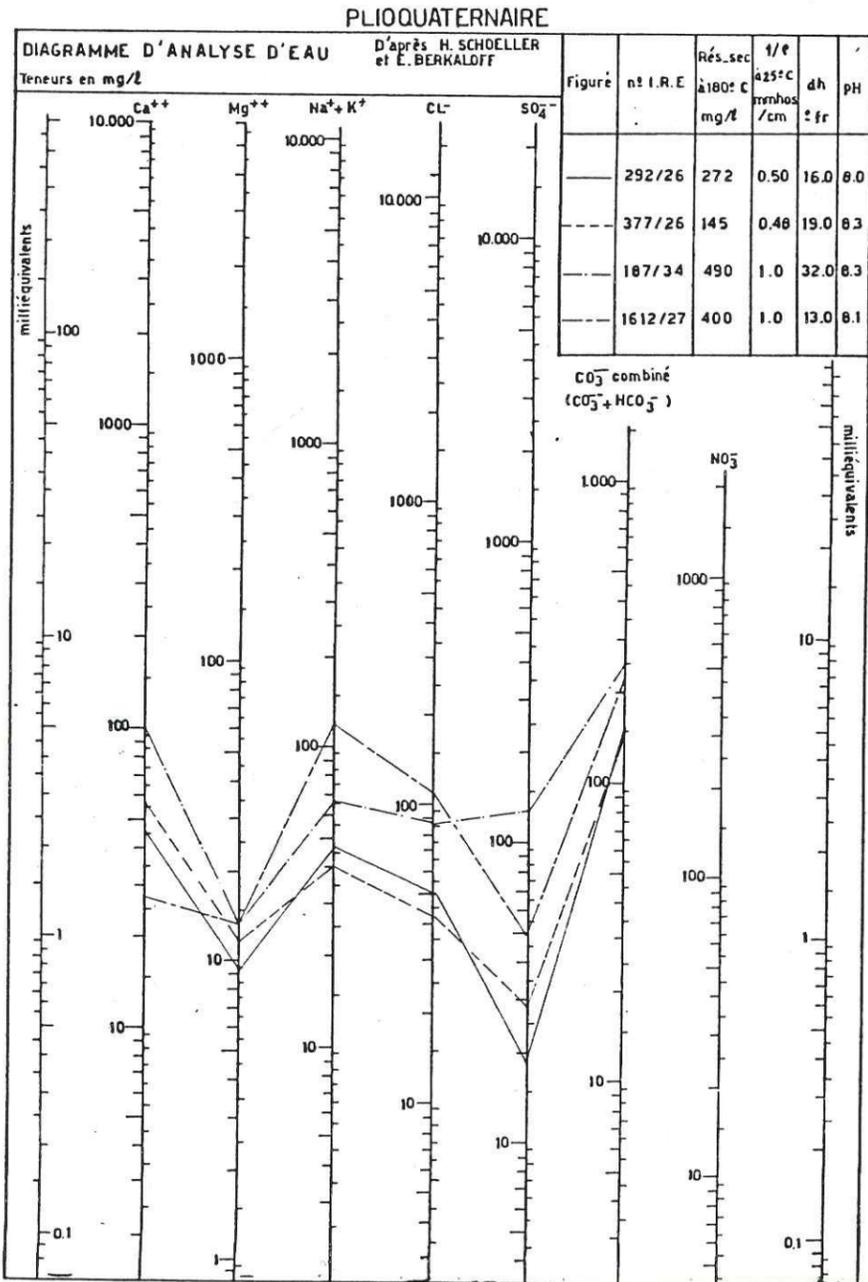


Figure 23b - Diagramme semi-logarithmique de SCHOELLER-BERKALOFF

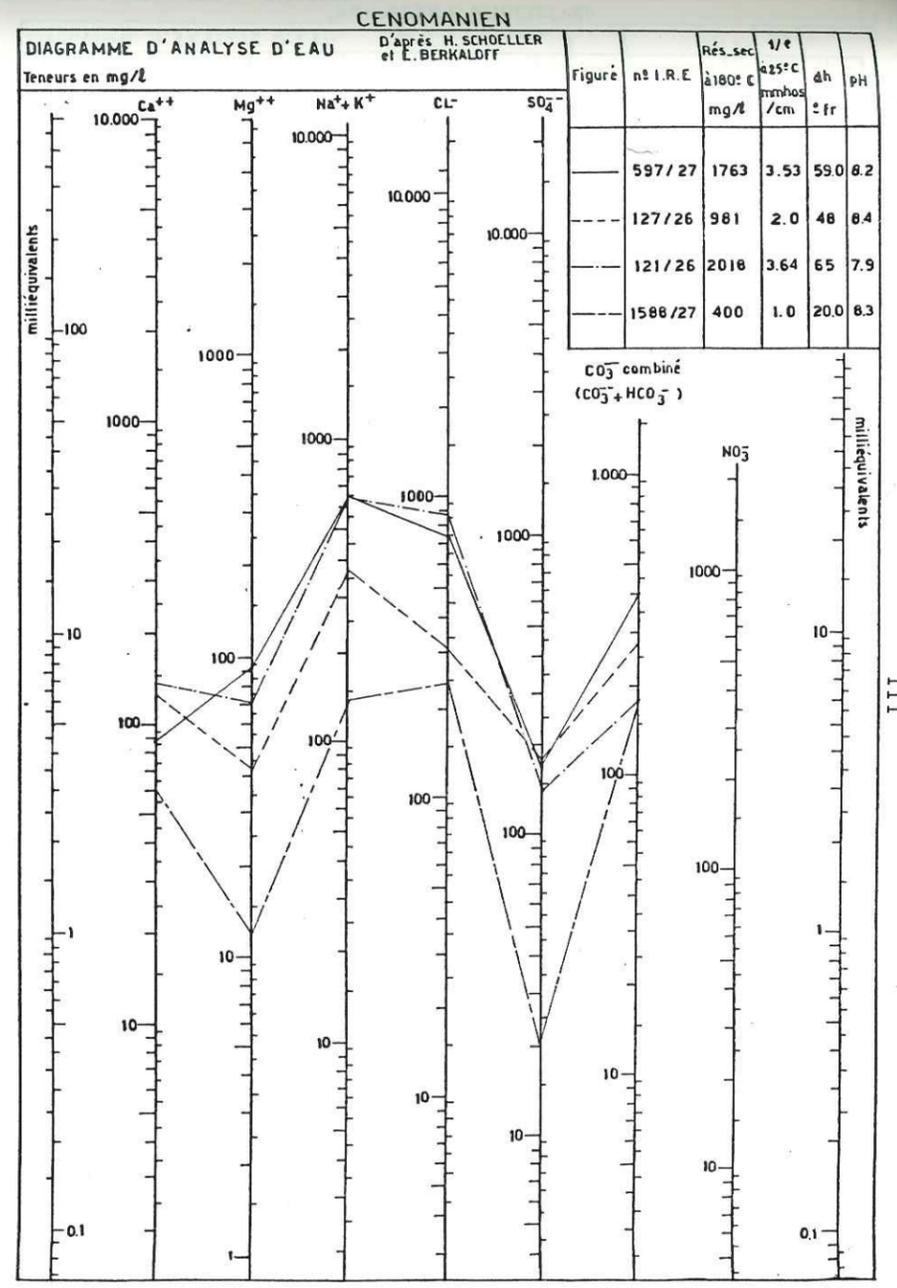
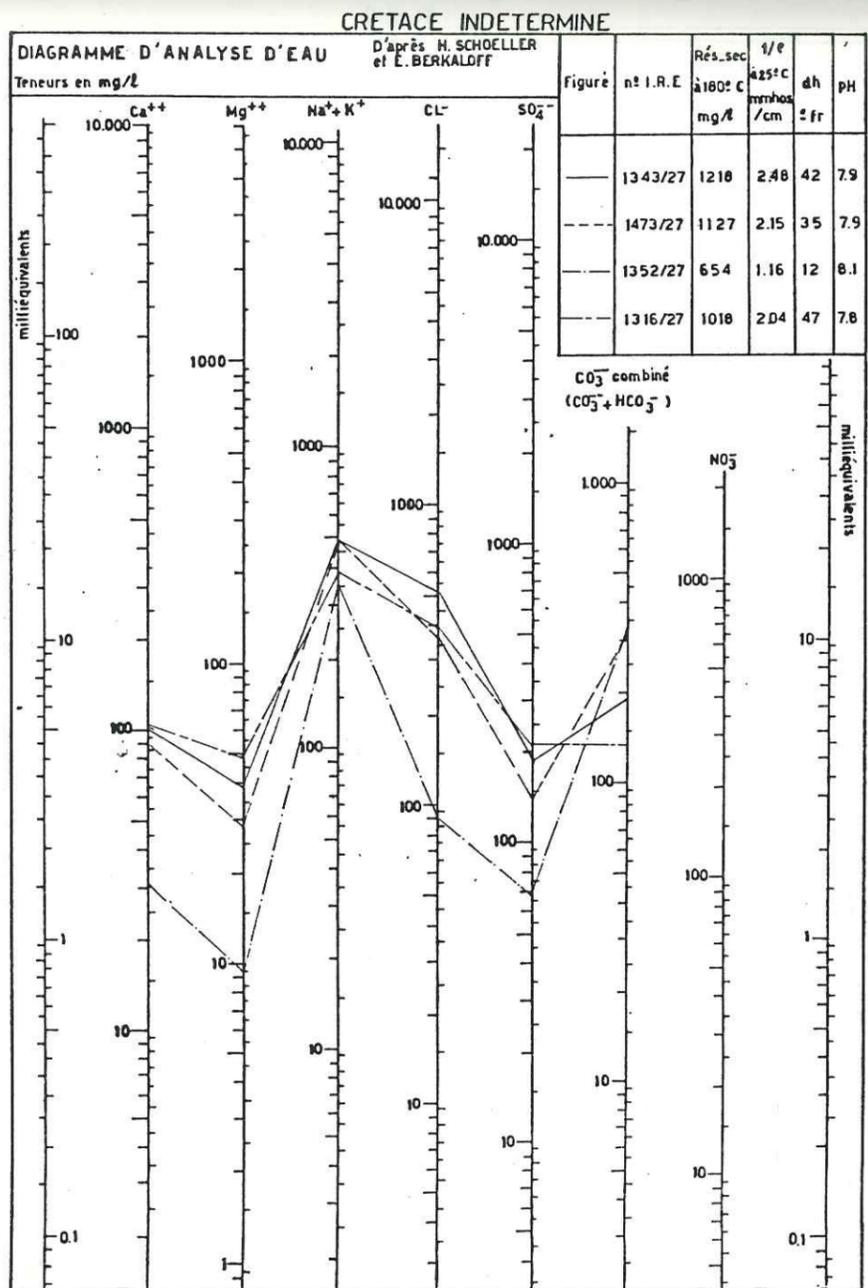


Figure 23c - Diagramme semi-logarithmique de SCHOELLER-BERKALOFF

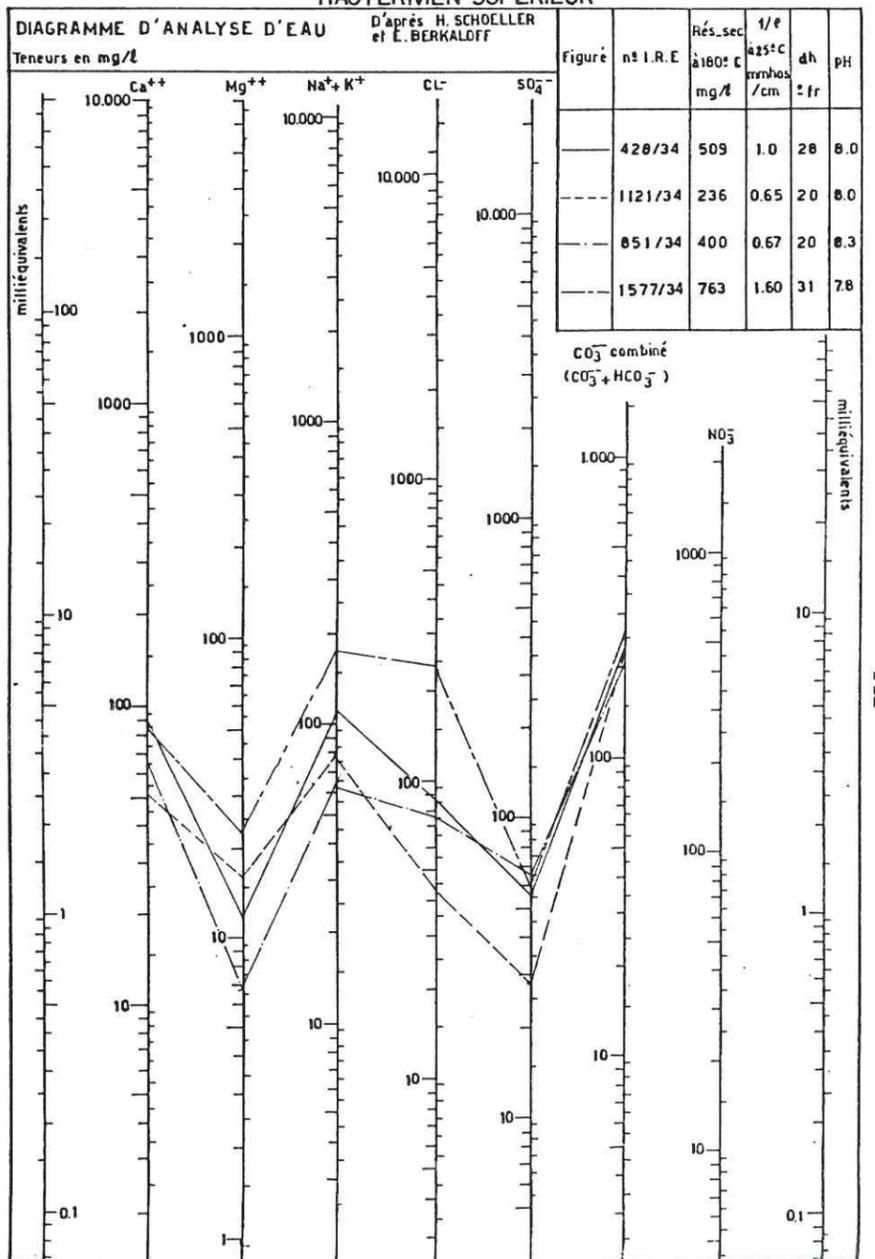
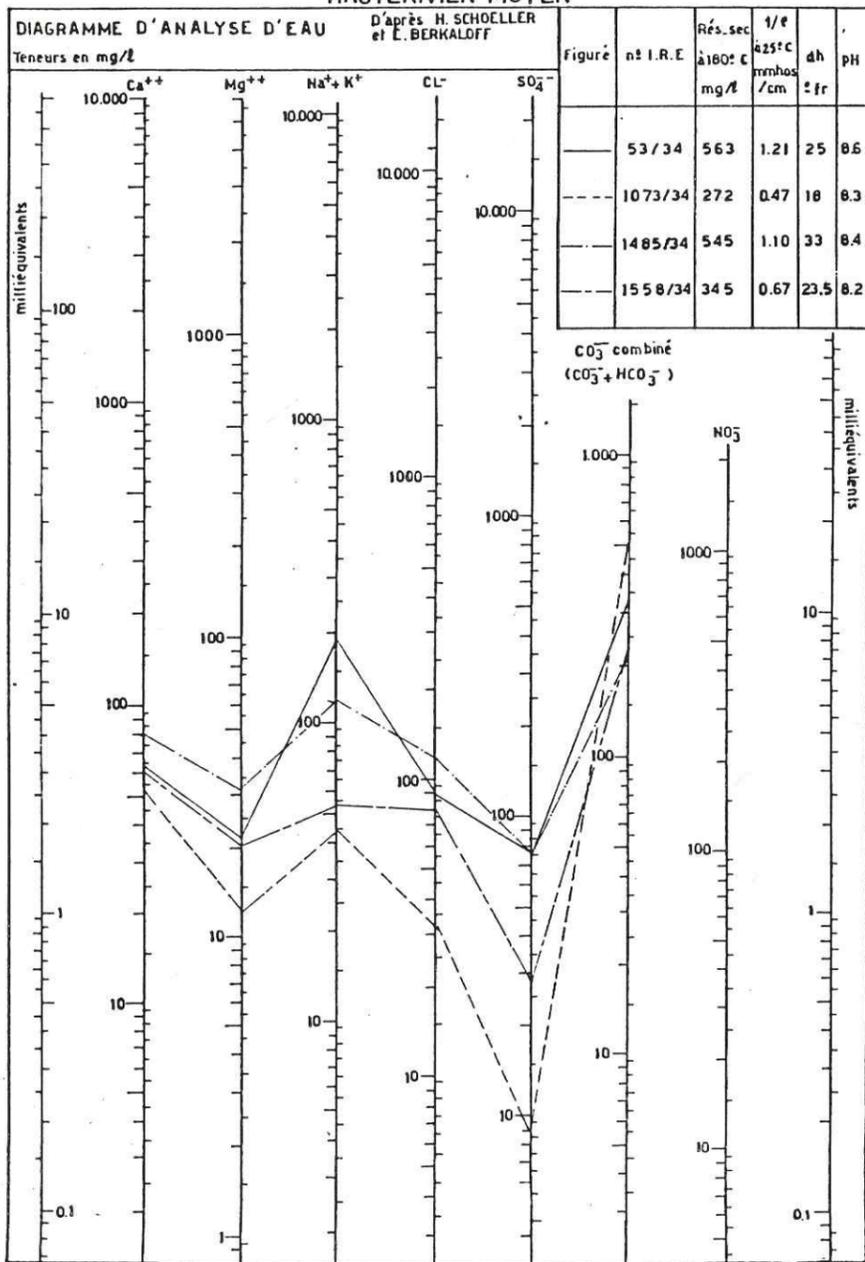


Figure 23d - Diagramme semi-logarithmique de SCHOELLER - BERKALOFF

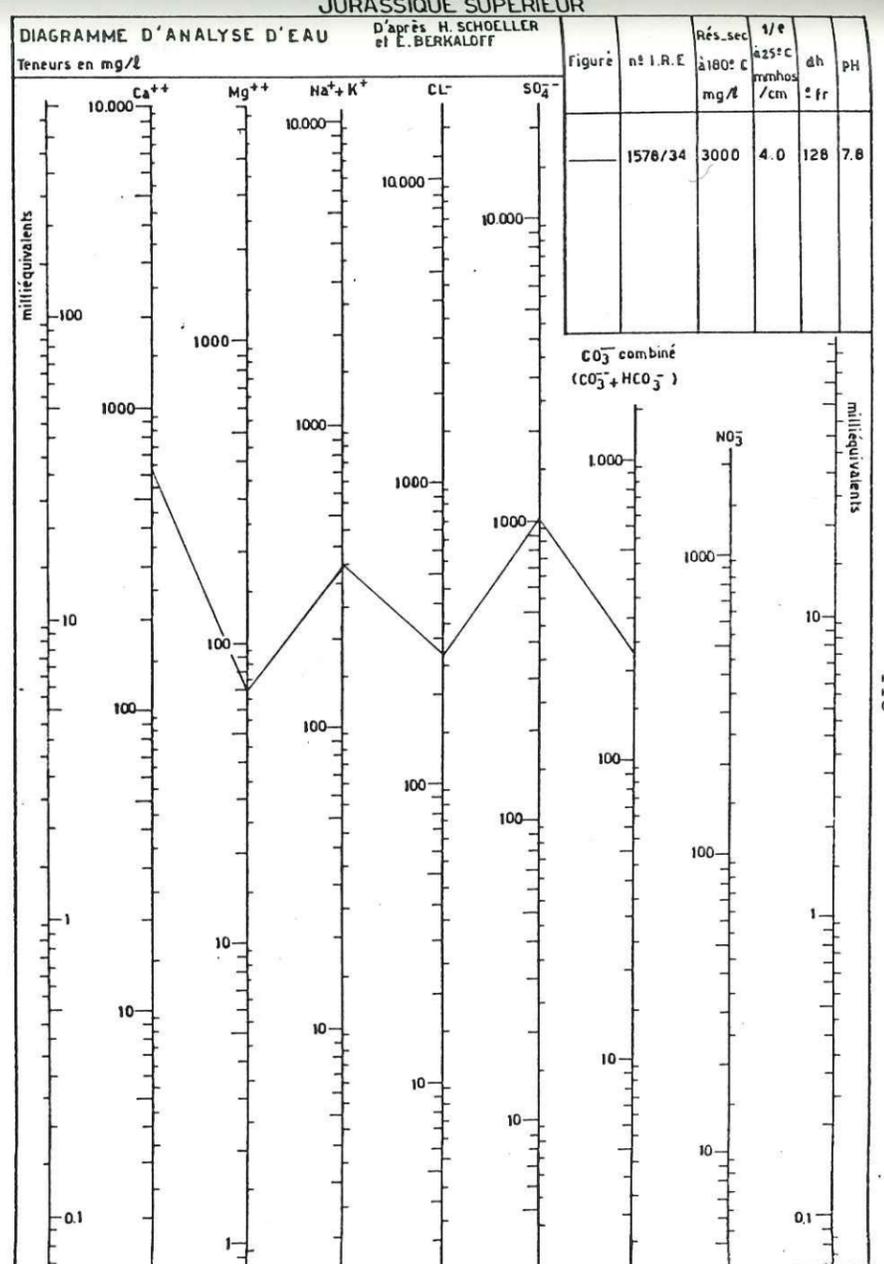
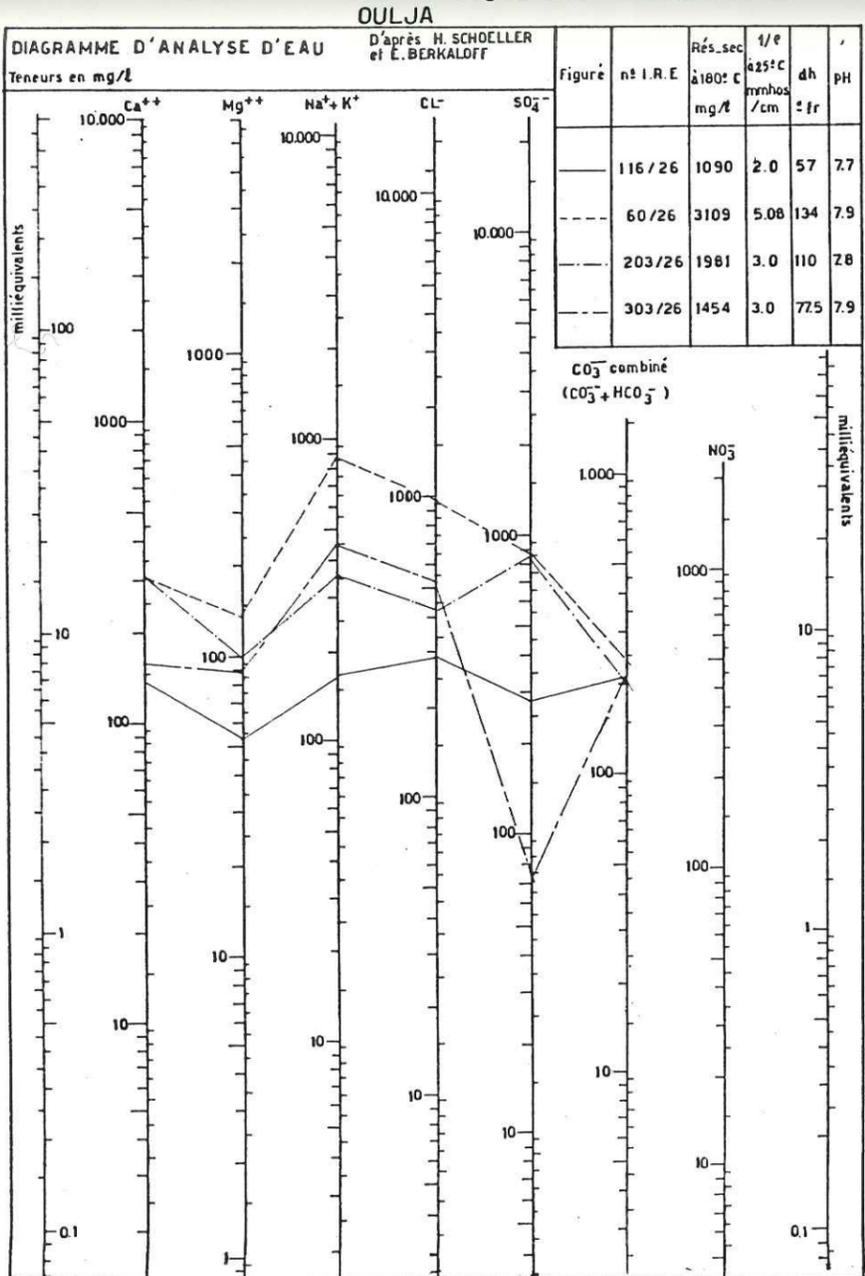
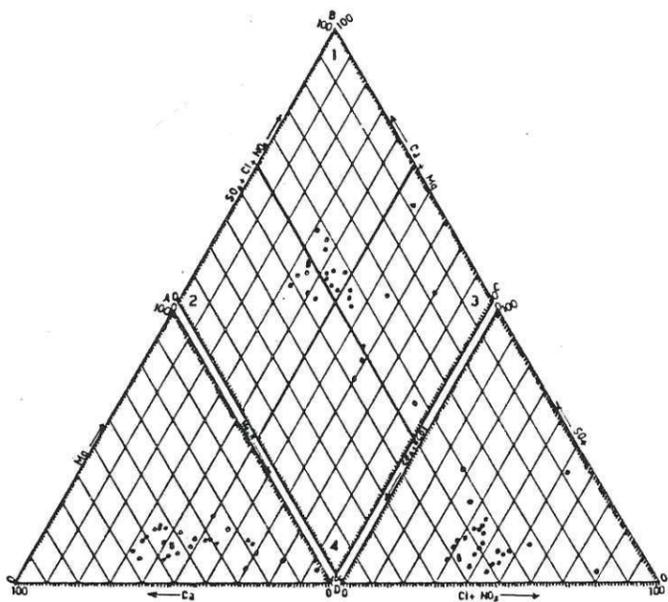


DIAGRAMME D'ANALYSE D'EAU
(D'Après PIPER)



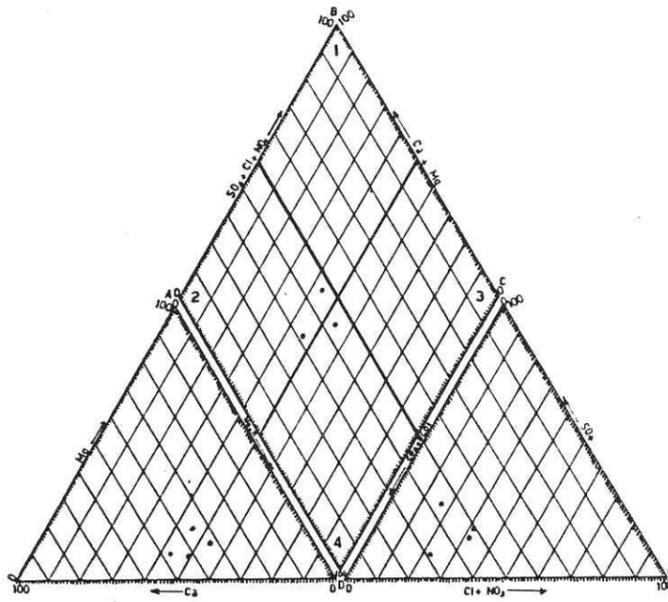
PLIO-QUATÉNAIRE

Total: 28 points d'eau

- 1 → 38%
- 2 → 25%
- 3 → 30%
- 4 → 7%

- ① CHLORURE ET SULFATE CALCIQUE ET MAGNÉSIENNE
- ② BICARBONATE CALCIQUE ET MAGNÉSIENNE
- ③ CHLORURE SODIQUE ET POTASSIQUE OU SULFATE SODIQUE (ANORMAL)
- ④ CARBONATE SODIQUE ET POTASSIQUE

DIAGRAMME D'ANALYSE D'EAU
(D'Après PIPER)



HAUTERIVIEN SUPERIEUR

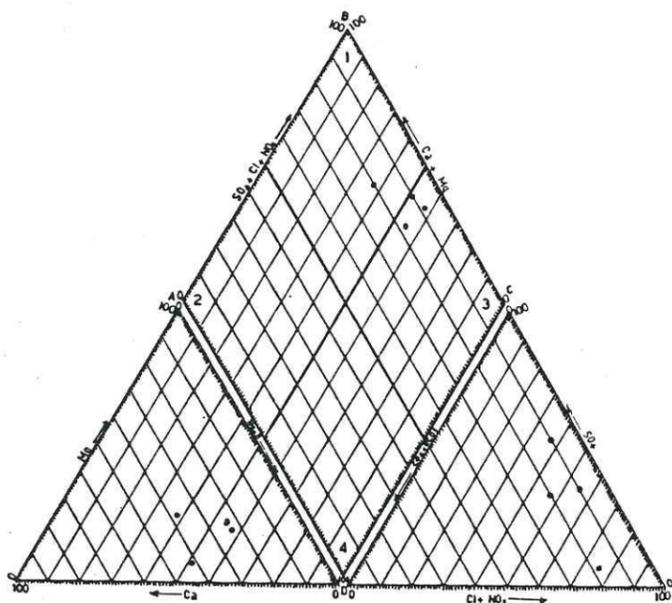
Total: 4 points d'eau

- 2 → 75%
- 4 → 25%

- ① CHLORURE ET SULFATE CALCIQUE ET MAGNÉSIENNE
- ② BICARBONATE CALCIQUE ET MAGNÉSIENNE
- ③ CHLORURE SODIQUE ET POTASSIQUE OU SULFATE SODIQUE (ANORMAL)
- ④ CARBONATE SODIQUE ET POTASSIQUE

Figure 24a - Diagrammes d'analyse d'eau de PIPER

DIAGRAMME D'ANALYSE D'EAU
(D'Après PIPER)



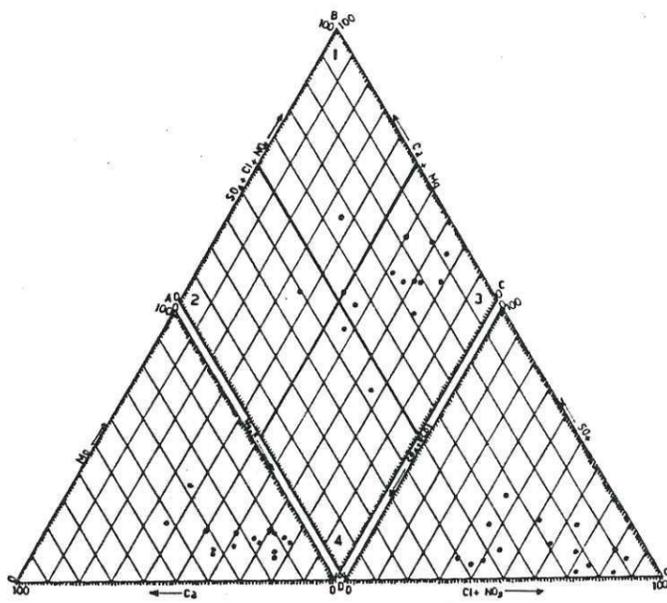
OULJA*

Total: 4 points d'eau

- 1 → 25%
- 3 → 75%

- ① CHLORURE ET SULFATE CALCIQUE ET MAGNÉSIENNE
- ② BICARBONATE CALCIQUE ET MAGNÉSIENNE
- ③ CHLORURE SODIQUE ET POTASSIQUE OU SULFATE SODIQUE (ANORMAL)
- ④ CARBONATE SODIQUE ET POTASSIQUE

DIAGRAMME D'ANALYSE D'EAU
(D'Après PIPER)



CENOMANIEN

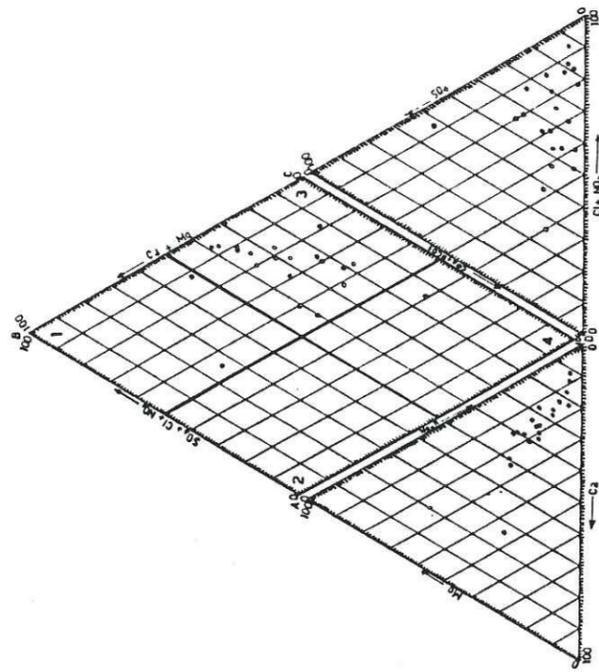
Total: 15 points d'eau

- 1 → 10%
- 2 → 6.7%
- 3 → 70%
- 4 → 13.3%

- ① CHLORURE ET SULFATE CALCIQUE ET MAGNÉSIENNE
- ② BICARBONATE CALCIQUE ET MAGNÉSIENNE
- ③ CHLORURE SODIQUE ET POTASSIQUE OU SULFATE SODIQUE (ANORMAL)
- ④ CARBONATE SODIQUE ET POTASSIQUE

Figure 24b - Diagrammes d'analyse d'eau de PIPER

DIAGRAMME D'ANALYSE D'EAU
(D'Après PIPER)

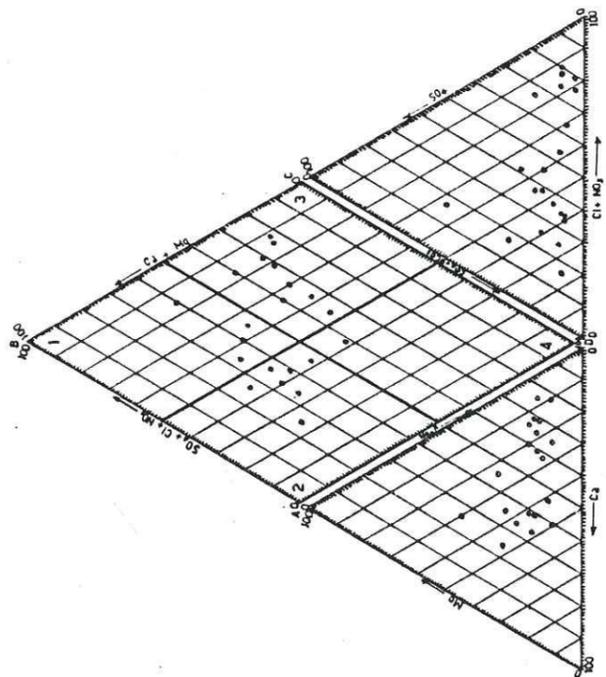


HAUTERIVIENS MOYEN

Total : 21 points d'eau
 1 → 19%
 2 → 33%
 3 → 43%
 4 → 5%

- ① CHLORURE ET SULFATE CALCIQUE ET MAGNÉSIIENNE
- ② BICARBONATE CALCIQUE ET MAGNÉSIIENNE
- ③ CHLORURE SODIQUE ET POTASSIQUE OU SULFATE SODIQUE (ANORMAL)
- ④ CARBONATE SODIQUE ET POTASSIQUE

DIAGRAMME D'ANALYSE D'EAU
(D'Après PIPER)



CRÉTACÉ INDÉTERMINÉ

Total : 22 points d'eau
 1 → 11%
 2 → 84%
 4 → 5%

- ① CHLORURE ET SULFATE CALCIQUE ET MAGNÉSIIENNE
- ② BICARBONATE CALCIQUE ET MAGNÉSIIENNE
- ③ CHLORURE SODIQUE ET POTASSIQUE OU SULFATE SODIQUE (ANORMAL)
- ④ CARBONATE SODIQUE ET POTASSIQUE

Figure 24c - Diagramme d'analyse d'eau de PIPER

b/ Les eaux bicarbonatées sodiques et calciques: les eaux de ce faciès répondent à la formule suivante:

$$r \text{ HCO}_3 > r \text{ Cl} > r \text{ SO}_4 \quad \text{ou} \quad r \text{ HCO}_3 > r \text{ SO}_4 > r \text{ Cl}$$

et

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

Ce faciès se rencontre au Sahel central et dans la zone située entre Cap Beddouza et El Oualidia même dans la zone côtière. Ce qui confirme l'absence de biseau salé dans ce secteur comme le prouve la carte de conductivité. Cette absence peut s'expliquer par la valeur élevée du gradient piézométrique d'une part et l'absence d'ouvrages de captage dans cette zone d'autre part. La répartition spatiale des faciès chimiques des eaux de la nappe phréatique du Sahel est représentée sur la figure 25.

V.3.3 - Etude de l'origine des ions

On va essayer de formuler des hypothèses sur l'origine des ions en analysant les cartes des teneurs en ions d'une part et le contexte géologique d'autre part.

V.3.3.1 - Carte des teneurs en chlorures (Fig.26)

L'étude de cette carte permet de constater qu'elle se superpose aisément avec les cartes de conductivité et piézométrique. Elle indique une augmentation de la teneur en chlorures en bordure océanique notamment à El Oualidia, Jorf Lasfar et vers l'embouchure de l'Oum-er-Rbia. Ceci peut s'expliquer par l'influence des eaux marines.

On note également une forte teneur en chlorures à l'extrême S-E du secteur. Il s'agit d'une zone d'alimentation de la nappe du Sahel par les eaux issues du périmètre irrigué de Doukhala. Il s'agit probablement des eaux ayant lessivé les formations argileuses et évaporitiques du Permo-Trias, ce qui expliquerait leur teneur relativement élevée en chlorures.

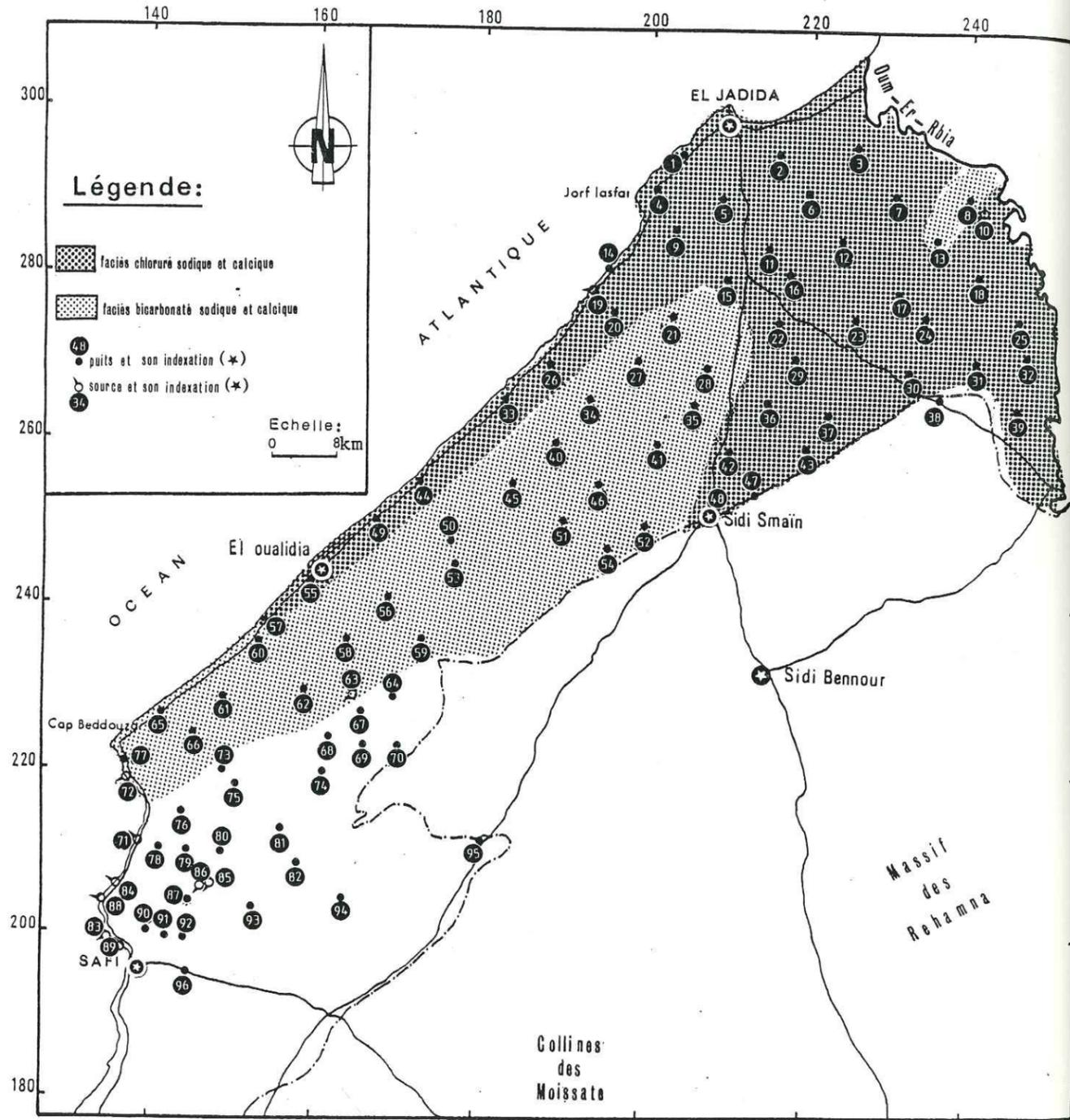
Les teneurs les plus faibles sont enregistrées au NE vers la zone d'alimentation par l'oued ainsi que le reste du Sahel.

V.3.3.2 - Carte des teneurs en sulfates (Fig.27)

Cette carte rappelle également les cartes de conductivité et piézométrique. Elle indique une augmentation de la teneur en sulfates vers la zone côtière.

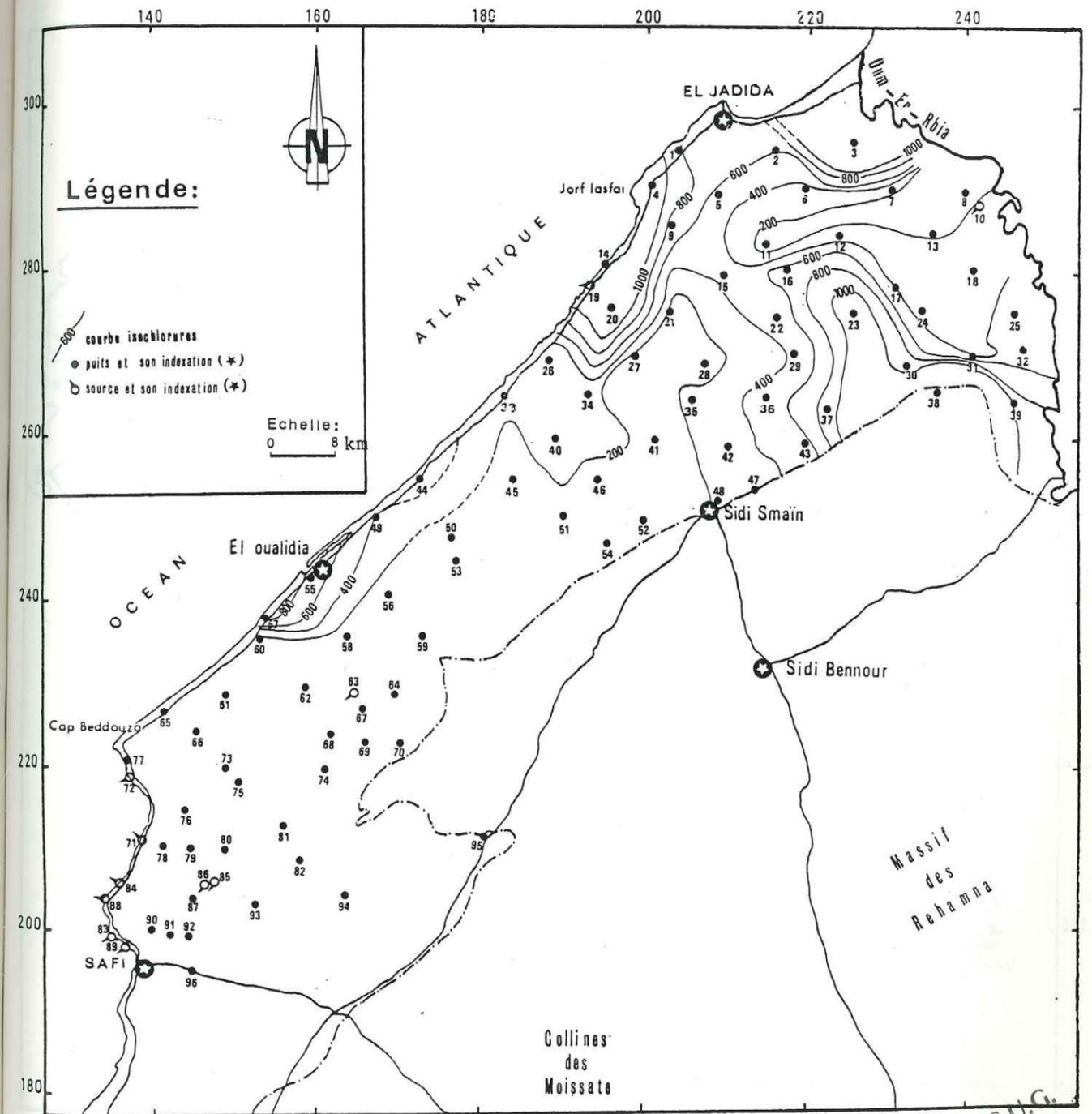
Les teneurs les plus fortes sont signalées vers El Oualidia où, en plus de l'influence marine, une pollution artificielle par des produits sulfatés utilisés en agriculture (cultures maraichères) vient ajouter son effet.

On note également une forte teneur en sulfates au niveau du puits 1367/27. Cette "anomalie" locale peut être due soit au lessivage du sol agricole riche en sulfates (présence de vignes traitées par des produits sulfatés), soit au lessivage des marnes du Cénomaniens qui sont par endroits gypsifères.



(*) LA CORRESPONDANCE INDEXATION - N° I.R.E. FIGURE EN ANNEXE

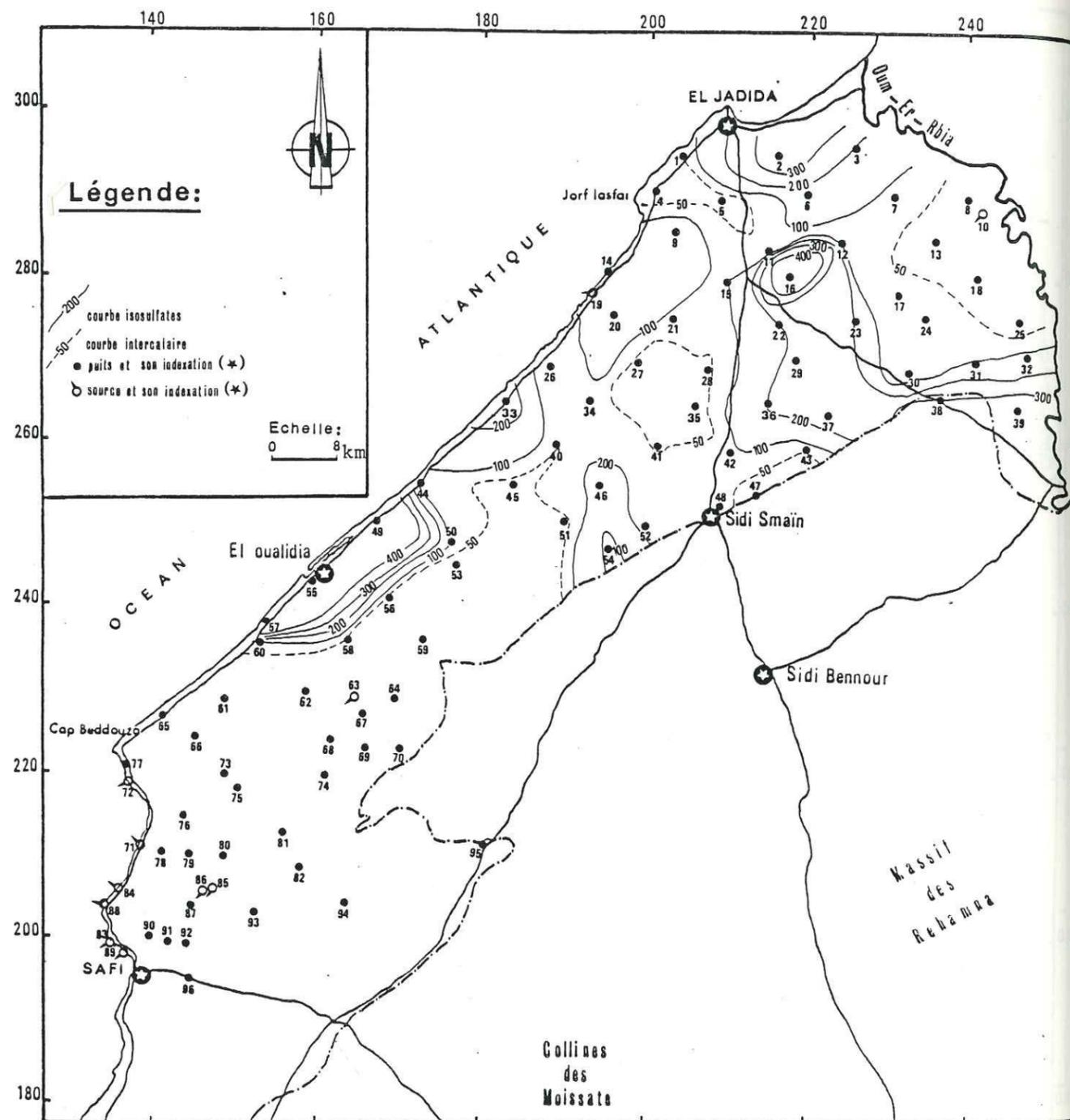
Figure 25 - CARTE DE REPARTITION DES FACIES CHIMIQUES (hautes eaux - mars 1985)



(*) LA CORRESPONDANCE INDEXATION - N° I.R.E. FIGURE EN ANNEXE

Figure 26 - CARTE DES TENEURS EN CHLORURES (mg/l) (mars 1985)

Univ. J. Fourier - O.S.U.G.
 MAISON DES GEOSCIENCES
 DOCUMENTATION
 B.P. 53
 F. 38041 GRENOBLE CEDEX
 Tél. 04 76 63 54 27 - Fax 04 76 51 40 58
 Mail: ptalour@ujf-grenoble.fr



(*) LA CORRESPONDANCE INDEXATION - N° I.R.E. FIGURE EN ANNEXE

Figure 27 - CARTE DES TENEURS EN SULFATES (mg/l) (mars 1985)

Au S W de Sidi Smain, on note une teneur en sulfates légèrement élevée (puits 267/27 et 413/26).

Cette zone coïncide avec la zone d'alimentation de la nappe par les eaux du périmètre d'irrigation; là encore l'utilisation des produits sulfatés dans l'agriculture peut être à l'origine de cette augmentation.

Ces eaux sont ensuite diluées par le mélange avec des eaux à faible teneur en sulfates.

Par ailleurs les teneurs en sulfates sont faibles (< 50 mg/l) et augmentent dans le sens de l'écoulement des eaux souterraines.

V.3.4 - Interprétation des cartes d'équirapport

V.3.4.1 - Carte d'équirapport $\frac{r \text{ SO}_4}{r \text{ Cl}}$ (Fig.28)

Cette carte indique un rapport généralement inférieur à 0,5. Cependant, on note des zones où ce rapport est supérieur à 1 notamment dans la zone d'El Oualidia (puits 203/26) et au N-E du Sahel (puits 1367/27). Comme nous l'avons dit, ceci est dû à l'usage de produits sulfatés en agriculture. Par contre la valeur élevée du rapport $r \text{ SO}_4/r \text{ Cl}$ au niveau du puits 413/26 ($r \text{ SO}_4/r \text{ Cl} = 2,24$) ne peut s'expliquer que par la combinaison d'une faible teneur en chlorures et une forte teneur en sulfates due à une pollution artificielle locale.

V.3.4.2 - Carte d'équirapport $r\text{Mg}/r\text{Ca}$ (Fig.29)

En général le rapport $r\text{Mg}/r\text{Ca}$ augmente dans le sens d'écoulement de la nappe. Dans notre cas, la carte indique un rapport inférieur à 1 et montre le caractère dominant du calcium à l'exception de la zone d'El Jadida et à l'Est du Sahel où on a un rapport supérieur à 1.

L'importance du magnésium dans les eaux souterraines de ces deux secteurs peut être due à la présence de sels MgCl_2 et MgSO_4 qui sont plus solubles que les sels CaCl_2 et CaSO_4 .

V.3.5 - Détermination graphique du CO_2 libre et du pH d'équilibre

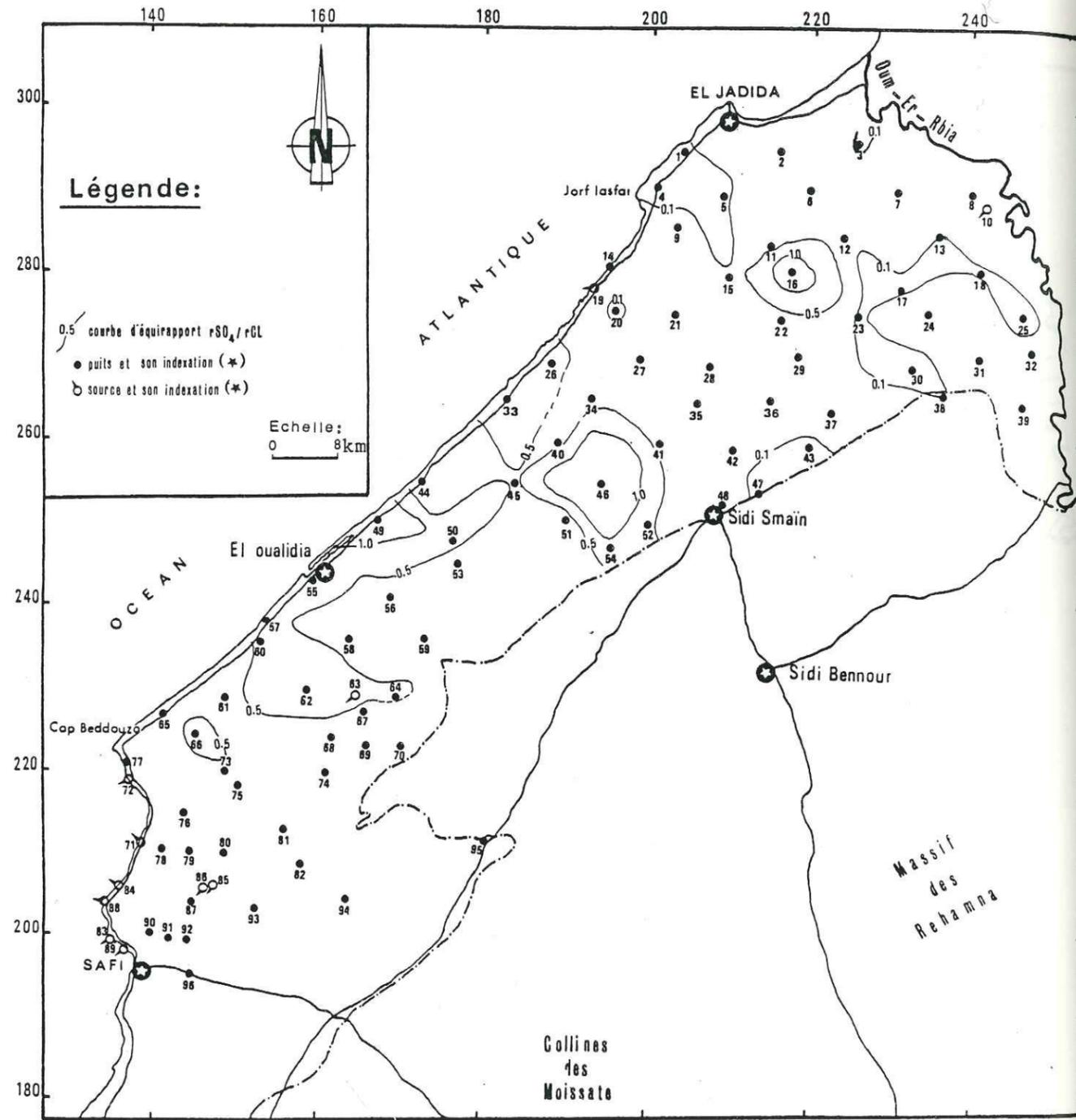
Afin de déterminer le pH d'équilibre et la teneur en CO_2 libre des eaux analysées, les résultats des analyses chimiques effectuées ont été reportés sur le diagramme logarithmique de H. SCHOELLER (Fig.30).

La méthode graphique utilisée pour l'évaluation de ces deux paramètres est très simple. Pour le pH d'équilibre, elle consiste à joindre par une droite les deux points représentant la teneur en calcium et celle en carbonates et bicarbonates. Le point d'intersection avec la colonne du pH d'équilibre représente la valeur de ce dernier. Pour le CO_2 libre, il s'agit du point d'intersection entre la colonne du CO_2 libre et la droite joignant les deux points représentant la somme des carbonates et bicarbonates avec le pH mesuré.

Si le pH mesuré est supérieur au pH d'équilibre l'eau est incrustante. Si le pH mesuré est inférieur au pH d'équilibre l'eau est agressive.

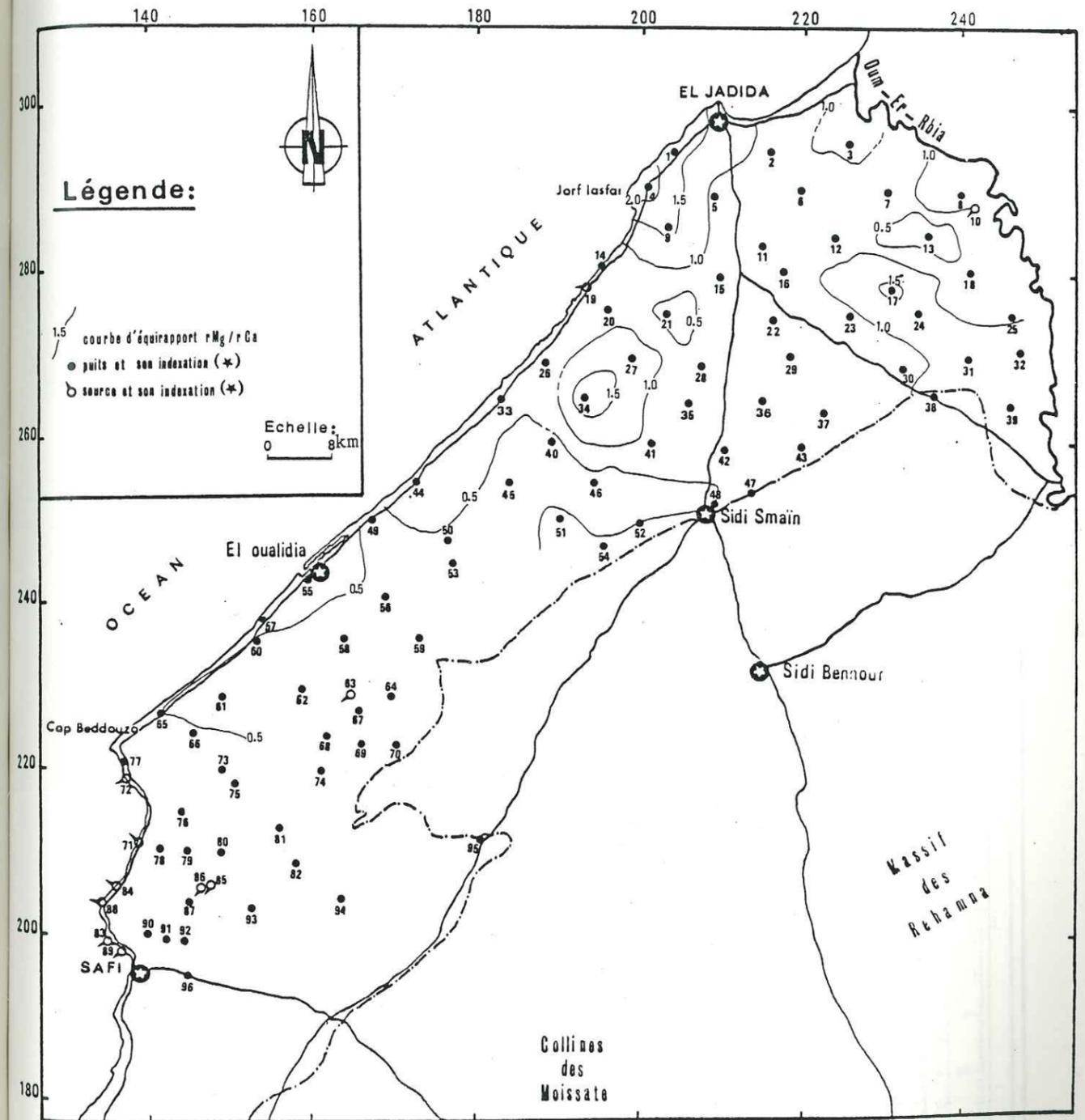
Dans le cas des eaux de la nappe du Sahel, sur les 96 échantillons analysés 97% des eaux sont incrustantes, 1% est en équilibre et 2% sont agressives (voir annexe 2).

Ceci a pu être vérifié sur le terrain; en effet sur la totalité des sources observées on a pu remarquer un dépôt de calcite au niveau du griffon.



(*) LA CORRESPONDANCE INDEXATION - N° I.R.E. FIGURE EN ANNEXE

Figure 28 - CARTE D'EQUIRAPPORT rSO_4/rCl (hautes eaux : mars 1985)



(*) LA CORRESPONDANCE INDEXATION - N° I.R.E. FIGURE EN ANNEXE

Figure 29 - CARTE D'EQUIRAPPORT rMg/rCa (hautes eaux : mars 1985)

Fig.30a - Diagramme logarithmique de H. SCHOELLER

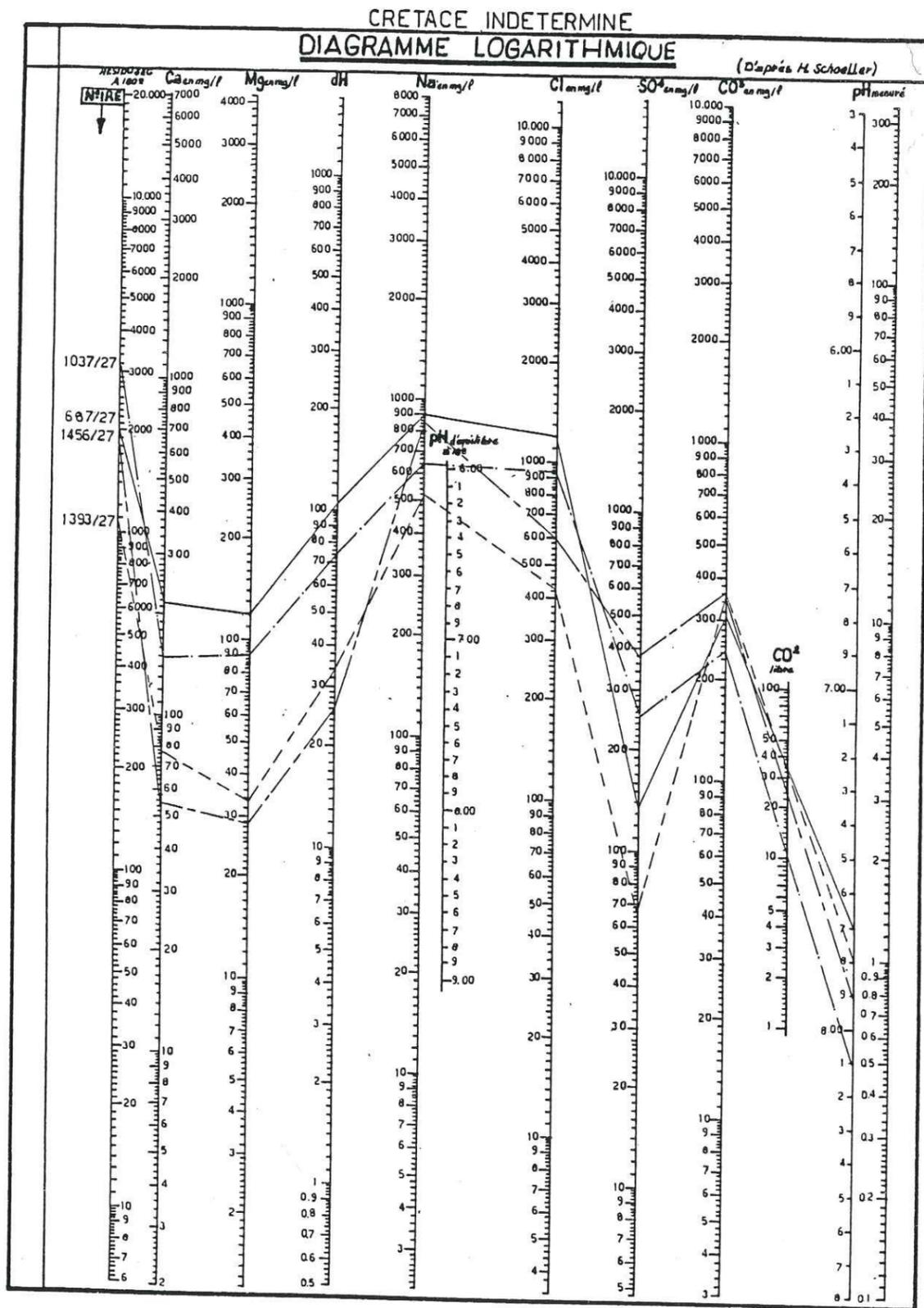


Fig.30b - Diagramme logarithmique de H. SCHOELLER

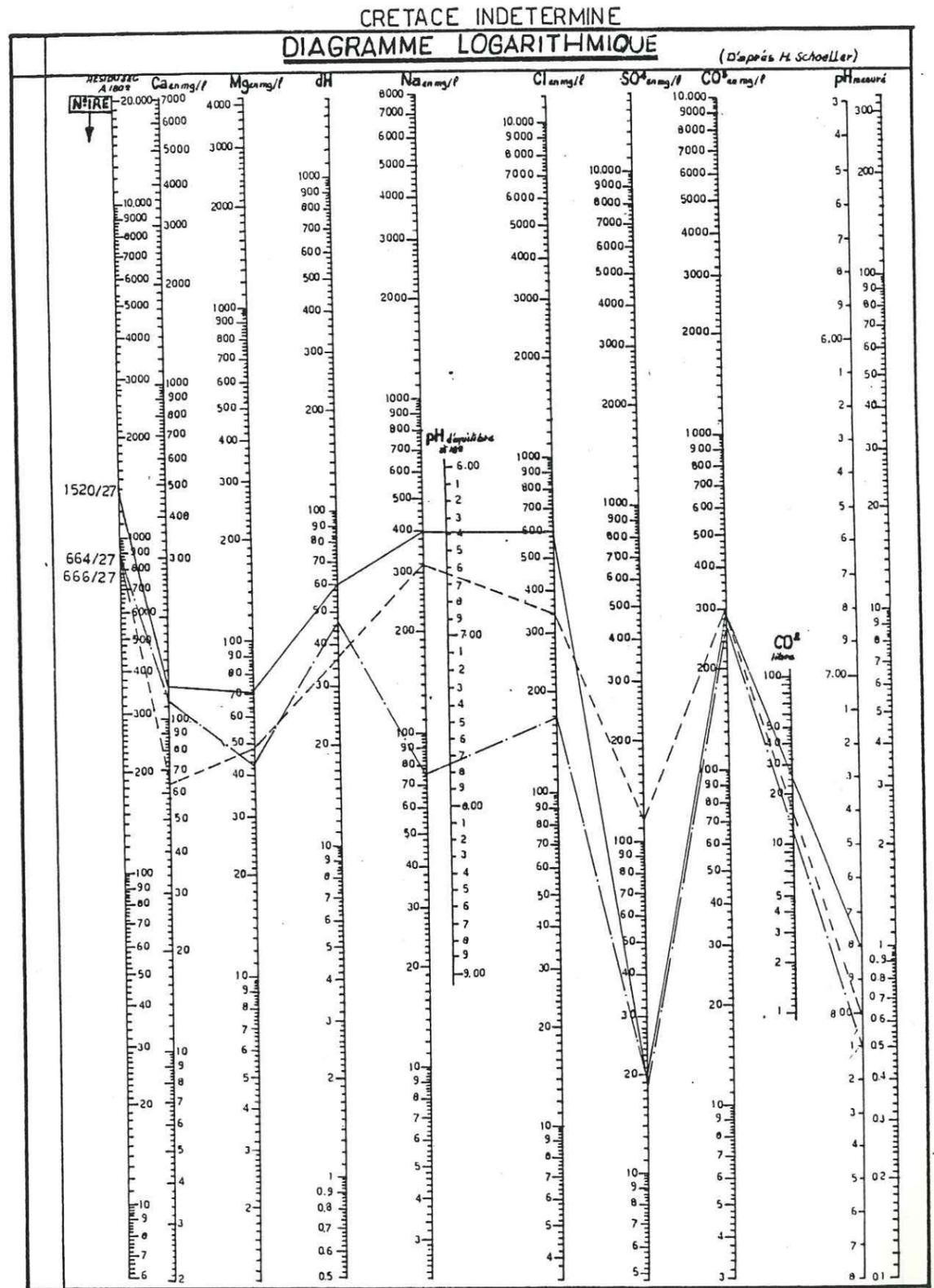
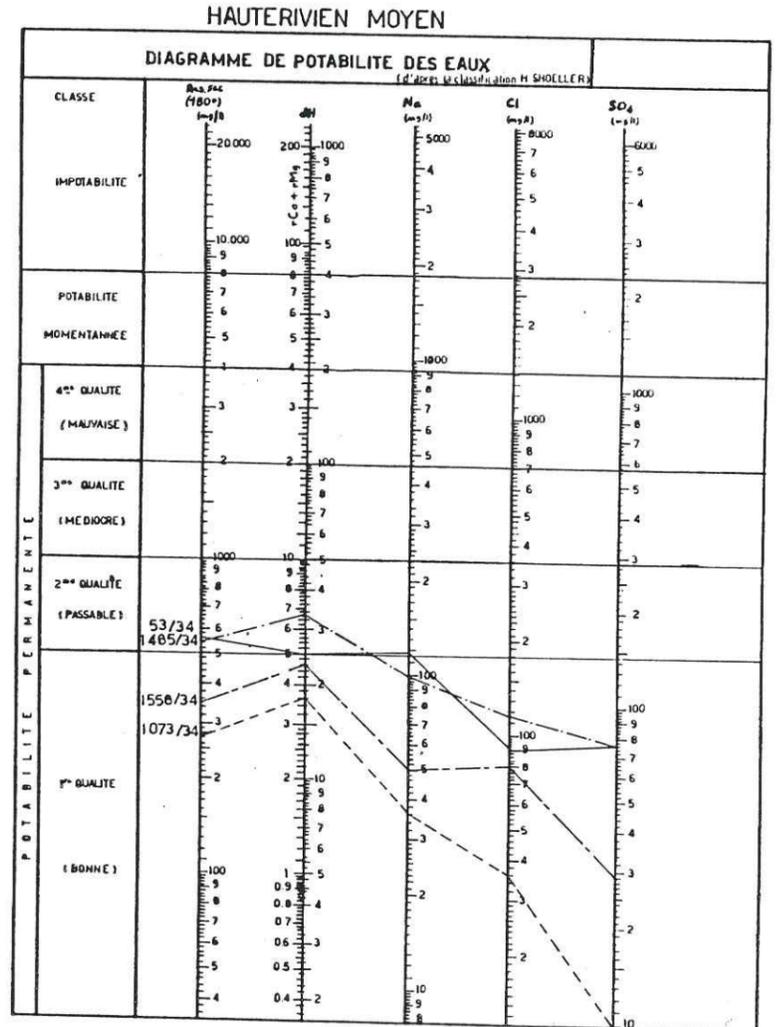
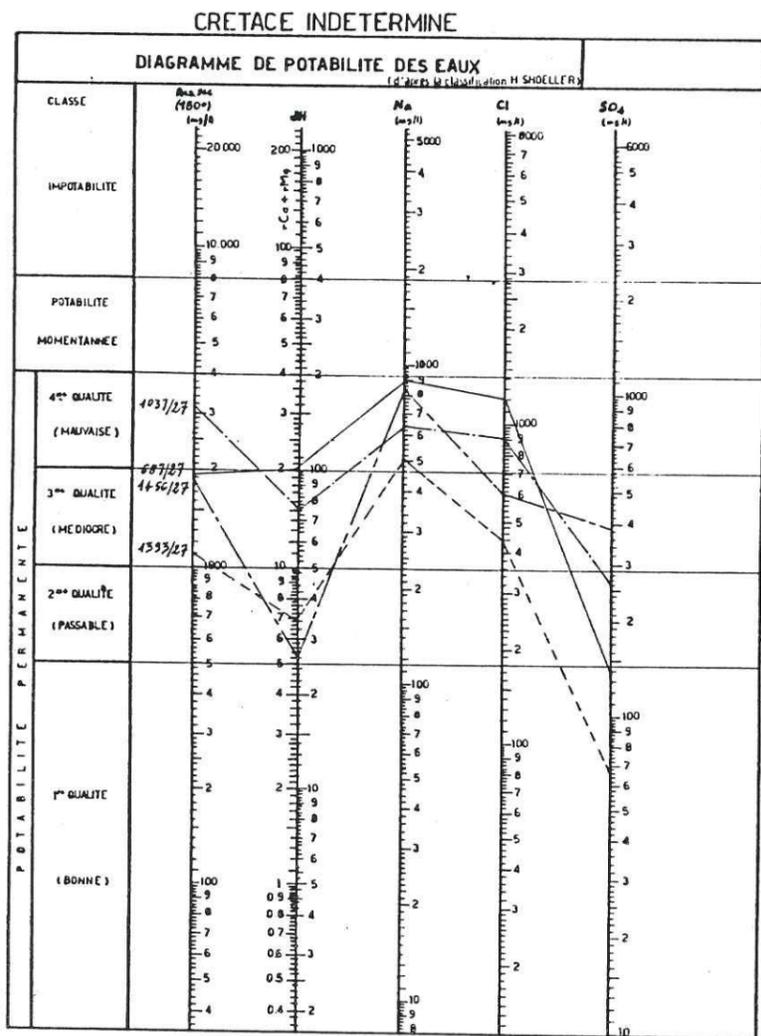
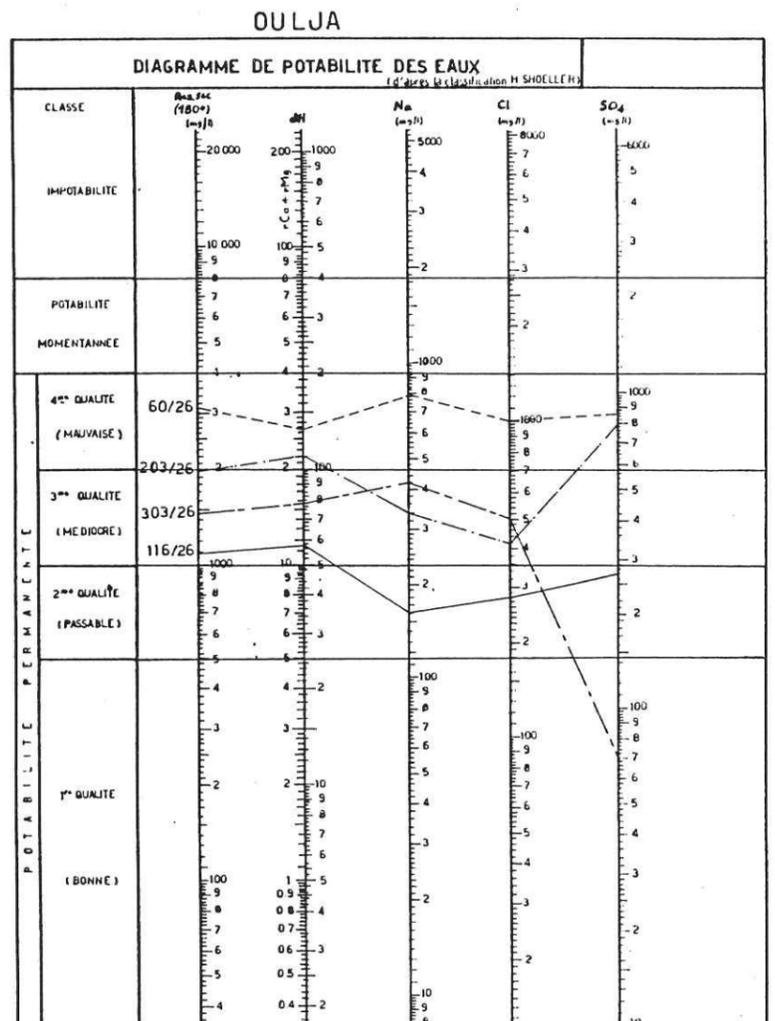
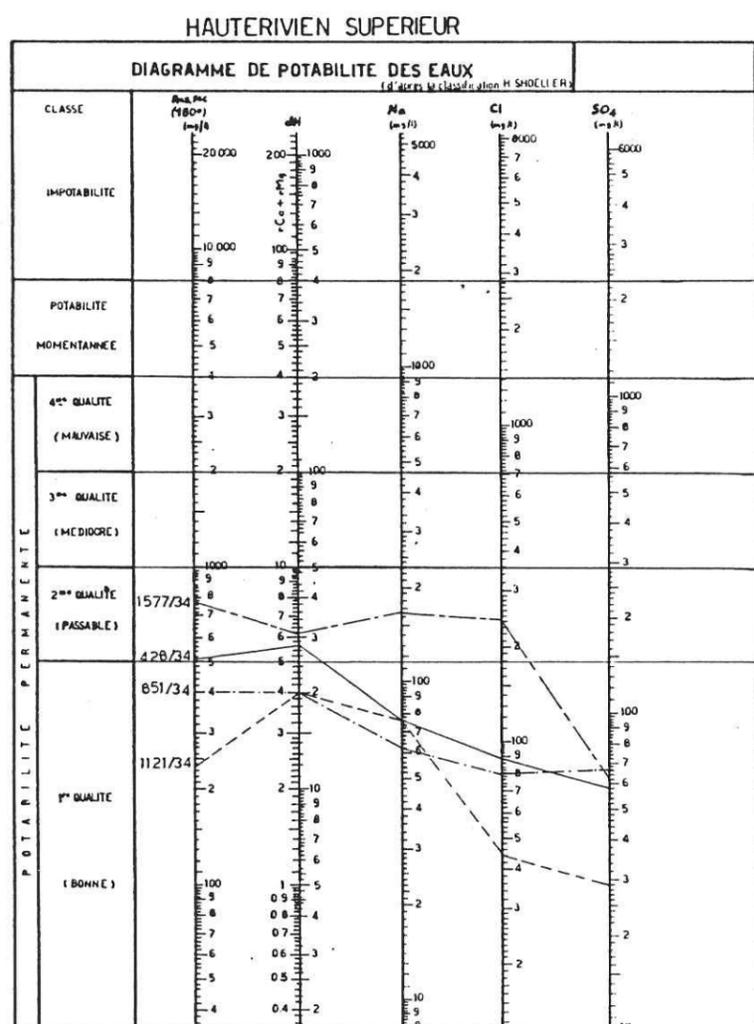


Fig.31b - Diagramme de potabilité des eaux de H. SCHOELLER



128

Figure 31c - Diagramme de potabilité des eaux de H. SCHOELLER



129

CHAPITRE VI

DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES

--

- VI.1 - INTRODUCTION
- VI.2 - DEFINITION DES CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES
- VI.3 - DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES PAR ESSAIS DE POMPAGE
 - VI.3.1 - Méthode de THEIS
 - VI.3.2 - Méthode de JACOB
 - VI.3.3 - Méthode de la remontée de THEIS
 - VI.3.4 - Méthode de CHOW
- VI.4 - PRINCIPE DE LA DETERMINATION DU COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT PAR LA METHODE DE RORABOUGH
- VI.5 - CONCLUSION

--

VI.1 - INTRODUCTION

Les caractéristiques étudiées au cours de cette étude sont les transmissivités et le coefficient d'emmagasinement. Ce sont des paramètres indispensables pour l'évaluation du bilan hydrogéologique et des réserves souterraines des nappes aquifères.

VI.2 - DEFINITION DE CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES

-La transmissivité (T) est le produit du coefficient de perméabilité par l'épaisseur de l'horizon aquifère: elle s'exprime en m²/s.

-Le coefficient de perméabilité (K) représente la quantité d'eau traversant une unité de section perpendiculaire à l'écoulement sous un gradient égal à l'unité. Il s'exprime en m/s.

-Le coefficient d'emmagasinement(s) ("storage coefficient"). Le coefficient d'emmagasinement est défini comme le volume d'eau libéré à travers une surface égale à l'unité, pour une unité de variation de la charge hydraulique normale à cette surface. C'est un nombre sans dimension.

Le coefficient d'emmagasinement des zones captives d'une nappe dépend de l'élasticité des roches et de l'eau; dans les nappes libres, il équivaut en pratique à la porosité efficace de la roche. Dans les nappes libres, les effets de l'élasticité de la roche et de l'eau sont généralement négligeables.

VI.3 - DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES PAR ESSAIS DE POMPAGE

Afin d'étudier les caractéristiques hydrodynamiques de la nappe du Sahel, plusieurs essais de pompage ont été effectués par la D.R.H. de Marrakech, ainsi que par les services de l'eau des D.P.E. de Safi et El Jadida.

Pour la détermination de T et S, plusieurs méthodes ont été utilisées.

VI.3.1 - Méthode de THEIS (Fig.32)

C.V. THEIS a proposé en 1935 de comparer l'écoulement des eaux souterraines à la propagation de la chaleur en milieu isotrope. C'est la méthode d'analogie thermique. Cette solution tient compte du temps de pompage qui est assez court.

La formule exponentielle intégrale utilisée dans ce cas s'écrit:

$$\Delta = \frac{Q}{4\pi T} \cdot W(u) \quad (1) \quad \text{avec } u = \frac{R^2 \cdot S}{4tT} \quad (2)$$

Avec: Δ = rabattement, en m
 Q = débit constant de pompage dans l'ouvrage, en m³/s
 t = temps de pompage en s.
 R = distance à laquelle on mesure le rabattement
 T = transmissivité, en m²/s
 S = coefficient d'emmagasinement, sans dimension

Figure 32a - Courbes interprétatives des essais de pompage d'après la méthode de THEIS

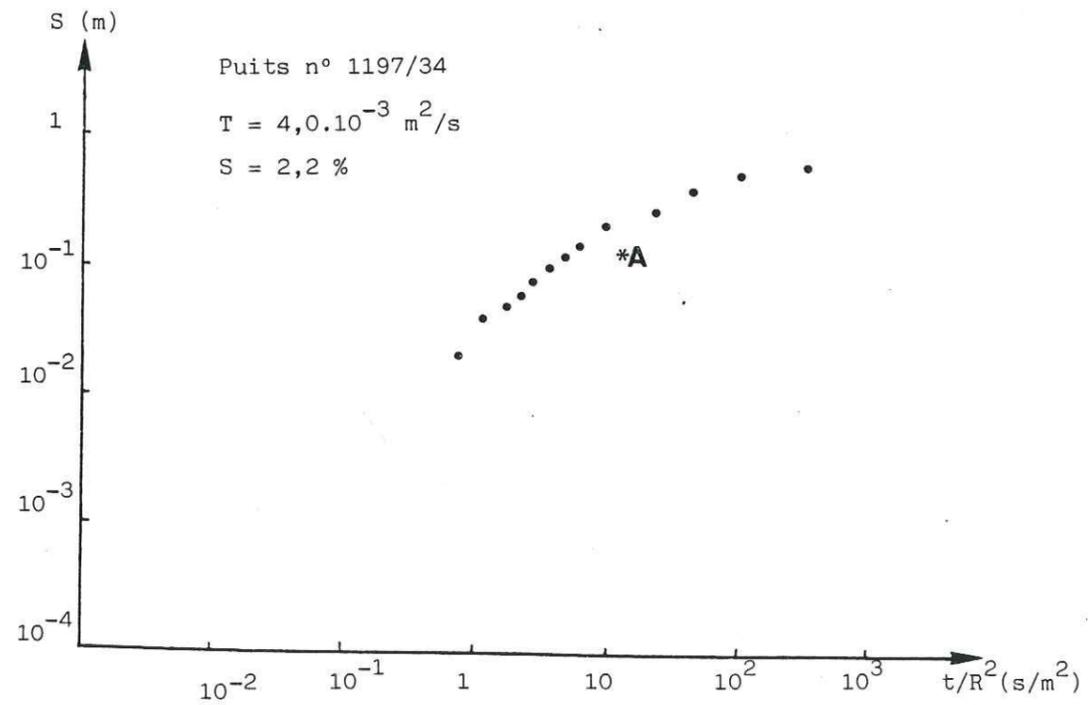
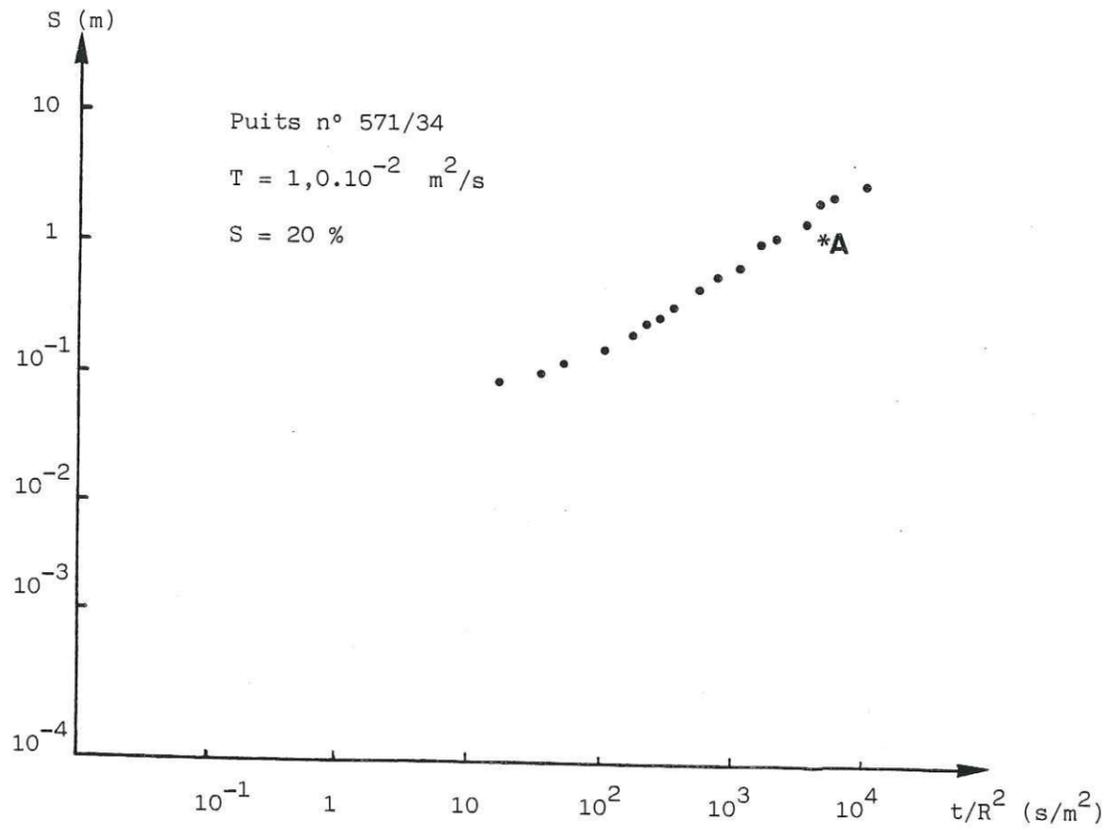
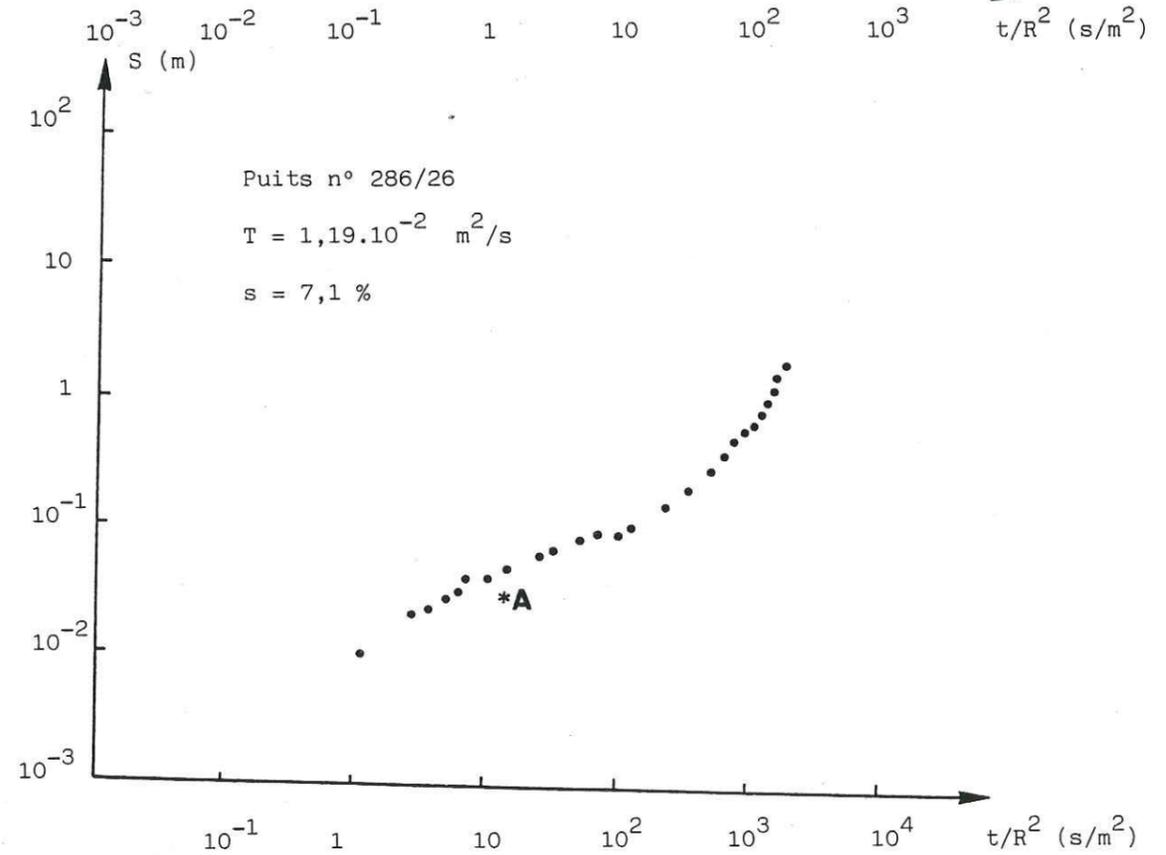
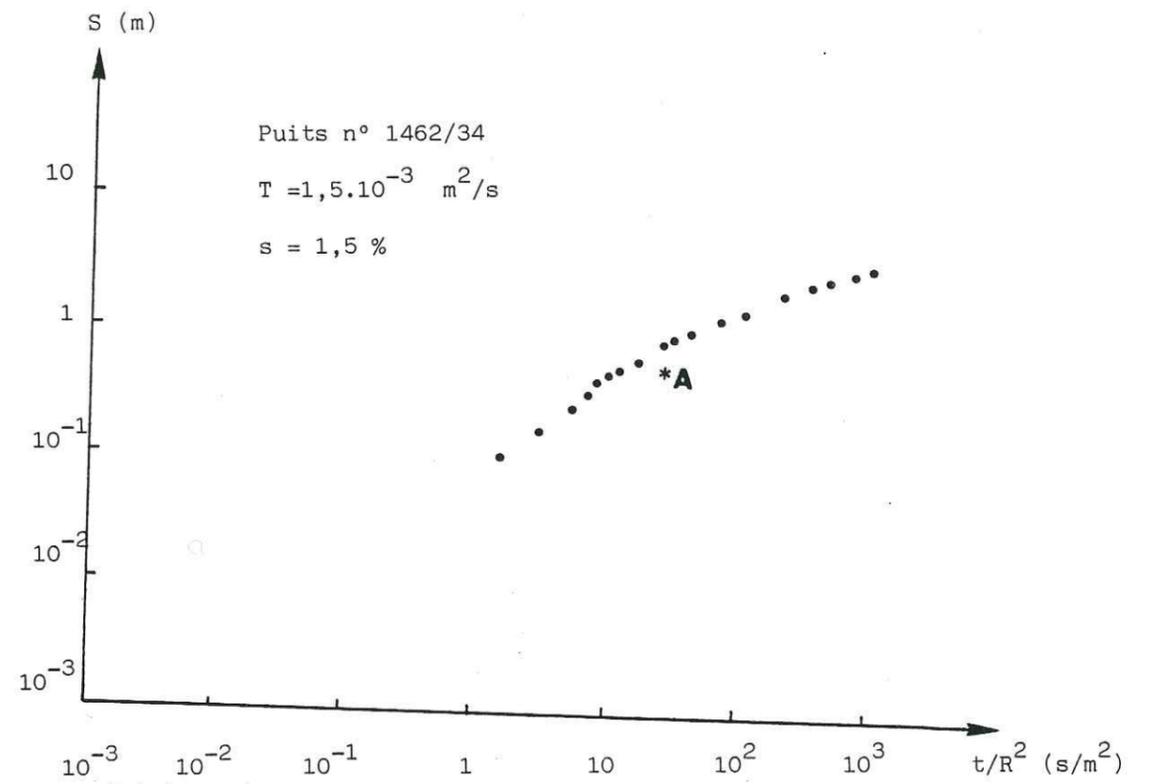


Figure 32b - Courbes interprétatives des essais de pompage d'après la méthode de THEIS



VI.3.1.1 - Mode opératoire

La résolution graphique nécessite l'établissement de deux courbes sur diagramme bi-logarithmique.

- La courbe type "normale" est obtenue en portant sur un diagramme bi-logarithmique les valeurs de $W(u)$ en ordonnées et celles de u en abscisses. Cependant, il est souvent plus pratique d'utiliser la courbe "renversée", obtenue en portant les valeurs de $W(u)$ en fonction de $1/u$.

- La courbe expérimentale est obtenue en portant sur un diagramme transparent de même module les valeurs de Δ en fonction de t/R^2 . Si l'on se sert de la courbe type normale, il faut porter en fonction de R^2/t .

Par translation, on tente de superposer, en maintenant les axes respectivement parallèles aussi parfaitement que possible, la courbe expérimentale à la courbe standard. On choisit un point de référence arbitraire A (point pivot) dont on définit les coordonnées $W(u)$, u ou $1/u$ et $\Delta t/R^2$ ou R^2/t . Il n'est pas nécessaire que le point pivot soit situé sur la courbe type. En fait, les calculs seront plus commodes si l'on choisit ce point de façon que $W(u) = 1$ et $1/u = 10$. En introduisant ces valeurs numériques dans les équations (1) et (2) on obtient:

$$T = \frac{Q}{4\pi\Delta} W(u) \quad \text{et} \quad S = \frac{4t TU}{R^2}$$

VI.3.1.2 - Application

Dans la majorité des cas, les courbes expérimentales présentent au départ une inflexion et ne deviennent homogènes qu'après le temps nécessaire à la vidage du puits. A partir de ce moment, et au fur et à mesure du pompage, la concordance entre libération de l'eau emmagasinée dans l'aquifère et vitesse d'abaissement de la charge hydraulique devient meilleure.

On n'accordera donc que peu d'importance aux premières mesures. Seule la deuxième partie de la courbe expérimentale sera considérée dans la détermination de la transmissivité.

L'interprétation ayant été faite à partir des mesures relevées sur le puits de pompage, nous avons estimé le rayon (R) en assimilant le cône de rabattement à un cylindre que l'on détermine ainsi: on calcule le volume (V_0) extrait et on admet qu'il correspond à un cylindre de hauteur Δ et de rayon efficace (R).

$$V_0 = \pi R^2 \Delta$$

$$V_0 = t \times Q$$

$$\text{Donc } R = \sqrt{\frac{V_0}{\pi \Delta}}$$

Remarque: Le rabattement mesuré correspond au rabattement résiduel. Pour obtenir le rabattement réel, il faudra ajouter les pertes de charges locales, causées par la turbulence de vitesse à la traversée des parois filtrantes et qui sont proportionnelles au carré du débit.

Dans le cas de nos essais, les débits sont faibles (10 à 20 l/s), ce qui nous permet d'assimiler le rabattement mesuré au rabattement réel.

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau 8.

Tableau 8

Valeurs des transmissivités et des coefficients d'emmagasinement d'après la méthode de THEIS.

N° I.R.E.	Q (l/s)	Δ (m)	1/u	w(u)	t/R^2 (s/m ²)	T 10 ⁻³ (m ² /s)	s%	formation captée
271/26	15.70	0.04	10	1	0.07	28.0	0.08	Ouljien
286/26	4.50	0.03	10	1	15.00	11.9	7.1	Plio-Quaternaire
1742/27	6.00	0.10	10	1	5.00	4.8	0.96	Plio-Quaternaire
36/34(I)	6.33	1.00	10	1	230.0	0.5	4.6	Plio-Quaternaire
36/34(II)	6.60	2.00	10	1	1500	0.26	15.6	Plio-Quaternaire
237/34	1.53	0.30	10	1	40.0	0.4	0.64	Hauterivien moyen
312/34	1.16	1.00	10	1	5000	0.09	18.0	Hauterivien moyen
358/34	1.80	2.00	10	1	7000	0.07	19.6	Hauterivien moyen
401/34	1.84	1.30	10	1	5000	0.1	20.0	Hauterivien moyen
571/34	1.60	1.20	10	1	5000	0.1	20.0	Hauterivien moyen
786/34(I)	10.10	0.70	10	1	8.80	1.14	4.0	Jurassique supérieur
786/34(II)	19.00	1.70	10	1	3.50	0.9	0.1	Jurassique supérieur
1197/34	6.60	0.13	10	1	14.0	4.0	2.2	Plio-Quaternaire
1462/34	9.60	0.50	10	1	25.0	1.5	1.5	Plio-Quaternaire
1519/34(I)	2.49	3.50	10	1	80.0	0.56	1.8	Plio-Quaternaire
1519/34(II)	6.83	1.30	10	1	350.0	0.4	5.6	Plio-Quaternaire

I : premier essai

II : deuxième essai

VI.3.2 - Méthode de Jacob (Fig.33)

Cette méthode découle de l'équation de Theis qui peut s'écrire:

$$\Delta = \frac{Q}{4\pi T} \left(-0,5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2.2} + \frac{u^3}{3.3} \dots \right)$$

Si le temps de pompage croît, u décroît. Ainsi pour les grandes valeurs de t ($u < 0,01$), le rabattement peut s'écrire:

$$\Delta = \frac{Q}{4\pi T} (-0,5772 - \ln u)$$

$$\text{où } \Delta = \frac{2,30 Q}{4\pi T} \log \frac{2,25 tT}{R^2 S} \quad (1) \text{ (Approximation de Jacob)}$$

Mode opératoire

Sur un diagramme semi-logarithmique, on porte en abscisses logarithmiques les temps de pompage et en ordonnées arithmétiques les rabattements correspondants. La droite moyenne (passant par les points obtenus) est représentative de l'équation (1) qui peut s'écrire sous la forme:

$$y = ax + b$$

$$\text{où } a = \frac{0,183 Q}{T} \text{ représente la pente pour un cycle logarithmique,}$$

$$T \text{ est égal alors à } \frac{0,183 Q}{a}$$

Cette droite coupe l'axe des temps en un point t_0 où le rabattement $\Delta = 0$; le deuxième terme de la formule (1) s'écrit alors:

$$\log \frac{2,25 t_0 T}{R^2 S} = 0$$

$$\text{donc } \frac{2,25 t_0 T}{R^2 S} = 1$$

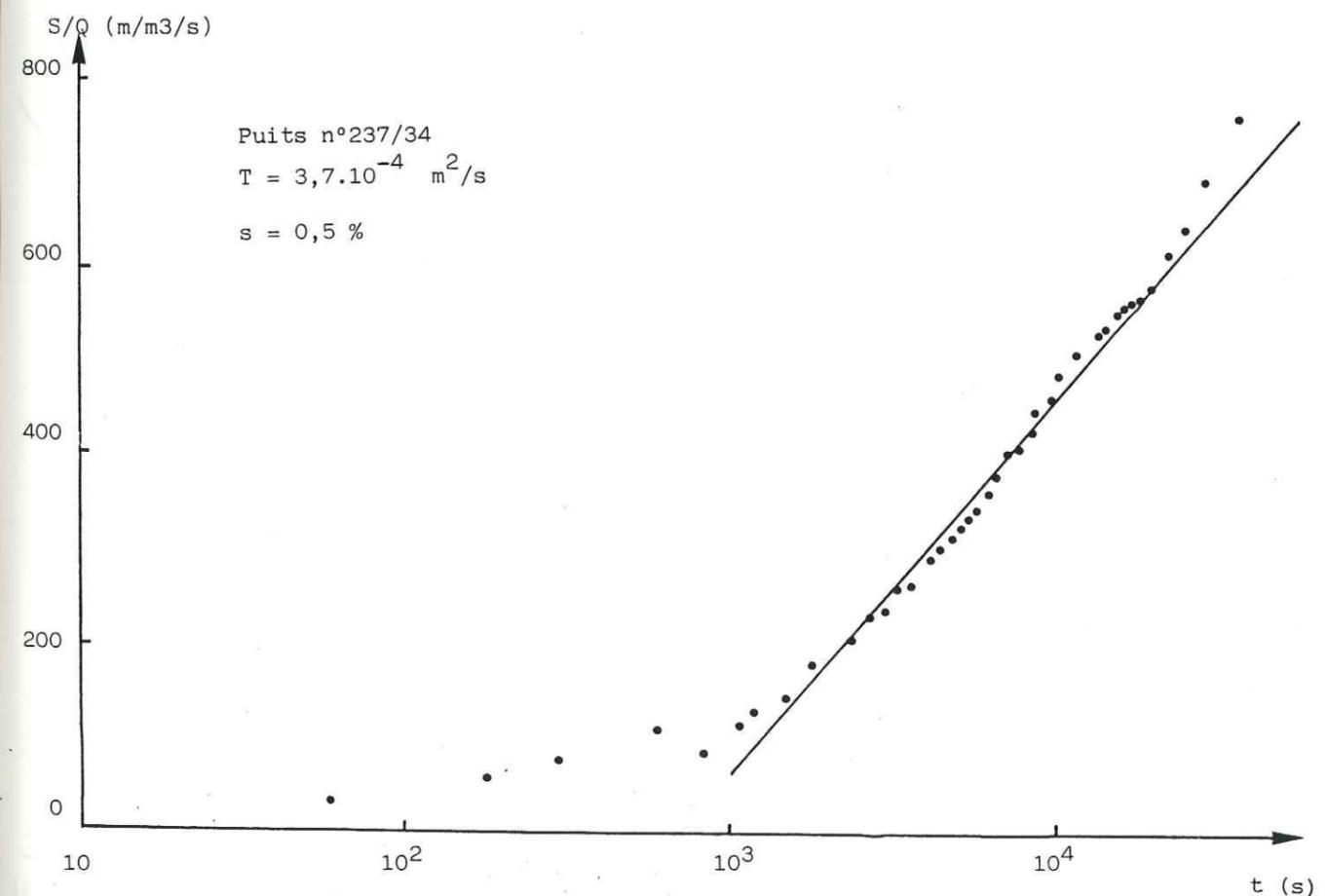
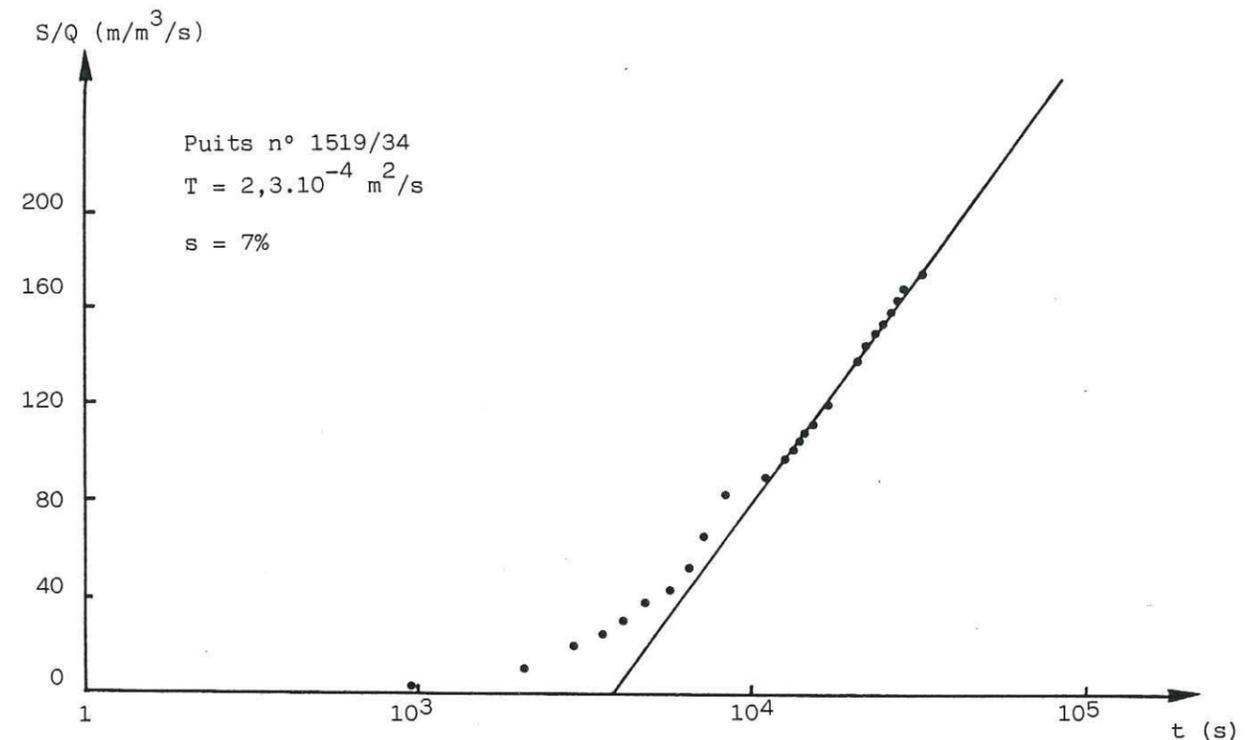
$$\text{On déduit que le coefficient d'emmagainement } S = \frac{2,25 t_0 T}{R^2}$$

Remarque

Pour les essais effectués dans les puits 401/34 et 1462/34, les points s'alignent sur deux droites. On a pris en considération la droite correspondant à des temps de pompage élevés car la formule de Jacob n'est applicable que si $u < 0,01$.

Les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau 9.

Figure 33a - Courbes interprétatives des essais de pompage d'après la méthode JACOB.



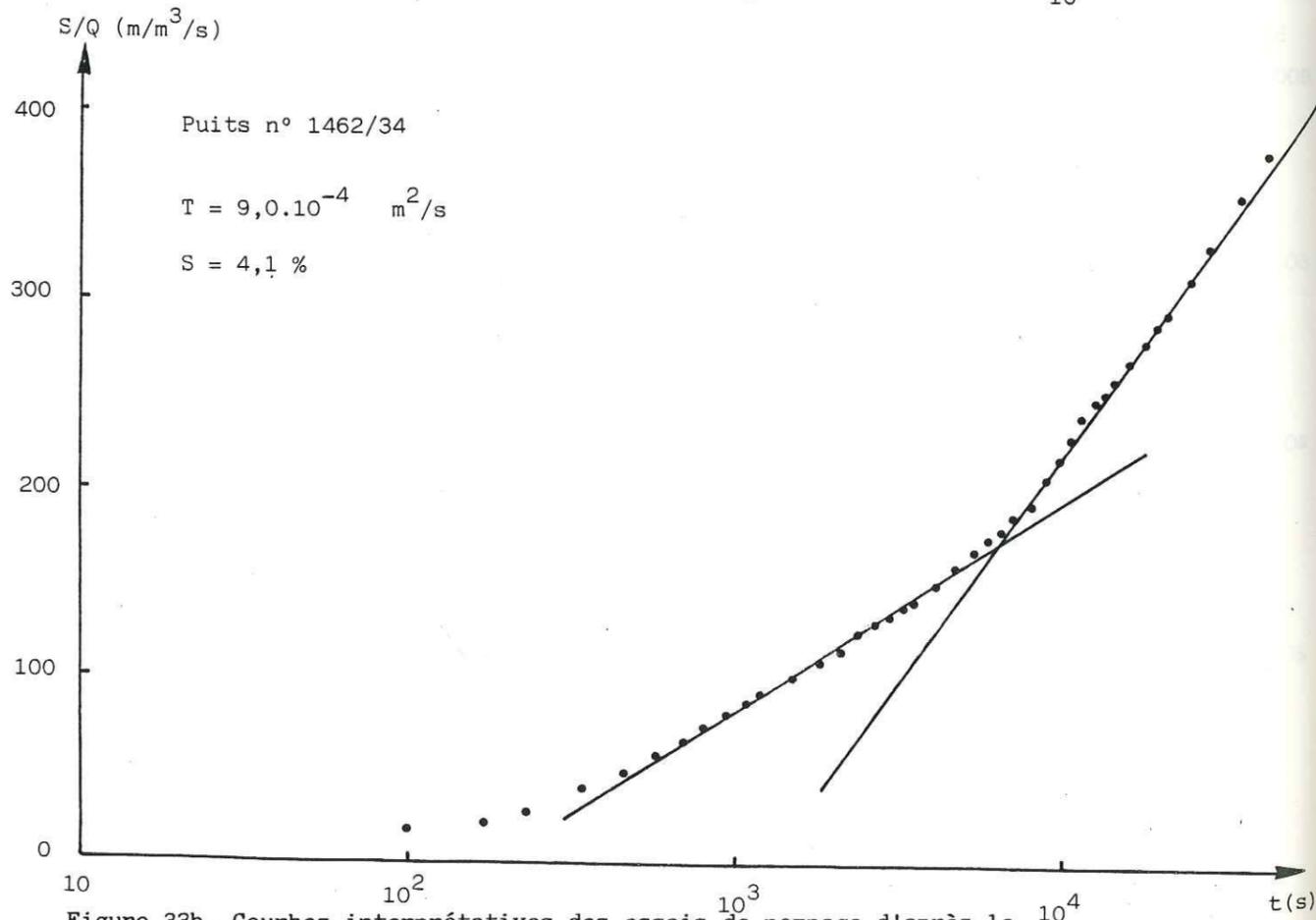
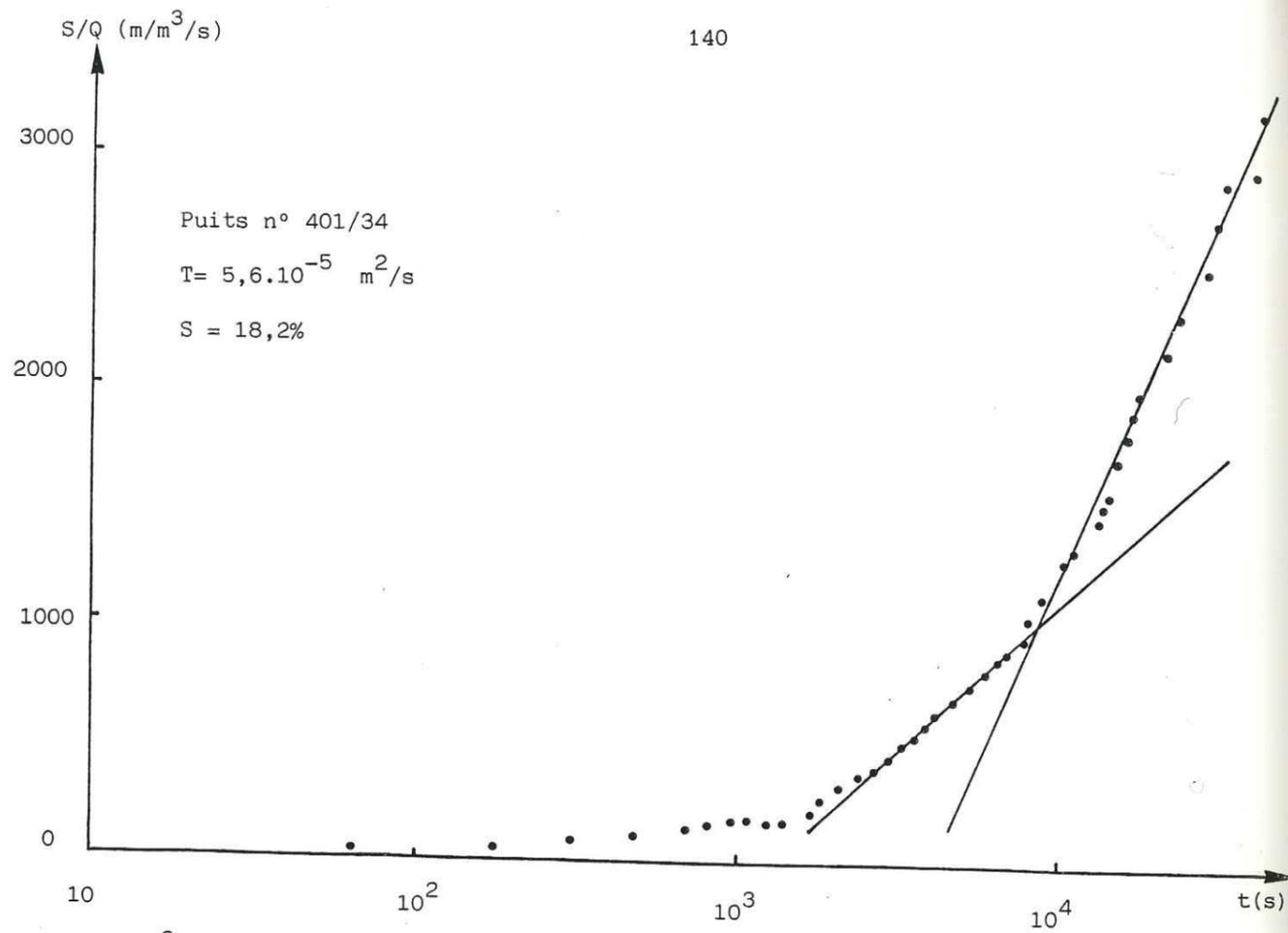


Figure 33b- Courbes interprétatives des essais de pompage d'après la méthode JACOB

Tableau 9

Valeurs de transmissivités et des coefficients d'emménagement d'après la méthode de JACOB.

N° I.R.E.	TEMPS DE POMPAGE (h)	Q MOY. (l/s)	S MAX. (m)	Δ(S) ou Δ(S/Q) (m) ou (m³/s)	T (m²/s)	t (s)	R (m)	s %
271/26	24 h	15.7	0.34	Δ(S) = 0.16	1.8 10 ⁻²	27	12.6	0.7
286/26	24 h	4.5	2.25	Δ(S) = 0.08	1.0 10 ⁻²	250	7.0	11.5
1742/27	12 h	6.0	0.60	Δ(S/Q) = 16	1.1 10 ⁻²	560	11.7	10.4
36/34(I)	24 h	6.3	3.35	Δ(S) = 2.24	5.2 10 ⁻⁴	1000	7.2	2.3
36/34(II)	24 h	6.6	4.09	Δ(S) = 5.20	2.3 10 ⁻⁴	9600	6.7	11.2
237/34	12 h	1.5	1.31	Δ(S) = 0.75	3.7 10 ⁻⁴	1000	12.7	0.5
312/34	6 h	1.2	3.05	Δ(S) = 2.36	8.9 10 ⁻⁵	2000	1.6	15.4
358/34	6 h	1.8	2.20	Δ(S) = 3.90	8.4 10 ⁻⁵	8000	2.4	27.0
401/34	11 h	1.8	6.49	Δ(S) = 5.98	5.6 10 ⁻⁵	5200	1.9	18.2
571/34	6 h	1.6	2.95	Δ(S) = 0.68	4.3 10 ⁻⁴	340	1.9	9.1
786/34(I)	12 h	10.1	2.15	Δ(S) = 0.84	2.2 10 ⁻³	120	8.0	0.9
786/34(II)	12 h	19.0	4.03	Δ(S) = 1.30	2.7 10 ⁻³	35	8.1	33.0
1197/34	12 h	6.6	0.62	Δ(S) = 0.41	2.9 10 ⁻³	620	12.1	2.8
1462/34	12 h	9.6	3.58	Δ(S) = 1.93	9.0 10 ⁻⁴	750	6.1	4.1
1519/34(I)	24 h	2.5	1.95	Δ(S) = 2.02	2.3 10 ⁻⁴	5000	5.9	7.0
1519/34(II)	9 h	6.8	6.75	Δ(S) = 2.90	4.3 10 ⁻⁴	600	3.2	5.6

I : premier essai

II : deuxième essai

VI.3.3 - Méthode de la remontée de THEIS (Fig.34)

La détermination de la transmissivité d'après la courbe de remontée de THEIS est la plus fiable car la remontée traduit mieux le régime naturel des eaux souterraines.

A la fin du pompage, le niveau d'eau remonte dans l'ouvrage pour regagner sa position d'origine.

On mesure la remontée par le rabattement résiduel Δ'' qui représente la différence entre le niveau statique et le niveau mesuré à l'instant t' ; t' est le temps écoulé depuis l'arrêt du pompage.

Le rabattement résiduel s'écrit alors:

$$\Delta'' = \Delta - \Delta' = \frac{0,183 Q}{T} \left(\log \frac{2,25 tT}{R^2 S} - \log \frac{2,25 t'T}{R^2 S'} \right)$$

S et S' sont respectivement les coefficients d'emmagasinement au cours du pompage et lors de la remontée.

En admettant que $S = S'$, on a:

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

- Avec
- Δ = rabattement à la fin de pompage
 - Δ' = rabattement durant la remontée par rapport au niveau statique
 - t = temps depuis le début du pompage
 - t' = temps depuis l'arrêt du pompage

Mode opératoire

Sur une feuille semi-logarithmique on reporte en ordonnées arithmétiques les rabattements résiduels et en abscisse logarithmique t/t' . On trace la droite moyenne passant par l'ensemble des points.

Pour un cycle logarithmique la pente de la droite est égale à

$$\frac{0,183 Q}{T}$$

d'où $T = \frac{0,183 Q}{a}$

Les résultats obtenus par cette méthode sont reportés sur le tableau 10.

Figure 34a- Courbes interprétatives des essais de pompage d'après la méthode de la remontée de THEIS

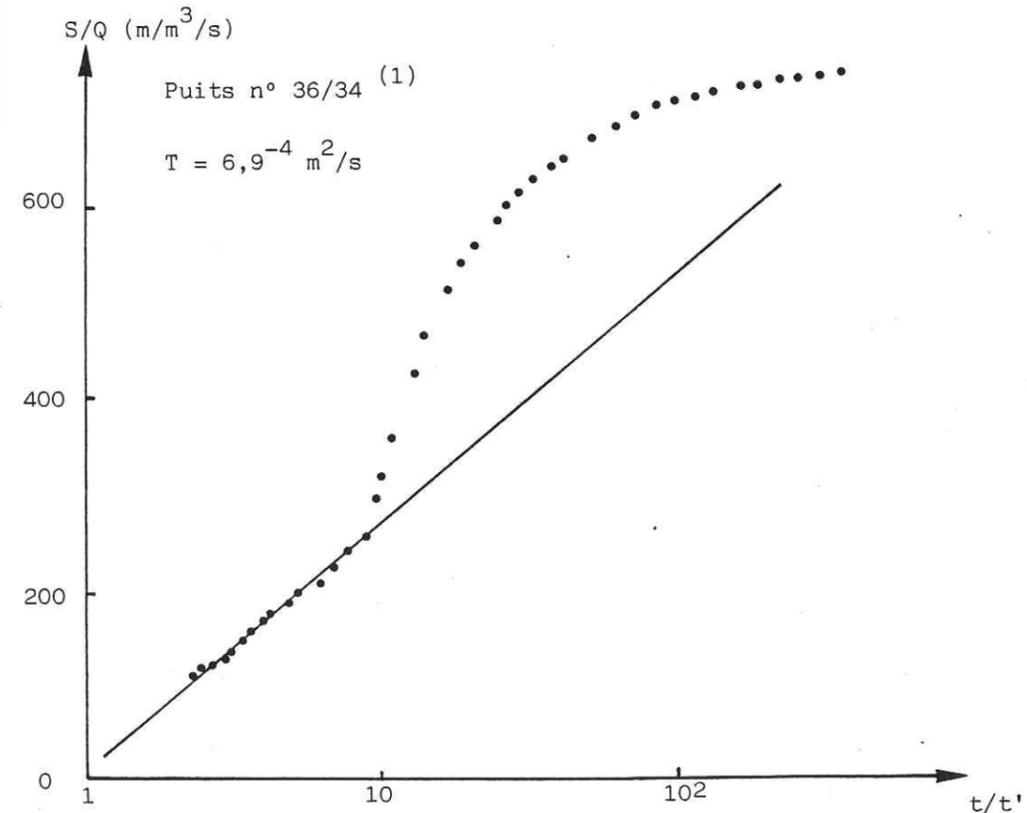
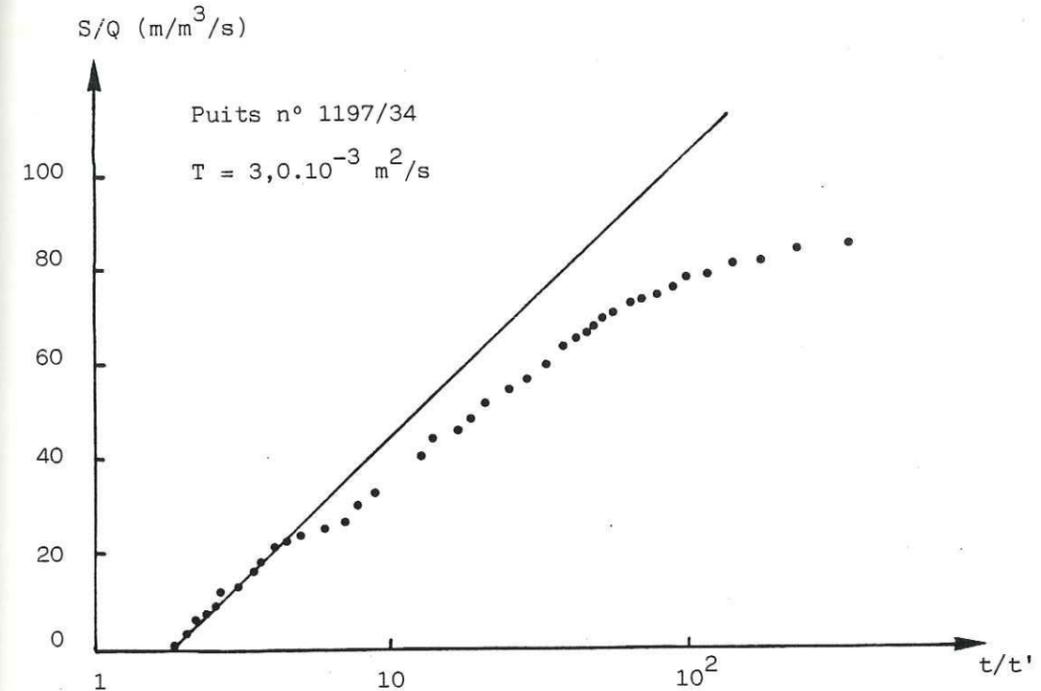


Figure 34b - Courbes interprétatives des essais de pompage d'après la méthode de la remontée de THEIS

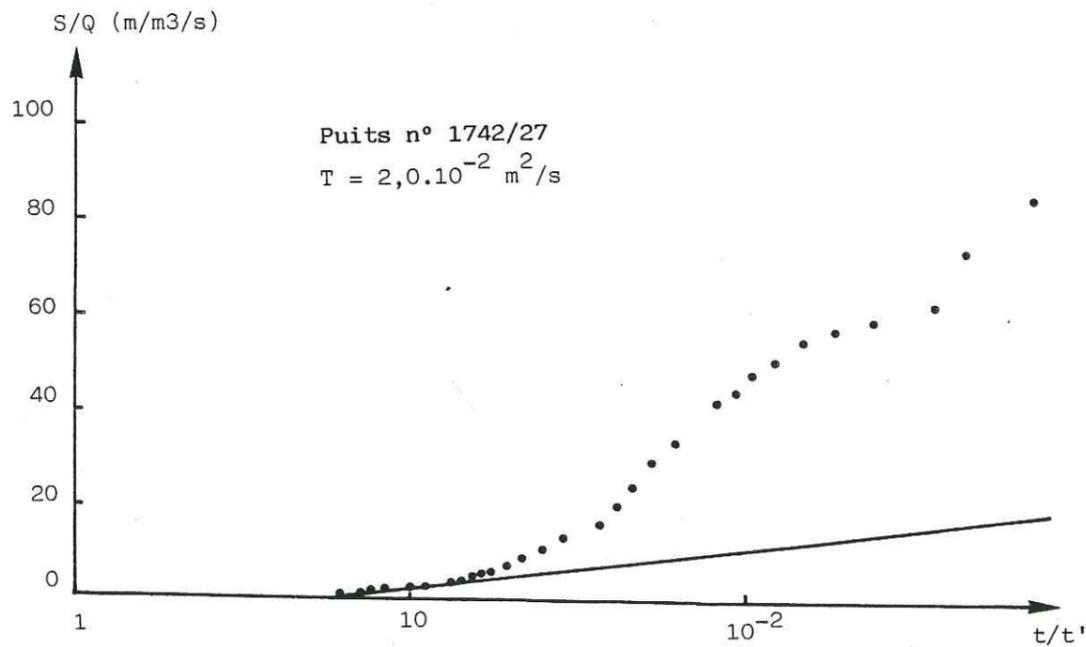
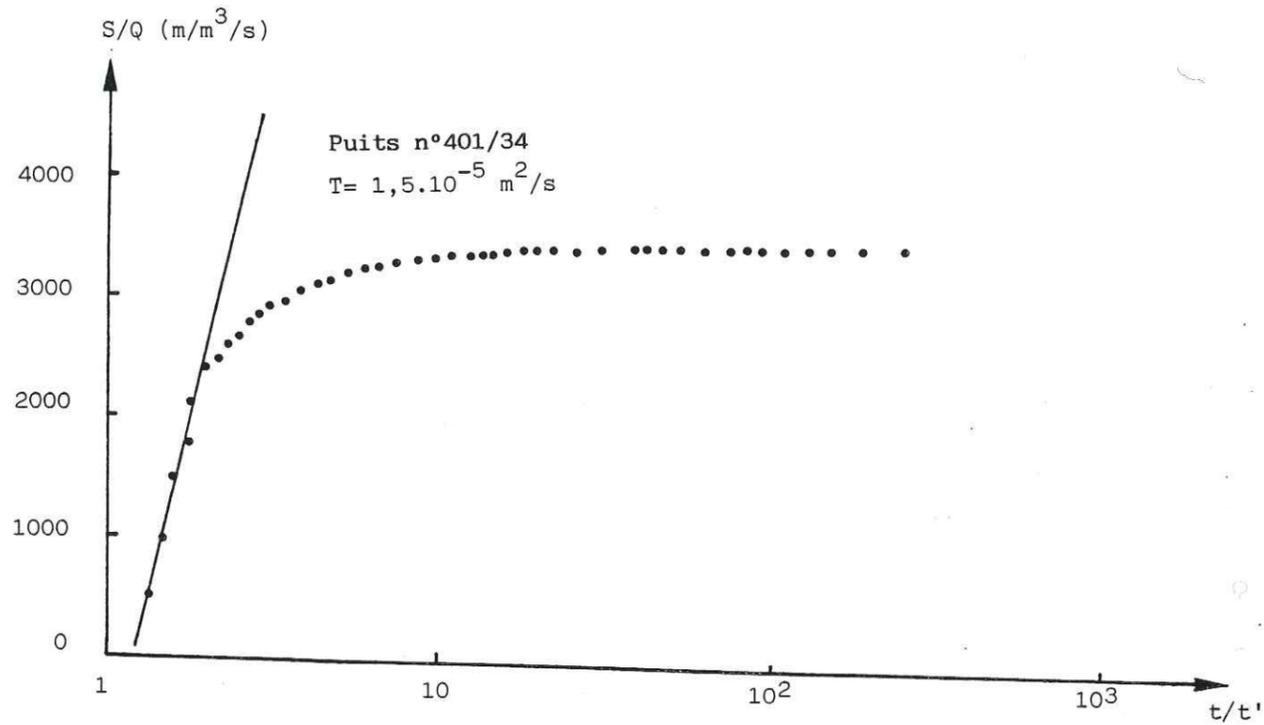


Tableau 10

Valeurs des transmissivités et des coefficients d'emmagasinement d'après la méthode de la remontée de THEIS.

N° I.R.E.	temps de remontée	$\Delta(s)$ ou $\Delta(s/Q)$ (m) (m/m/s)	T (m ² /s)
271/26	13mn	$\Delta(s/Q) = 4.7$	$3.9 \cdot 10^{-2}$
286/26	28h	$\Delta(s/Q) = 155$	$1.2 \cdot 10^{-3}$
1742/27	2h15'	$\Delta(s/Q) = 9$	$2.0 \cdot 10^{-2}$
36/34(I)	24h	$\Delta(s/Q) = 265$	$6.9 \cdot 10^{-4}$
36/34(II)	70h	$\Delta(s/Q) = 260$	$7.0 \cdot 10^{-4}$
237/34	14h	$\Delta(s/Q) = 12000$	$1.5 \cdot 10^{-5}$
312/34	20h	$\Delta(s/Q) = 4200$	$4.0 \cdot 10^{-5}$
358/34	2h	$\Delta(s) = 0.82$	$2.1 \cdot 10^{-4}$
401/34	32h	$\Delta(s/Q) = 12200$	$1.5 \cdot 10^{-5}$
571/34	20h	$\Delta(s/Q) = 500$	$3.6 \cdot 10^{-5}$
786/34(I)	7h	$\Delta(s) = 0.35$	$5.2 \cdot 10^{-3}$
786/34(II)	12h30'	$\Delta(s) = 2.4$	$1.5 \cdot 10^{-3}$
1197/34	12h	$\Delta(s/Q) = 61$	$3.0 \cdot 10^{-3}$
1462/34	2h	$\Delta(s/Q) = 110$	$1.6 \cdot 10^{-3}$
1519/34(I)	26h	$\Delta(s/Q) = 315$	$5.8 \cdot 10^{-4}$
1519/34(II)	32h	$\Delta(s/Q) = 500$	$3.7 \cdot 10^{-4}$

I : premier essai

II : deuxième essai

VI.3.4 - Méthode de CHOW (Fig.35)

CHOW (1952) développe une méthode rapide en introduisant la fonction

$$F(u) = \frac{W(u) \cdot e^u}{2.3}$$

permettant de trouver les valeurs de $W(u)$ et u correspondant au rabattement S en un temps donné t .

C'est une méthode dont l'intérêt pratique est que l'on n'a pas besoin de tracer la courbe de la méthode de THEIS, sans pour autant se limiter aux faibles valeurs de R et aux grandes valeurs de T , comme c'est le cas par la méthode de JACOB.

Mode opératoire

Sur un papier semi-logarithmique on reporte en abscisses logarithmiques t et en ordonnées les rabattements. On sélectionne un point quelconque A de la courbe passant par l'ensemble des points et on trace la tangente en A à la courbe. A ce point A correspond un rabattement S_A , un temps t_A et on calcule la pente de la tangente (différence de rabattement pour un cycle logarithmique du temps), soit:

$$\Delta S_A$$

$F(u)$ est donné par la formule

$$F(u) = \frac{S_A}{\Delta S_A}$$

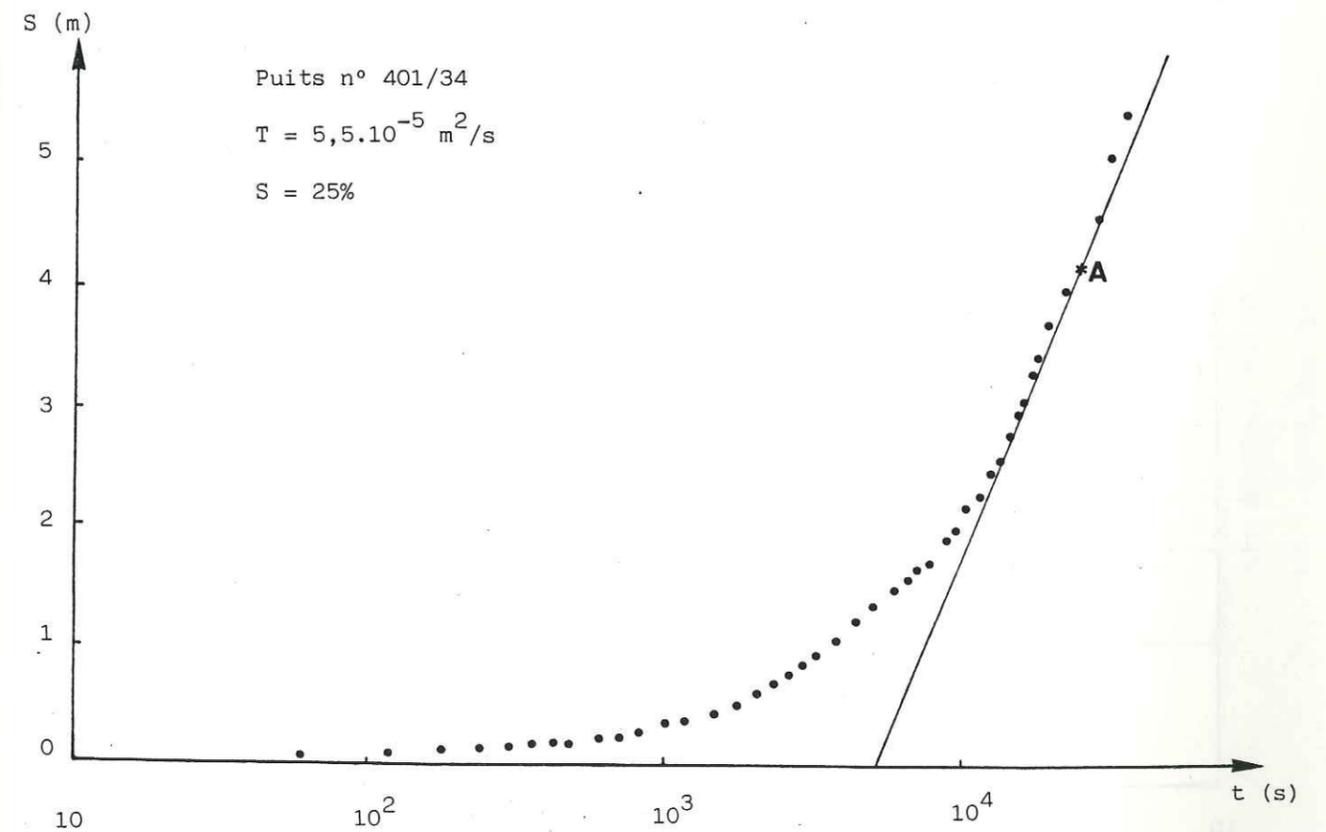
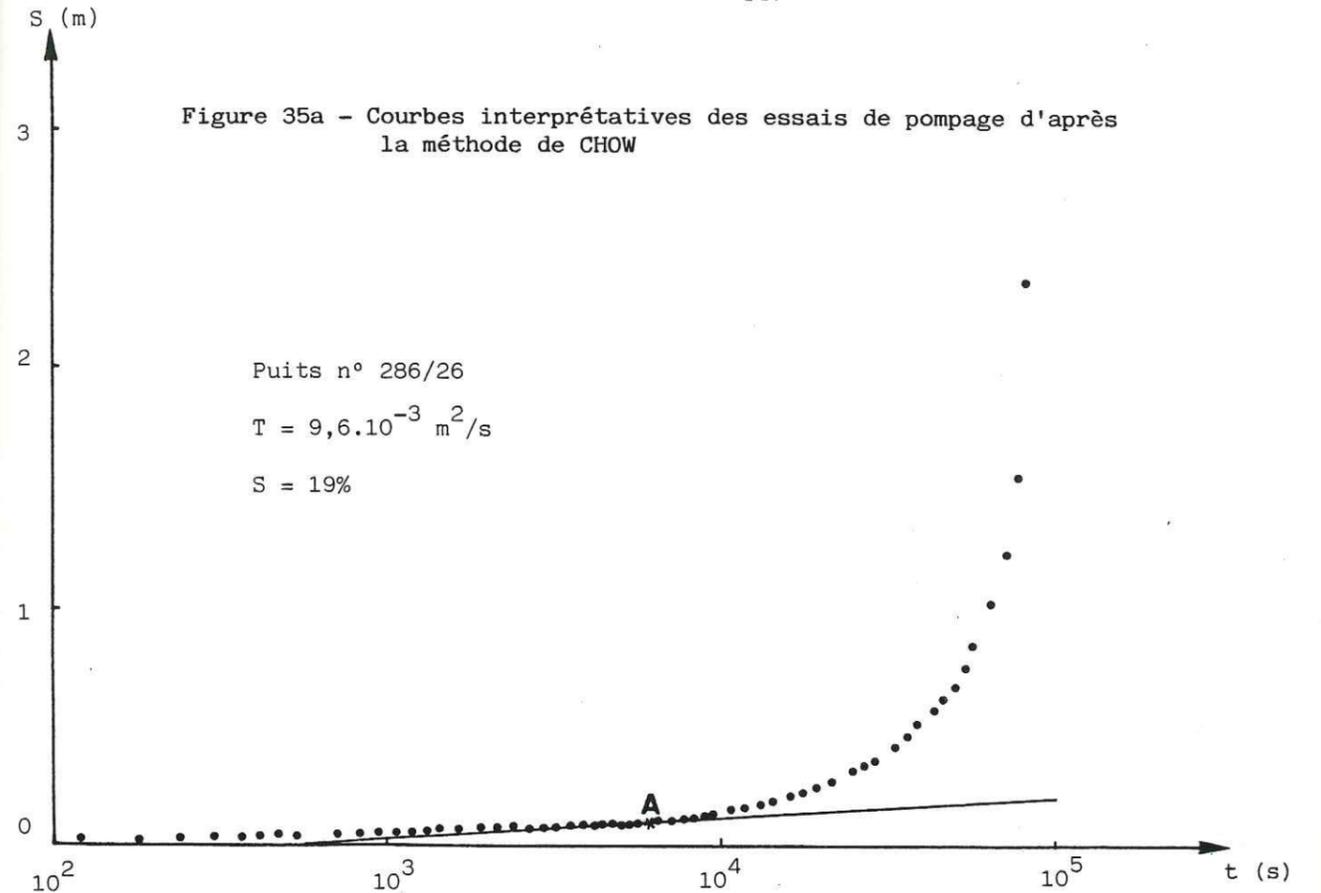
A partir de l'abaque de CHOW on déduit les valeurs de $W(u)$ et de u correspondantes à $F(u)$.

La transmissivité et le coefficient d'emmagasinement s'écrivent:

$$T = \frac{Q}{4 \pi S_A} \cdot W(u)_A \quad \text{et}$$

$$S = \frac{U_A \cdot T \cdot t_A}{R^2}$$

Les résultats obtenus par cette méthode sont résumés dans le tableau II.



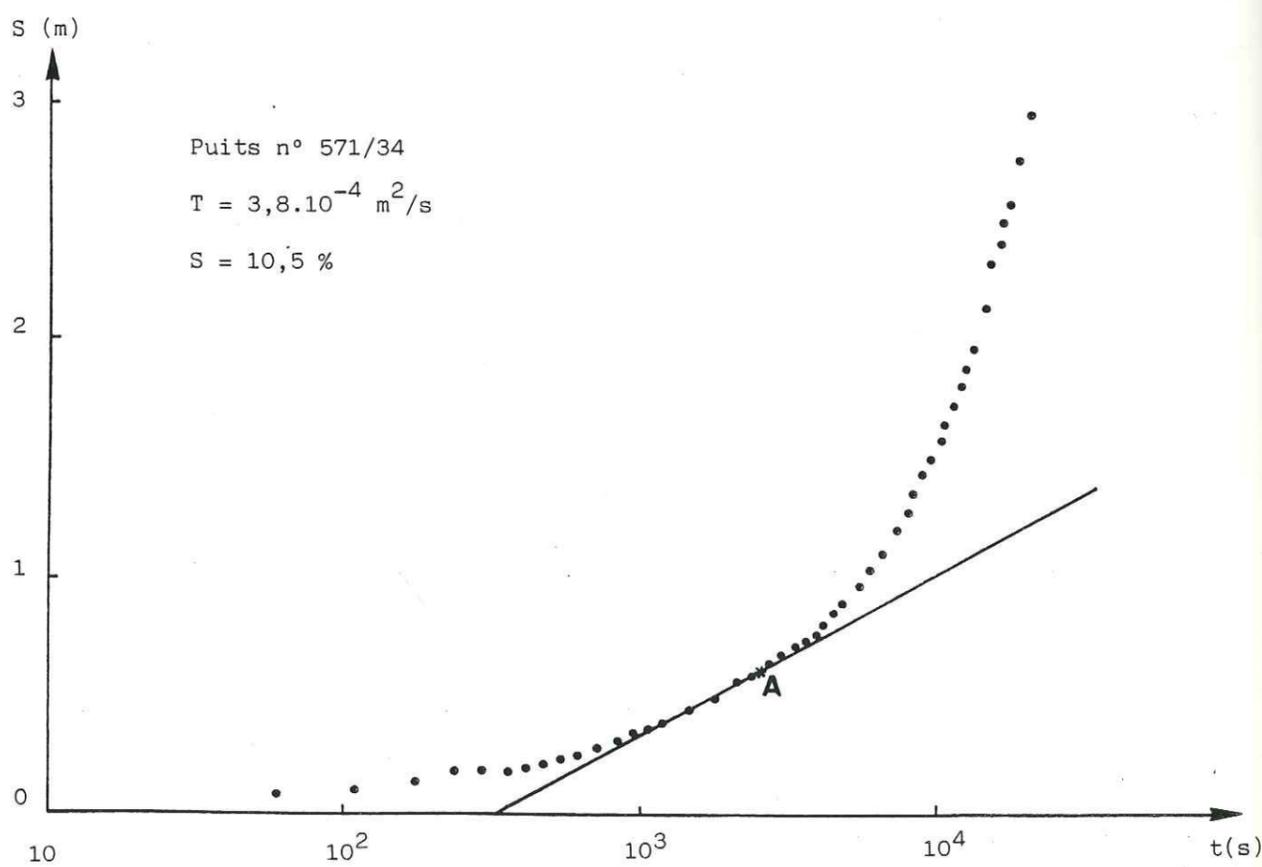
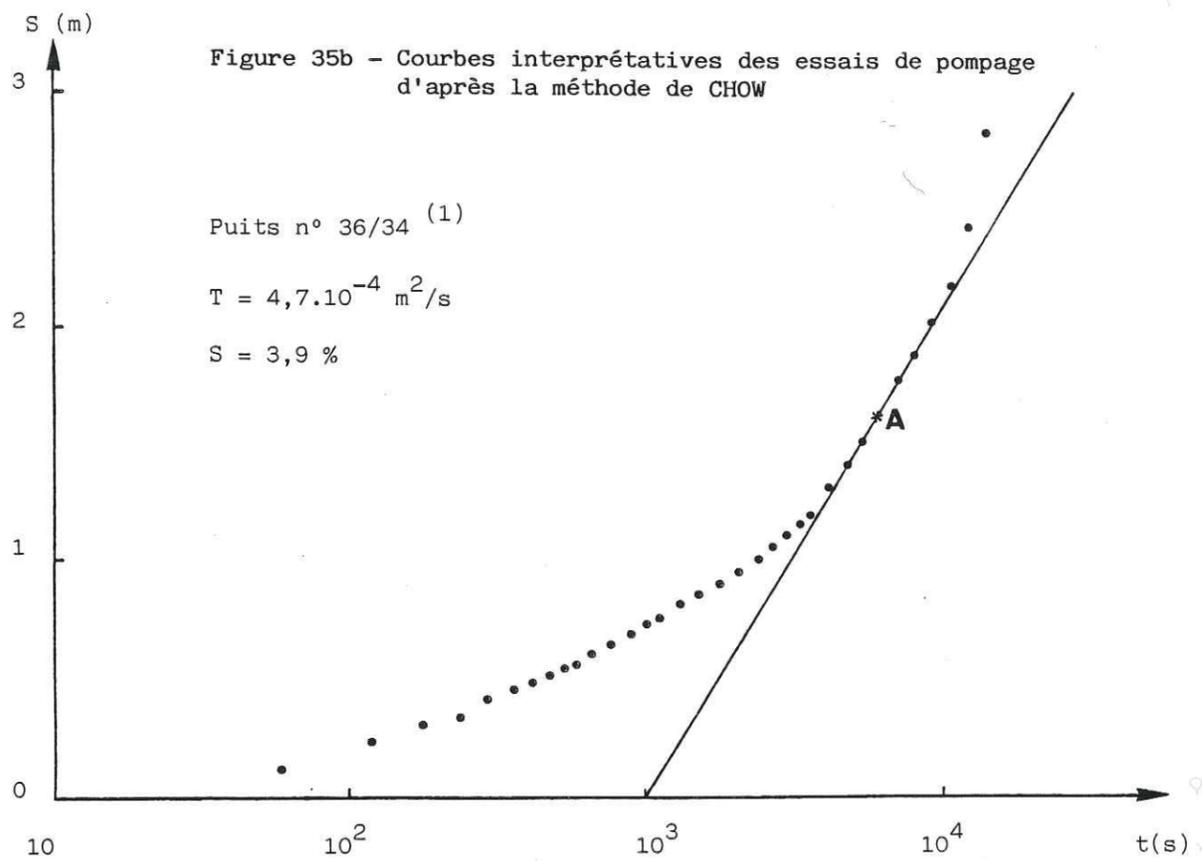
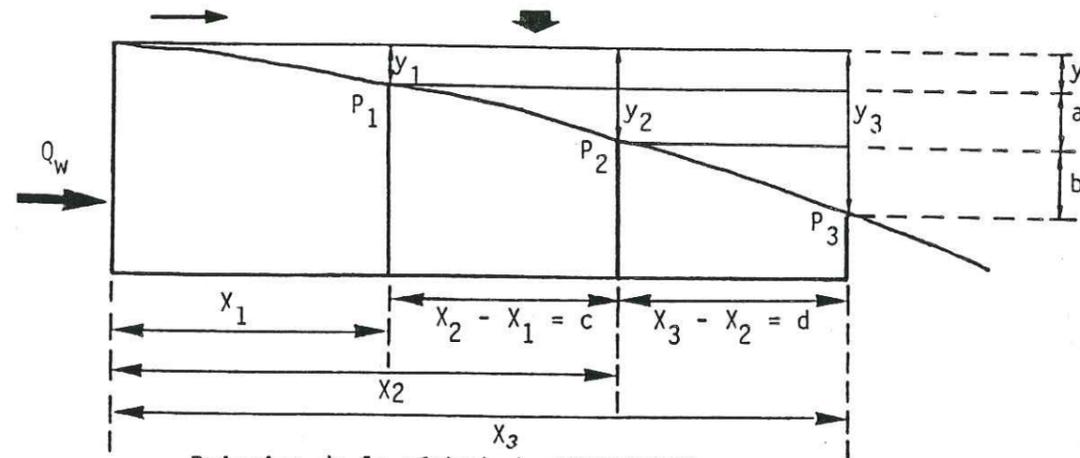


Tableau 11
Valeurs de transmissivités et des coefficients d'emmagasinement d'après la méthode de CHOW.

N° I.R.E.	s_A (m)	s_A (m)	t_A (s)	F_u	u_A	$W(u)_A$	T (m ² /s)	$s\%$
271/26	0.30	0.16	1900	1.875	0.008	4.26	$1.8 \cdot 10^{-2}$	0.7
286/26	0.10	0.08	6000	1.250	0.040	2.68	$9.6 \cdot 10^{-3}$	19
1742/27	0.15	0.24	280	0.600	2.250	1.10	$3.5 \cdot 10^{-3}$	6.4
36/34(I)	1.60	2.24	6000	0.715	0.180	1.50	$4.7 \cdot 10^{-4}$	3.9
36/34(II)	2.10	5.20	25000	0.400	0.500	0.56	$1.4 \cdot 10^{-4}$	15.5
237/34	0.75	0.75	10000	1.000	0.070	2.15	$3.5 \cdot 10^{-4}$	0.6
312/34	1.64	2.36	10000	0.690	0.180	1.50	$8.4 \cdot 10^{-5}$	23
358/34	1.25	3.90	20000	0.320	0.700	0.36	$4.1 \cdot 10^{-5}$	37
401/34	4.00	5.98	23000	0.670	0.180	1.50	$5.5 \cdot 10^{-5}$	25
571/34	0.60	0.68	2500	0.882	0.100	1.82	$3.8 \cdot 10^{-4}$	10.5
786/34(I)	1.44	0.84	10000	1.710	0.010	4.04	$2.3 \cdot 10^{-3}$	1.4
786/34(II)	3.48	1.30	18000	2.680	0.001	6.00	$2.6 \cdot 10^{-3}$	0.4
1197/34	0.40	0.41	6000	0.975	0.070	2.15	$2.8 \cdot 10^{-3}$	3.2
1462/34	2.16	1.93	10000	1.120	0.050	2.47	$8.7 \cdot 10^{-4}$	4.7
1519/34(I)	1.60	1.95	50000	0.820	0.130	1.60	$2.0 \cdot 10^{-4}$	14.8
1519/34(II)	2.00	2.90	3000	0.700	0.180	1.50	$4.1 \cdot 10^{-4}$	8.4

I : premier essai
II : deuxième essai

VI.4 - PRINCIPE DE LA DETERMINATION DU COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT PAR LA
METHODE DE RORABAUGH (1960)



Principe de la méthode de RORABAUGH

Si on dispose de trois piézomètres alignés sur une même ligne de courant dans un aquifère de grande dimension, on peut déterminer, en régime de tarissement, la diffusivité de la nappe qui s'écrit:

$$\frac{T}{S} = \frac{h}{t} \cdot \frac{cd(c+d)}{2(bc-ad)}$$

Avec:

h = variation moyenne du niveau piézométrique entre hautes et basses eaux en mètres.

t = temps écoulé entre les hautes eaux et les basses eaux exprimé en secondes.

$c = x_2 - x_1$ et $d = x_3 - x_2$ = distance entre les piézomètres.

a et b = différences de niveaux entre les piézomètres en basses eaux.

a , b , c et d sont exprimés en mètres.

Connaissant les valeurs de transmissivité déterminées à partir des essais de pompage, il est donc possible de calculer le coefficient d'emmagasinement.

Mais cette méthode fait intervenir le paramètre h qui est la variation du niveau d'eau entre la période des hautes eaux et des basses eaux. Cela suppose donc une variation naturelle du niveau piézométrique, ce qui n'est pas le cas pour la nappe du Sahel étant donné l'influence du périmètre d'irrigation de Doukhala situé en amont hydraulique du secteur.

Il nous est donc impossible d'utiliser cette méthode dans cette étude.

Tableau 12

Récapitulation des valeurs de transmissivités (m^2/s)

N° I.R.E.	METHODE DE THEIS	METHODE DE JACOB	REMONTEE DE THEIS	METHODE DE CHOW	VALEUR MOYENNE
271/26	$2.8 \cdot 10^{-2}$	$1.8 \cdot 10^{-2}$	$3.9 \cdot 10^{-2}$	$1.8 \cdot 10^{-2}$	$2.6 \cdot 10^{-2}$
286/26	$1.2 \cdot 10^{-2}$	$1.0 \cdot 10^{-2}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$	$9.6 \cdot 10^{-3}$	$8.2 \cdot 10^{-3}$
1742/27	$4.8 \cdot 10^{-3}$	$1.1 \cdot 10^{-2}$	$2.0 \cdot 10^{-2}$	$3.5 \cdot 10^{-3}$	$9.9 \cdot 10^{-3}$
36/34(I)	$5.0 \cdot 10^{-4}$	$5.2 \cdot 10^{-4}$	$6.9 \cdot 10^{-4}$	$4.7 \cdot 10^{-4}$	$5.4 \cdot 10^{-4}$
36/34(II)	$2.6 \cdot 10^{-4}$	$2.3 \cdot 10^{-4}$	$7.0 \cdot 10^{-4}$	$1.4 \cdot 10^{-4}$	$3.3 \cdot 10^{-4}$
237/34	$4.0 \cdot 10^{-4}$	$3.7 \cdot 10^{-4}$	$1.5 \cdot 10^{-5}$	$3.5 \cdot 10^{-4}$	$3.7 \cdot 10^{-4}$
312/34	$9.0 \cdot 10^{-5}$	$8.9 \cdot 10^{-5}$	$4.0 \cdot 10^{-5}$	$8.4 \cdot 10^{-5}$	$7.6 \cdot 10^{-5}$
358/34	$7.0 \cdot 10^{-5}$	$8.4 \cdot 10^{-5}$	$2.1 \cdot 10^{-4}$	$4.1 \cdot 10^{-5}$	$6.5 \cdot 10^{-5}$
401/34	$1.0 \cdot 10^{-4}$	$5.6 \cdot 10^{-5}$	$1.5 \cdot 10^{-5}$	$5.5 \cdot 10^{-5}$	$4.2 \cdot 10^{-5}$
571/34	$1.0 \cdot 10^{-4}$	$4.3 \cdot 10^{-4}$	$3.6 \cdot 10^{-5}$	$3.8 \cdot 10^{-4}$	$3.2 \cdot 10^{-4}$
786/34(I)	$1.1 \cdot 10^{-3}$	$2.2 \cdot 10^{-3}$	$5.2 \cdot 10^{-3}$	$2.3 \cdot 10^{-3}$	$2.7 \cdot 10^{-3}$
786/34(II)	$9.0 \cdot 10^{-4}$	$2.7 \cdot 10^{-3}$	$1.5 \cdot 10^{-3}$	$2.6 \cdot 10^{-3}$	$1.9 \cdot 10^{-3}$
1197/34	$4.0 \cdot 10^{-3}$	$2.9 \cdot 10^{-3}$	$3.1 \cdot 10^{-3}$	$2.8 \cdot 10^{-3}$	$3.2 \cdot 10^{-3}$
1462/34	$1.5 \cdot 10^{-3}$	$9.0 \cdot 10^{-4}$	$1.6 \cdot 10^{-3}$	$8.7 \cdot 10^{-4}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$
1519/34(I)	$5.6 \cdot 10^{-4}$	$2.3 \cdot 10^{-4}$	$5.8 \cdot 10^{-4}$	$2.0 \cdot 10^{-4}$	$3.9 \cdot 10^{-4}$
1519/34(II)	$4.0 \cdot 10^{-4}$	$4.3 \cdot 10^{-4}$	$3.7 \cdot 10^{-4}$	$4.1 \cdot 10^{-4}$	$4.0 \cdot 10^{-4}$

I : premier essai

II : deuxième essai

VI.5 - CONCLUSION

Le tableau 12 permet de comparer rapidement les résultats obtenus par les quatre méthodes de détermination de la transmissivité. Il est intéressant de constater la très bonne concordance entre les résultats fournis par les différentes méthodes.

Pour le Plio-Quaternaire, la transmissivité varie entre $3,3 \cdot 10^{-4}$ m²/s et $9,0 \cdot 10^{-3}$ m²/s avec une moyenne de $3 \cdot 10^{-3}$ m²/s.

Les calcaires de Dridrat (Hauterivien moyen) ont une transmissivité qui varie entre $4,2 \cdot 10^{-5}$ m²/s et $3,7 \cdot 10^{-4}$ m²/s avec une moyenne de l'ordre de $1,7 \cdot 10^{-4}$ m²/s.

Pour le Jurassique supérieur, un seul essai de pompage a été interprété. La transmissivité calculée est de $2,3 \cdot 10^{-3}$ m²/s, étant donné la grande variation lithologique du Jurassique supérieur, ce chiffre est loin d'être représentatif.

La plus grande valeur de la transmissivité calculée est celle des sables ouljiens situés en bordure ouest du secteur. Elle est de $2,6 \cdot 10^{-2}$ m²/s. Bien qu'il n'y a eu qu'un seul essai de pompage dans l'Oulja on peut retenir ce chiffre car ces sédiments sont d'une grande homogénéité.

Par contre les valeurs du coefficient d'emmagasinement calculées sont très différentes d'un point à l'autre dans la même formation avec cependant une certaine concordance entre les différentes méthodes.

On ne pourra aboutir, par suite de l'absence de piézomètres d'observation autour des puits d'essai qu'à des résultats théoriques.

Nous ne saurions insister sur la nécessité de développer et d'améliorer l'infrastructure des équipements indispensables pour une meilleure connaissance des caractéristiques hydrodynamiques de toute la région et en particulier la multiplication des essais de pompage avec piézomètres d'observation.

CONCLUSION GENERALE

Dans le cadre de cette étude, nous avons essayé de dégager un certain nombre de paramètres (géologiques, hydroclimatiques, piézométriques, hydrochimiques et hydrodynamiques) du Sahel des Doukkala.

Les précipitations moyennes annuelles sont de 362 mm sur l'ensemble de la région avec cependant un gradient assez élevé E-W et un gradient beaucoup plus faible N-S. Les diverses méthodes de calcul et l'établissement du bilan hydrologique nous conduisent à admettre que, sur l'ensemble du secteur, l'évapotranspiration représente 90% des précipitations. Le ruissellement étant négligeable, l'infiltration est donc de 10% de la lame d'eau précipitée.

L'étude géologique de la région nous a permis de définir les réservoirs potentiels et leur géométrie.

Parmi les formations géologiques, il en est essentiellement deux qui jouissent de propriétés hydrogéologiques importantes. Il s'agit des formations plio-quaternaires pour lesquelles le rôle de mur est assuré par les argiles de l'Hauterivien supérieur, et des calcaires de l'Hauterivien moyen dont le substratum imperméable est constitué par les marnes de l'Hauterivien inférieur.

La connaissance des caractères physico-chimiques des eaux a permis d'apprécier la qualité des eaux de la région, mais aussi de confirmer et de préciser les résultats obtenus par l'étude piézométrique.

Deux grands faciès chimiques ont été mis en évidence: un faciès chloruré sodique qui domine dans la bordure atlantique et au N E du Sahel et un faciès bicarbonaté sodique et calcique qui couvre la partie centrale du Sahel.

La détermination de l'origine des ions a permis de conclure à trois origines de minéralisation des eaux souterraines:

- . la dissolution des formations calcaires encaissantes;
- . une pollution artificielle par les engrais utilisés dans le périmètre irrigué des Doukkala;
- . l'influence des eaux marines.

Les valeurs de transmissivité déduites de l'interprétation des essais de pompage sont de l'ordre de $3 \cdot 10^{-3}$ m²/s pour les calcaires plio-quaternaires et $2 \cdot 10^{-3}$ m²/s pour les calcaires de l'Hauterivien moyen. Mais étant donné que ces derniers ont essentiellement une perméabilité de fissures, la transmissivité est très variable d'un point à l'autre.

Dans l'état actuel des connaissances, il est impossible de chiffrer les réserves.

La transmissivité n'est pas assez bien connue pour déterminer les débits transités au moyen de la formule de DARCY.

Pour les réserves régulatrices (volume d'eau contenue entre les niveaux des hautes et basses eaux), les fluctuations de la nappe du Sahel sont perturbées par l'alimentation permanente de la nappe par les apports issus du périmètre d'irrigation situé à l'amont.

Pour les réserves permanentes, qui sont définies pour une nappe libre comme étant le volume d'eau contenu entre le substratum et la surface piézométrique minimale moyenne, trois facteurs restent très mal connus: le coefficient d'emmagasinement, la profondeur du substratum dans la partie nord du secteur et, comme nous l'avons déjà dit, la véritable nature du régime naturel de la nappe.

Enfin, nous avons pu définir des axes de recherches futures tant théoriques que pratiques.

En 1951, date à laquelle a été publiée la carte géologique de la méséta côtière par M. GIGOUT, l'étage Valanginien comprenait en fait le Valanginien et le Berriasien.

En 1963, lors du colloque sur le Crétacé inférieur qui a eu lieu à Lyon, il a été décidé de distinguer l'étage Berriasien du Valanginien. Il serait donc intéressant d'appliquer les conclusions de ce colloque à la région de notre étude.

La région de Safi, qui présente une structure complexe, n'a pu être intégrée dans cette étude régionale. Il est préférable qu'elle fasse l'objet d'une étude hydrogéologique détaillée à petite échelle qui permettrait de préciser le rôle hydrogéologique des failles décelées dans le secteur.

Pour le biseau salé, l'absence de forages alignés perpendiculairement à la côte ne nous a pas permis de dresser le profil du biseau salé. Il serait souhaitable d'exécuter des forages qui permettraient d'étudier avec précision l'interface eau douce - eau salée.

Il faudrait suivre de près la chimie des eaux dans la zone côtière située entre El Oualidia et Sidi Moussa qui est très menacée par la pollution des eaux douces par les eaux salées. Cette zone risque d'avoir le même sort que la zone située entre El Jadida et l'embouchure d'Oum-er-Rbia.

Enfin, il reste à vérifier par des forages mécaniques l'hypothèse émise au cours de cette étude d'une alimentation profonde dans le Sud du plateau mazaganais.

BIBLIOGRAPHIE

- AMBROGGI R., THUILLE G. (1952).- Abada-Doukkala in: Hydrogéologie du Maroc. Notes et Mémoires. Service Géologique MAROC, n°97.
- AMBROGGI R. (1960).- Observations générales sur l'évasion des eaux marines dans les nappes d'eau souterraine et dans les régions d'estuaires le long des côtes du Maroc. In Congr. Helsinki.
- AMBROGGI R., MARGAT (1960).- Légende générale des cartes hydrogéologiques du Maroc. Notes et Mémoires. Service Géologique MAROC, Rabat n°148.
- BOLLELLI (1950).- Danger d'un pompage intense dans la région SE d'El Jadida (Mazagan). Notes Serv. Géol. MAROC, Rabat, n°76.
- C.A.G. (1968).- Etude par prospection électrique dans le Sahel des Doukkala.
- CASTANY G. (1967).- Traité pratique des eaux souterraines. Edition Dunod, Paris.
- CASTANY G. (1983).- Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Edition Dunod, Paris.
- COLAS R., CABAUD R., VIVIER P. (1968).- Dictionnaire de l'eau et des questions annexes.
- COLAS DES FRANCS E. (1962).- Note sur la possibilité de création d'une réserve pendant les périodes de chômage du canal de Safi.
- COLAS DES FRANCS E. (1962).- Acidification sur un forage. Un nouvel exemple de l'application au Maroc. Rapport inédit arc. MTPC/DH/DRE.
- DEGREMONT (1963).- Mémento technique de l'eau.
- DE MARSILLY G. (1981).- Hydrogéologie quantitative. Edition Masson, Paris.
- D.R.E. (1983).- Etat actuel des connaissances sur les aquifères du Maroc. Aquifère profond du Crétacé inférieur des Doukkala et du Sahel d'Azzemmour à Safi. Rabat, Maroc.
- D.R.E. (1954).- Notice sur l'irrigation de la plaine des Abda-Doukkala, Rabat.
- D.R.P.E. (1985).- Etude du plan directeur intégré d'aménagement des eaux des bassins Sébou, Bouregreg et Oum-er-Rbia. Rapport inédit.
- FERRE M. (1963).- Etude hydrogéologique sommaire de Bled-el-Eyer (Région d'Oualidia).
- FERRE M. (1963).- Exploitation d'une nappe karstique à proximité de l'océan (région d'Oualidia) in Congr. Berkley (Calif.).
- FERRE M. (1963).- Eaux souterraines. Ass. Int. Hydrol. Sci. Publ. n°64 Gentbrugge.
- FERRE M. (1963).- Nappe du calcaire de Dridrat. Etat des travaux de reconnaissance et d'exploitation. Rapp. Inéd. Arch. MTPC/DH/DRE.
- FERRE M. (1963).- Adduction d'eau de Safi. Réserve de sécurité (étude géologique). Rapp. Inéd. Arch. MTPC/DH/DRE.
- FERRE M. (1964).- Nappe du calcaire de Dridrat. Récapitulation des travaux de reconnaissance et d'exploitation. Rapport Inéd. MTPC/DH/DRE.
- FERRE M. (1966).- Périmètre des Abda-Doukkala. Etat des communes sur l'hydrologie superficielle. Rapport inéd. MTPC/DH/DRE.
- FERRE M. (1966).- Etude de l'étanchéité de la retenue de Safi; résultats des travaux de reconnaissance. Rapport Inéd. arch. MTPC/DH/DRE.
- FERRE M. (1969).- Hydrologie et hydrogéologie des Abda-Doukkala. Thèse de Docteur Ingénieur, Nancy.
- FOURNEAUX J.C., SARROT-REYNAULD J. (1977).- Déficit d'écoulement et évapotranspiration dans les Alpes du Nord. Extrait du compte-rendu du 102e Congrès National des Sociétés Savantes. Fasc.II Limoges.
- GIGOUT M. (1951).- Etudes géologiques sur la méséta marocaine occidentale (arrière pays de Casablanca, El Jadida et Safi). T. 1.
- GIGOUT M. (19).- La méséta côtière: aspects de la géomorphologie du Maroc. Notes et Mémoires Serv. Géol. Maroc.
- HAZAN (1958).- Note sur le sondage d'Oualidia.
- I.G.N. (1977).- Etude thermographique des côtes marocaines. Rapport inédit.
- KRUSMAN G.P. et RIDDER N.A. (1974).- Interprétation et discussion des pompages d'eau. Bull. 11F. International Institut for land reclamation and improvement wagingen the Netherlands 1974.
- MARGAT (1958).- Les cartes hydrogéologiques du Maroc.
- MICHARD A. (1976).- Eléments de géologie marocaine.

- MONITION L. (1963).- Etat des connaissances sur l'hydrogéologie karstique au Maroc in Congr. Berkley (Calif.).
- MONITION L. (1963).- Eaux souterraines. Ass. Int. Hydrol. Sci. Publ.64, Gentbrugge.
- MOUILLARD L. (1959).- Reconnaissance des calcaires du Crétacé dans le détroit d'El Jadida (Mazagan) par sismique inférieur.
- REMENERAS G. (1976).- L'hydrologie de l'Ingénieur. 2e édition Eyrolles, Paris.
- RORABOUGH M.I. (1969).- Variations naturelles du niveau piézométrique. Bull. du B.R.G.M. 2e série, section III, n°2.
- RUHARD J.P. (1968).- Note relative aux remontées spectaculaires de la nappe phréatique dans la région de Jorf.
- RUHARD J.P., FERREM (1975).- Ressources en eau des bassins des Abda-Doukkala et du Sahel d'Azemmour à Safi. Edition du Service géologique du Maroc, Rabat.
- SCANVIC J.Y. (1984).- Utilisation de la télédétection dans les sources de la terre. Bull. B.R.G.M.
- SCHOELLER H. (1959).- Hydrologie des régions arides. Progrès récents UNESCO.
- SCHOELLER H. (1962).- Les eaux souterraines. Edition Masson, Paris.
- THAUVIN J.P. (1966).- Solubilités relatives de la calcite, de la magnétite et de la dolomite. Emploi des traceurs pour l'étude des eaux karstiques.
- THUILLE G. (1950).- Etude hydrogéologique des environs de l'Aïn-Rbor. Rapport inédit arch. MTPC/DH/DRE.

ANNEXE 1

RELEVES PIEZOMETRIQUES

RESULTATS DES RELEVES PIEZOMETRIQUES

N° I.R.E.	Coordonnées		Z (m)	P.t. (1)	P.b.e (2)	P.h.e (3)	Fluc. (4)
	X	Y					
1322/27	218.850	275.000	75	50.00	40.70	40.10	+0.60
1316/27	218.375	270.150	105	60.00	53.20	51.80	+1.40
687/27	225.700	274.950	165	58.00	49.30	49.00	+0.30
1082/27	232.350	268.725	134	60.00	53.60	53.30	+0.30
468/27	236.200	265.400	128	50.10	38.60	39.00	-0.40
457/27	240.800	262.250	135	30.00	24.40	24.00	+0.40
245/27	245.750	264.350	145	43.40	42.60	42.50	+0.10
226/27	243.950	255.350	196	56.00	57.80	44.00	+13.8
1285/27	210.500	268.400	105	42.50	41.45	41.40	+0.05
1289/27	210.750	266.575	93	50.00	30.60	30.30	+0.30
1290/27	210.900	264.600	89	45.60	30.63	30.50	+0.13
609/27	212.300	266.000	104	49.00	47.30	47.00	+0.30
1281/27	215.000	264.875	98	32.50	30.60	31.30	-0.70
2925/27	219.750	259.250	133	20.00	12.40	8.00	+4.40
2927/27	227.200	261.350	128	42.90	42.60	36.70	+5.90
261/27	232.500	264.800	120	30.20	29.35	28.86	+0.49
1051/27	224.850	264.450	121	46.50	44.20	44.00	+0.20
1037/27	222.700	263.500	120	65.00	49.60	48.70	+0.90
1034/27	226.450	265.300	120	61.40	61.15	60.30	+0.85
124/27	213.675	253.525	124	60.00	45.00	44.20	+0.80
137/27	208.950	251.800	150	31.00	15.60	15.55	+0.05
2928/27	205.000	250.650	145	26.70	24.50	23.80	+0.70
1596/27	200.350	250.050	134	35.00	32.40	32.04	+0.36
267/26	195.850	247.150	150	-	24.00	22.60	+1.40
412/26	190.550	250.500	125	30.00	28.20	-	-
413/26	195.050	254.900	104	16.30	15.70	13.60	+2.10
641/27	209.250	258.300	130	30.20	30.10	28.85	+1.25
148/26	188.500	240.125	129	40.00	32.70	21.90	+10.8
146/26	188.400	242.500	120	31.00	23.10	22.74	+0.36
366/26	184.025	246.150	94	6.80	5.15	5.00	+0.15
415/26	177.800	245.100	81	11.03	9.76	9.40	+0.36
355/26	176.850	248.150	102	51.00	35.70	35.75	-0.05
127/26	196.000	281.200	10	26.00	10.50	-	-
116/26	183.550	265.400	7	5.90	5.13	4.57	+0.56
390/26	180.500	259.300	90	86.00	78.10	77.80	+0.30
203/26	168.250	251.050	16	14.40	13.80	-	-
310/26	163.250	246.000	66	63.60	62.40	-	-
378/26	184.575	254.975	85	23.15	22.40	21.80	+0.60
414/26	189.750	260.060	85	13.60	13.40	11.70	+1.70
416/26	190.510	259.200	59	5.10	4.80	3.95	+0.85
2924/26	199.550	270.650	85	52.60	51.23	50.38	+0.85
131/26	191.400	266.950	60	12.00	11.10	9.00	+2.10
86/26	193.850	265.100	64	21.55	18.30	16.56	+1.74
1612/26	201.900	259.850	104	10.00	9.48	9.10	+0.38
1293/27	210.500	258.850	137	35.70	33.40	-	-
2923/27	208.000	269.000	89	26.00	25.50	25.70	-0.20
1588/27	206.400	264.550	120	14.25	13.15	13.90	-0.75

- (1) : Profondeur totale de l'ouvrage (m).
(2) : Profondeur de l'eau en basses eaux (m).
(3) : Profondeur de l'eau en hautes eaux (m).
(4) : Fluctuation (m).

RESULTATS DES RELEVES PIEZOMETRIQUES

N° I.R.E.	Coordonnées		Z (m)	P.t. (1)	P.b.e (2)	P.h.e (3)	Fluc. (4)
	X	Y					
1586/34	138.600	195.800	44	69.00	60.27	60.30	-0.03
1578/34	144.600	195.600	98	>100	83.14	88.40	-5.26
1589/34	152.000	192.850	120	60.20	54.82	54.55	+0.27
1584/34	181.050	212.100	164	13.75	13.68	6.88	+6.80
1517/34	164.000	205.150	1.4	29.45	14.75	14.16	+0.59
1585/34	164.925	204.675	143	14.05	11.88	11.50	+0.38
444/34	157.450	204.700	128	7.30	sec	7.20	-
56/34	152.725	203.850	135	8.83	4.50	1.50	+3.00
979/34	156.500	213.600	96	10.60	10.30	9.40	+0.90
1587/34	152.100	213.625	94	12.70	8.62	8.17	+0.45
571/34	148.750	211.250	77	10.20	9.70	6.55	+3.15
1579/34	148.550	210.550	80	13.00	10.10	12.53	-2.43
358/34	146.125	213.125	89	54.15	49.65	49.90	-0.25
393/34	143.850	215.300	81	27.95	27.65	20.20	+7.45
359/34	145.000	212.250	80	8.40	8.30	6.50	+1.80
1581/34	144.550	210.725	90	52.80	38.10	38.26	-0.16
57/34	144.550	206.550	150	7.70	7.34	5.16	+2.18
1588/34	145.150	204.350	112	11.28	7.90	7.65	+0.25
213/34	139.500	200.700	100	17.40	16.60	15.00	+1.60
565/34	136.000	203.950	108	13.00	12.65	12.53	+0.12
49/34	141.450	210.875	66	22.30	17.90	-	-
50/34	137.275	219.950	57	1.60	1.38	0.15	+1.23
1580/34	141.800	227.700	60	53.90	53.25	52.70	+0.55
379/34	149.400	229.500	79	33.70	32.70	32.88	-0.18
388/34	145.100	226.450	62	13.00	12.70	12.60	+0.10
1459/34	145.950	225.150	78	19.50	17.90	17.90	+0.00
1475/34	150.850	218.825	115	10.80	9.30	4.20	+5.10
1485/34	149.425	220.550	85	5.50	2.90	5.25	-2.35
30/34	153.525	223.575	100	4.72	3.08	1.56	+1.52
105/34	155.200	225.075	105	4.30	3.50	0.75	+2.75
26/34	155.350	226.000	104	5.15	4.70	4.50	+0.20
27/34	158.300	227.250	104	6.28	5.60	5.00	+0.60
187/34	159.100	230.250	128	4.60	1.70	1.14	+0.56
135/34	164.500	236.650	90	5.34	5.00	4.80	+0.20
1084/34	167.075	234.525	108	2.60	2.30	1.45	+0.85
172/34	169.000	236.000	100	2.22	1.70	1.46	+0.24
158/34	170.800	242.875	92	11.82	10.39	5.73	+5.09
292/34	169.500	241.300	84	4.93	3.65	5.10	-1.45
165/34	173.400	236.575	114	3.00	1.92	1.48	+0.44
1121/34	166.250	227.500	110	3.70	sec	1.60	-
851/34	170.150	229.100	120	7.80	6.30	6.89	-0.59
1073/34	170.750	222.800	138	21.25	20.30	21.10	-0.80
255/34	161.500	220.500	116	12.10	12.00	8.13	+3.87
1577/34	162.250	224.500	119	3.00	1.90	1.20	+0.70
383/34	153.800	236.325	46	45.95	43.75	44.05	-0.30
2931/27	204.750	295.075	17	7.90	7.70	-	-

- (1) : Profondeur totale de l'ouvrage (m).
(2) : Profondeur de l'eau en basses eaux (m).
(3) : Profondeur de l'eau en hautes eaux (m).
(4) : Fluctuation (m).

RESULTATS DES RELEVES PIEZOMETRIQUES

N° I.R.E.	Coordonnées		Z (m)	P.t. (1)	P.b.e (2)	P.h.e (3)	Fluc. (4)
	X	Y					
2932/27	203.100	292.900	20	14.80	12.00	11.70	+0.30
1623/27	207.500	292.000	39	39.00	22.50	22.00	+0.50
1628/27	209.550	289.725	29	12.50	6.80	6.30	+0.50
1645/27	201.600	290.800	40	46.00	39.70	39.30	+0.40
2933/27	203.850	286.000	52	10.80	9.90	9.50	+0.40
2934/27	206.650	283.600	31	12.70	8.30	9.00	-0.70
2935/27	208.450	281.800	49	32.00	22.60	20.50	+2.10
2936/27	210.000	279.800	54	40.00	29.30	29.30	0.00
1656/27	208.300	276.300	59	41.00	31.90	22.2	+9.70
1687/27	204.700	275.325	48	50.00	16.83	17.00	-0.17
2937/27	201.150	276.000	72	3.30	2.07	1.00	+1.07
417/27	193.550	276.700	43	11.50	11.20	11.00	+0.20
245/26	196.150	275.900	60	4.00	3.90	2.70	+1.20
418/27	197.450	274.300	70	11.00	10.60	8.10	+2.50
1456/27	216.450	294.875	30	25.00	19.40	15.60	+3.80
1473/27	219.800	290.275	75	80.00	52.10	50.90	+1.20
678/27	224.950	291.675	100	73.80	60.70	59.90	+0.80
679/27	226.400	296.225	70	40.70	38.50	37.40	+1.10
1430/27	225.800	295.925	65	46.00	35.10	35.10	0.00
2929/27	224.750	288.950	95	63.20	62.80	58.60	+4.20
1418/27	226.250	289.900	98	70.00	57.80	57.04	+2.70
1422/27	227.750	290.700	100	71.00	51.20	52.50	-1.30
1424/27	230.200	292.250	105	57.00	46.70	46.40	+0.30
1425/27	231.300	291.000	94	33.80	33.60	33.10	+0.50
1426/27	230.550	290.100	83	26.70	23.60	23.40	+0.20
1416/27	228.250	289.200	86	42.60	33.60	32.30	+1.30
1393/27	224.300	284.600	95	81.00	70.40	70.40	0.00
613/27	228.400	283.600	130	67.80	67.00	66.80	+0.20
1408/27	231.100	279.300	128	45.20	44.50	44.50	0.00
2921/27	235.375	284.725	151	62.30	57.40	51.00	+6.40
2930/27	238.200	285.300	158	50.90	50.60	50.60	0.00
-	240.800	288.100	129	7.40	7.20	7.15	+0.05
-	239.500	289.850	150	40.00	39.40	39.00	+0.40
-	240.575	280.450	160	65.00	59.00	55.00	+4.00
-	241.125	277.150	167	67.00	63.60	-	-
-	245.875	275.075	89	13.80	7.90	7.10	+0.80
-	247.350	272.050	127	49.30	41.60	38.30	+3.30
-	246.750	270.700	150	36.00	35.60	35.40	+0.20
-	237.000	273.050	168	90.00	81.60	80.70	+0.90
2922/27	234.150	275.300	145	51.20	51.10	50.10	+1.00
-	240.400	270.200	113	32.90	32.10	31.00	+1.10
2938/27	211.100	275.150	65	28.90	28.25	28.10	+0.15
1352/27	215.100	283.350	48	33.00	23.50	23.20	+0.30
1357/27	217.000	282.500	69	56.00	46.70	45.10	+1.60
1367/27	217.700	280.200	79	49.20	49.10	47.60	+1.50
1343/27	216.150	274.500	80	43.30	40.50	40.00	+0.50

- (1) : Profondeur totale de l'ouvrage (m).
(2) : Profondeur de l'eau en basses eaux (m).
(3) : Profondeur de l'eau en hautes eaux (m).
(4) : Fluctuation (m).

ANNEXE 2

RESULTATS DES ANALYSES CHIMIQUES

RESULTATS DES ANALYSES CHIMIQUES

INDEX- ATION	N° I.R.E.	Coordonnées		Formation captée	Ca++ mg/l	Mg++ mg/l	Na+K+ mg/l	Cl- mg/l	SO4-- mg/l	HCO3- mg/l	R.S. mg/l	CO2 l. mg/l	Cond. mmho/cm	pHm	pHeq	A ou I (*)	r Mg/Ca	r SO4/Cl	r Na/Ca	i.e.b.
		X	Y																	
69	1174/34	166.350	223.700	PLIO-QUATERNAIRE	56.0	14.5	48.4	71.0	28.8	170.8	254	3.6	0.552	8.4	7.7	I	0.42	0.30	0.72	-0.03
59	165/34	173.450	236.600	"	60.0	12.1	70.7	79.9	19.2	140.3	236	3.0	0.652	8.4	7.0	I	0.33	0.17	0.87	-0.28
58	135/34	164.450	236.550	"	68.0	7.2	68.5	70.1	19.2	183.0	727	3.4	0.608	8.5	7.6	I	0.17	0.20	0.82	-0.45
66	1459/34	145.950	225.150	"	30.0	9.7	79.5	53.3	43.2	122.0	254	16.0	0.453	7.6	8.1	A	0.53	0.60	1.46	-0.95
60	383/34	153.750	236.350	"	48.0	14.5	97.4	79.9	57.6	170.8	364	6.0	0.685	8.2	7.7	I	0.50	0.53	1.64	-0.83
47	124/27	213.650	253.500	"	80.0	48.4	187.4	239.6	19.2	286.7	709	10.0	1.383	8.2	7.3	I	1.00	0.05	1.97	-0.19
61	379/34	149.400	229.500	"	52.0	9.6	34.6	44.4	19.2	158.6	418	5.5	0.398	8.2	7.7	I	0.31	0.32	0.57	-0.20
94	1517/34	164.000	205.150	"	72.0	21.8	91.7	79.9	67.2	201.3	527	9.0	0.928	8.1	7.5	I	0.50	0.62	1.04	-0.73
50	355/26	176.875	248.150	"	64.0	16.9	58.5	79.9	76.8	170.8	364	6.0	0.663	8.2	7.6	I	0.43	0.71	0.76	-0.11
52	1596/27	200.350	250.050	"	80.0	24.0	80.9	106.5	76.8	183.0	473	6.5	0.884	8.2	7.5	I	0.50	0.53	0.85	-0.16
48	137/27	208.950	251.800	"	140.0	41.1	224.3	213.0	76.8	323.3	1018	14.0	1.768	8.1	7.0	I	0.48	0.26	1.37	-0.61
55	103/26	160.500	244.700	"	236.0	123.4	702.0	763.3	825.6	207.4	2618	11.0	4.309	8.0	7.0	I	0.86	0.80	2.30	-0.35
56	292/26	169.500	241.300	"	48.0	9.7	48.3	53.2	19.2	158.6	273	8.5	0.508	8.0	7.8	I	0.33	0.26	0.80	-0.35
45	377/26	184.575	254.975	"	56.0	12.1	41.4	44.4	28.8	152.5	154	4.0	0.486	8.3	7.7	I	0.35	0.48	0.62	-0.42
62	187/34	159.100	230.175	"	104.0	14.5	68.4	88.7	134.4	256.0	491	7.0	0.906	8.3	7.2	I	0.23	1.12	0.55	-0.18
41	1612/27	201.900	259.850	"	28.0	14.5	121.9	115.4	48.0	244.0	400	10.0	0.862	8.1	7.8	I	0.85	0.30	3.73	-0.62
13	2921/27	235.375	284.725	"	104.0	14.5	326.0	142.0	19.2	298.9	582	16.0	1.271	8.0	7.2	I	0.23	0.10	2.70	-2.53
43	2925/27	219.750	259.250	"	64.0	33.9	547.7	594.6	48.0	219.6	1182	12.0	2.597	8.0	7.5	I	0.87	0.06	7.42	-0.42
46	413/26	195.050	254.900	"	52.0	9.7	58.5	44.4	134.4	164.7	236	6.0	0.541	8.2	7.7	I	0.31	2.24	0.95	-1.01
51	412/26	190.550	250.500	"	36.0	12.1	150.3	88.8	38.0	280.0	673	4.0	0.961	8.6	7.7	I	0.55	0.32	3.55	-1.59
40	414/26	189.750	260.050	"	68.0	14.5	98.4	408.3	48.0	195.2	491	7.0	0.829	8.2	7.5	I	0.35	0.40	1.24	-0.70
26	286/26	188.900	269.625	"	64.0	20.6	103.6	142.0	24.0	196.9	436	6.0	0.884	8.2	6.0	I	0.53	0.62	1.37	-0.11
65	1580/34	141.800	227.700	"	48.0	14.5	107.2	106.5	38.4	189.1	364	8.0	0.660	8.1	7.7	I	0.50	0.27	1.20	-0.31
53	415/26	177.750	245.100	"	68.0	12.0	85.6	88.7	19.2	170.8	382	9.0	0.729	8.0	7.6	I	0.29	0.16	1.00	-0.44
95	1584/34	181.050	212.100	"	16.0	19.4	766.9	426.0	144.0	634.4	1400	2.0	2.762	8.9	8.0	I	2.00	0.25	39.47	-1.72
85	59/34	148.950	206.800	"	68.0	9.7	72.0	79.9	38.4	134.2	327	7.5	0.818	8.0	7.7	I	0.23	0.35	0.85	-0.35
63	18/34	165.100	231.750	"	54.0	6.1	38.0	44.4	33.6	128.1	309	4.4	0.453	8.2	7.8	I	0.18	0.56	0.85	-0.29
10	1533/27	241.300	288.250	"	76.0	38.7	305.1	266.3	105.6	292.8	873	10.0	1.928	8.2	7.3	I	0.84	0.29	3.46	-0.76
86	1583/34	146.450	206.100	"	50.0	14.5	50.0	44.4	33.6	146.4	236	2.4	0.484	8.5	7.8	I	0.48	0.56	0.70	-0.60
33	116/26	183.550	265.400	"	140.0	53.2	165.1	284.0	268.8	207.4	1091	23.0	1.934	7.7	7.2	I	0.62	0.70	0.97	+0.12
57	60/26	154.400	238.700	"	304.0	140.3	813.4	994.0	864.0	231.8	3109	15.0	5.083	7.9	6.8	I	0.76	0.64	2.25	-0.24
49	203/26	168.250	251.050	"	314.0	98.9	350.3	408.3	806.4	195.2	1982	17.0	2.983	7.8	6.9	I	0.40	1.46	0.94	-0.31
44	303/26	173.200	255.150	"	160.0	89.5	438.2	505.9	67.2	207.4	1454	13.0	2.818	7.9	7.1	I	0.92	0.10	2.30	-0.32

(*) A: eau agressive I: eau incrustante

RESULTATS DES ANALYSES CHIMIQUES

INDEX- ATION	N°I.R.E.	Coordonnées		Formation captée	Ca++ mg/l	Mg++ mg/l	Na+K+ mg/l	Cl- mg/l	SO4-- mg/l	HCO3- mg/l	R.S. mg/l	CO2 l. mg/l	Cond. mmho/cm	pHm	pHeq	A ou I (*)	r Mg/Ca	rSO4/Cl	r Na/Ca	i.e.b.
		X	Y																	
74	428/34	161.500	220.500	HAUTERIVIEN SUP.	92.0	12.1	110.4	88.8	57.6	244.0	509	13.0	0.939	8.0	7.3	I	0.22	0.48	0.71	-0.66
67	1121/34	166.200	227.500	"	52.0	16.9	77.7	44.4	28.8	244.0	236	14.0	0.652	8.0	7.6	I	0.53	0.48	1.28	-1.68
64	851/34	170.150	229.100	"	68.0	7.0	70.3	80.0	67.0	220.0	400	6.0	0.674	8.3	7.5	I	0.18	0.62	0.80	-0.33
68	1577/34	162.250	224.500	"	86.0	22.9	169.3	248.5	62.4	262.3	764	24.0	1.602	7.8	7.3	I	0.44	0.18	1.69	-0.55
96	1578/34	144.600	195.600	JURASSIQUE SUP.	602.0	67.7	356.4	266.2	998.7	231.8	3000	20.0	3.867	7.8	6.5	I	0.19	2.92	0.49	-1.04
22	1343/27	216.150	274.500	CRETACE INDETERMINE	104.0	39.0	488.0	515.0	182.0	183.0	1218	12.0	2.486	7.9	7.4	I	0.61	0.26	4.04	-0.45
11	1352/27	215.100	283.450	"	32.0	9.7	344.8	88.8	67.2	341.6	655	15.0	1.160	8.1	7.6	I	0.50	0.56	9.31	-4.98
6	1473/27	219.800	290.275	"	92.0	29.0	488.8	362.9	134.4	317.2	1127	22.0	2.155	7.9	7.2	I	0.52	0.27	4.57	-1.06
29	1316/27	218.375	270.150	"	106.0	49.6	387.7	390.5	211.2	127.8	1018	15.0	2.044	7.8	7.6	I	0.77	0.40	3.14	-0.52
3	1430/27	225.800	295.925	"	276.0	191.2	1053.7	1863.7	192.0	237.9	3964	14.0	6.961	8.0	6.87	I	1.14	0.07	3.30	+0.14
38	469/27	236.050	265.500	"	436.0	312.2	1145.6	2514.6	326.4	780.8	5091	>100?	8.950	7.0	6.1	I	1.18	0.09	2.09	+0.32
30	1082/27	232.350	268.725	"	128.0	65.3	530.1	745.5	48.0	237.9	1764	14.0	3.149	8.0	7.2	I	0.84	0.04	3.56	-0.09
42	1293/27	210.500	258.850	"	52.0	16.9	407.7	319.5	76.8	378.2	891	33.0	1.823	7.8	7.4	I	0.53	0.17	6.74	-0.96
8	1537/27	239.500	289.850	"	32.0	29.0	143.1	97.6	12.2	244.0	509	5.5	1.017	8.4	7.8	I	1.50	0.14	3.83	-1.25
32	1514/27	246.750	270.700	"	64.0	50.8	448.2	479.3	115.2	298.9	1164	8.5	2.321	8.3	7.4	I	1.31	0.17	6.03	-0.43
17	1408/27	231.100	278.300	"	80.0	77.4	349.6	301.8	28.8	366.0	800	16.0	1.713	8.1	7.2	I	1.60	0.07	3.72	-0.77
16	1367/27	217.700	280.200	"	168.0	72.6	551.6	665.6	999.8	231.8	2000	13.0	3.204	8.0	7.1	I	0.71	1.47	2.81	-0.27
23	687/27	225.700	274.950	"	216.0	121.0	890.2	1207.0	134.4	305.0	1964	33.0	5.194	7.7	6.8	I	0.92	0.08	3.57	-0.13
12	1393/27	224.300	284.600	"	80.0	33.9	517.6	426.0	67.2	353.8	1091	32.0	2.376	7.8	7.2	I	0.70	0.11	5.59	-0.87
37	1037/27	222.700	263.450	"	148.0	89.5	651.8	931.8	259.2	244.0	3073	10.0	3.978	8.1	7.1	I	1.00	0.20	3.79	-0.07
2	1456/27	216.450	294.875	"	56.0	29.0	849.6	603.5	384.0	353.8	1855	23.0	3.702	7.9	7.3	I	0.85	0.47	13.15	-1.17
39	1710/27	245.750	264.350	"	224.0	140.4	490.8	816.5	384.0	280.6	2436	10.0	3.868	8.2	6.9	I	1.03	0.34	1.87	+0.07
7	1426/27	230.575	290.125	"	60.0	26.6	324.8	204.1	76.8	311.1	709	22.0	1.492	7.9	7.4	I	0.73	0.27	4.68	-1.45
24	2922/27	234.150	275.300	"	40.0	29.0	386.1	257.4	86.4	305.0	782	8.5	1.602	8.3	7.5	I	1.20	0.25	8.33	-1.31
25	1520/27	245.900	275.100	"	124.0	70.0	406.1	604.1	19.0	281.0	1364	24.0	2.597	7.8	7.1	I	0.93	0.02	2.82	-0.03
31	664/27	240.400	270.150	"	64.0	84.0	326.4	346.1	115.2	298.9	873	16.0	1.768	8.0	7.4	I	1.25	0.24	4.38	-0.44
18	666/27	240.600	280.450	"	116.0	43.6	81.5	168.6	19.2	268.4	818	12.0	1.326	8.1	7.2	I	0.62	0.08	0.55	+0.28

(*) A: eau agressive
I: eau incrustante

RESULTATS DES ANALYSES CHIMIQUES

INDEX- ATION	N°I.R.E.	Coordonnées		Formation captée	Ca++ mg/l	Mg++ mg/l	Na+K+ mg/l	Cl- mg/l	SO4-- mg/l	HCO3- mg/l	R.S. mg/l	CO2 l. mg/l	Cond. mmho/cm	pHm	pHeq	A ou I (*)	r Mg/Ca	rSO4/Cl	r Na/Ca	i.e.b.
		X	Y																	
77	50/34	137.275	219.950	HAUTERIVIEN MOY.	120.0	96.8	747.3	958.5	38.4	378.2	2127	>100?	4.199	7.0	7.0	-	1.33	0.03	5.12	-0.18
90	213/34	139.700	200.700	"	80.0	36.3	89.0	106.5	48.0	262.3	546	18.0	1.061	7.9	7.3	I	0.75	0.33	0.92	-0.26
81	979/34	156.500	213.600	"	70.0	20.6	81.0	88.7	28.8	244.0	418	12.5	0.840	8.0	7.4	I	0.48	0.24	0.93	-0.36
87	251/34	144.700	204.300	"	168.0	43.7	264.7	541.4	192.0	207.4	2055	7.5	3.536	8.2	7.5	I	0.43	0.26	0.26	+0.50
93	53/34	152.775	204.000	"	64.0	21.8	192.0	88.7	76.8	366.0	564	5.0	1.215	8.6	7.3	I	0.56	0.64	1.59	-1.80
70	1073/34	170.850	223.275	"	52.0	12.1	44.5	35.5	9.2	158.6	273	4.4	0.475	8.3	7.7	I	0.38	0.40	0.60	-0.79
73	1485/34	149.425	220.550	"	80.0	31.4	111.6	115.4	76.8	244.0	545	5.0	1.105	8.4	7.4	I	0.65	0.49	1.07	-0.42
82	1558/34	158.490	209.380	"	60.0	20.6	51.5	79.9	28.8	244.0	345	8.5	0.674	8.2	7.6	I	0.57	0.27	0.73	-0.08
79	1581/34	144.550	210.725	"	68.0	26.2	36.6	35.5	28.8	292.8	327	24.0	0.652	7.8	7.4	I	0.65	0.60	0.44	-0.55
75	1475/34	150.850	218.825	"	40.0	24.0	161.7	133.1	76.8	280.6	473	8.0	1.160	8.3	7.6	I	1.00	0.43	3.46	-0.86
80	1579/34	148.550	210.550	"	32.0	29.0	31.0	35.5	76.8	195.2	236	8.5	0.464	8.1	7.8	I	1.50	1.60	0.77	-0.30
76	393/34	143.900	215.300	"	172.0	72.6	496.1	701.1	124.8	274.5	1836	14.0	3.315	8.0	7.0	I	0.70	0.13	2.45	-0.08
78	49/34	141.450	210.850	"	44.0	8.5	57.6	27.2	28.8	231.8	346	40.0	0.729	7.5	7.6	A	0.32	0.27	1.08	-0.09
88	55/34	134.300	204.400	"	80.0	24.2	246.0	257.4	38.4	207.4	691	11.0	1.692	8.0	7.8	I	0.50	0.11	2.63	-0.47
89	91/34	137.050	198.400	"	88.0	53.2	318.0	301.8	345.6	292.8	927	20.0	1.878	7.9	7.3	I	1.00	0.85	2.79	-0.55
91	1582/34	142.050	199.850	"	48.0	44.0	265.3	257.0	67.0	305.0	673	16.0	1.436	8.0	7.5	I	1.50	0.19	4.75	-0.58
92	1560/34	144.500	199.800	"	110.0	165.8	1373.8	1775.0	278.4	488.0	1745	40.0	6.796	7.8	6.9	I	2.49	0.17	10.84	-0.19
71	274/34	139.800	211.300	"	44.0	33.9	93.6	115.4	86.4	170.8	236	8.0	0.818	8.1	7.8	I	1.27	0.55	1.79	-0.24
83	1561/34	135.375	199.150	"	64.0	48.4	331.5	390.5	19.2	195.2	873	6.0	1.934	8.2	7.6	I	1.25	0.04	4.66	-0.37
84	236/34	136.000	206.500	"	60.0	8.5	56.4	88.8	43.2	134.2	309	4.6	0.575	8.2	7.6	I	0.25	0.36	0.79	+0.03
72	1562/34	137.000	219.150	"	140.0	104.0	1172.9	1491.0	192.0	402.6	4091	22.0	6.077	8.0	6.9	I	1.23	0.09	7.27	-0.21

(*) A: eau agressive
I: eau incrustante

RESULTATS DES ANALYSES CHIMIQUES

INDEX- ATION	N° I. R. E.	Coordonnées X Y	Formation captée	Ca++ mg/l	Mg++ mg/l	Na+K+ mg/l	Cl- mg/l	SO4-- mg/l	HCO3- mg/l	R.S. mg/l	CO2 l. mg/l	Cond. mmho/cm	pHm	pHeq	A ou I (*)	r Mg/Ca	r SO4/Cl	r Na/Ca	i.e.b.
5	1628/27	209.550 289.725	CENOMANEN	108.0	60.5	470.1	532.5	19.2	328.4	1290	30.0	2.597	7.8	7.1	I	0.92	0.02	3.73	-0.35
21	1687/27	204.700 275.325	"	64.0	14.5	129.4	88.8	67.2	183.0	563	4.0	1.050	8.4	7.6	I	0.37	0.56	1.67	-1.20
15	598/27	210.000 279.800	"	86.0	32.8	507.9	497.0	76.8	854.0	1109	75.0	2.320	7.8	6.8	I	0.62	0.11	5.10	-0.57
20	245/26	196.150 275.900	"	176.0	87.1	1131.7	1526.5	195.2	256.2	2963	14.0	5.801	8.0	7.0	I	0.81	0.07	5.58	-0.14
36	1281/27	215.025 264.825	"	104.0	53.2	328.8	497.0	201.6	219.6	1000	30.0	1.934	7.6	7.3	I	0.84	0.30	2.70	-0.01
4	1645/27	201.600 290.800	"	84.0	111.0	1096.2	1198.0	19.0	366.0	2491	15.0	4.972	8.1	7.2	I	2.19	0.01	11.27	-0.40
1	1227/27	204.800 295.350	"	80.0	84.7	649.5	745.5	48.0	359.9	1581	20.0	3.425	8.0	7.2	I	1.75	0.04	7.01	-0.35
34	86/26	193.850 265.100	"	28.0	31.0	306.8	222.0	67.0	177.0	545	5.0	1.160	8.3	7.9	I	1.85	0.22	8.14	-1.00
27	2924/27	199.550 270.050	"	40.0	31.0	61.1	88.7	28.8	280.6	363	10.0	0.619	8.2	7.6	I	1.30	0.24	1.27	-0.04
28	2923/27	208.000 269.000	"	60.0	21.8	110.0	124.3	43.2	219.6	509	8.0	0.928	8.2	7.5	I	0.60	0.26	1.55	-0.35
54	267/26	195.850 247.150	"	132.0	42.4	130.9	202.4	235.2	311.1	1000	34.0	1.713	7.7	7.1	I	0.53	0.86	0.85	+0.01
35	1588/27	206.400 264.550	"	60.0	12.1	138.2	240.0	19.0	177.0	400	5.0	0.829	8.3	7.6	I	0.33	0.17	1.22	-1.24
9	597/27	203.850 286.000	"	88.0	89.5	637.9	736.6	153.6	402.6	1763	14.0	3.536	8.2	7.1	I	1.68	0.15	6.17	-0.32
14	127/26	196.000 281.200	"	124.0	41.1	368.8	301.7	172.8	286.7	981	6.0	1.878	8.4	7.4	I	0.54	0.42	2.12	-0.74
19	121/26	194.250 278.900	"	140.0	72.6	639.5	852.0	144.0	176.9	2018	13.0	3.646	7.9	7.3	I	0.86	0.12	3.88	-0.15

(*) A: eau aggressive
I: eau incrustante

RESULTATS DES ANALYSES CHIMIQUES DES TROIS SOURCES
UTILISEES POUR L'A.E.P.

	SOURCE: 18/34		SOURCE: 19/34		SOURCE: 55/34	
	mg/l	mé/l	mg/l	mé/l	mg/l	mé/l
CATIONS						
Hydrogène H+	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ammonium NH4+	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sodium Na+	38.00	1.65	38.40	1.67	167.0	7.26
Potassium K+	1.54	0.04	0.71	0.02	3.34	0.08
Calcium Ca+	75.20	3.76	59.20	2.96	88.00	4.40
Magnésium Mg++	4.00	0.32	2.00	0.16	32.10	2.64
Fer Fe++	0.02	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00
Manganèse Mn++	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Zinc Zn++	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00
Cuivre Cu++	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Aluminium Al+++	0.01	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00
ANIONS						
Hydroxyle OH-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Chlorure Cl-	72.80	2.05	44.40	1.25	286.0	8.05
Nitrite NO2-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Nitrate NO3-	76.40	1.23	32.50	0.52	44.70	0.72
Bicarbonate HCO3-	140.0	2.30	138.0	2.26	218.0	3.58
Carbonate CO3--	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sulfate SO4--	15.50	0.32	5.70	0.12	52.00	1.08
Silicate Si3--	10.00	0.26	10.00	0.26	13.00	0.34
Fluorure F-	0.20	0.02	0.22	0.01	0.46	0.02
SUB.TOXIQUES						
Plomb (Pb)	0.0064		0.0003		0.0025	
Arsenic (As)	0.0000		0.0002		0.0000	
Sélénium (Se)	0.0000		0.0000		0.0000	
Chrome (Cr6+)	0.0001		0.0020		0.0000	
Cadmium (Cd)	0.0002		0.0000		0.0000	
Baryum (Ba)	-		0.0170		-	

RESUME

Le Sahel des Doukkala, situé entre le périmètre d'irrigation des Doukkala et l'Océan Atlantique fait partie de la grande unité structurale appelée méséta marocaine très peu déformée durant le cycle alpin (atlasique) et qui constitue une plate-forme sub-horizontale. Le socle calédo-hercynien y est sub-tabulaire, pénéplané et recouvert par une couverture où dominent le Trias et le Crétacé.

L'étude géophysique, complétée par les sondages mécaniques a permis le tracé d'une esquisse structurale de la base des formations aquifères (Plio-quaternaire et Hauterivien moyen).

L'étude climatologique: pluviométrie, températures et évapotranspiration nous a permis de proposer un essai de bilan hydrologique.

La piézométrie met en évidence deux directions principales d'écoulement et montre qu'il y a très peu de variations de niveau piézométrique entre les hautes et basses eaux en raison de l'infiltration d'eau d'irrigation.

La thermographie a permis la confirmation des résultats obtenus par l'étude piézométrique.

L'étude physico-chimique des eaux a montré deux types de faciès chimiques dominants: chloruré sodique en bordure océanique et au N-E et bicarbonaté sodique ou calcique au Centre du Sahel.

La minéralisation des eaux a pour origine la dissolution des formations encaissantes, la pollution par les engrais et le mélange avec les eaux marines.

Les résultats d'interprétation des essais de pompage ont permis la détermination des caractéristiques hydrodynamiques (transmissivité et coefficient d'emmagasinement).

Mots clés

Sahel des Doukkala - méséta marocaine - périmètre irrigué - bilan hydrologique - nappes aquifères piézométrie - physico-chimie des eaux - caractéristiques hydrodynamiques.

1 SEP. 1987

UNIVERSITE DE GRENOBLE 1
INSTITUT DE GEOLOGIE
DOCUMENTATION
RUE MAURICE GIGNOUX
B 38031 GRENOBLE CEDEX
TEL (76) 87.46.42