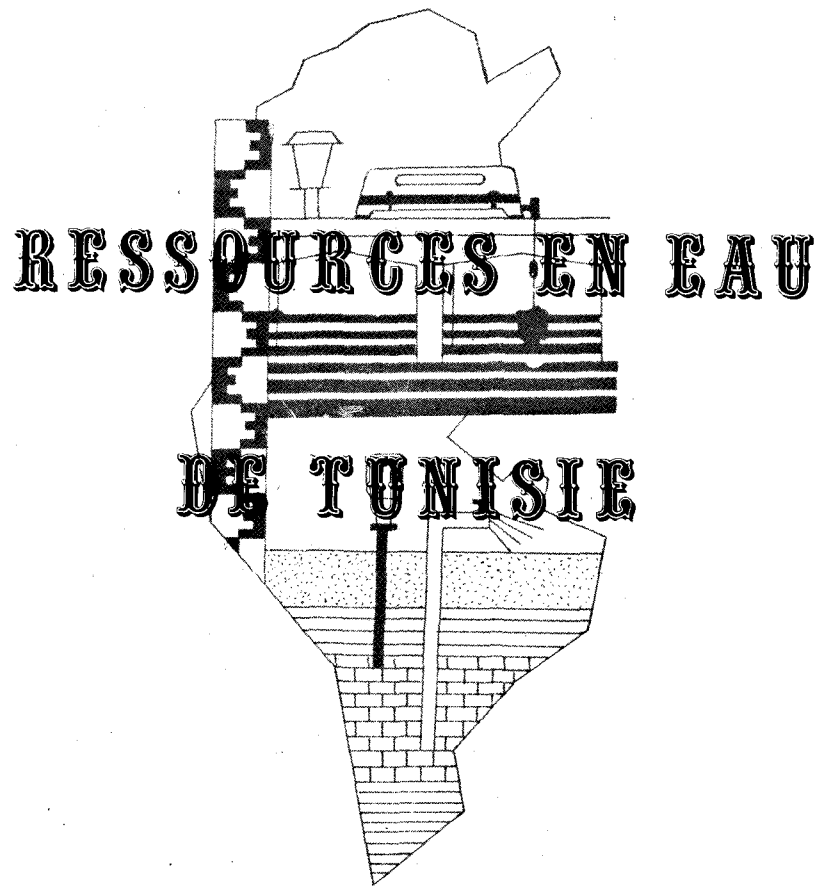


RÉPUBLIQUE TUNISIENNE

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE

DIRECTION DES RESSOURCES EN EAU ET EN SOL



PUBLICATION DE LA DIVISION DES RESSOURCES EN EAU DE TUNISIE

TABLE DES MATIERES

PAGE

Première partie : Eaux de surface

- 1/ Les pluies de l'été en Tunisie 5
Par Z. BENZARTI, Ingénieur Principal Hydrologue à la D.R.E
- 2/ Essai de corrélation entre débit liquide d'étiage et salinité 11
Par : A. GHORBEL
M. MATOUSSI

Deuxième partie : Eaux souterraines

- 1/ Bilan des ressources en eau 1980 20
Par : H. ZÉBIDI
- 2/ Approvisionnement en eau de Kairouan à l'époque Aghlabides 29
Par : M. HAMZA
- 3/ Recharge artificielle de la nappe de Tébolba - TUNISIE 37
Par : H. ZÉBIDI
D. EL BATTI

Aperçu sur les études hydrogéologiques

- 1/ Contribution à l'étude hydrogéologique du bassin d'Oued Rmel (Zaghuan Bou Fichta) 46
Thèse par : M. REKAYA

Première partie

eaux de surface

LES PLUIES DE L'ÉTÉ EN TUNISIE

Par Mme BENZARTI*

INTRODUCTION

Le climat de la Tunisie, comme tout climat méditerranéen est défini par une saison froide et pluvieuse qui s'étale du mois de septembre au mois de Mai (soit les 3 saisons d'automne, d'hiver et de printemps) et une saison d'été chaude et sèche qui dure de Juin à Août.

Chacune des saisons participe plus au moins amplement au total pluviométrique annuel suivant l'année et la région du pays. En moyenne, l'automne est la saison la plus humide au Centre, au Sahel et au Sud, l'hiver l'est pour les régions situées au Nord de la Dorsale, le printemps l'est pour quelques stations comme Thala, Gafsa... Quant à l'été il est considéré comme la saison la plus sèche. Nous allons essayer dans cette note de définir les caractéristiques de cette saison.

** Chef de laboratoire - Division des Ressources en Eau - D.R.E.S - Ministère de l'Agriculture - TUNIS*

1 - CARACTÉRISTIQUES DE LA SAISON D'ÉTÉ

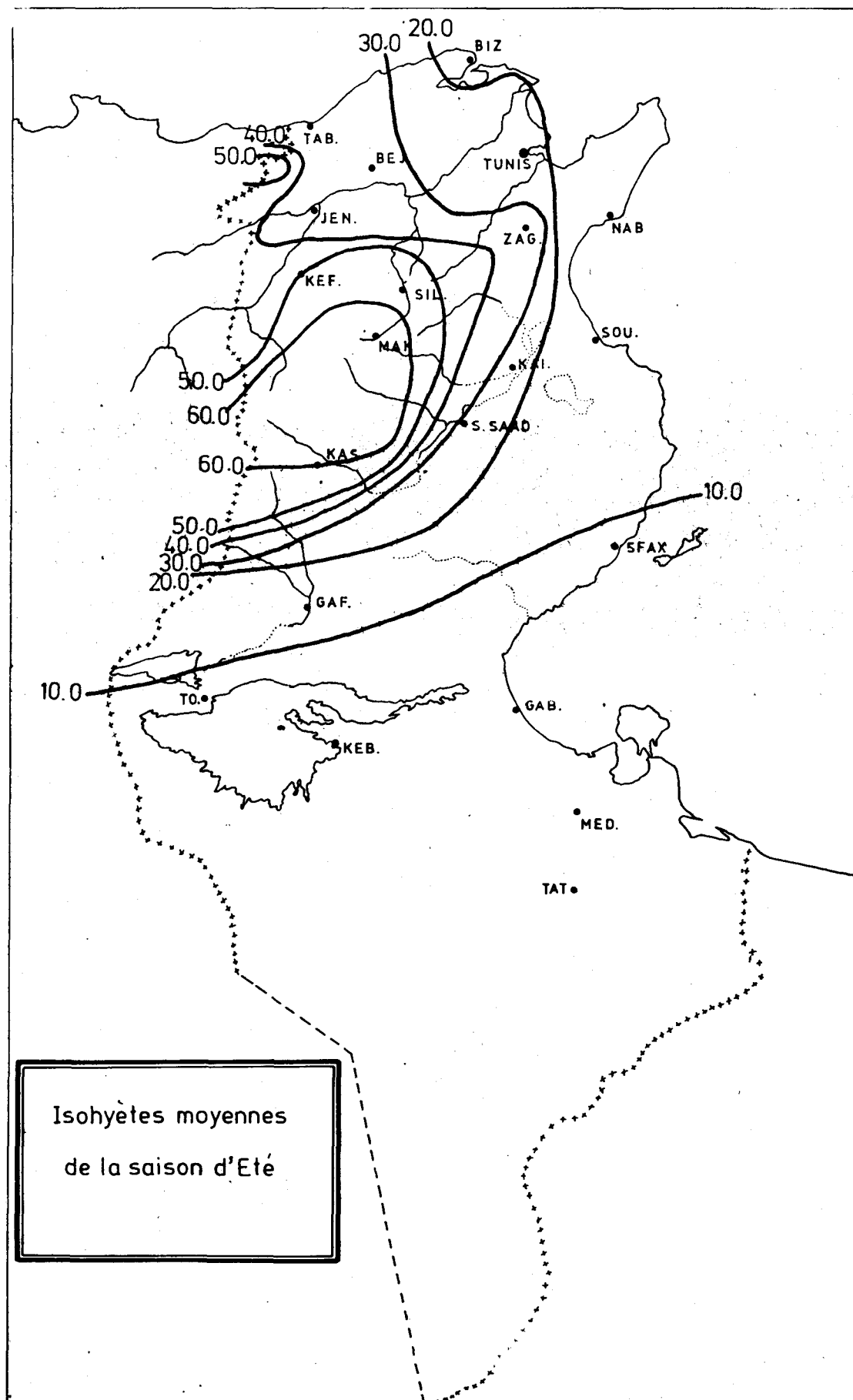
La carte des isohyètes des moyennes estivales présente un maximum pluviométrique situé sur la région centre-ouest de la Tunisie où les valeurs dépassent 60 mm de pluie. A partir de ce noyau, les valeurs décroissent progressivement vers le Nord (33 mm à Tabarka, 30,8 mm à Béja) vers l'Est (moins de 20 mm pour le Sahel et le Cap-Bon) et vers le Sud (13 mm à Gafsa et moins de 10 mm pour tout le Sud : Sfax, Gabès et Mednine).

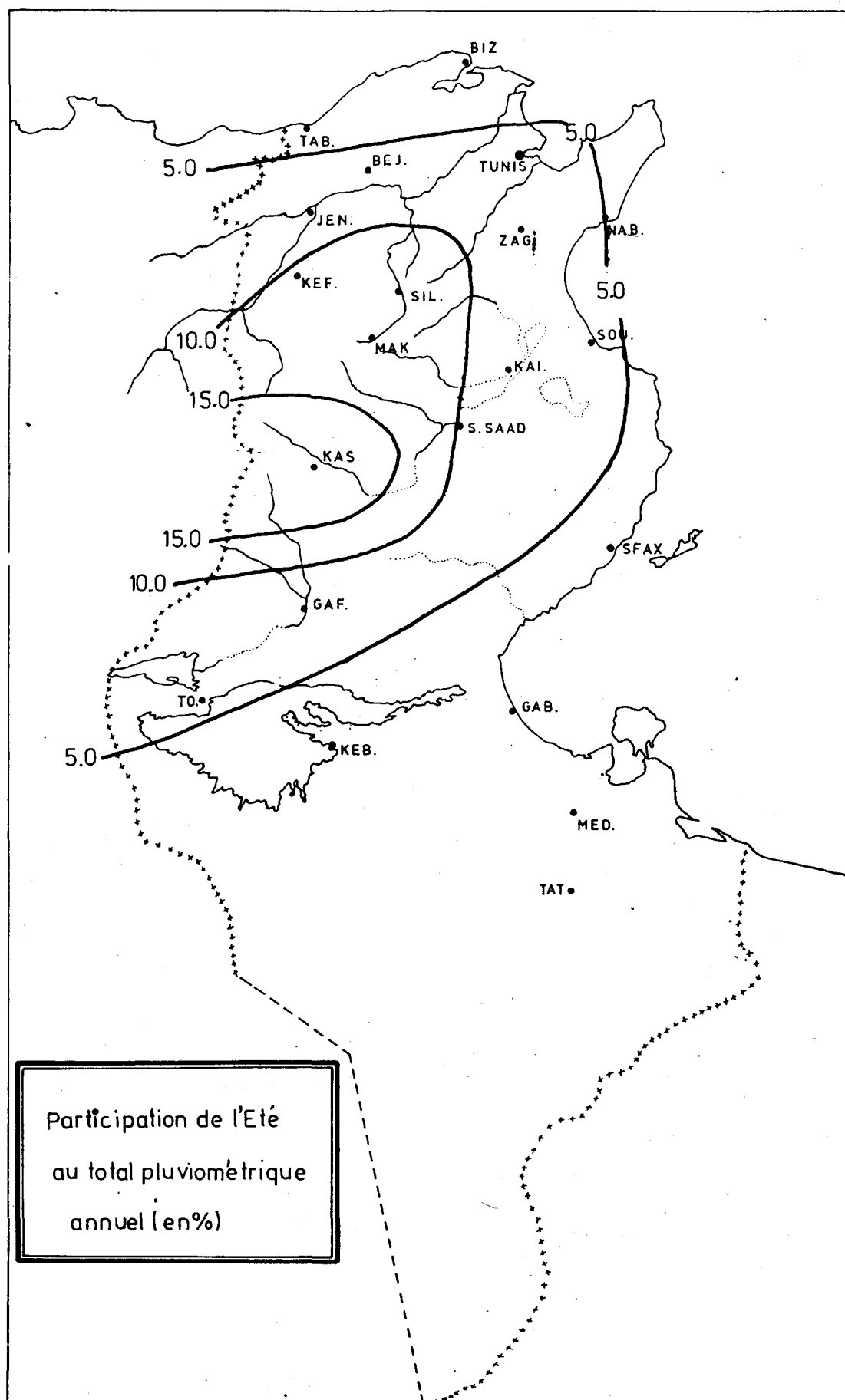
La participation moyenne de l'été au total annuel est ainsi maximale au Centre-Ouest où elle varie entre 15 et 20 %, et minimale (moins de 5 %) sur la côte et au Sud.

Ainsi, près du cinquième du total pluviométrique annuel moyen est enregistré en été dans les régions les plus occidentales de la Tunisie Centrale : A Kasserine, la contribution de l'été est en moyenne de 18,6 % ; à Aïn Amara elle est de 18,8 % et à Fériana, la proportion est de 19,6 % dépassant celle de l'hiver qui est de 19,2 %. En effet, très souvent, l'été est plus humide que l'hiver (58 % des années étudiées à Fériana, 51 % à Kasserine, 50 % à Dernaya...) comme il peut dépasser l'automne ou le printemps.

CARACTÉRISTIQUES DES PLUIES D'ÉTÉ

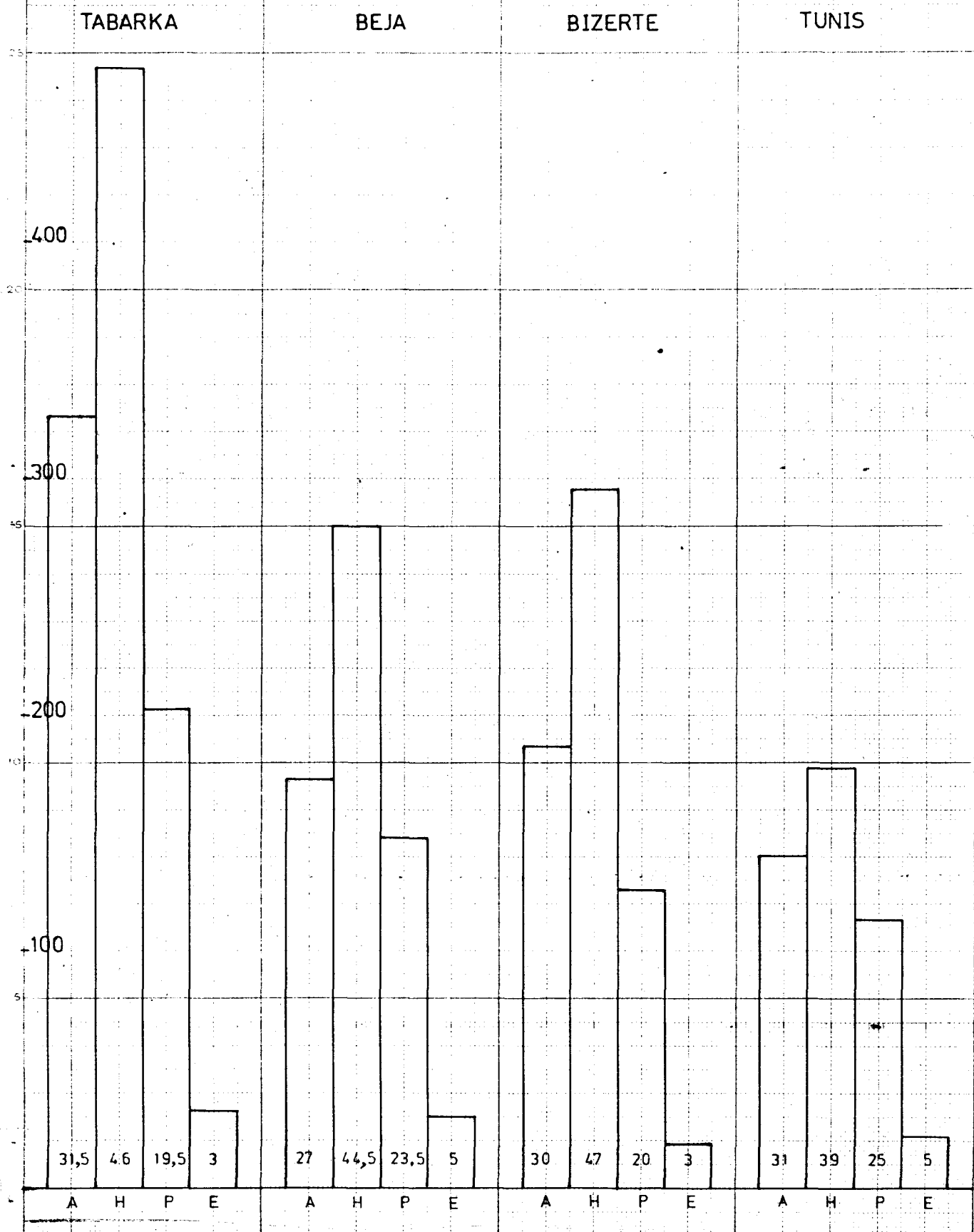
Stations	Moyenne	Médiane	Maxi	Mini	%	Décennale Humide	Décennale sèche	K3
Bizerte	18,4	13,5	73,8	00	3	47,3	0,2	236
Sousse	16,5	11,5	67,1	00	5	40,8	0,5	81,6
Mednine	2,4	00	20,0	00	1,6	7,0	00	—
Kasserine	57,7	46,4	211,9	00	18,6	123,4	7,2	17,1
Sbeitla	69,1	59,7	177,5	4,5	21,0			
Fériana	57,6	48,5	163,0	0,3	19,6			
Dernaya	54,9	48,1	135,0	3,0	16,9			
Aïn Amara	67,6	55,0	150,6	4,6	18,8			
Thala	63,5	48,7	260,5	00	14,0	122,5	13,8	8,8
Le Kef	55,3	43,8	165,0	3,7	10,1	108,5	14,8	7,3
Makthar	61,1	47,7	209,3	0,5	12,0	124,9	17,7	7,0
Siliana	52,0	49,0	136,4	10,0	12,0	95,0	14,8	6,4
Sidi Bouzid	25,7	20,7	100,0	00	10,7	53,0	00	—



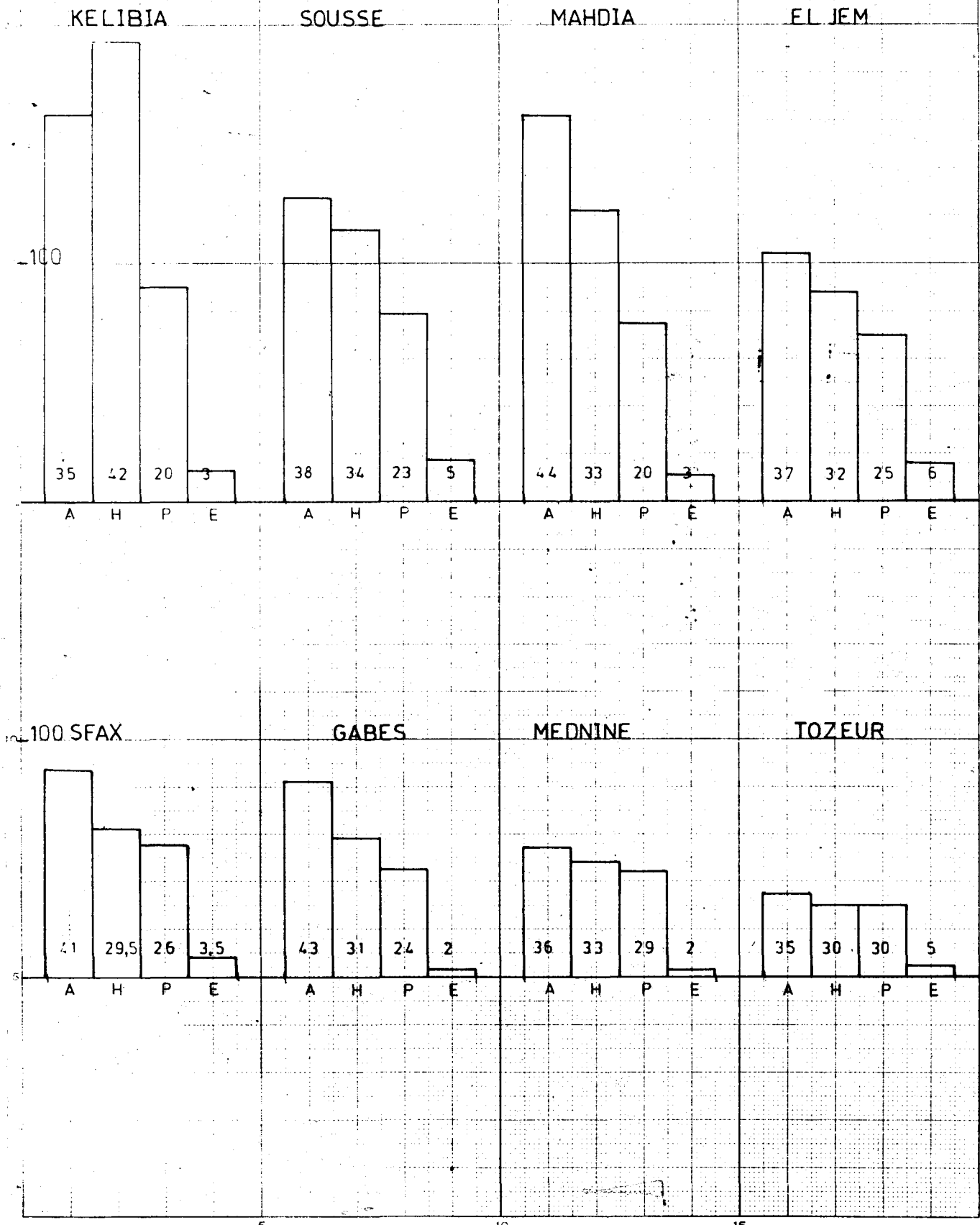


ECHELLE 1/3000.000 - K.B.M. JUL. P.

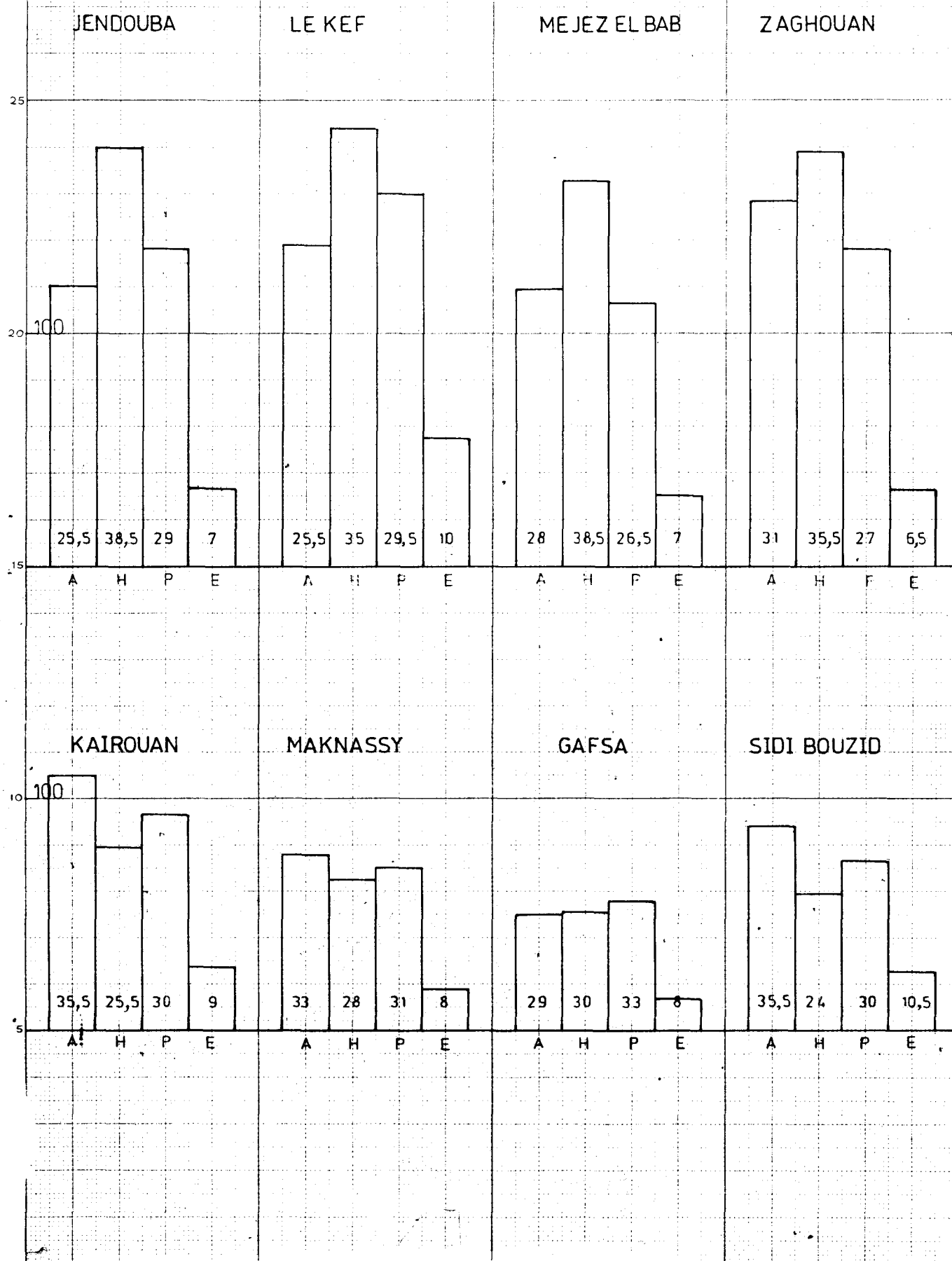
Moyennes pluviométriques saisonnières et leur contribution(en%) au total pluviométrique annuel moyen.



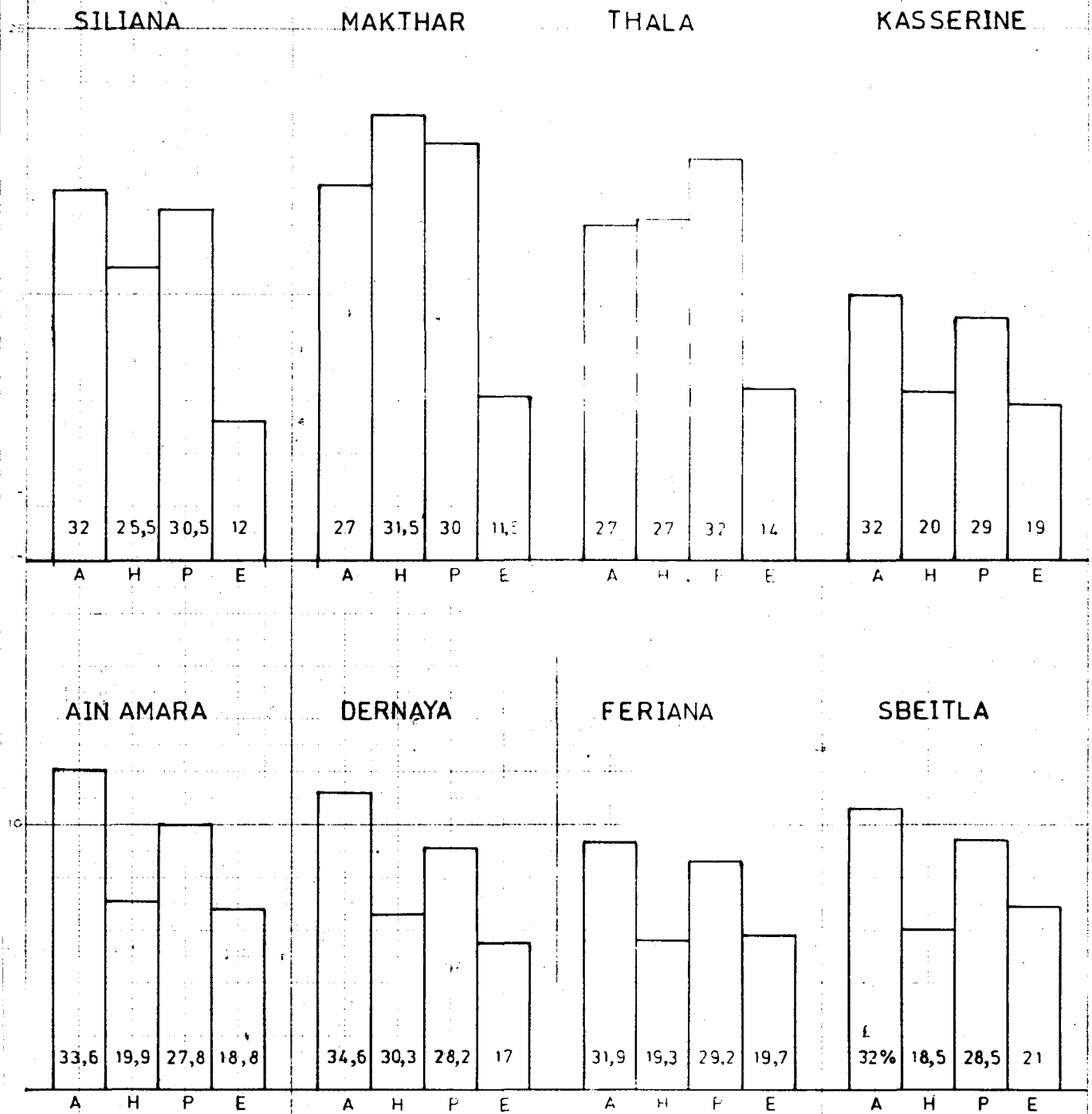
Moyennes pluviométriques saisonnières et leur contribution(en %) au total pluviométrique annuel moyen



Moyennes pluviométriques saisonnières et leur contribution (en%) au total pluviométrique annuel moyen.



Moyennes pluviométriques saisonnières et leur contribution (en%) au total pluviométrique annuel moyen.



Dans 57 % des cas à Kasserine, 60 % des cas à Aïn Amara, et 68 % des cas à Fériana l'été est plus humide que l'une des autres saisons. Il arrive même que l'été soit la saison la plus humide de l'année [cas des années 1967 (42 % du total annuel) 1959 (38,6 % du total annuel) 1961... soit 11 % des années étudiées à Kasserine et 8 % à Fériana]. On a même décelé un été plus humide que les 3 autres saisons réunies : en 1961, la participation de l'été était de 53,4 % à Kasserine et 55,9 % à Sbeitla.

Ainsi donc, la contribution de l'été varie énormément et peut être déterminante dans le total annuel : en 1959 et en 1963, à Kasserine, les pluies de l'été ont comblé un déficit de 11 % et de 24 % et donné un excédent de 12 % et 6 %.

Les quantités de pluie maximale peuvent atteindre des valeurs relativement très élevées : 211,9 mm à Kasserine (1929) 165 mm au Kef (1905) 163 mm à Fériana, 150,6 mm à Aïn Amara. Sur les 63 années de mesure à Kasserine, 16 % des pluies estivales sont supérieures à 100 mm et 44 % dépassent les 50 mm. Il en est de même dans toute la région (Le Kef, Fériana, Thala, Dernaya, Aïn Amara).

Les minimales sont plutôt très faibles, à Kasserine encore, 6 % des années ont un été complètement sec ; pourtant, le Kef, Thala, Siliana, Aïn Amara, Fériana, Dernaya n'ont jamais eu de valeur nulle.

Toutefois, le coefficient d'irrégularité demeure très fort : 6 à Siliana, 17 à Kasserine, Sousse 81,6 ... la décennale humide dépasse les 100 mm, la décennale sèche est inférieure à 20 mm.

Pour le reste du pays, (extrême nord, sahel et sud) valeurs et proportions restent bien inférieures à celles qu'on vient d'étudier. A Béja, station de la Tunisie humide, on n'a que 6 % de valeurs supérieures à 100 mm, 15 % supérieures à 50 mm, les contributions au total annuel les plus élevées étant de 15 à 25 %. A Mahdia, 60 % des totaux de l'été sont inférieurs à 10 mm, à Gabès 35 % des valeurs sont nulles et 92 % sont inférieures à 10 mm.

2 - RÉPARTITION MENSUELLE DES PLUIES D'ÉTÉ

La répartition des pluies entre les 3 mois de l'été est inégale Juin et Août étant plus humides que le mois de Juillet. Toutefois, chacun de ces mois peut-être complètement sec, comme il peut donner une forte proportion du total annuel, comme il peut arriver qu'il soit le plus pluvieux de l'année.

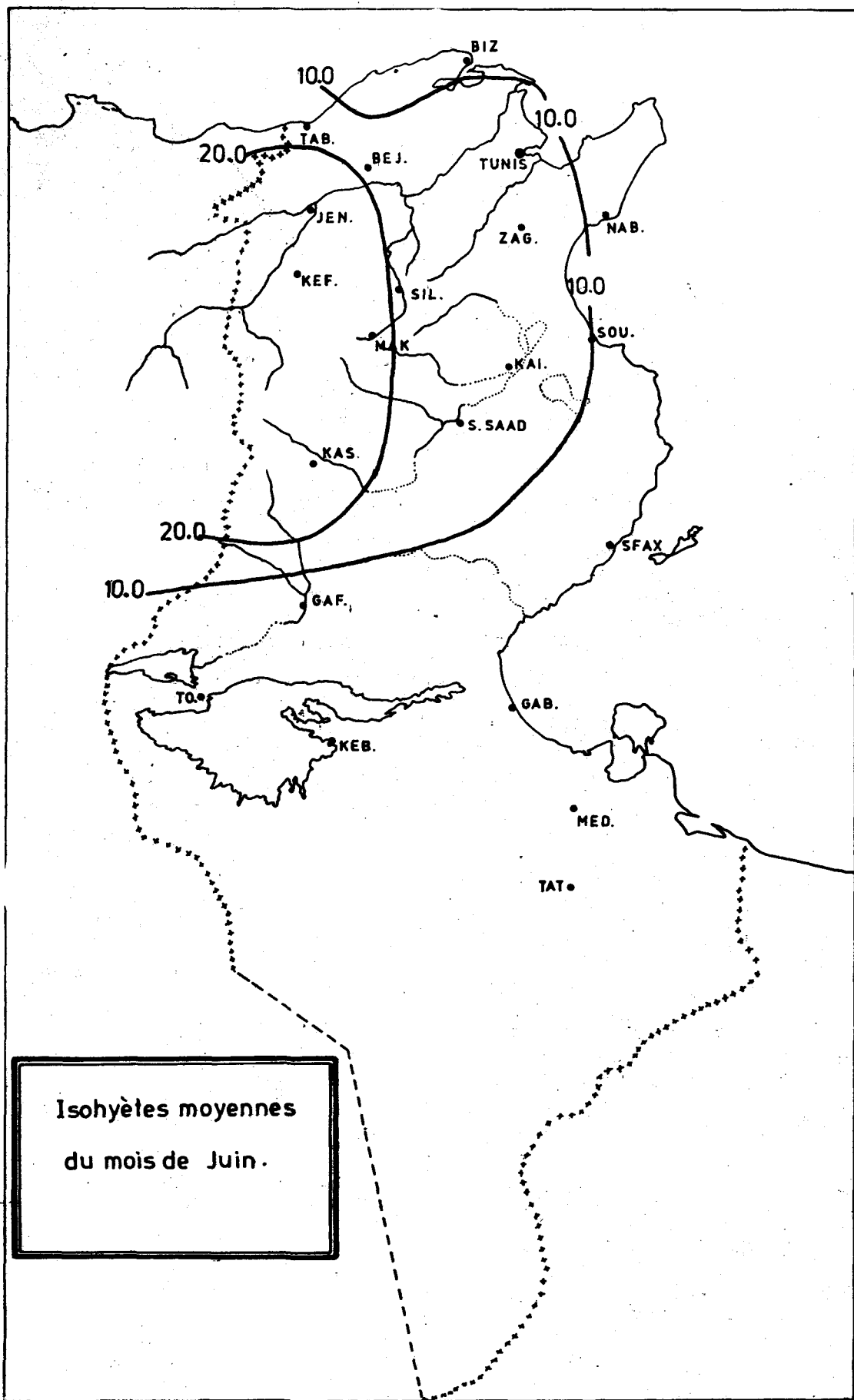
A Thala en 1968, le mois de Juin a totalisé 188 mm soit 31 % du total annuel ; à Kasserine, en 1915, le même mois a reçu 197 mm soit 38 % du total de l'année ; le mois de Juillet a enregistré 100,6 mm à Fériana et 82,5 mm à Aïn Amara soit 25 % et 34 % du total pluviométrique annuel ; enfin à Dernaya, les 47 mm du mois d'Août 1938 et les 99 mm d'Août 1952, représentent 23 et 24 % du total annuel.

Ainsi, toutes les minimales sont nulles, alors que les maximales varient de 50 à 200 mm suivant les stations et les mois.

D'autre part, les cartes des isohyètes moyennes mensuelles présentent toutes les trois un maximum centré à l'Ouest à partir duquel les valeurs se dégradent vers le littoral et vers le sud.

+Le mois de Juin

De moins de 10 mm sur la côte et au sud, les moyennes dépassent les 20 mm à l'Ouest (de Aïn Draham à Fériana en passant par Téboursouk et Makthar). La participation au total annuel est de 5 à 10 % pour les régions les plus pluvieuses. A Kasserine, le mois de Juin est plus humide que les mois de Novembre, Décembre, Janvier, Février. Il en est de même à Aïn Amara, Fériana, Sbeitla.



Isohyètes moyennes
du mois de Juin.

CARACTÉRISTIQUES DES PLUIES DU MOIS DE JUIN

Stations	Moyenne	Médiane	Max	Mini	%	Nbre d'années
Béjà	16,8	9,2	159,1	00	2,7	84
Le Kef	27	21,3	132,5	00	5,0	96
Kasserine	27,2	16,3	197,0	00	8,8	64
Sbeïtla	31,5	16,9	143,5	00	9,2	27
Fériana	21,5	19,3	60,5	00	7,3	38
Dernaya	18,5	14,3	61,5	00	5,7	20
Aïn Amara	23,2	20,9	71,0	00	6,5	20
Thala	30,3	20,0	188,5	00	6,5	84
Makthar	28,2	19,5	116,0	00	5,4	88
Siliana	22	16,0	90,0	00	5,1	29
Sidi Bouzid	11,4	6,7	70,0	00	4,6	77
Kairouan	11,3	6,8	70,8	00	3,7	95

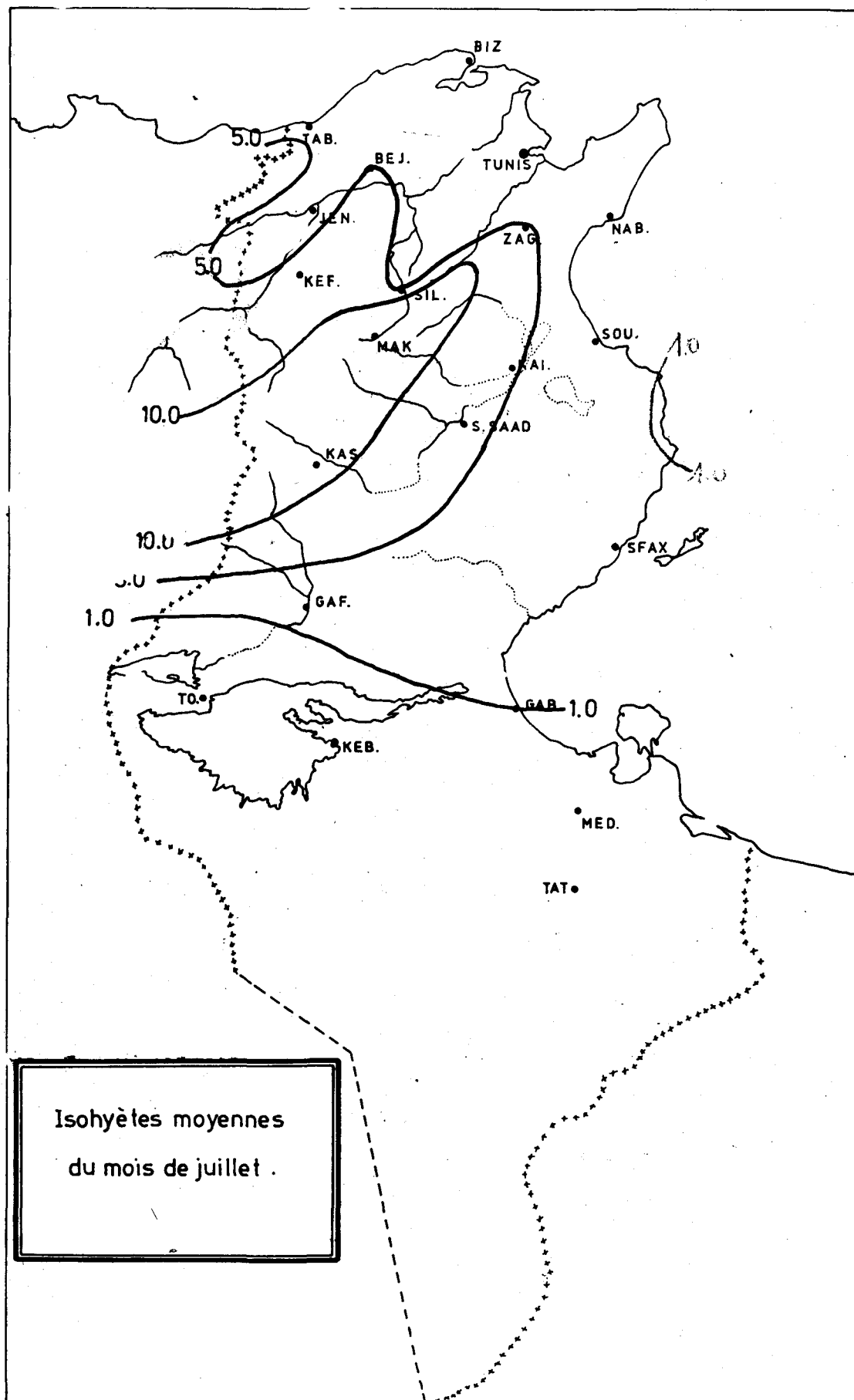
+ Le mois de Juillet

Est beaucoup moins pluvieux, comme il est plus fréquemment complètement sec. Les plus faibles moyennes sont inférieures à 1 mm au sud du pays et les plus fortes dépassent 10 mm sur la Dorsale (Thala-Barrage el Kébir - Fériana).

La contribution au total annuel moyen est également minime (0,8 % à Béjà, 6 % au maximum à Aïn Amara).

CARACTÉRISTIQUES DES PLUIES DU MOIS DE JUILLET

Stations	Moyenne	Médiane	Max	Mini	%	Nbre d'années
Béjà	4,9	00	86,6	00	0,8	83
Le Kef	9,9	3,5	82,7	00	1,8	96
Kasserine	10,0	3,1	82,9	00	3,2	65
Sbeïtla	8,5	5,3	40,6	00	2,5	26
Fériana	13,3	4,4	100,6	00	4,5	38
Dernaya	13,2	9,8	56,4	00	4,0	20
Aïn Amara	21,8	10,4	83,3	00	6,0	20
Thala	11,6	4,6	184,5	00	2,5	84
Makthar	11,3	6,0	99,5	00	2,1	87
Siliana	7,1	3,5	32,1	00	1,6	29
Sidi Bouzid	4,5	00	51,0	00	1,8	77
Kairouan	5,5	0,7	53,3	00	1,8	95



+ Le mois d'Août

est plus sec que le mois de Juin dans plusieurs régions : le Sud a moins de 5 mm, la basse et la moyenne vallée de la Medjerda ont moins de 10 mm de moyenne... La région la plus arrosée demeure la dorsale (de Tajerouine à Siliana - Barrage El Kébir - Sbeïtla et Fériana) les moyennes y sont entre 20 et 30 mm de pluie soit 5 à 90 % de la moyenne pluviométrique annuelle. Là aussi, certaines stations reçoivent en moyenne plus d'eau qu'au mois de Janvier (cas de Kasserine), de Novembre, Décembre, Janvier, Février (cas de Sbeïtla, Fériana, Dernaya) et de Novembre, Janvier et Février à Aïn Amara.

CARACTÉRISTIQUES DES PLUIES DU MOIS D'AOUT

Stations	Moyenne	Médiane	Max	Mini	%	Nbre d'années
Béja	8,7	3,0	92,5	00	1,4	82
Le Kef	18,3	12,8	80,0	00	3,4	96
Kasserine	19,4	16,6	86,3	00	6,3	64
Sbeïtla	30	29,5	78,3	00	9,0	27
Fériana	22,7	16,1	82,2	00	7,7	38
Dernaya	23,2	15,3	99,0	00	7,1	20
Aïn Amara	22,4	18,6	78	00	6,2	20
Thala	20,2	14,6	81,0	00	4,3	82
Makthar	21,8	15,1	103,0	00	4,1	88
Siliana	22,9	14,0	110,5	00	5,3	29
Sidi Bouzid	9,8	4,5	50,5	00	4,0	77
Kairouan	9,8	5,2	45,3	00	3,2	95

En définitive, le mois de Juin demeure plus humide que le mois d'Août comme il est moins souvent complètement sec (10 à 15 % seulement des années étudiées) Juillet étant le mois le plus sec de l'année sur tout le pays.

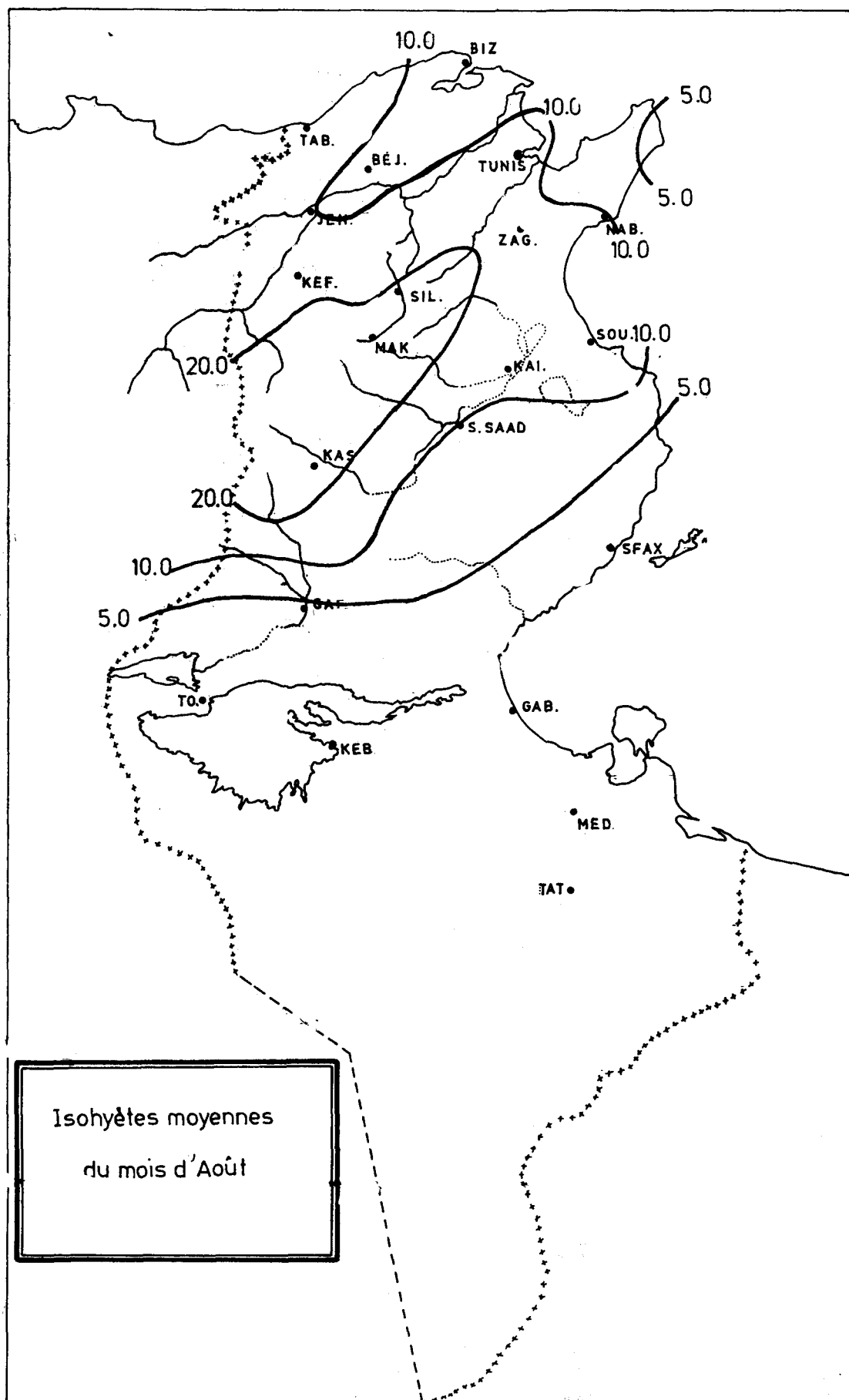
1. LES PLUIES QUOTIDIENNES

Le nombre de jours de pluie est en moyenne de 7 à 9 jours pour tout l'été, pour les stations les plus humides (Fériana : 8, Kasserine : 9, Sbeïtla : 8) et peut atteindre un maximum de 15 à 20 jours.

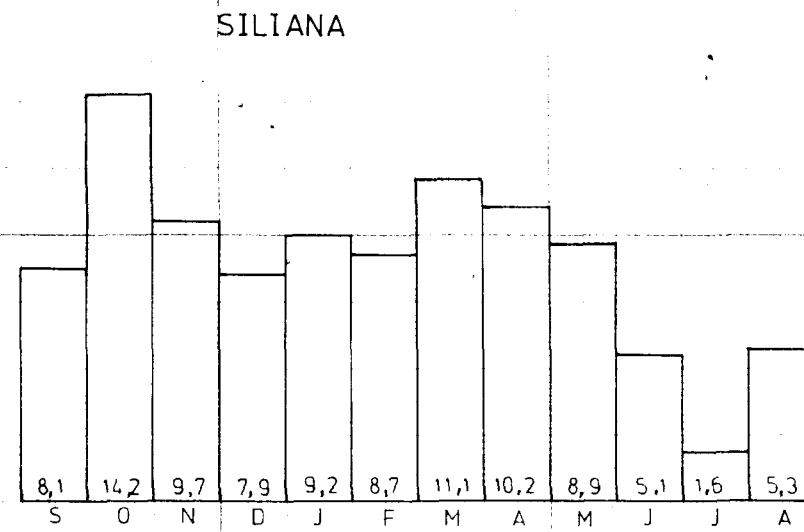
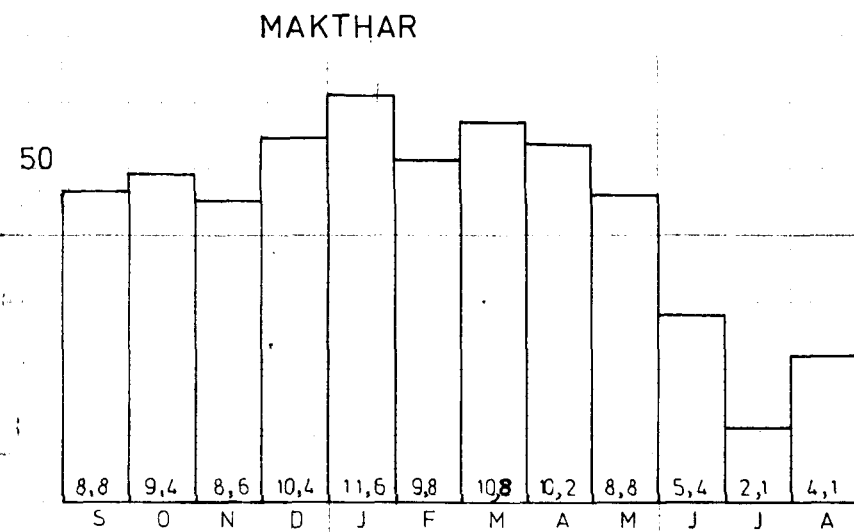
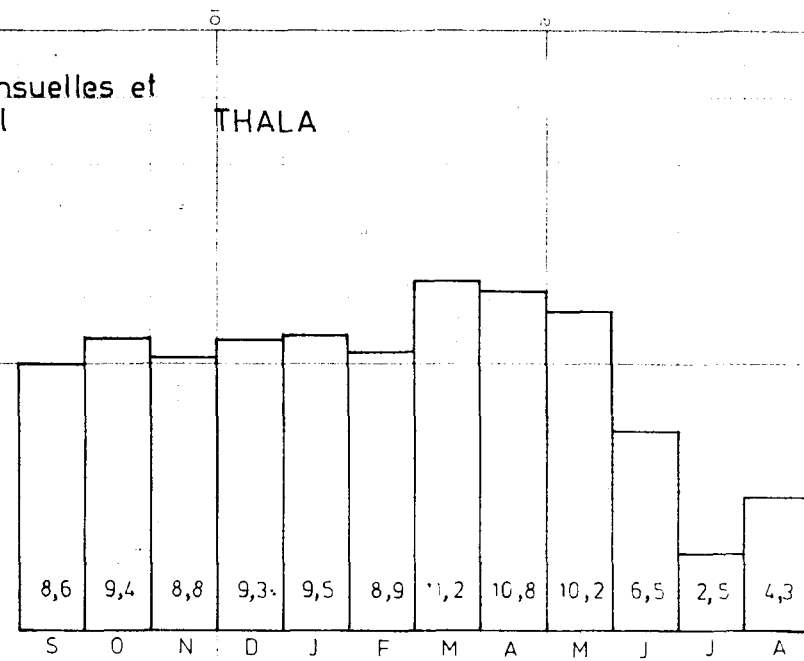
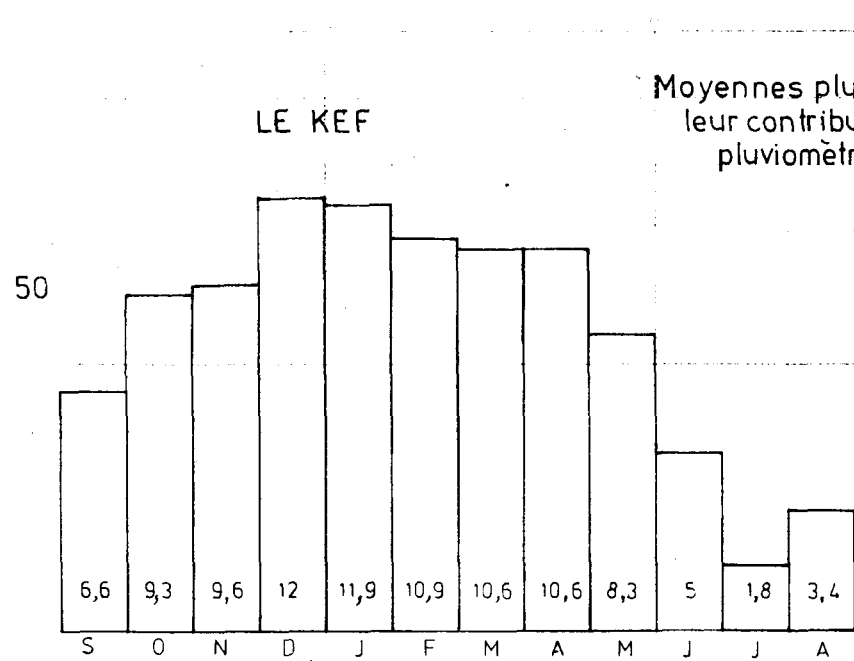
Le mois de Juin a en moyenne le plus de jours de pluie (3 jours) et peut en avoir jusqu'à 15 jours au maximum. Le mois de Juillet 1928 a eu 12 jours de pluie à Fériana, Août a eu un maximum de 8 jours à Sbeïtla.

Les pluies maximales quotidiennes de l'été se produisent le plus souvent en Juin et en Août. Elles peuvent donner la maximale quotidienne annuelle : la pluie du 8 Juin 1972 représente la maximale annuelle à Kasserine (18,1 mm) et à Sbeïtla (32,2 mm). Il est de même de celle du 27 Juin 1976 à Kasserine (46,1 mm) et du 23 Juin 1976 à Sbeïtla 73,8 mm). D'ailleurs à Sbeïtla 35 % des maximales quotidiennes se produisent en été. Pour cette station, 48 % des maximales sont supérieures à 25 mm et 13 % sont supérieures à 50 mm.

Les quantités de pluie quotidienne supérieures à 30 mm représentent de 0,5 à 3 % ; celles supérieures à 10 mm, 20 à 25 %.

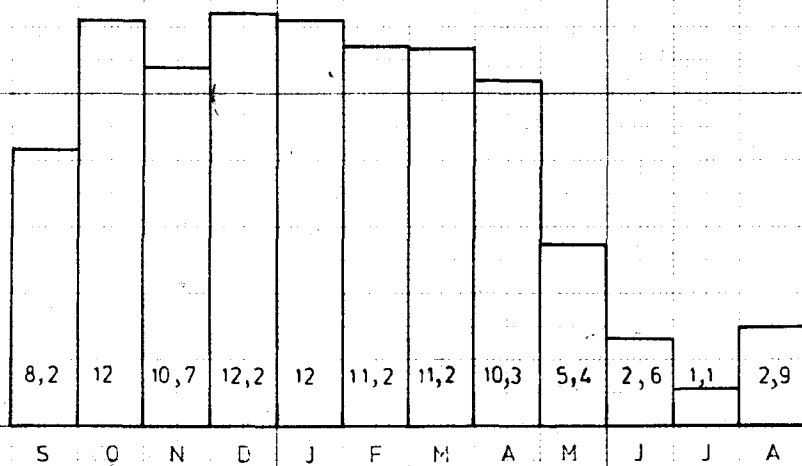


ECHELLE 1/3000.000 - K.B.M. JUL.79

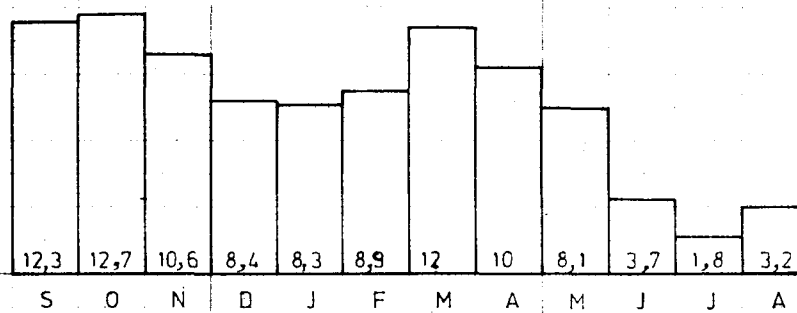


Moyennes pluviométriques mensuelles et leur contribution (en %) au total pluviométrique annuel.

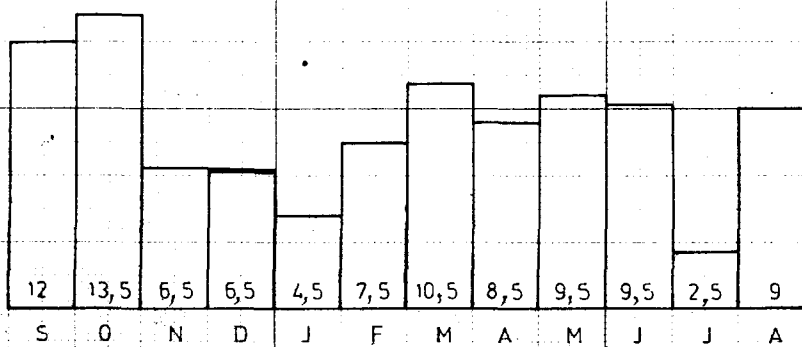
ZAGHOUAN



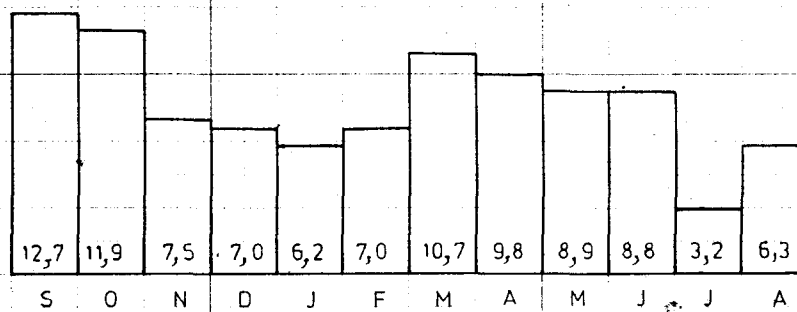
KAIROUAN



SBEITLA

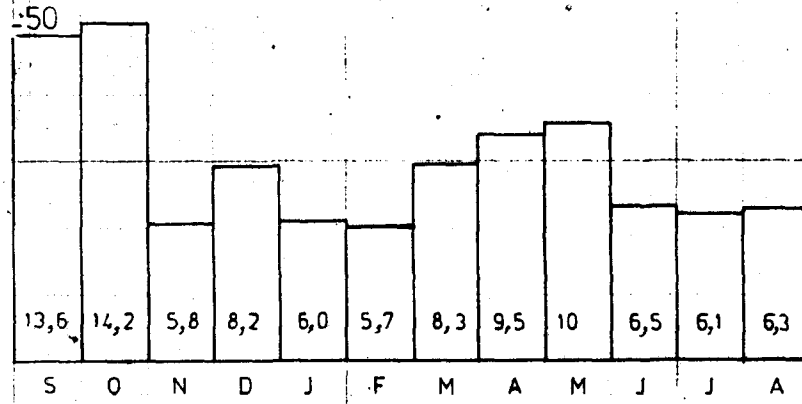


KASSERINE

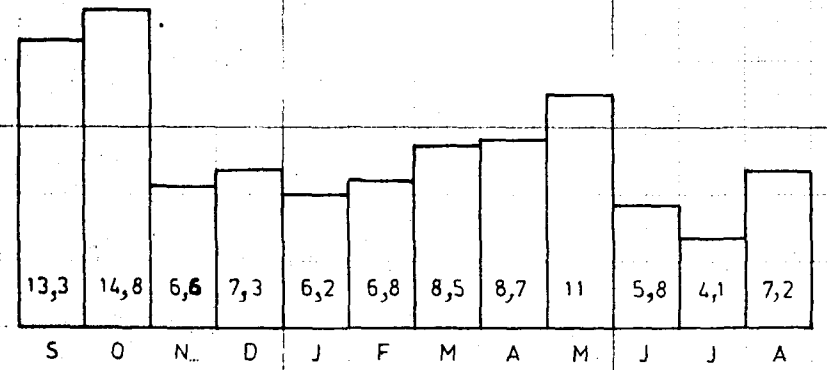


Moyennes pluviométriques mensuelles et leur contribution(en %) au total pluviométrique annuel

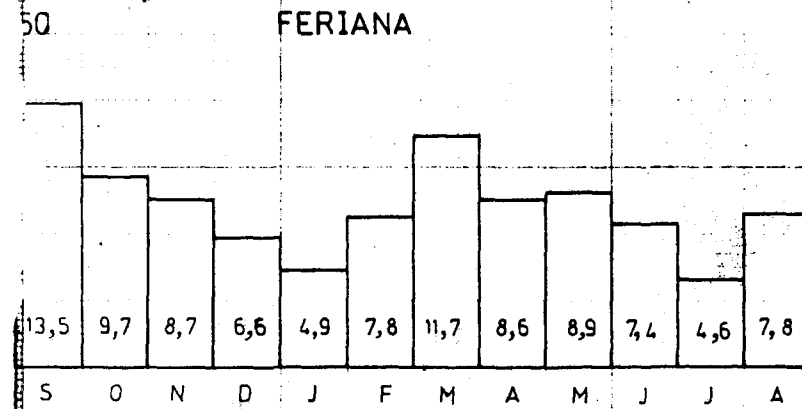
AIN AMARA



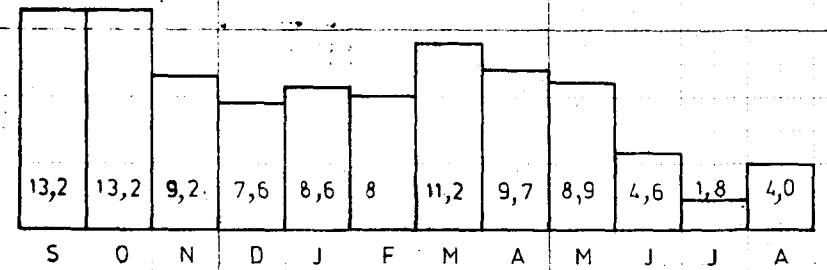
DERNAYA



FERIANA



SIDI BOUZID



En conclusion, les pluies d'été étant des pluies d'orage, c'est dans la région montagneuse de la Tunisie Centrale et continentale du Haut Tell qu'elles sont considérables. La saison d'été y équivaut plus ou moins (au point de vue quantité de pluie) à celle de l'hiver. Mais il demeure que la dispersion, la variabilité et l'irrégularité soient la règle. Ainsi, les valeurs mensuelles ou même quotidiennes peuvent être déterminantes d'un total annuel excédentaire, la probabilité d'avoir un mois complètement sec étant plus importante que pour les autres mois de l'année.

ESSAI DE CORRELATION ENTRE DÉBIT LIQUIDE D'ÉTIAGE ET SALINITÉ

Par : A. Chorbél*
et M. Matoussi**

La détermination de la salinité des eaux d'étiages des cours d'eau est une opération nécessaire dans les régions semi-arides où les ressources en eau sont limitées et les concentrations en sel des eaux de ruissellement et en particulier des étiages sont relativement importantes. En effet l'évaluation précise de la salinité des étiages permet :

- a) de mieux gérer les eaux retenues par les barrages*
- b) de choisir les cultures d'irrigation à entreprendre*
- c) de limiter les périodes d'irrigation en fonction des besoins en eau et en fonction des seuils de concentration de la salinité.*

INTRODUCTION

La mesure de la salinité des étiages des cours d'eau et apparemment une opération assez facile en comparaison avec ce qui se passe en crues, aussi bien pour l'hydrologue que pour le chimiste ; néanmoins elle comporte des difficultés d'ordre technique et pratique. En effet la diversité des appareils utilisés (résistivimètre, conductivimètre, analyse ionique, mesure à l'étuve etc...) entraîne une certaine hétérogénéité dans les résultats de mesures et par conséquent dans les estimations issues de ces résultats (interpolation, extrapolation) ; quant à la deuxième difficulté, elle réside dans la continuité d'effectuer des mesures ponctuelles dans le temps et dans l'espace.

Ce travail nécessaire et fastidieux coûte très cher et demande beaucoup de temps pour être réalisé. En outre, la gestion des fichiers résultats des différents modes d'analyses est lourde à faire, l'exploitation de ces données ne se fait qu'à l'occasion des études hydrologiques et en particulier lors des études de monographies, et les résultats obtenus se sont avérés en deçà de ce qui a été escompté.

*La question que se pose tout hydrologue est la suivante :
Existe-il un autre moyen plus facile et moins coûteux pour évaluer la salinité ?*

En réponse à cette question quelques essais de recherche de corrélation entre débit et salinité ont été faits en Tunisie. La plupart de ces essais n'ont pas abouti à des résultats concluants (1) d'autres ont procédé à une sorte de cartographie (5) qu'on ne peut mettre en équation. Dans cette note nous avons voulu développer une méthode de corrélation entre débit et salinité facile et applicable à la plupart des cas.

* Hydrologue Principal de la Division des Ressources en Eau — DRES - Ministère de l'Agriculture - TUNIS.

** Ingénieur Adjoint de la Division des Ressources en Eau — DRES - Ministère de l'Agriculture - TUNIS.

I - METHODES UTILISEES POUR LA DETERMINATION DE LA SALINITE

Il existe plusieurs méthodes pour déterminer la salinité, ces méthodes sont divisées en deux catégories ; la première catégorie est basée sur des mesures directes de salinité et la deuxième sur des mesures de paramètres comme la température.

1.1 - Mesures directes de salinité

a) mesure du résidu sec et de la salinité par la somme des masses des éléments minérales

Cette méthode est la plus sûre car elle permet de recouper les deux mesures et d'établir la balance ionique.

b) mesure du résidu sec et mesure de la conductivité

Cette méthode est moins satisfaisante que la première car elle ne permet pas l'établissement de balance ionique.

c) mesure du résidu sec

Cette méthode est la moins bonne car elle ne permet pas la détection d'une éventuelle erreur.

1.2 - Mesures indirectes de salinité

a) mesure de conductivité

b) mesure de résistivité

A partir de ces mesures, on calcule la salinité soit par l'application de formule empirique soit par interpolation entre deux mesures directes de salinité ou extrapolation à partir d'une relation résidu sec conductivité.

Il est bien évident que la conductivité (ou résistivité) est influencée par plusieurs facteurs : comme le PH de la solution, la valence des ions, le degré d'ionisation, la température. Ces différents facteurs peuvent être des sources d'erreurs ce qui rend le calcul de la minéralisation à partir de la conductivité aléatoire.

2 - SOURCES D'ERREURS DE MESURE DE SALINITE

a) Le flacon est une source d'erreur. Il est donc conseillé d'utiliser des flacons en verre et les traiter ou au moins les laver convenablement avec l'eau à prélever avant l'utilisation.

b) Le prélèvement peut ne pas être représentatif, il faut donc apporter le plus grand soin à cette opération pour cela la bouteille doit être plongée à une distance du fond et de la surface, assez loin des rives ou des bords.

c) La période qui sépare les opérations de prélèvement et l'analyse, quand elle est assez longue peut faire intervenir des modifications : fixation de certains éléments sur les parois des récipients, précipitations secondaires par changement de valence, etc...

d) La température et la durée de dessiccation du résidu sont des facteurs très importants. A 105° C ou à 180°C il peut y avoir de différences dans les résultats.

e) La variation de l'étalonnage des électrodes du conductivimètre est très fréquente. Il est recommandé de pratiquer l'étalonnage lors de chaque série de mesures.

f) La température si elle n'est pas relevée exactement au cours de la mesure entraînerait de grosses erreurs.

g) Erreurs de mesure de la conductivité. Pour éviter cette erreur il faut faire de préférence deux mesures sur le même échantillon et recommencer si nécessaire jusqu'à ce que le résultat obtenu soit constant.

h) Erreur de pesée. Il est recommandé de faire plusieurs fois la pesée jusqu'à stabilisation du résultat.

i) Erreur de bouteille, pour éviter cette erreur il faut coller sur la bouteille juste après l'opération de prélèvement une étiquette indiquant le nom de l'oued, station, heure, côte à l'échelle...

3 - CORRELATION ENTRE DÉBIT EN SEL ET DÉBIT LIQUIDE

Le but de cette corrélation est de déterminer la concentration en sel ou le débit en sel en connaissant le débit liquide instantané.

Dans une première phase nous avons rassemblé les données (débits liquides et concentrations en sel des différents modes d'analyse y compris celles déterminées à partir de la conductivité) de quelques stations parmi les mieux connues et qui se trouvent loin des confluent, et tenté des corrélations entre débit liquide et concentration, débit en sel etc...

La première remarque qui s'est dégagée de ces essais c'est qu'il existe une tendance de corrélation entre débit sel et débit liquide. Dans une deuxième phase nous avons éliminé toutes les mesures indirectes de salinité (paragraphe 1) et porté les débits en sel en ordonnée et les racines carrées des débits liquides correspondants en abscisse. Il va de soi que cette opération a réduit considérablement le nombre de points (car le nombre de mesures de conductivité est beaucoup plus grand que le nombre de mesure de salinité au laboratoire) mais en revanche elle a éliminée les points les plus mauvais et a permis de tracer une courbe passant par le nuage de points de mesure. Cette courbe de corrélation a des allures différentes selon les stations. Elle est parabolique pour les stations de Ghardimaou (grap. 1), Kanguet Zazia (grap. 5) et Ousafa M 12 (grap. 3) et droite pour Tessa Sidi Mediène (gra. 4) et Siliana à Dj. Laoudj (grap. 2).

4 - COMMENTAIRE

D'une façon générale le nombre d'analyse au laboratoire des étiages est insuffisant pour pouvoir ajuster ces courbes de corrélation (exception faite pour les stations de Ghardimaou et Khanguet Zazia).

En sévère étiage les analyses sont presque inexistantes ceci rend difficile si ce n'est impossible l'extrapolation de la courbe vers les faibles débits.

La limite supérieure des débits d'étiage de chaque station est toujours mal connue ; un écoulement retardé ou même un ruissellement en été peut avoir un débit du même ordre de grandeur qu'un débit d'étiage en hiver comme c'est le cas de quelques points de Khanguet Zazia où c'est marqué D (décru) (graph. 5).

L'écart relatif entre les points de mesures et les courbes de corrélation ainsi obtenues dans la plupart des cas ne dépassent pas 20 %.

On peut aussi utiliser les salinités déterminées à partir de mesures de conductivités après correction de ces dernières. La correction se fait par lot de mesures de conductivités compris entre deux analyses au laboratoire. Un exemple est donné en annexe ; cas de l'Oued Negada à Bled Lassoued (graph. 7).

Pour rendre facile l'utilisation de ces courbes de corrélation on les a découpées en segments de droites dont l'équation générale est $Q_s : a\sqrt{Q_l} + b$ (1).

Q_s : débit sel
 Q_l : débit liquide
 a, b : constantes
 b : est négative ou égale à zéro
 Q_s : $C \times Q_l$ (2)
 C : concentration en sel instantanée
 (1) : (2)
 $C \times Q_l : a\sqrt{Q_l} + b$ -----

$$C : \frac{a}{\sqrt{Q_l}} + \frac{b}{Q_l} \quad (3)$$

Pour les faibles débits $b : 0$ et $C : \frac{a}{\sqrt{Q_l}}$

Quant Q_l tend vers 0, C tend vers l'infini.

Ceci n'a pas de sens physique car il existe un seuil de saturation à des conditions déterminées qu'on ne peut le dépasser mais explique quelque chose de logique : c'est qu'on dispose d'une quantité de sel «dissoute» dans un volume d'eau égal à zéro.

La deuxième condition aux limites bien qu'on ne peut jamais l'atteindre c'est quand Q_l tend vers l'infini C tend vers 0, est vérifiée.

L'équation (3) montre bien que la concentration en sel est une fonction décroissante du débit liquide.

Pour les stations qui se trouvent très en aval de l'oued comme celles de Tessa à Sidi Mediène (graph. 4) et de Siliana à Dj. Laoudj (graph. 2) la corrélation est représentée par une seule droite. Deux explications sont possibles: existence d'une nappe ou d'un underflow assez important en amont de ces stations qui régularise aussi bien les débits liquides que les débits en sel ou bien présence de plusieurs nappes et les conditions de bon mélange réalisées. Par contre les stations qui se trouvent relativement en amont, la corrélation est représentée par plusieurs droites : cas de Ghardimaou (graph. 1) et Ousafa à M 12 (graph. 3) deux explications sont possibles à ces variations de pentes et des constantes à l'origine : coexistence de plusieurs nappes en interférences l'une sur l'autre ou bien conditions géologiques locales influençant la salinité.

L'étude de tarissement à Ghardimaou (1) montre que l'ajustement d'une loi de type exponentiel n'est pas tout à fait plausible et que l'écoulement en étiage ne semble pas soumis à l'influence d'un seul réservoir de type nappe captive. Ce qui a été dit pour Ghardimaou et aussi valable pour Ousafa à M 12 avec une différence dans les grandeurs et les capacités des nappes.

Si on reprend l'équation générale (1)

$Q_s : a\sqrt{Q_l} + b$ et si on prend l'exemple de 3 nappes en interférences comme c'est le cas pour Ghardimaou (graph. 1).

Les équations des différentes droites seraient :

a) $Q_s : \frac{a_1 \sqrt{Q_1}}{t_a}$ de l'origine à l'intersection avec la 2ème droite.
à l'intersection $Q_1 : Q_1 1$ et $Q_s : Q_{s1}$

b) $Q_s : Q_{s1} + \frac{a_2 \sqrt{Q_1 - Q_1 1}}{t_b}$ de $Q_1 1$ jusqu'à l'intersection avec la 3ème droite.
à l'intersection $Q_1 : Q_1 2$ et $Q_s : Q_{s2}$

c) $Q_s : Q_{s2} + \frac{a_3 \sqrt{Q_1 - Q_1 2}}{t_c}$

les termes t_a, t_b, t_c représentent respectivement les débits en sel de la première, de la deuxième et de la troisième nappe.

Les débits liquides $Q_1 1$ et $Q_1 2$ sont respectivement les débits maximums de la première et de la 2ème nappe.

Si on représente schématiquement les trois nappes par des réservoirs ayant chacun un orifice en bas on obtient par exemple le schéma suivant : (graph.)

Le vidage peut se faire en même temps pour les 3 nappes mais le 3ème réservoir cesse de déverser avant le 2ème et ce dernier avant le 1er.

Pour les stations qui se trouvent non loin d'une confluence il faut chercher pour chaque oued sa propre corrélation. Pour déterminer la concentration en sel juste en aval de la confluence il faut additionner les débits en sel des différents oueds et diviser la somme par le débit liquide total (exemple : Tuborbo Majus sur l'Oued Miliane (graph. 7) et Oued Jarabia (graph. 6)).

Si on appelle Q le débit total, q_1 et q_2 et C_1 et C_2 , les débits et les concentrations en sel des affluents 1 et 2 on a alors :

$$Q : q_1 + q_2$$

$$Q_s : q_{s1} + q_{s2}$$

Q_s : débit en sel

$$Q_s : C_1 q_1 + C_2 q_2$$

$$\text{et comme } q_{s1} : a_1 \sqrt{q_1} + b_1$$

$$q_{s2} : a_2 \sqrt{q_2} + b_2$$

$$Q_s : q_{s1} + q_{s2} : a_1 \sqrt{q_1} + a_2 \sqrt{q_2} + B \text{ avec } B : b_1 + b_2$$

La relation n'est donc pas univoque entre Q et Q_s c'est à dire pour un Q donné on ne trouve pas un seul Q_s car Q_s dépend à la fois de la distribution des débits entre oueds et de leurs concentrations.

5 - CONCLUSION

L'utilisation de cette méthode permet :

- 1) l'étalonnage définitif d'un nombre de stations de mesures
- 2) la traduction des débits liquides des étiages en débits en sel ou en concentrations
- 3) de réduire le nombre de mesures de salinité aux stations étalonnées.

La fourchette d'erreur de cette méthode est de plus ou moins 20 % ce qui représente l'ordre de grandeur de l'erreur commise sur la mesure de salinité d'un même prélèvement déterminée de deux modes de mesures différents à savoir : mesure de conductivité et mesure de salinité au laboratoire.

Ce travail nous a permis de voir de près la qualité des données de la salinité, de comparer les résultats obtenus par différents modes de mesures et de faire les recommandations suivantes :

a) intensifier les analyses complètes (ions, résidu sec) ne serait ce que pour une période couvrant la gamme des débits d'étiage.

b) réduire les mesures de conductivités qui sont généralement de qualité très inférieure que les précédentes.

Pour terminer, il faut noter que l'application de cette méthode peut être difficile pour les stations qui présentent des particularités comme celle de Siliana à Gaafour (présence de griffons très salés).

BIBLIOGRAPHIE

- 1 - Monographie de la Medjerda - D.R.E.S — ORSTOM — Tunis 1974
- 2 - Underflow de Oued Siliana étude hydrogéologique et modèle, essais d'alimentation artificielle - Nations-Unies - Juillet 1974.
- 3 - Débits et qualités des eaux d'été de l'Oued Siliana
Ghorbel-Matoussi - Octobre 1980.
- 4 - Note sur les débits de base de l'Oued Zarga - Cruette et Belazi.
- 5 - L'analyse chimique et physico-chimique de l'eau - Rodier

ANNEXE

MEDJERDAH A GHARDIMAOU

q s Débit en sel (g/s)

2000

1500

1000

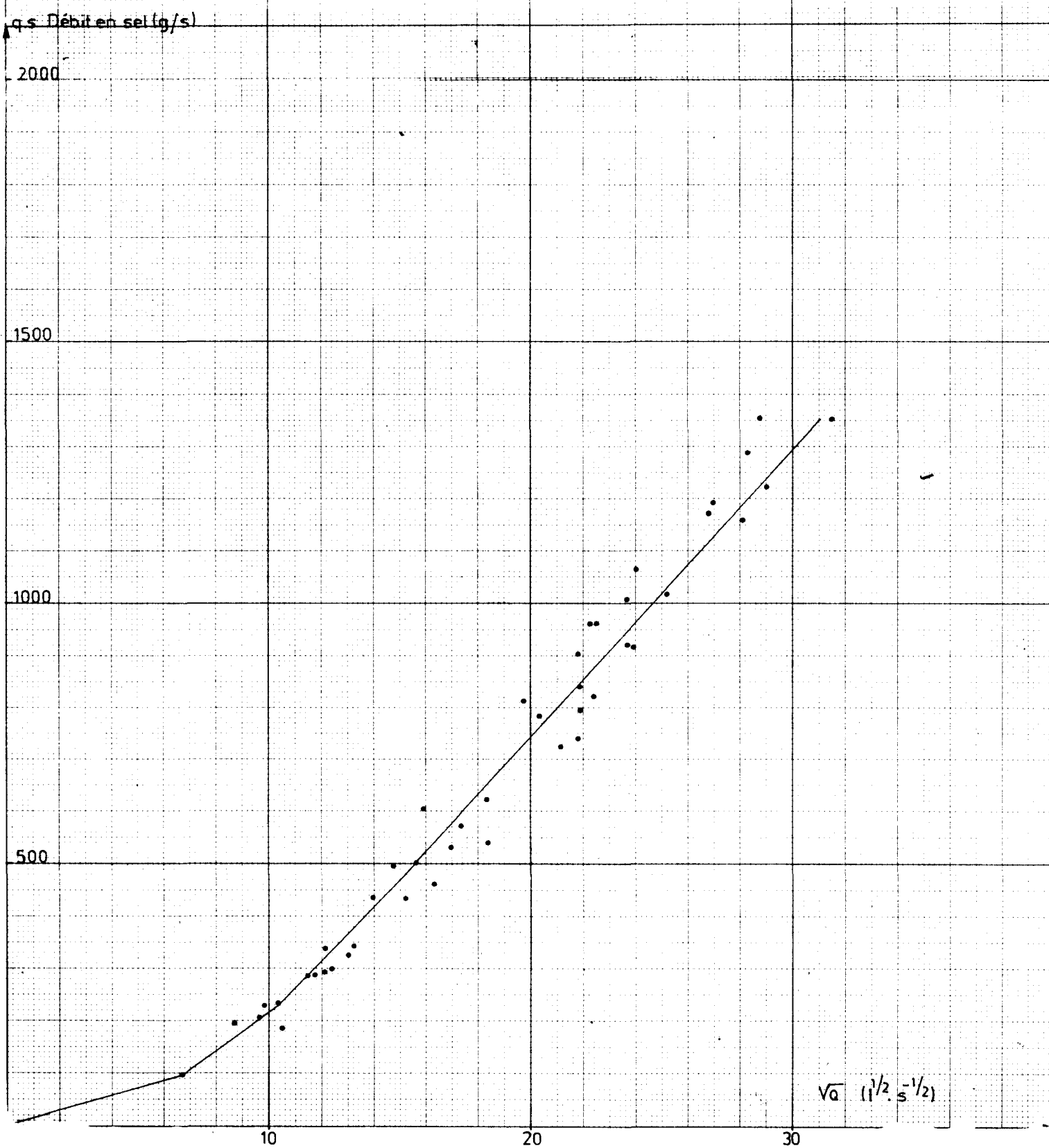
500

 $\sqrt{q} \text{ (l}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1/2}\text{)}$

10

20

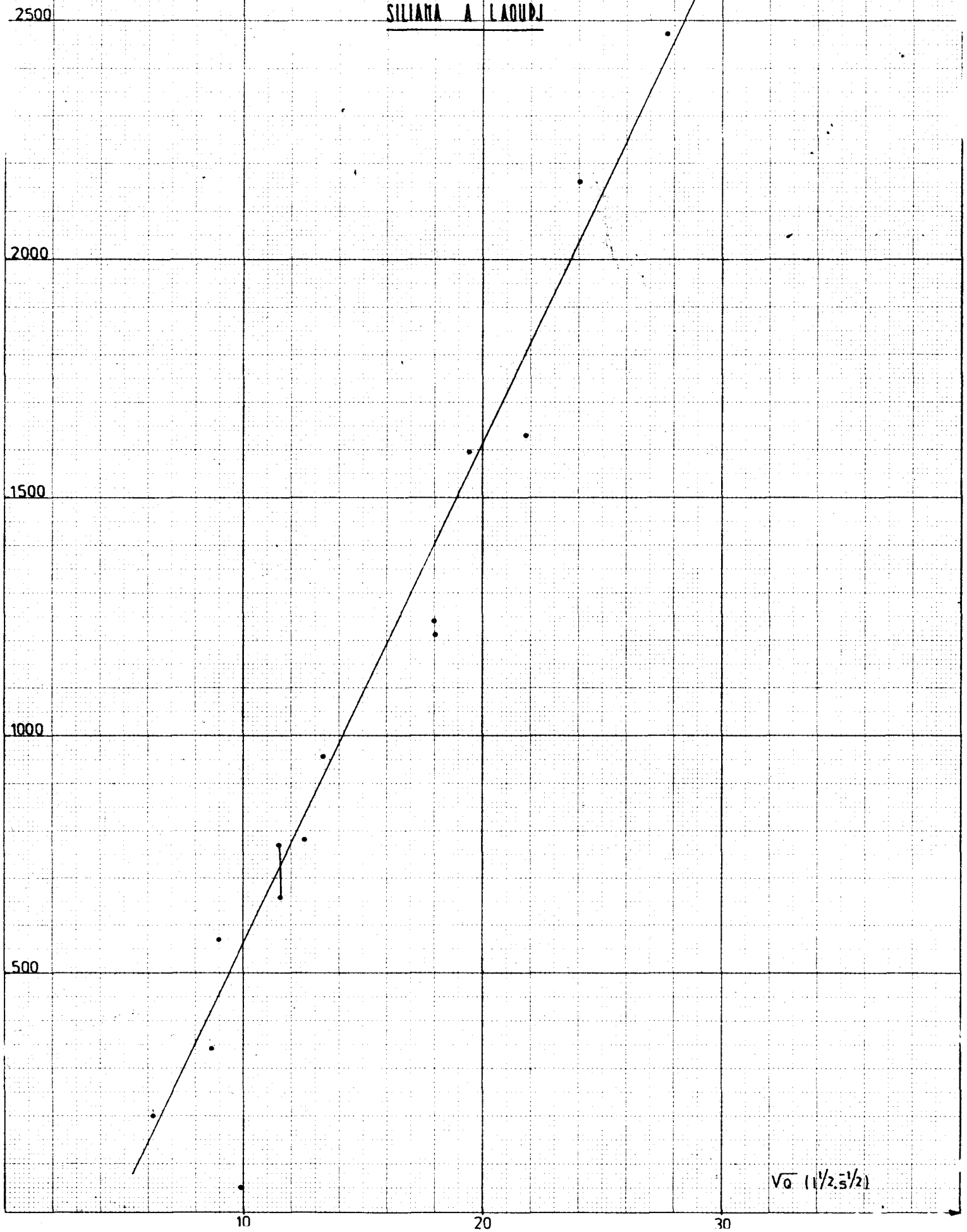
30



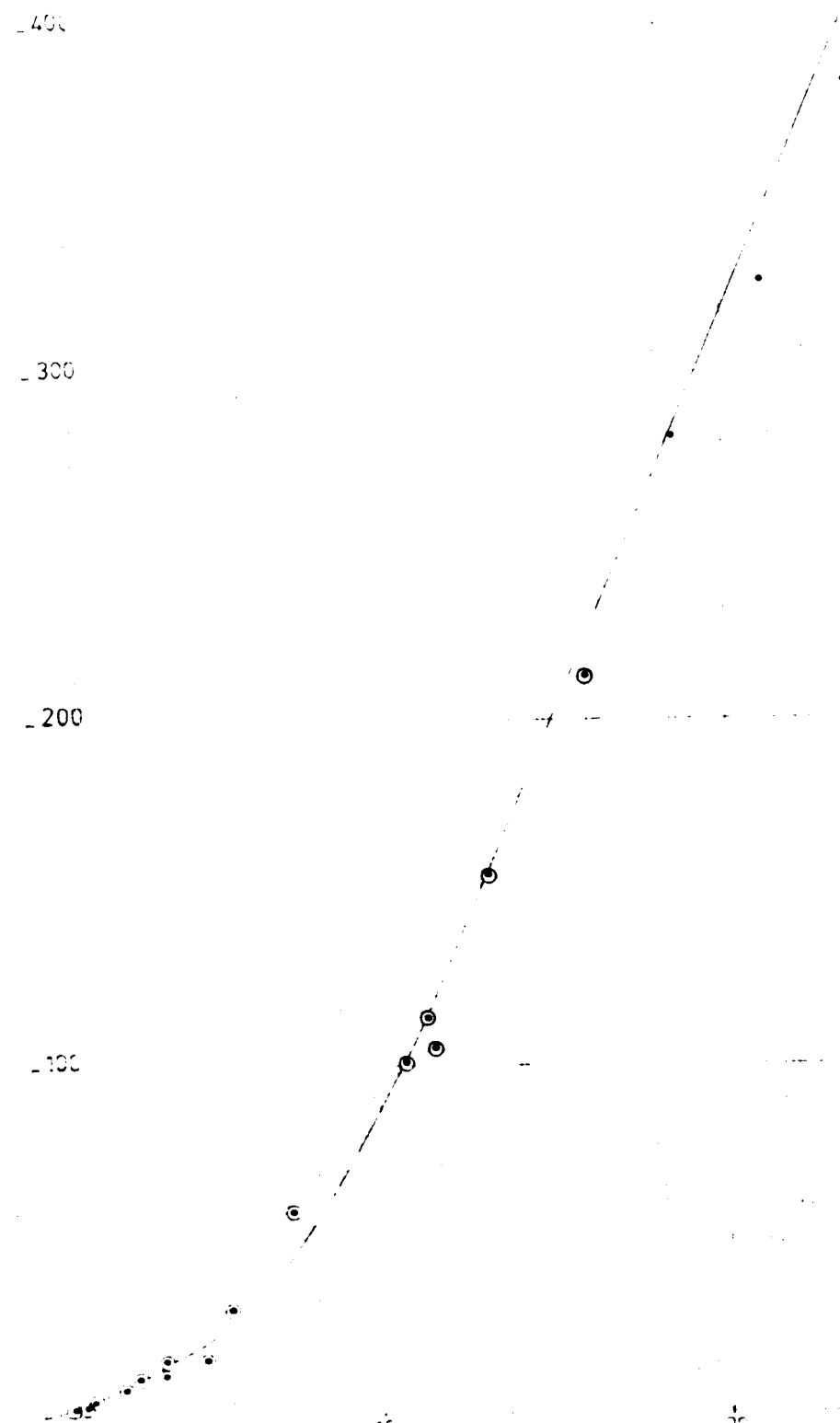
q.s Debit en sel (g/s)

Graphique : 2

SILIANA A LAOUDJ



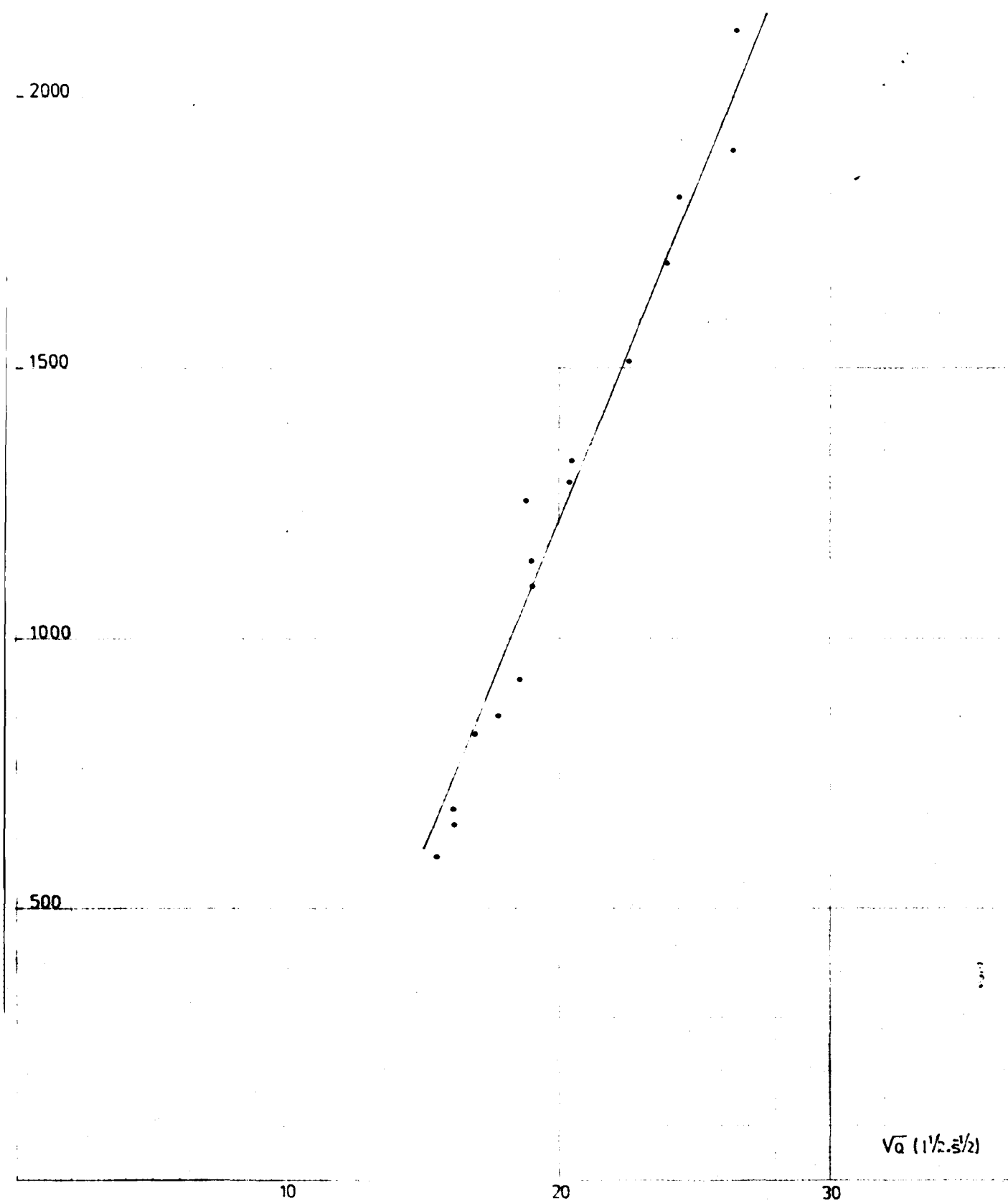
- Conductivité.
- ⊙ Salinité au laboratoire.



$\sqrt{V \cdot S^{1/2}}$

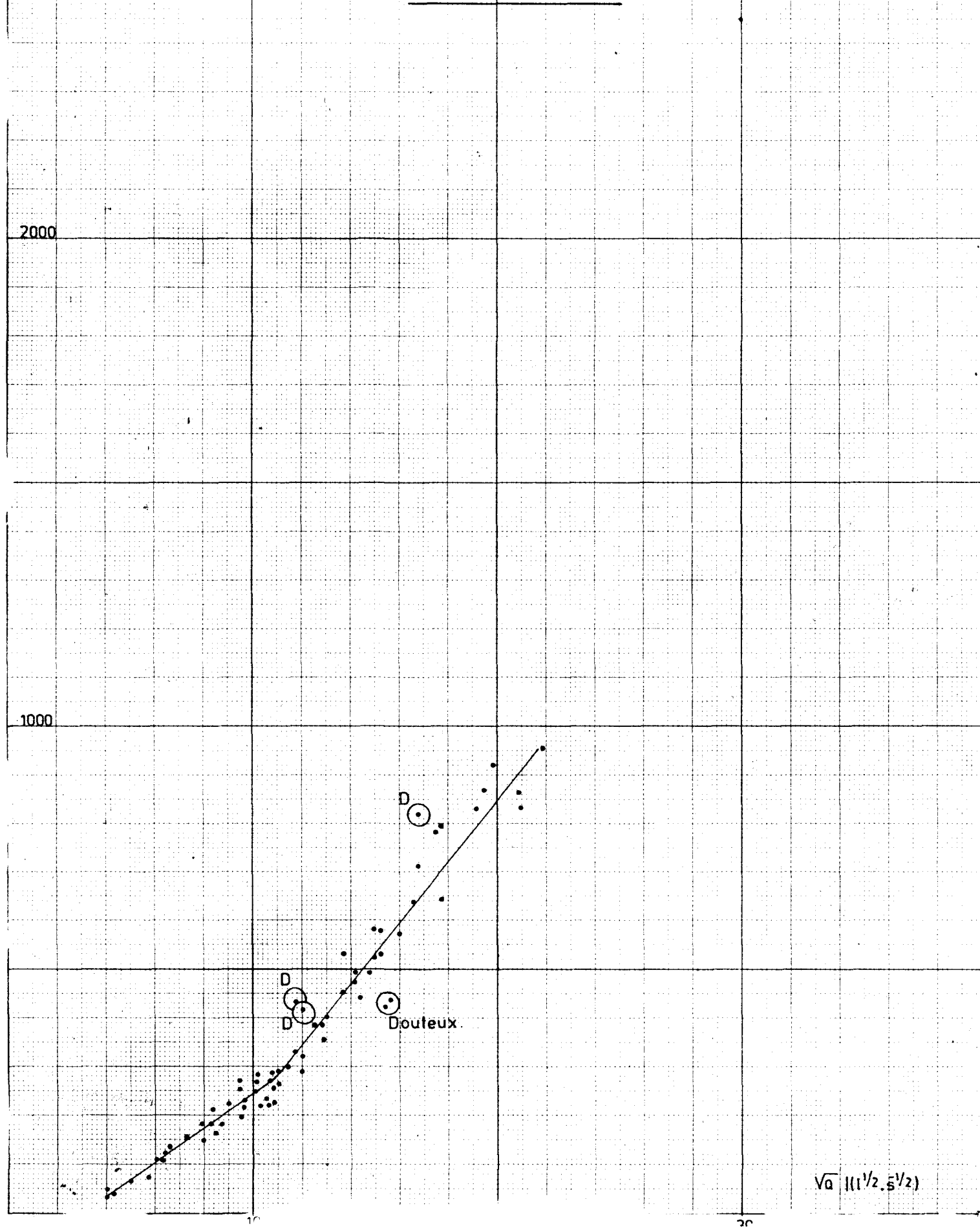
TESSA A SIDI MEDJEN

▲ q.s Débit en sel (g/s)



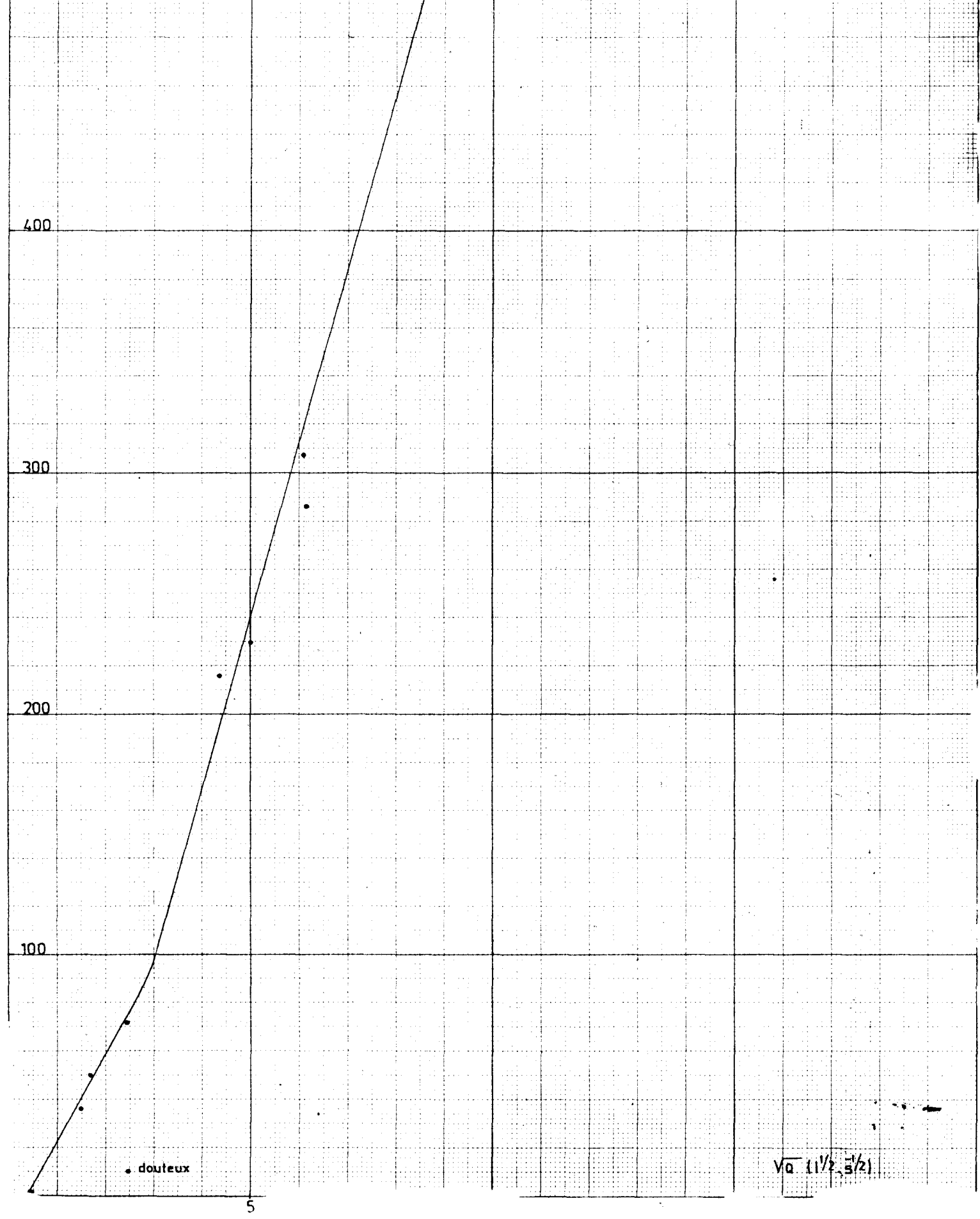
HATAD A KANGUET ZAZIA

q, s Débit en sel (g/s)



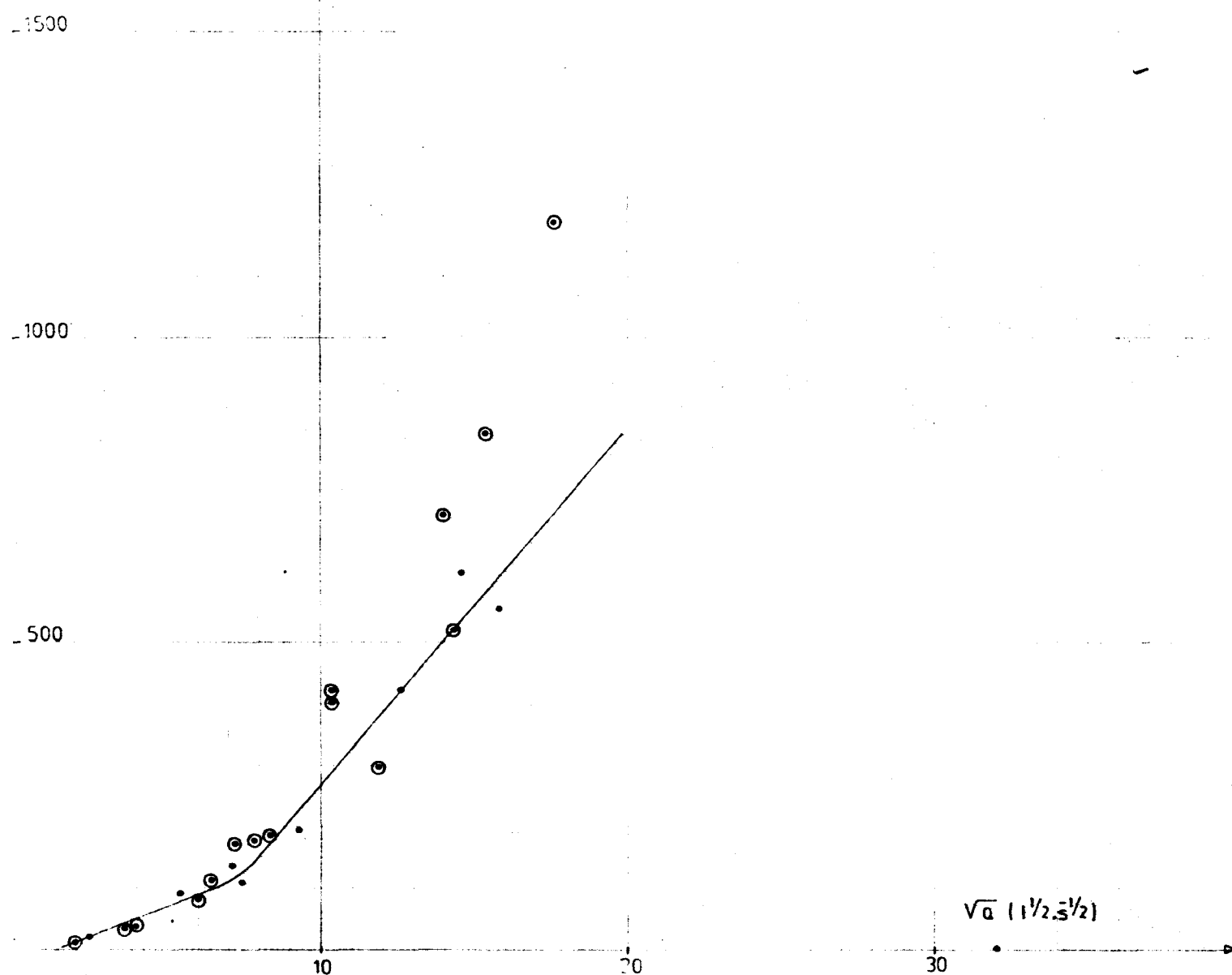
q.s. Débit en sel (g/s)

JARABIA (K. 12)

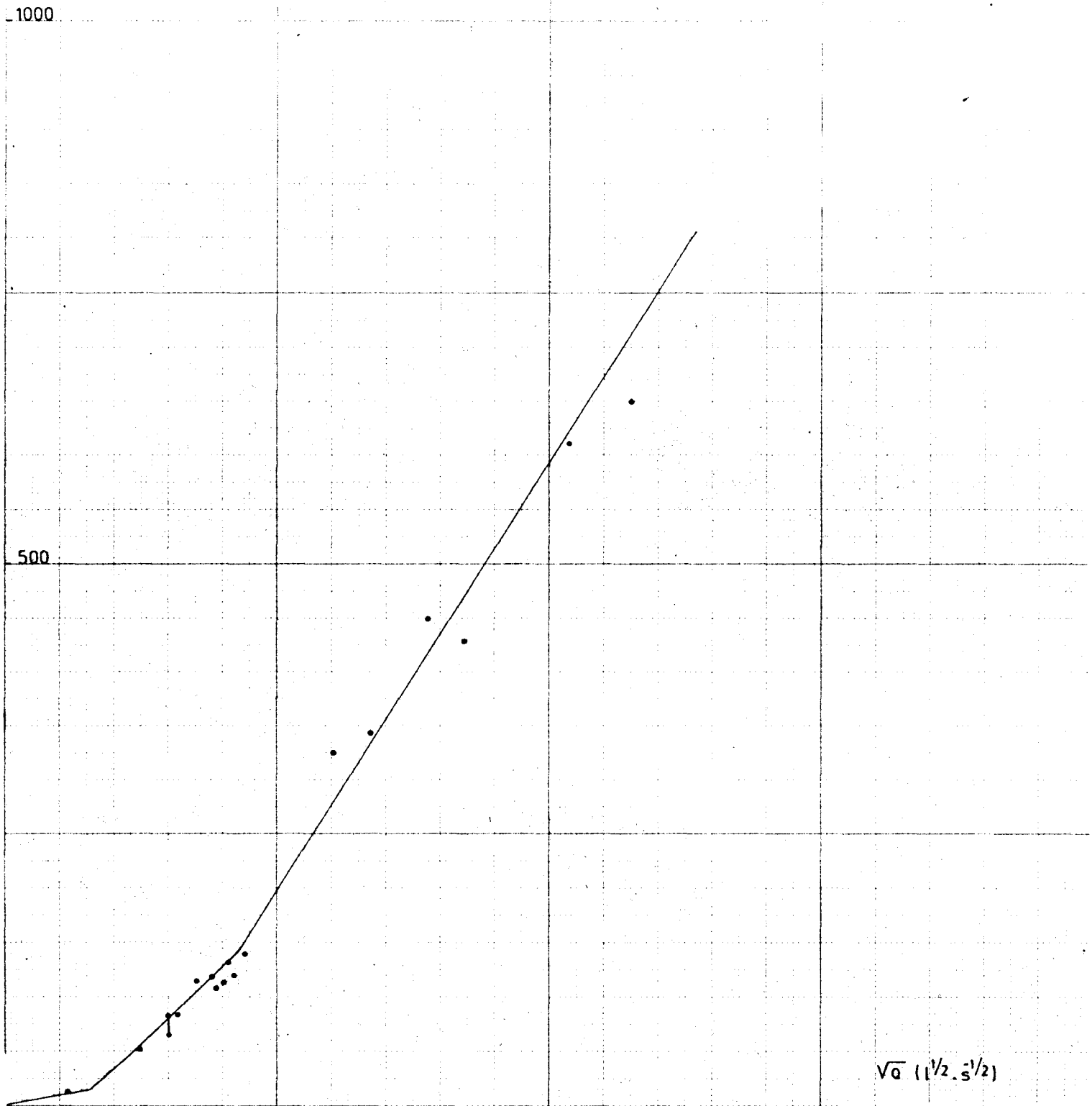


• q s Débit en sel (g/s)

- Miliane à Tuborbo Majus (sans Jarabia).
- ⊙ " " " " (avec Jarabia).
- ⊙ = q s Jarabia + q s Miliane à Tuborbo Majus.



↑ q.s Débit en sel (g/s)



Oued Negada A Bled Lassoued

• douteux.

Δ q.s: Débit en sel (g/s).

1300

1000

500

- ⊙ Analyse complète.
- A partir de mesure de conductivité contrôlée.
- ♦ Non contrôlée.

 $\sqrt{Q} \text{ (l. } 1/2 \cdot \text{s}^{-1/2})$

→

5

6

7

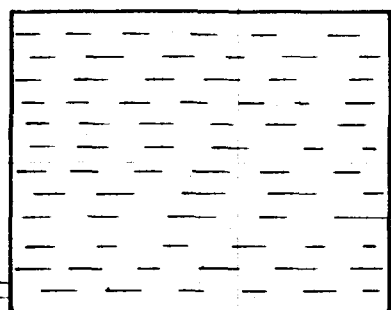
8

9

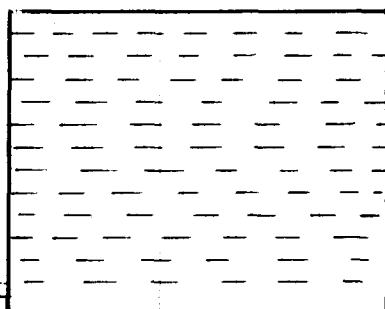
10

11

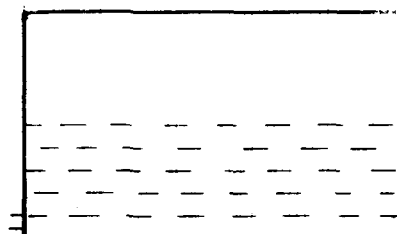
12



1° Réservoir



2° Réservoir



3° Réservoir

Exutoire

Deuxième partie

eaux souterraines

BILAN DES RESSOURCES EN EAU 1980

*Par H. Zébidî **

INTRODUCTION

Le présent bilan des ressources en eau du pays a été établi dans le cadre de la préparation du 6^o Plan Quinquennal.

Il reflète l'état de nos connaissances en 1980.

Nous y avons distingué les eaux de surface des eaux souterraines étant donné les moyens de mobilisation différents, et nous avons établi une répartition régionale pour faciliter ainsi la confrontation avec les besoins (Tableau).

Les ressources en eau sont traitées quantitativement, aucune mention n'est faite ici de la qualité des eaux qui sera reprise dans d'autres rapports plus détaillés.

** Chef de la Division des Ressources en Eau – DRES - Ministère de l'Agriculture - TUNIS.*

1 - EAUX DE SURFACE

L'évaluation des ressources en eau de surface a abouti à une valeur nouvelle de :

2,580 Milliards/m3/an

supérieure à celle qui a été arrêtée en 1977 (2 Milliards de m3/an) lors de la préparation de la contribution tunisienne à la Conférence des Nations-Unies sur l'Eau (Mar del Plata - Argentine).

Ceci résulte essentiellement d'une amélioration notable au niveau de nos réseaux de mesure qui a permis de disposer de mesures plus complètes et de mettre au point des méthodes plus précises pour l'évaluation de nos ressources en eau.

Les ressources ainsi mises en évidence se répartissent comme suit :

Tunisie du Nord : 2,085 Milliards m3/an soit 80 % du total

Tunisie du Centre : 0,325 Milliards m3/an soit 13 % du total

Tunisie du Sud : 0,170 Milliards m3/an soit 7 % du total

Bien entendu, la Tunisie du Nord qui reçoit la pluviométrie la plus importante renferme la majeure partie des ressources ; il est utile à ce propos de présenter le détail des sous bassins de la Tunisie du Nord, soit :

Extrême-Nord (Zouara, Tabarka, Ichkeul) : 0,860 Milliard m3/an soit 33 % du total

Bassin Medjerda : 1,000 Milliard m3/an soit 39 % du total

Cap-Bon-Miliane : 0,225 Milliard m3/an soit 8 % du total

C'est une évaluation plus correcte des apports de l'extrême Nord notamment des bassins des Oueds Zouara et Barbara qui est à l'origine de l'augmentation substantielle des ressources en eau de surface par rapport à 1977.

Mobilisation des ressources

Elle a été établie d'après les informations fournies par la Direction E.G.T.H compte-tenu des barrages existants, en cours de construction ou projetés.

Ressources Milliards m3/an	Extrême Nord	Nord Medjerda + Cap-Bon Miliane	Tunisie du Centre	Tunisie du Sud	Total
Potentiel	0,860	1,225	0,325	0,170	2,580
Mobilisable	0,494 57 %	0,872 71 %	0,130 40 %	0	1,496 58 %

Les ressources en eau de surface mobilisables ne représentent que 58 % du potentiel total dans le contexte actuel de mobilisation des eaux à partir de barrages économiques.

La mobilisation la plus importante se situe au niveau des grands oueds, c'est le cas de la Medjerdah, alors que le ruissellement dans l'extrême Nord est éparpillé entre plusieurs petits cours d'eau ; le paroxysme de ce phénomène est atteint dans le sud où il n'y a pratiquement plus de possibilité de mobilisation rentable.

2 - EAUX SOUTERRAINES

Ici aussi les évaluations de 1980 sont nettement supérieures à celles de 1977 jusqu'elles font ressortir un nouveau total de :

1,520 Milliards de m³/an

contre 1,1 milliard antérieurement.

Cette augmentation substantielle résulte de :

- Une évaluation plus exhaustive des possibilités de nos nappes phréatiques.
- des propositions d'exploitation plus substantielles aussi bien pour les nappes phréatiques que profondes avec notamment des prélèvements plus importants sur les réserves, suivant le cas. Ceci a été rendu possible par l'avancement de nos études et c'est dans cette direction qui reposeront à l'avenir nos espoirs maintenant que notre inventaire des nappes souterraines couvre tout le pays. Ceci nécessitera un approfondissement de nos connaissances actuelles et le recours de plus en plus aux modèles de simulation.

2.1 - Présentation des résultats

Dans le tableau général fourni en annexe nous avons fait apparaître, pour la commodité des utilisateurs trois notions :

- **Ressources exploitables** : suivant le cas il s'agira soit des ressources renouvelables seulement, soit d'un appoint supplémentaire, plus ou moins important, à partir des réserves. Dans le cas de nappes surexploitées, nous avons retenu la valeur de surexploitation comme une réalité physique qui nous est imposée mais qui n'est pas souhaitable.
- **Exploitation actuelle** : Elle résulte de nos enquêtes récentes ou plus généralement actuelles. Il s'agit des débits extraits effectivement des nappes par puits ou forages.
- **Ressources disponibles** : Ce n'est pas nécessairement une soustraction entre les deux éléments précédents pour les raisons évoquées ci-dessus. Il s'agit des débits disponibles à l'exploitation soit à partir de forages existants encore fermés soit par création de nouveaux puits ou de nouveaux forages.

Quant il y a relation entre les nappes phréatiques et les nappes profondes les disponibilités en eau ont été programmées sur les nappes profondes, compte-tenu du rendement supérieur des forages et à condition de ne pas perturber les nappes phréatiques.

2.2 - Nappes phréatiques

La situation s'établit comme suit :

- *Ressources exploitables* : 486 Millions de m³/an
- *Exploitation actuelle* : 395 Millions de m³/an
- *Ressources disponibles* : 91 Millions de m³/an

La répartition régionale (tableau ci-après) montre l'importance de la Tunisie du Nord qui renferme 60 % environ des ressources mises en évidence par les études.

Régions naturelles	Ressources exploitables M m ³ /an	Exploitation actuelle M m ³ /an	Ressources disponibles M m ³ /an
Tunisie du Nord	287 59 %	227 57 %	60 66 %
Tunisie du Centre	162 33 %	137 35 %	25 27 %
Tunisie du Sud	37 8 %	31 8 %	6 7 %
TOTAL	486	395	91

Au sein de la Tunisie du Nord, la part la plus importante revient au Cap Bon (voir tableau en annexe) dont l'exploitation actuelle dépasse très nettement celle des autres régions (68 % de l'ensemble de la Tunisie du Nord), cela résulte de la surexploitation de nombreuses nappes notamment celles de Grombalia-Soliman de la côte orientale et d'El Haouaria.

Par contre, les disponibilités les plus grandes sont en Tunisie du Nord-Ouest et notamment la région du Kef où plusieurs nappes phréatiques d'excellente qualité sont quasiment inexploitées.

2.3 - Nappes profondes

A l'inverse des nappes phréatiques c'est la Tunisie du Sud qui dispose de la part la plus substantielle des nappes profondes (63 %) et la Tunisie du Nord qui vient en dernière position (15 %).

Région naturelle	Ressources exploitables M m ³ /an	Exploitation actuelle M m ³ /an	Ressources disponibles M m ³ /an
Tunisie du Nord	151 15 %	56	67 15 %
Tunisie du Centre	224 22 %	133	70 16 %
Tunisie du Sud	656 63 %	341	312 16 %
TOTAL	1031	530	449

Cette situation résulte du « poids » des grands nappes du Sud Tunisien où des ressources exploitables importantes ont été programmées et dont une bonne partie, qui concerne la nappe du C.I, n'a pas encore été réalisée.

Il faudrait noter toutefois les disponibilités importantes de la Tunisie du Nord qui égalent sensiblement celles de la Tunisie Centrale ; ces disponibilités sont concentrées dans l'extrême Nord (dunes de Nefza) et la haute vallée de la Medjerdah.

3 -BILAN

Les évaluations récentes des ressources en eau de surface et souterraines du pays ont permis de dégager plus de :

4 Milliards de m³/an

se répartissant comme suit :

Régions naturelles	Eaux de surface M m ³ /an	Eaux souterraines M m ³ /an	Total M m ³ /an
Tunisie du Nord	2085	438	2523 62 %
Tunisie du Centre	325	386	711 17 %
Tunisie du Sud	170	693	863 21 %
TOTAL	2580	1517	4097

Il y a ainsi une progression de 1 Milliard par rapport à la situation antérieure.

Cette augmentation est dû approximativement pour moitié aux eaux de surface, et pour moitié aux eaux souterraines.

De nouveaux espoirs sont-ils permis pour l'avenir ?

Oui, notamment à partir des eaux souterraines où on pourrait tirer davantage moyennant le recours au pompage systématique dans certains cas, par le développement contrôlé de la surexploitation des nappes phréatiques dans d'autres cas.

Ceci nécessite un approfondissement des études pour se prémunir contre tous les dangers de contamination ou de repercussions fâcheuses des nappes les unes sur les autres.

C'est dans le Nord et le Centre du pays que ces espoirs sont permis alors que dans le Sud les ressources dégagées sont déjà une projection sur l'avenir et se traduisent généralement par une surexploitation avancée des nappes.

Qu'en est-il de la mobilisation ?

Si la totalité des eaux souterraines dégagées sont techniquement mobilisables, il n'est pas de même pour les eaux de surface dont 58 % seulement peuvent être régularisées, par des barrages notamment dans l'extrême Nord (57 %) et le Nord (71 %) beaucoup moins dans le Centre (40 %) et pas du tout dans le Sud.

Ainsi plus de 1 Milliard de m3/an est perdu surtout par évaporation, et déversement dans la mer ; une partie de cette eau va alimenter les nappes souterraines.

Il s'agira en conséquence de s'ingénier à, soit utiliser d'autres moyens de mobilisation des eaux de surface comme les lacs collinaires dans le Nord et l'extrême Nord, soit s'orienter de plus en plus vers une complémentarité entre les eaux de surface et les eaux souterraines, par le développement de programmes de rétention des eaux de ruissellement ou, si possible, par un recours plus fréquent à la recharge artificielle des nappes.

Ceci est de nature à limiter la déperditions de nos précieuses eaux de surface et à les stocker dans nos nappes pour les récupérer à notre convenance.

26
BILAN
des Ressources en Eau
1 9 8 0

Régions Naturelles		Eaux de Surface M m3/an		Eaux souterraines - M m3/an					
				Nappes phréatiques			Nappes profondes		
		Potentiel	Mobilisable	E1	E2	Disponible	E1	E2	Disponible
Nord-Est	Bizerte	390	194	41	30	11	24	12	12
	Tunis	avec Medjerdah		42	30	12	15	5	10
Nord-Ouest	Cap Bon (Miliane)	225	52	169	155	14	19	13	5
	N/Vallée Medjerdah Extrême Nord	470	300	10	3	7	56	9	30
	S/Vallée Medjerdah	1000	820	25	9	16	37	17	10
Kairouanais-Sahel	Kairouanais	50	20	51	49	2	76	49	24
	Sahel-Sousse	45	0	26	24	2	17	7	7
	Sahel Sfax	20	0	23	16	7	22	9	13
Tunisie-Centrale	Tunisie-Centrale	210	110	62	48	14	109	68	26
Sud-Ouest	Chott Rharsa	20	0	7	6	1	62	42	17
	Djérid	—	—	6	6	0	190	82	108
Sud-Est	Djeffara	70	0	14	12	2	142	102	40
	Chott Fedjej	23	0	—	—	—	32	6	26
	Nefzaoua	—	—	4	3	1	190	98	92
	Extrême Sud Borma (C.I)	34	0	—	—	—	32	9	23
	Medenine	23	0	6	4	2	8	2	6
T O T A U X		2580	1496 # 1500	486	395	91	1031	530	449

E1 : Ressources exploitables
E2 : Exploitation actuelle

Situation Générale	— Eaux de surface: 2,580 Milliards m3/an
	— Eaux souterraines: 1,520 Milliards m3/an
	T O T A L : 4,100 Milliards m3/an

ÉTUDES CONSULTÉES

- 1) **B. BEN BACCAR**
A. MAMOU
1980 : Les nappes phréatiques du Sud-Est
Caractéristiques et exploitation
D.R.E - 1 - 075.261
- 2) **B. BEN MARZOUK**
MOUMENI
1980 : Exploitation des nappes phréatiques du S.W.
- 3) **D.R.E.** : Annuaire de l'exploitation des nappes profondes de Tunisie - 1979.
D.R.E - TG/439
- 4) **D. EL BATTI**
1976 : Carte des Ressources en Eaux Souterraines de la Tunisie.
Feuilles de Sousse - El Jem
D.R.E - 5057.105
- 5) **D. EL BATTI**
1980 : Exploitation des nappes phréatiques du Sahel de Sousse
D.R.E - 5.057.117
- 6) **M. ENNABLI**
1980 : Exploitation des aquifères du NE de la Tunisie.
- 7) **H. FARHAT**
1980 : Données hydrogéologiques sur le Gouvernorat de Gafsa.
D.R.E - 1 - 066.147
- 8) **A. GASSARA**
1980 : État d'exploitation des nappes phréatiques de la région de Sidi Bouzid.
D.R.E - 5.094.009
- 9) **A. GASSARA**
1980 : Aperçu général sur les données hydrogéologiques des nappes du Gouvernorat de Sidi Bouzid.
D.R.E - 5 - 094.006
- 10) **A. HAJJEM**
1980 : Note hydrogéologique préliminaire des nappes phréatiques du Sahel de Sfax.
D.R.E - 5 - 107.044
- 11) **M. HAMZA**
1980 : Exploitation des nappes phréatiques du Kairouannais.
D.R.E - 5.063.184
- 12) **M. HAMZA** : Ressources en Eau du Kairouannais
D.R.E - 5 - 063.174

- 13) **R. KALLEL** : Bilan global des eaux de surface de Tunisie.
D.R.E - TH/224
- 14) **A. MAMOU** : État d'exploitation et potentialités en eau souterraine des nappes
B.B. BACCAR du Sud-Est et de l'extrême Sud Tunisien.
C. PONCET D.R.E - 1 - 075.240
1980
- 15) **Ministère de l'Agriculture** : Conférence des Nations-Unies sur l'Eau - Monographie Nationale de la Tunisie.
D.R.E - EG - 372
- 16) **H. RAHOU** : Aperçu général sur les données hydrogéologiques des nappes du Gouvernorat
R. KHANFIR de Kasserine
1979 D.R.E. - 5 - 084.147
- 17) **H. RAHOU** : Exploitation des nappes phréatiques de Kasserine
R. KAHNFIR D.R.E - 5.084.159
1980
- 18) **M. REKAYA** : Note sur les ressources en eau du Gouvernorat de Zaghouan
D.R.E - 5 - 035.071
- 19) **H. ZEBIDI** : Gouvernorat de Siliana - Ressources en Eau
1974 D.R.E - 5 - 046.059
- 20) **H. ZEBIDI** : Gouvernorat du Kef - Ressources en Eau
1977 D.R.E - 5 - 044.065
- 21) **H. ZEBIDI** : Les grandes nappes du Sud Tunisien - Principales caractéristiques
1980 D.R.E - TG - 499

APPROVISIONNEMENT EN EAU DE KAIROUAN A L'EPOQUE AGHLABIDE

Par : M. Hamza*

Cette note a été présentée au 2ème Symposium
d'Hydrogéologie Arabe.

Rabat 21 - 27 Septembre 1981

INTRODUCTION

«Je suis d'avis, O-musulmans ! de fonder une ville qui servira de place d'armes à l'Islam jusqu'à la fin des temps. Serpents et bêtes féroces ! Nous sommes les compagnons du Prophète béni. Aussi, retirez-vous, car nous allons nous établir ici».

Alors on voit les animaux féroces et les serpents emporter leurs progénitures, et à ce spectacle beaucoup de Berbères se convertirent à l'Islam.

C'est ainsi que les chroniqueurs arabes rapportent l'acte de foi par lequel Okba Ibn Nafaa crée en 670 J.C, Kairouan ; la première ville musulmane du Maghreb.

La conquête arabe ne se fit pas sans mal. Les Berbères commandés par «Koceila» puis par la «Kakéna» se soulevèrent à plusieurs reprises contre les gouverneurs de Kairouan et occupèrent même la ville.

Le Khaïfe de Bagdad, «Haroun Errachid» confia alors le gouvernement de l'Ifriqya à un grand capitaine «Ibrahim Ibn Al Aghlab» qui rétablit l'ordre. En récompense de ses services Al Aghlab obtint de transmettre sa charge à des hommes de sa lignée et fonde ainsi en l'an 800 la dynastie des Aghlabides qui un siècle plus tard succombera aux attaques du «Mahdi» Fatimide.

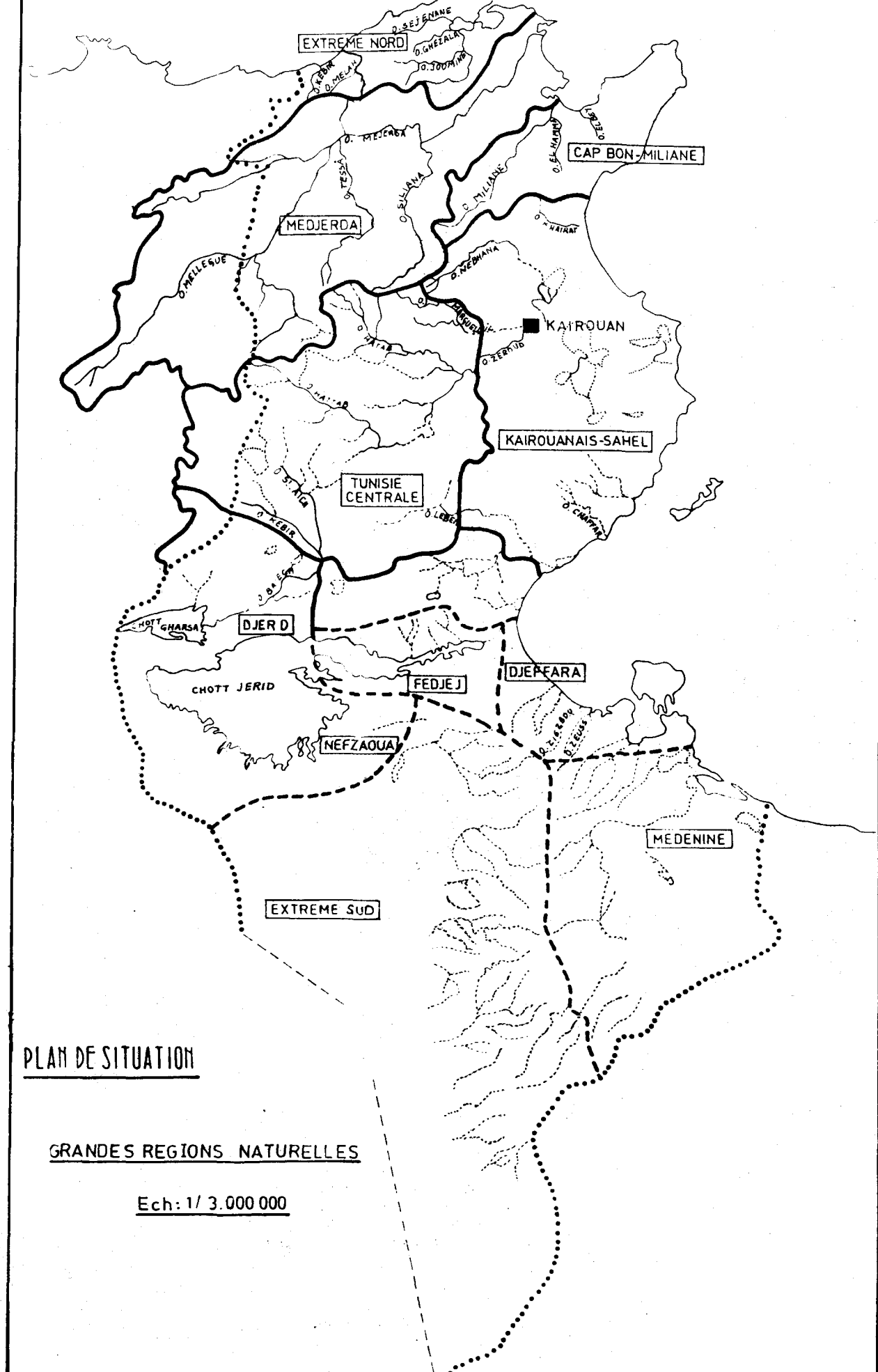
Sous les Aghlabides l'Ifriqya connaît une incontestable renaissance. L'agriculture prospère par le développement d'importants travaux et ouvrages hydrauliques.

Kairouan capitale politique et religieuse, se développe, s'embellit et s'entoure de résidences princières : Qasr Al Qadim et Raqqada. Elle devient l'un des plus importants foyers de civilisation arabe, où les lettres, les sciences et les arts brillent d'un très vif éclat.

Les nouveaux maîtres Fatimides de l'Ifriqya l'abandonnent au profit de Mahdia et les successeurs des Fatimides, Les Sanhajiens, s'installent de nouveau à Kairouan dévastée en 1057 J.C par l'invasion des Hilaliens.

La recherche et l'utilisation méthodique de l'eau potable furent une des grandes préoccupations des Aghlabides en Ifriqya. Alors que leurs prédécesseurs romains excellaient dans le captage des sources et des eaux souterraines les Aghlabides se sont surtout évertués à la mobilisation, la dérivation et le stockage des eaux de surface. On allait parfois chercher très loin l'eau nécessaire à l'alimentation des villes ; comme en témoigne l'aqueduc de Bir El Adine qui draine les eaux du piémont du Djebel Ousselat et les déverse dans les bassins des Aghlabides à Kairouan 38 km à l'aval et dont les vestiges sont encore visibles.

*Hydrogéologue Principal de la Division des Ressources en Eau -- DRES - Ministère de l'Agriculture -- TUNIS



1 - LES BASSINS DES AGHLABIDES (fig. 2)

Ils furent construits sous le règne de l'Émir «Abou Ibrahim Ahmed Ben Mohamed» le 6ème prince de la dynastie Aghlabide entre 859 et 863 J.C.

L'ensemble est constitué par :

- un petit bassin
- un grand bassin
- deux citernes de puisage

1.1 - Le petit bassin ou bassin de décantation

Il a une forme polygonale à 17 côtés sensiblement égaux. La profondeur jusqu'au radier est de 4,87 m. Les parois s'appuient sur 28 contreforts extérieurs et 17 contreforts intérieurs. De même 16 niches occupent la paroi intérieure.

Ce bassin reçoit les crues de l'Oued Merguellil par une ouverture surmontée d'une voûte et située entre deux quarts de cône. Sur le sommet de l'un de ces quarts de cône, on aperçoit encore une portion de conduite en poterie de 0,25 m de diamètre intérieur en chassée dans un massif de maçonnerie et venant se souder au petit bassin ; il est vraisemblable qu'il s'agit de l'embouchure du canal qui amenait l'eau de Bir el Adine.

1.2 - Le grand bassin ou bassin de stockage

Il a aussi une forme polygonale de 64 côtés sensiblement égaux. Le diamètre intérieur est de 129,67 m. Les parois s'appuient sur 64 contreforts intérieurs (El Fersiyat) ; 58 contreforts extérieurs simples sur les sommets d'angles et 61 contreforts extérieurs simples de milieu. Le radier mesure 0,50 m d'épaisseur. La profondeur est de 4,35 m. Au milieu de ce bassin se trouvait un pilier central de 4,68 m de hauteur dont il ne reste plus qu'une partie. Ce pilastre octogonal est posé sur un marchepied circulaire à 2 marches reposant sur le radier du bassin.

1.3 - Jonction des deux bassins

Le maçonnerie de jonction a été exécutée d'un seul bloc et ne montre pas de traces choquantes de proportions dissemblables des éléments accolés.

Un double système de déversement des eaux du petit bassin dans le grand bassin existe ; il s'agit :

- du «Sarh» (décharge)
- de deux tuyaux de poterie à 0,60 m au dessous du niveau de Sarh pouvant commencer à débiter dès que l'eau s'élevait de 0,83 m dans le petit bassin.

1.4 - Les citernes de puisage

Il s'agit de deux galeries voûtées ; indépendantes l'une de l'autre et communiquent de plein pied avec le grand bassin. Le puisage de l'eau s'effectuait de la terrasse à partir d'une double rangée de cheminées à section carrée en deux groupes de 6 et séparés par un écartement de 2,70 m alors que dans chaque groupe l'espacement d'un orifice à l'autre n'est que 1,40 m.

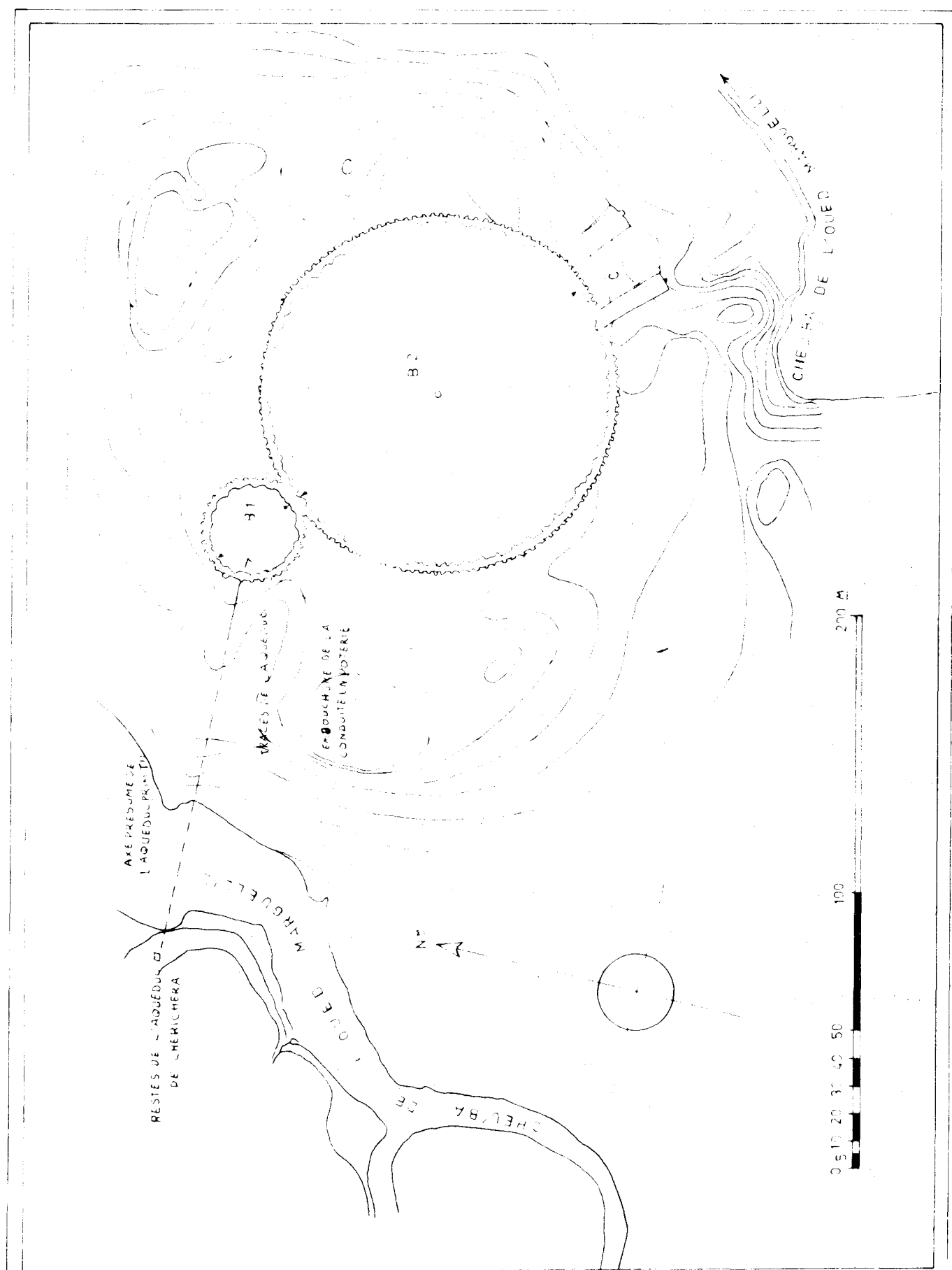


Fig. 2: Plan des Bassins aglabides de Kairouan

La Communication de chaque citerne avec le grand bassin se fait par deux ouvertures voûtées, placées au niveau même du radier.

2 - LES CAPTAGES DE BIR EL ADINE (fig. 3)

Il s'agit là du « Château d'eau » qui alimente par le biais d'un aqueduc, le bassin des Aghlabides puis plus tard, la cité de Cabra-Mansourya sous le règne des Fatimides. Il s'agit de divers captages et de systèmes de distribution d'eau aussi bien Aghlabides que Fatimides en connection étroite avec de plus vieux ouvrages hydrauliques romains.

2.1 - Les travaux romains comprenaient :

- un système de captage des eaux réalisé par :
 - a) deux systèmes de galeries filtrantes :
 - le premier système alimente le réseau oriental
 - le second système alimente le réseau occidental.
 - b) une citerne souterraine groupant deux constructions juxtaposées considérées par « Roger Gresse » et « Louis Chatelain » comme « temple » et « basilique » puis comme citernes par « le Lieutenant Lamotte ».
- un système d'adduction
- un système de collection, de stockage et de distribution.
 - a) le réseau oriental comporte :
 - un bassin de décantation rectangulaire voûté
 - un nymphæum avec son canal d'amenée
 - b) le réseau occidental comporte :
 - un petit bassin de stockage
 - une conduite d'évacuation

Il semble que les installations hydrauliques de ce réseau n'avaient qu'une importance locale.

2.2 - Les Aghlabides

Se sont contentés de réutiliser les installations romaines du réseau oriental après refecton tout en leur substituant des appareils et des mécanismes sans doute de meilleur rendement.

C'est ainsi que le nymphæum initial sans doute tombé en ruines a été remplacé par une construction spécifiquement Aghlabide.

Il s'agit d'un grand bassin circulaire, concentrique au nymphæum romain. Il est construit en maçonnerie de blocage et revêtu intérieurement comme tous les bassins des Aghlabides d'un enduit au mortier de tuileaux.

Les parois de ce bassin sont constituées par un mur de 1,30 m d'épaisseur, étayé extérieurement par 21 contreforts renforcés. La hauteur totale est de 3,70 m et le diamètre extérieur est de 41,85 m.

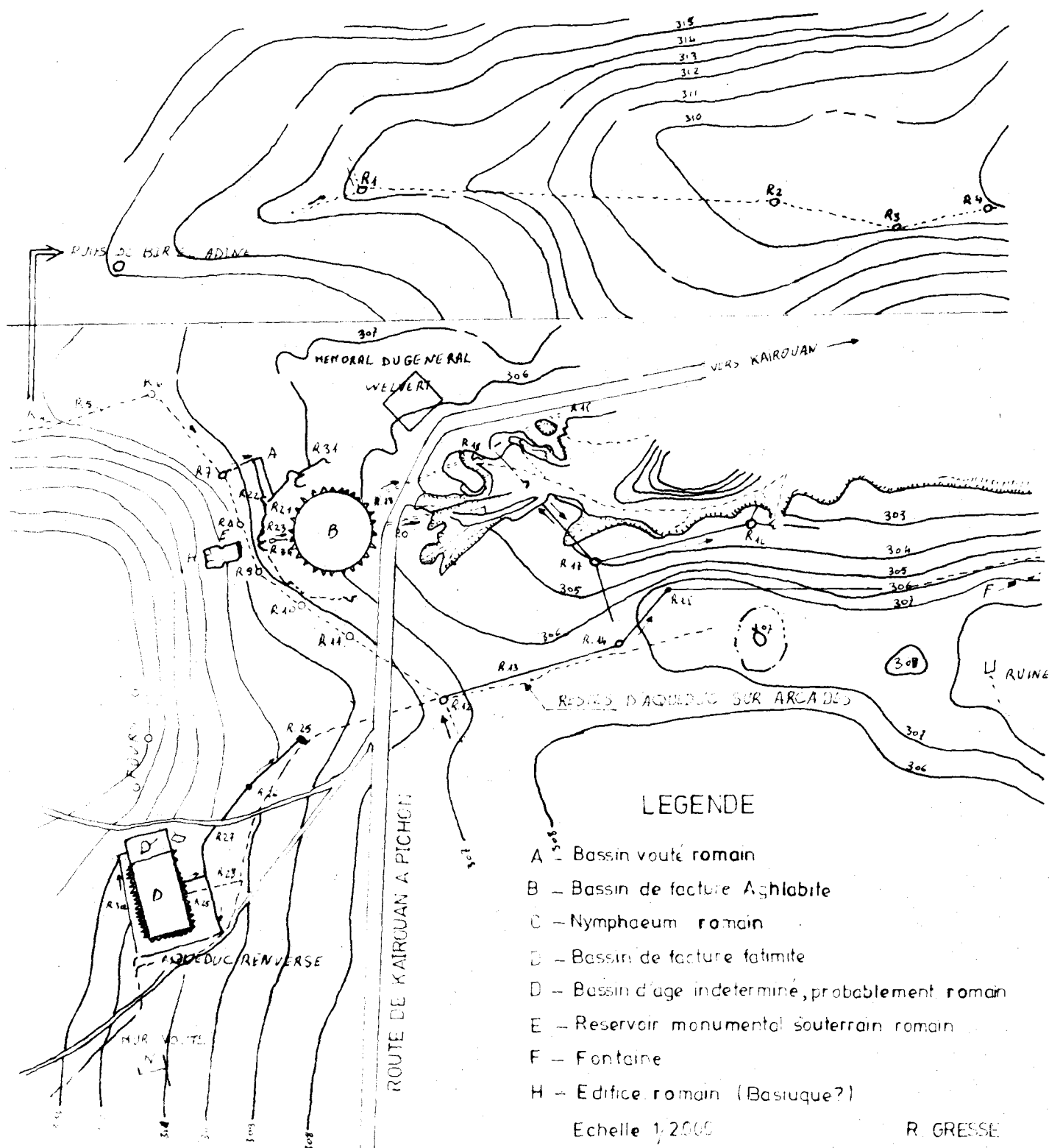


Fig 3: LES CAPTAGES DE BIR EL ADINE

Ce bassin s'alimentait par le biais d'une canalisation romaine à l'origine ; prenant naissance du bassin de décantation et qui déversait dans le nymphéum. Cette canalisation a été restaurée et une rigole lui a été juxtaposée. Cette rigole issue d'un abside du nymphéum traverse en ligne droite l'espace annulaire compris entre le nymphéum et le bassin puis se jette dans celui-ci.

Deux prises d'eau occupant les emplacements des contreforts manquants avaient pour rôle :
— d'évacuer l'eau dont le niveau excède une lame de 1,20 m pour la première.
— d'évacuer totalement l'eau emmagasinée (égout de vidange et de purge) pour la seconde.

Enfin un dispositif était prévu pour l'évacuation des petites crues éventuelles du bassin. Il a été aménagé dans le sommet d'un contrefort.

2.3 - Les Fatimides

Les Fatimides eurent à restaurer les ouvrages créés par les Romains et les Aghlabides. Dans un souci de mobilisation davantage d'eau ils construisèrent un grand bassin quadrilatéral contigu au petit bassin Romain de stockage du réseau occidental.

Ce bassin est sub-aérien sans contreforts intérieurs. Les parois sont épaisses de 1,32 m. On compte 20 contreforts extérieurs distants de 4,50 m sur les grands côtés et de 4,00 m sur les petits côtés du quadrilatère.

Un petit bassin situé dans l'axe transversal et sur un contrefort de cet ouvrage paraît avoir assumé la double fonction de déverser les débits convergents à partir des canaux de crête et d'évacuer un certain débit.

Dans la paroi Sud de ce grand bassin Fatimide se trouve une prise qui alimente sur place une citerne probablement d'utilité locale. A côté de cette prise prend naissance un canal débouchant dans un puits carré. Perpendiculairement à ce canal, il s'en trouve deux autres dans le prolongement l'un de l'autre et partant du même puits. L'une de ces branches est l'aqueduc de Kairouan. La seconde de pente opposée est un canal de vidange.

Ainsi une connexion entre le réseau oriental et le réseau occidental a été réalisée par les Fatimides par l'intermédiaire d'un canal perché. Ce canal permettait de déverser les eaux des captages Fatimides non utilisés pour l'alimentation locale dans la conduite Aghlabide qui se dirige vers Kairouan.

3 - LES ADDUCTIONS AGHLABIDES ENTRE BIR EL ADINE ET KAIROUAN (fig. 4)

A l'aval des captages de Bir el Adine, une conduite unique romaine au départ, alimentait exclusivement quelques centres situés à quelques kilomètres à l'aval du site de Bir el Adine. Elle fut prolongée à l'époque Aghlabide. Aux abords du confluent de l'Oued Chérichira et Oued Jerouila existait probablement un château d'eau dans lequel aboutissaient non seulement l'aqueduc Aghlabide mais aussi deux autres canalisations latérales ; la première drainait la nappe des grès oligocènes de rive droite de l'Oued Chérichira ; la seconde drainait le massif Bou Zellouna de la rive gauche.

Sous les Fatimides l'adduction principale subit des restaurations et fut complétée à partir de ce château d'eau par la superposition d'une canalisation plus importante pouvant véhiculer davantage d'eau.

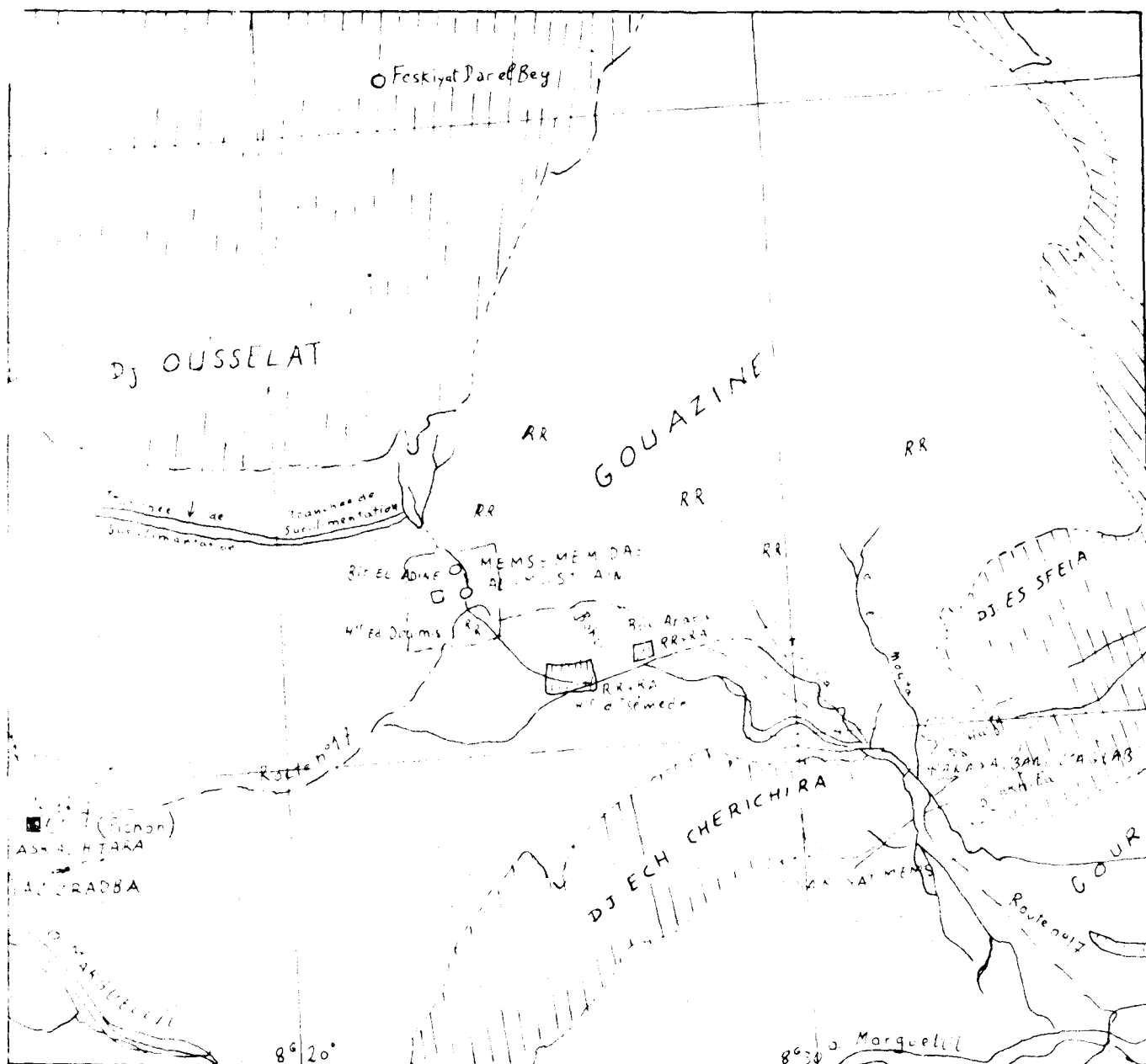


Fig. 4a : LES ADDUCTIONS AGHLABIDES
ENTRE BIR EL ADINE ET KAIROUAN

Tronçon amont

Echelle: 1/100.000

3.1 - Jusqu'à la sortie de la zone montagneuse de Chérichira les adductions Aghlabide et Fatimide sont réalisées par deux aqueducs distincts et superposés. Cette double conduite franchit ensuite les dépressions de l'Oued Mouta et Oued Brel sur pont-aqueduc.

3.1.1 - Celui de l'Oued Mouta est long de 170 m. Il est composé d'un mur plein sur lequel était posé le double aqueduc. La hauteur de ce mur est de 2 m au point de départ ; elle atteint 10 m à la naissance des arcades. A la traversée de l'Oued ; le mur était percé d'arches.

Le construction de ce pont aqueduc ne suit pas les règles architecturales qui ont présidé à la construction d'un nombre d'aqueducs romains (130 m de substruction contre 40 m d'arches sur 170 m de longueur). L'aqueduc à substruction dominante (Hanaya Béni Aghleb) inauguré par les Aghlabides a connu alors un grand essor et devint ainsi spécifique à l'Afrique du Nord : C'est ainsi que divers aqueducs du Maroc présentent les mêmes caractéristiques architecturales ; on cite : Aqueduc de Sidi Othman à Marrakech ; Aqueduc de Bou Ferkan à Meknès etc...

Il convient de noter qu'au point où le pont atteint la croupe terminale de Dj. el Halfa, le canal inférieur Aghlabide, se sépare par un coude brusque de son tracé commun avec le canal supérieur Fatimide qui poursuit son chemin dans l'alignement du pont-aqueduc. Après cette boucle imposée sans doute par la topographie et suite à une nouvelle inflexion, le canal Aghlabide revient à la rencontre du canal Fatimide sous lequel il semble passer avec une direction Nord-Sud.

Au point de rencontre existait une tête de départ aujourd'hui disparue d'une troisième adduction desservant sans doute une localité lointaine (Mems ?).

3.1.2 - Celui de l'Oued Brel traverse aussi la dépression sur un haut mur, puis sur un pont aqueduc malheureusement très mal conservé.

L'aqueduc Aghlabide est porté sur un mur constitué par un maçonnerie de blocage disposée en assises horizontales. Dans cette maçonnerie est disposé un chenal à parois revêtues d'un enduit blanc, constitué par de la chaux mélangée à une poudre de tuileaux et de cendres. Ce canal est large de 0,34 m et profond de 0,42 m.

L'aqueduc Fatimide recouvre le canal Aghlabide et repose sur une assise de dalles calcaires large de 2,11 m. Sur cette dalle sont montées deux murettes de 1,20 m de haut et 0,40 m de large constituées de pierres plates reliées par du mortier et qui forment les enveloppes d'un espace vide en forme de U à fond plat qui correspond à la section du canal. Ce canal est surmonté d'une voûte. Il présente une ouverture de 0,77 m et une profondeur de 0,70 m.

3.2 - Après le franchissement d'Oued el Brel, l'aqueduc traversé souterrainement le col de Fedj Bou Ragouba, arrive ensuite à Sidi Bou Jdaria où il change de direction pour éviter une chute brusque d'altitude ; et aborde par la suite la plaine. De Sidi Bou Jdaria à l'Oued Merguelli, l'aqueduc paraît redevenir unique.

Au delà il se prolongea au IX^{ème} siècle jusqu'à Kairouan (bassin des Aghlabides) et au X^{ème} siècle après l'abandon de l'adduction Aghlabide, jusqu'à Cabra-Mansourya.

4 - INSTALLATIONS HYDRAULIQUES DES AGHLABIDES DANS LA BANLIEUE DE KAIROUAN

De l'an 800, date de l'accession au pouvoir de la dynastie Aghlabide jusqu'en l'an 903 ; date de l'avènement du dernier prince de cette dynastie : Ziyadet Allah III ; les émirs Aghlabides ont réalisé diverses installations hydrauliques pour l'alimentation des 2 villes gouvernementales successivement construites en 811 (abbassiya : Ksar el Kadim) et en 877 (Raqqada).

4.1 - Abbassiya

Les installations réalisées hors de Kairouan au cours du IX^{ème} siècle diffèrent considérablement des autres. Ce sont des simples bassins découverts, posés sur le sol et non enterrés. Leur alimentation ne se faisait ni au moyen de dérivation de cours d'eau ni d'adduction lointaine. Elle était réalisée sur place probablement par élévation de l'eau de puits ou d'oueds voisins (avec l'intermédiaire de norias ou de roues hydrauliques). De ces bassins il n'en subsiste actuellement aucune trace. Seul a survécu le grand bassin en maçonnerie de moellons construit entièrement par l'émir Abou Ibrahim Ahmed et terminé le jour même de sa mort (242 H : 853 J.C).

Avec ce bassin on note l'apparition d'une technique nouvelle essentiellement orientale caractérisée par la puissance exagérée des contreforts extérieurs.

Le bassin est rectangulaire (6 m X 4,82 m). Ses murs sont épais de 1 m et sont constitués de maçonnerie de moellons par assises horizontales mal liées entre-elles. Le bassin est soutenu extérieurement par 8 contreforts cylindriques, un à chacun des quatre angles et un autre au milieu de chaque côté. L'ensemble de l'ouvrage était enduit intérieurement et extérieurement sur 0,40 m d'épaisseur, au mortier de tuileaux. Il est actuellement extrêmement délabré.

4.2 - Raqqada (fig. 5)

Créée en 877 J.C par le 9^{ème} émir Aghlabide Ibrahim Ben Ahmed dit Ibrahim II ; elle fut agrandie et arrangée sous le règne de Ziyadat Allah III le 11^{ème} et dernier prince Aghlabide.

4.2.1 - Les bassins Aghlabides construits par Ibrahim II sont au nombre de 5. Ils sont d'une construction massive très soignée dont la solidité et la dureté vu l'épaisseur et la robustesse des murs sont à toute épreuve. Quatre de ces bassins sont construits sur un plan carré et sont identiques à celui d'Abbassiya. Le dernier est un bassin circulaire. Il semble que ces bassins desservaient les châteaux construits par Ibrahim II (El Fath, Baghdad, El Mokhtar, Assahn etc...).

4.2.2 - A son retour de Raqqada, Ziyadat Allah III fit construire le fameux bassin «El Bahr» qu'il dote d'une canalisation propre à proximité de son nouveau palais «El Arous». C'est le premier grand bassin quadrilatère qui ait été construit par les arabes en Afrique du Nord.

Il s'agit d'un bassin enterré de 3,05 m de haut, de 130 m de long et 88,50 m de large. Les parois ont une épaisseur de 1,08 m ; elles sont construites en maçonnerie de gros moellons disposés en strates horizontales parallèles et sont soutenues par 96 contreforts extérieurs et 92 intérieurs disposés en alternance, constitués par de simples demi-cylindres coiffés d'une calotte sphérique. Le seqiya d'alimentation reconstituée jusqu'au lieu présumé de captage ; prend naissance du bord d'Oued Malaïeh, affluent rive gauche de l'Oued Zéroud.

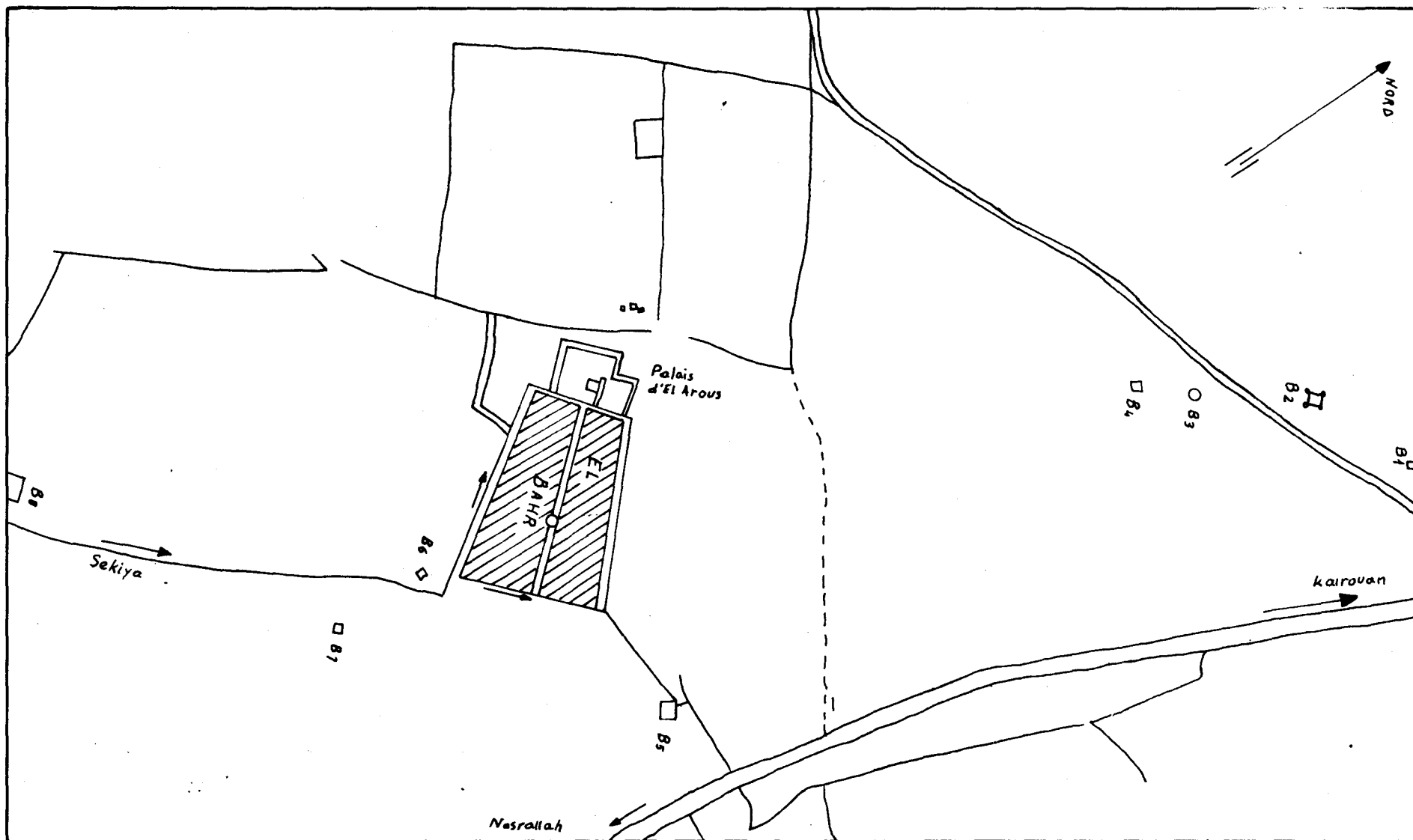


Fig. 5. Plan Aérien Montrant les Installations Hydrauliques de RAQQADA
Echelle 1/5.000

5 - CONCLUSION

L'examen minutieux des vestiges des anciennes installations hydrauliques de Kairouan nous révèle l'ingéniosité des arabes et plus particulièrement des Aghlabides et l'ampleur de l'effort qu'ils ont déployé par l'alimentation en eau de la capitale et de sa banlieue. C'est en ce sens qu'ils se présentent comme les continuateurs des traditions techniques de leurs prédécesseurs romains et les innovateurs des systèmes de maîtrise, de mobilisation et d'utilisation des eaux sauvages des oueds.

Cependant on s'étonne de constater que des villes comme Kairouan ; Abbassiya ou Raqqada ne soient pas alimentées en eau sur place du fait de l'existence de nappes d'eau locales superficielles et profondes ; et que les Aghlabides aient eu recours à des aqueducs amenant l'eau de très loin. Peut être cette situation a-t-elle été dictée par un souci de qualité ; car les eaux des nappes phréatiques locales sont quand même assez chargées.

BIBLIOGRAPHIE

ROGER GRESSE

Rapport sur les «Études et travaux de recherches d'eau à Bir el Adine» du 29 Mars 1971.

GEORGES MARCAIS

Manuel d'Art musulman - Paris 1926-27

G. BERTHOMMIER

Sources de l'Oued Chérichira - Reconnaissance des sources et du canal en maçonnerie amenant les eaux à Kairouan, du 24 Février 1884 - Archives D.T.P - Tunis

MARCEL SOLIGNAC

Recherches sur les installations hydrauliques de Kairouan et des steppes tunisiennes du VII au XIème Siècle (J.C) 1953.

- Enquête sur les installations hydrauliques romaines en Tunisie ; publiée par la Direction des Antiquités et des Beaux Arts sous la direction de Paul Gaucker - Tunis 1900.

RECHARGE ARTIFICIELLE DE LA NAPPE DE TÉBOULBA – TUNISIE

*Par : H. Zébidî**
*et Dj. El Batti***

Cette note a été présentée au 2ème Symposium
d'Hydrogéologie Arabe.

Rabat 21 - 27 Septembre 1981

INTRODUCTION

Dans le sahel côtier tunisien, la région de Téboulba, située à 180 km au S.S.E de Tunis, est le siège d'une agriculture prospère de primeurs. L'irrigation y est pratiquée à partir de centaines de puits de surface exploitant intensivement depuis des dizaines d'années une nappe phréatique de ressources faibles ce qui a entraîné un abaissement continu du niveau piézométrique. Ceci a été à l'origine du développement, dans la partie centrale, d'un vaste cône de dépression atteignant des cotes de - 30 m sous le niveau de la mer, et par conséquent du début d'intrusion d'eau salée et de la détérioration de la qualité chimique de l'eau de la nappe.

Pour sauvegarder cette nappe, nous avons envisagé de recourir à la recharge artificielle à partir des eaux de surface excédentaires du barrage de Nebhana.

** Chef de la Division des Ressources en Eau – DRES - Ministère de l'Agriculture - TUNIS.*

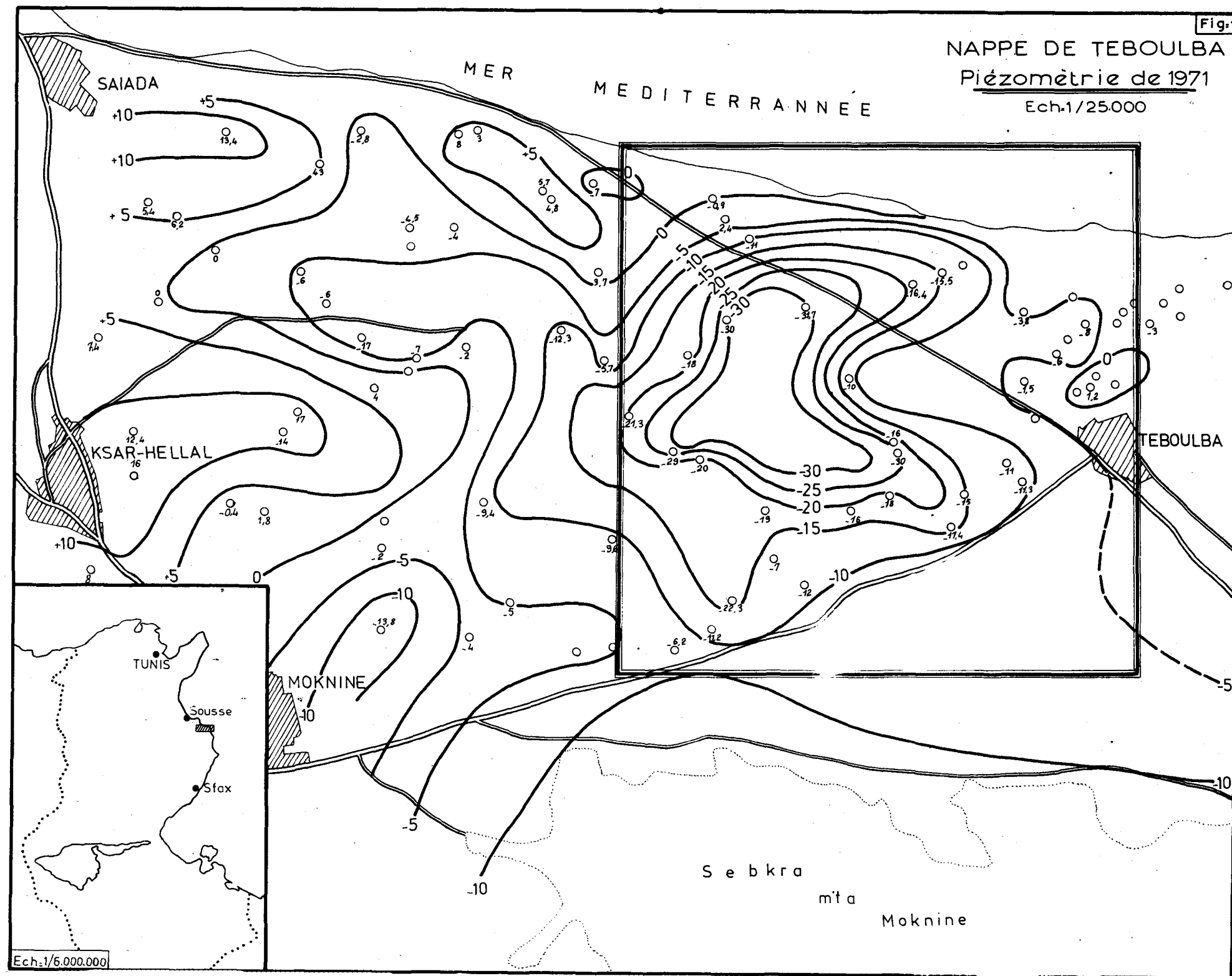
*** Chef du Service d'Hydrogéologie de la Division des Ressources en Eau – DRES - Ministère de l'Agriculture - TUNIS.*

Fig.1

NAPPE DE TEBOULBA

Piézométrie de 1971

Ech:1/25.000



1 - RAPPEL DES CONDITIONS HYDROGÉOLOGIQUES DE LA NAPPE

La nappe phréatique de Tébolba s'étend sur une bande de terre de 35 km² de superficie, entre la mer au N.E et la Sebkhah salée de Moknine au S.W l'altitude du terrain ne dépassant pas 30 m alors que le niveau de la Sebkhah est à - 10 m (fig. 1).

L'aquifère est constitué par des lentilles de sables fins, intercalées dans des séries à dominante argileuse attribuées au Plio-quaternaire dont la puissance ne dépasse pas 90 m ; le substratum correspond à des bancs puissants et continus d'argile alors qu'en surface se développe une croûte calcaire qui limite l'infiltration.

Les caractéristiques de l'aquifère sont médiocres avec des transmissivités en 10^{-4} et des coefficients d'emmagasinement en 10^{-2} .

L'alimentation de la nappe à partir des précipitations est de l'ordre de 0,6 M m³/an et se déroule au moment des grosses averses.

Quant à l'exploitation, elle était de 1,1 M m³/an en 1971 et s'est intensifiée encore par la multiplication des équipements de puits pour atteindre actuellement les 1,5 M m³/an.

Cette exploitation intensive pratiquée depuis plus de quarante années a été à l'origine d'un abaissement continu des niveaux piézométriques et d'une détérioration de la qualité des eaux.

Ainsi, la piézométrie a montré un abaissement général atteignant son paroxysme dans la partie centrale où s'est développé un vaste cône de dépression qui était déjà à la côte - 15 m en 1940 et qui atteignait - 30 m en 1971 (fig.1).

En ce qui concerne la salinité, la carte établie en 1971 montre que la zone étudiée est intéressée par des salinités à prédominance inférieure à 3 g/l de résidu sec mais qu'elle a subi une invasion par des eaux plus salées (3 à 5 g/l) qui sont venues occuper la partie centrale la plus déprimée ; ceci a eu pour conséquence une dislocation de la zone la plus douce (moins de 1,5 g/l) dont il ne subsiste que quelques lambeaux disséminés le plus important étant situé en bordure de la Sebkhah mais aussi de la mer où nous avons mesuré des salinités supérieures à 5 g/l.

Au rythme d'exploitation pratiqué, il a été calculé qu'on aboutirait à une invasion totale de la nappe dans un délai d'une dizaine d'années (à partir de la situation de 1971).

2 - ÉTUDE DES POSSIBILITÉS DE RECHARGE ARTIFICIELLE

La recharge artificielle a donc été envisagée pour sauvegarder la nappe.

A partir de tests ponctuels effectués sur quelques puits et par l'introduction de modèles de simulation, les modalités de la recharge artificielle ont été fixées comme suit : (1).

(1) Nappe de Tébolba - Essais d'alimentation artificielle.

Rapport technique du Projet PNUD/TUN 69-528 - Tunisie 1973. D.R.E -- 5.066.034

- L'objectif principal serait de combler le cône de dépression existant et de ramener à des côtés positives pour bloquer l'invasion par les eaux salées de la mer et de la Sebkha.
- Pour ramener la dépression à la côte 0 il faudrait injecter 7 M m³ ce qui est nettement au dessus des disponibilités modestes d'eau de surface à partir du barrage du Nebhana et nécessiterait des moyens considérables.
- Il a été adopté en conséquence une valeur plus réaliste de 0,5 M m³/an à injecter à partir de 15 puits de surface à raison de 3,2 l/s et cela pendant 4 mois de chacune des 5 années prévues.
- L'injection de 2,5 M m³ au bout de 5 ans provoquerait une remontée de l'ordre de 25 m au centre diffusant jusqu'à 2 km à l'Est et à l'Ouest ce qui ramènerait la piézométrie à des côtes de - 10 m et - 15 m.
- Pour maintenir cette situation, compte tenu d'une exploitation annuelle qui serait stabilisée à 1 M m³/an il faudrait continuer d'injecter par la suite 0,25 M m³/an.
- Dans ces conditions, la diminution des gradients hydrauliques peut porter de dix à vingt ans l'espérance moyenne de vie de la nappe.
- La dilution de l'eau à 3 g/l par l'eau douce injectée, en doublant la zone d'eau utilisable, doublerait encore cette durée.
- La survie définitive de la nappe serait assurée en doublant ce programme de recharge artificielle.

3 - RECHARGE ARTIFICIELLE RÉALISÉE

7 campagnes de recharge artificielle ont été réalisées de 1972 à 1978.

3.1 - Technique utilisée

La technique utilisée consiste à injecter de l'eau de surface provenant du barrage de Nebhana (0,9 g/l de salinité) dans les puits de surface sous le niveau piézométrique.

Ce mode de recharge a été adopté du fait de l'existence de très nombreux puits abandonnés susceptibles d'être utilisés comme puits d'injection.

3.1.1 - Système de recharge mis en place

Les puits ont été choisis dans la zone de la dépression centrale.

- Nombre de puits :

Le nombre de puits d'injection a varié depuis les essais d'injection en 1971 jusqu'en 1978 date à laquelle la recharge a été arrêtée par manque d'eau à partir du barrage de Nebhana suite à une période de pluviométrie déficitaire.

Le nombre de puits d'injection opérationnels est passé de 4 en 1972 à 16 en 1978 ; en 1975 et 1976, nous avons pu utiliser 17 puits ; entre temps plusieurs puits ont dû être changés en raison de difficultés rencontrées au cours de la recharge.

Autour de chacun des puits d'injection nous avons choisi un certain nombre de puits à partir desquels nous avons observé l'évolution des niveaux piézométriques pendant la période de la recharge ainsi que les variations de salinité. Le réseau d'observation ainsi établi concerne une centaine de puits répartis en 3 ceintures.

- *La 1er ceinture*, groupe les puits les plus proches des puits d'injection, la fréquence des mesures y est d'une fois pour les 3 jours. Leur nombre a varié de 14 à 20 au cours de la recharge.

- *La 2ème ceinture* ; est formée des puits plus éloignés. Leur nombre a aussi varié au cours de la recharge, mais il était voisin de 20. Leur observation se fait une fois par semaine.

- *La 3ème ceinture*, réunit les puits les plus éloignés des puits d'injection ; ils sont les plus nombreux avec 40 à 50 puits. Leur observation est mensuelle.

Quant aux puits d'injection, leur observation est quotidienne.

Connection avec la conduite de Nebhana

L'eau d'injection parvient aux puits par un réseau de conduites mobiles (Bauer) de 3 km de longueur, connecté sur la conduite principale d'irrigation du Nebhana.

Système d'injection

Dans chaque puits d'injection, le débit est mesuré avec un compteur et contrôlé par une vanne, l'eau injectée étant envoyée sous le niveau hydrostatique par un tube de 2" (Fig. 2).

Ce mode d'injection utilise l'eau provenant du barrage de Nebhana sous sa forme brute sans aucun traitement préalable.

Devant la diminution lente mais continue des débits d'absorption causée vraisemblablement par le colmatage à partir des matières en suspension de l'eau d'injection, nous avons procédé à l'installation de bassins de filtration sur tous les puits d'injection à partir de la campagne 1976-77 à la suite d'un essai réalisé sur 3 puits en 1975-76.

3.1.2 - Performances obtenues

Nous avons reporté sur la figure 3 les variations du débit d'absorption de quatre puits d'injection durant toute la campagne de recharge artificielle ; on peut constater :

- Une diminution nette et continue du débit d'absorption avec le temps se réduisant à des valeurs de 50 % du débit initial.
- Une légère amélioration à partir de la campagne de 1977 date à laquelle ont été introduites les interventions de décolmatage et en particulier l'utilisation des bassins de filtration.
- La situation semble se stabiliser par la suite autour de 1 l/s l'arrêt de la recharge ne permettant pas de voir les développements ultérieurs.

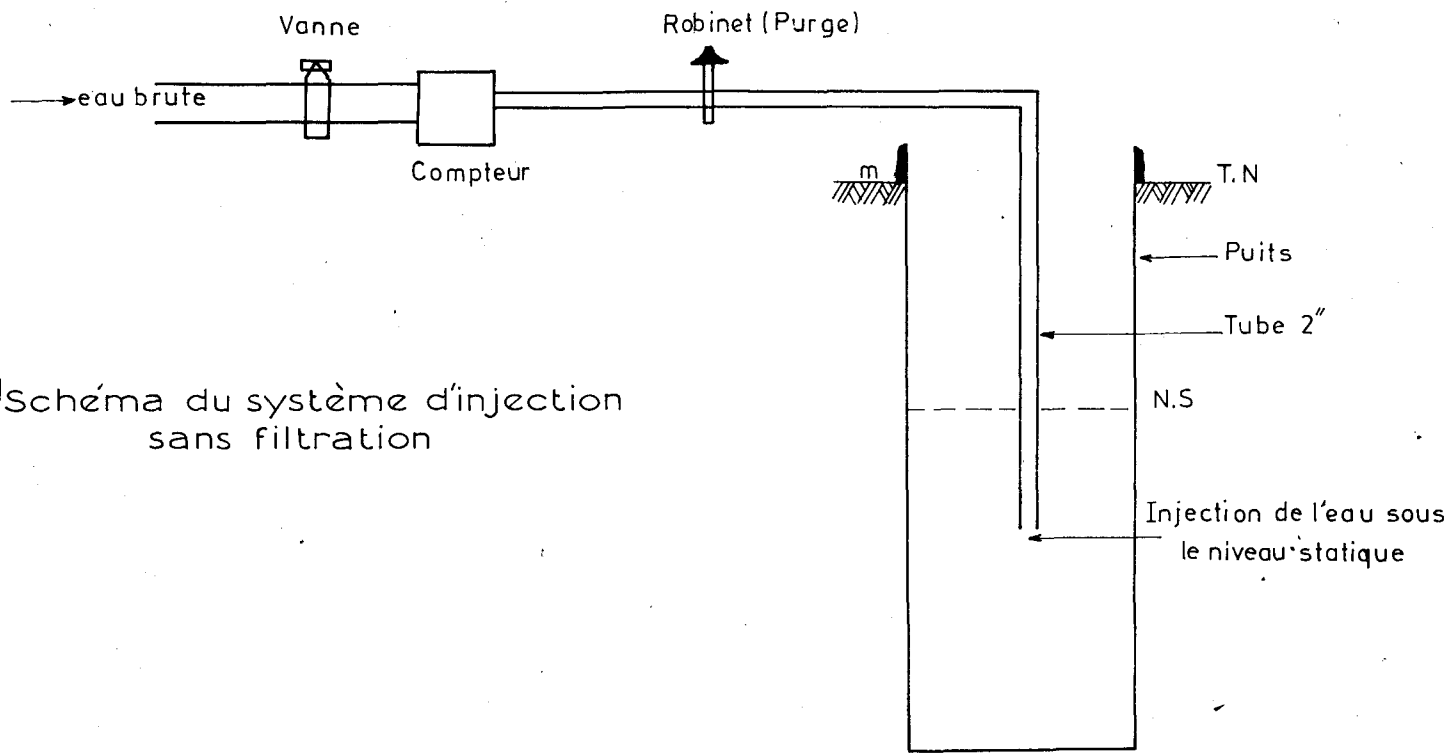


Schéma du système d'injection sans filtration

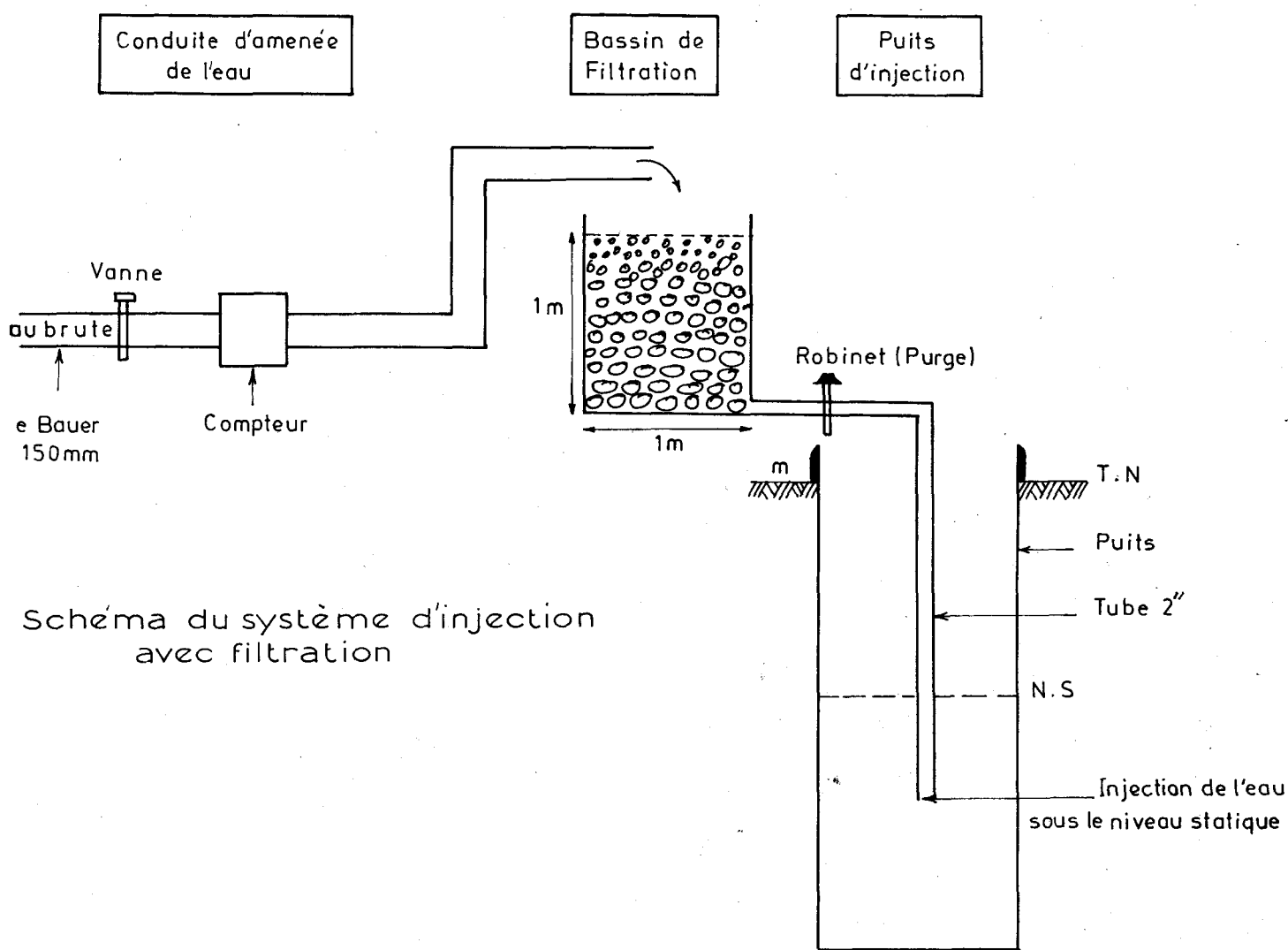
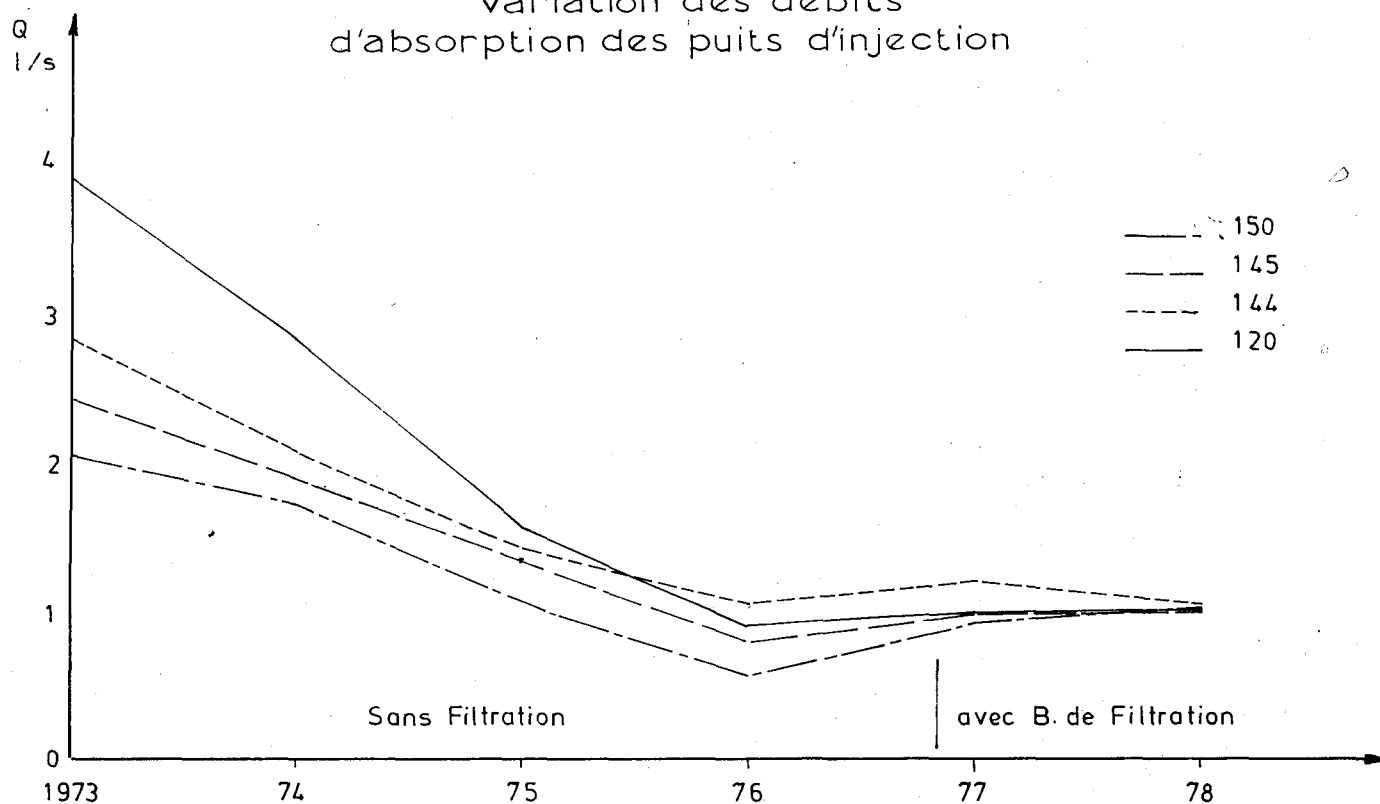
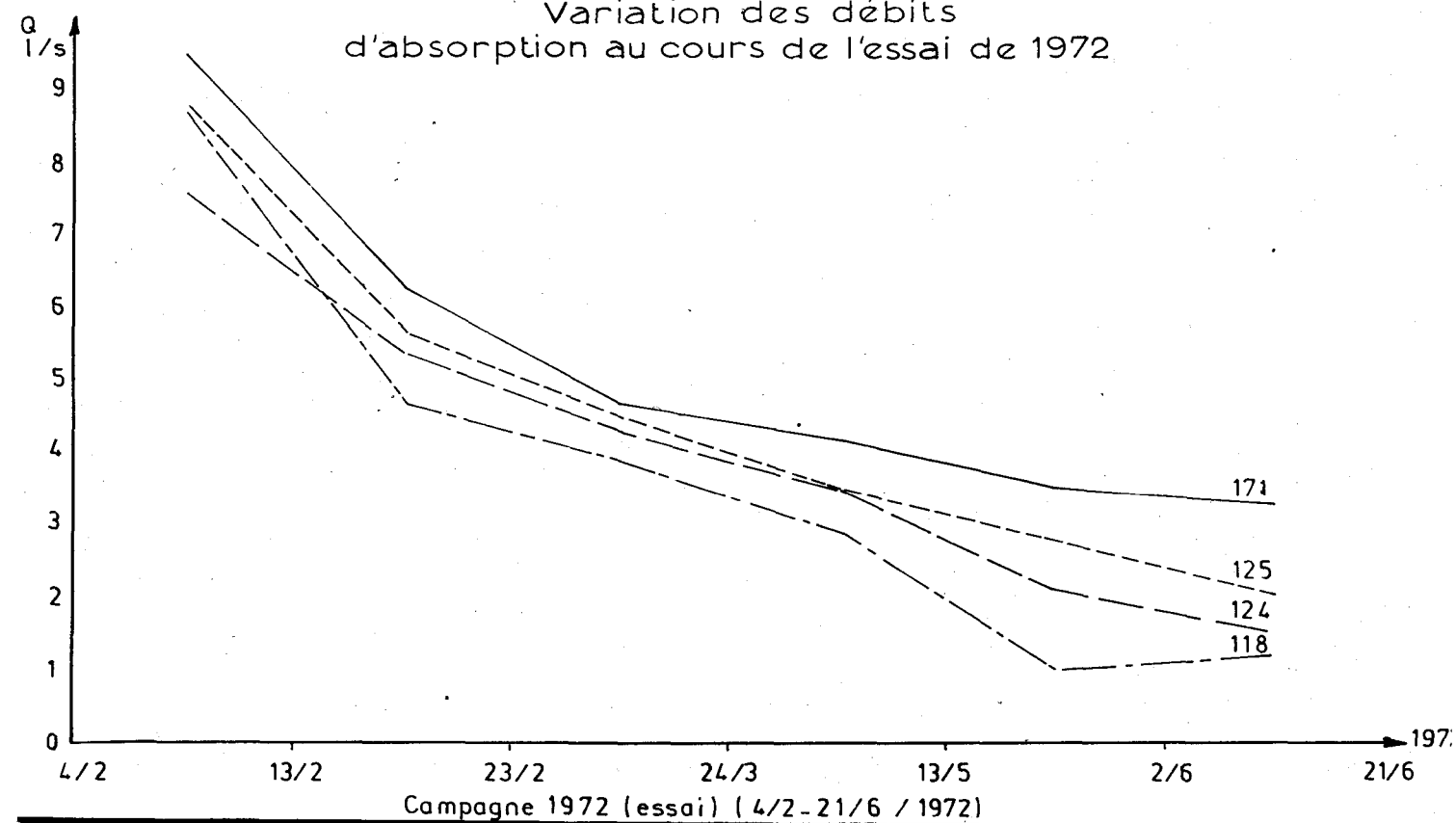


Schéma du système d'injection avec filtration

Variation des débits
d'absorption des puits d'injection



Variation des débits
d'absorption au cours de l'essai de 1972



Nous avons attribué la réduction des débits d'absorption à un colmatage des parois et du fond des puits par les matières en suspension de l'eau provenant du barrage qui sont de l'ordre de 1,3 g/l au niveau de la conduite d'injection.

Décolmatage des puits d'injection

Deux procédés ont été utilisés pour décolmater les puits d'injection et améliorer leurs performances :

- ***Le décolmatage par pompage*** consiste à vider les puits à la fin d'une campagne de recharge afin de provoquer un afflux rapide de l'eau de la nappe susceptible de dégager le cake léger formé sur les parois ; cette opération n'a pas été très efficace, un seul puits ayant réagi favorablement.

- ***Utilisation des bassins de filtration***

Nous avons alors recouru à la filtration de l'eau brute avant son injection et cela par la construction à proximité de chaque puits de recharge, d'un bassin cubique de 1 m de côté rempli de gravier et de galets granulo-classés de bas en haut ; le remplissage superficiel étant constitué d'une couche de sable de 5 à 10 cm d'épaisseur. Les matières en suspension ont été ainsi réduites de façon notable passant de 1,32 g/l à l'entrée du bassin à 0,17 g/l à la sortie.

Cette opération a permis de stabiliser d'une façon générale les débits d'absorption des puits utilisés depuis le début avec ces bassins et d'améliorer légèrement les performances des autres puits, ce qui évite des remplacements successifs par de nouveaux puits.

3.1.3 - Puits éboulés

Au cours de la période de recharge, nous avons constaté l'éboulement de 12 puits se répartissant en :

- 2 puits d'injections
- 10 puits d'observations

Il convient de signaler que les puits de Tébolba atteignent des profondeurs élevées (60 m) et ne sont que partiellement maçonnés sous la partie superficielle constituée par la croûte ; généralement c'est le fond du puits qui n'est pas construit.

Par ailleurs un grand nombre d'entre eux sont très anciens et ont été abandonnés durant de longues périodes.

La reprise de leur exploitation résulte de la remontée de la nappe à la suite de la recharge artificielle, elle s'est faite brutalement avec des groupes de pompage électriques alors que ces puits ont été exploités initialement avec la méthode traditionnelle du dalou.

Ceci pourrait expliquer les éboulements constatés.

3.2 - Résultats obtenus

3.2.1 - Volumes d'eau injectés

Les volumes d'eau injectés dans la nappe au cours de la période de recharge s'établissent comme suit :

Campagne	Nombre de puits	Volume injecté m3	Période d'injection	Observations
1972	4	186.000	4/2 – 26/6	128 j d'injection
1972/73	10	360.000	15/12/72 15/ 6/73	122 j d'injection
1973/74	10	122.000	19/ 2/74 23/ 5/74	65 à 81 j d'injection
1974/75	17	200.000	15/11/74 1/ 4/75	28 j coupure d'eau
1975/76	17	206.000	7/11/75 13/ 4/76	32 j coupure d'eau
1976/77	16	100.000	2/11/76 7/ 3/77	6 j coupure d'eau
1977/78	16	205.00	10/10/77 6/ 3/78	136 j d'injection

TOTAL : 1 379.000 m3

35.000 m3 (essai 1971)

Le volume d'eau total injection au cours des différentes campagnes serait de l'ordre de 1,4 M m3, soit un peu plus de la moitié du volume initialement prévu.

Ceci résulte, outre les difficultés de disposer de puits d'injection auprès des agriculteurs :

- de la faible capacité d'absorption des puits.
- de la limitation de la période de disponibilité d'eau du barrage ainsi que des nombreuses coupures dues à des réparations.

3.2.2 - Exploitation de la nappe

Au cours de la même période l'exploitation de la nappe s'est développée comme suit :

ANNÉES		1971	1973	1976	1977	1978
Équipement	Dalou	187	28	100	28	50
	GMP Diesel	40	24	14	15	20
	GMP Élect.	2	21	58	80	82
Exploitation Millions m3		1,1	0,9	1,3	1,4	1,5

On notera le développement des équipements de groupes de pompage notamment électriques qui a intensifié considérablement l'exploitation entre le début et la fin de la période de recharge ; signalons que 90 % de cette exploitation est prélevée dans la partie centrale la plus déprimée de la nappe.

3.2.3 - Remontée de la nappe

Nous avons mesuré la remontée de la nappe en comparant les profondeurs du plan d'eau des puits relevés au cours de deux campagnes :

- 1971 : avant le début de l'injection
- 1978 : après la fin de la dernière campagne de recharge.

Cette façon d'opérer a l'avantage de représenter l'évolution générale de la nappe en effaçant notamment les phénomènes locaux.

Elle intègre toutefois, en plus de la recharge, les phénomènes suivants :

- **La fluctuation annuelle de la nappe**, de l'ordre de 1 à 3 m dans les zones non influencées par la recharge et cela malgré une pluviométrie nettement supérieure à la normale durant la période de recharge (427 mm/an contre 330 mm/an de pluie moyenne annuelle au poste de Mahdia) ; ceci nous a toutefois amené à ne prendre en considération que les remontées mesurées supérieures à 5 m.
- **L'exploitation notamment à partir des puits pompés qui a augmenté sensiblement entre le début et la fin de la campagne de recharge.**

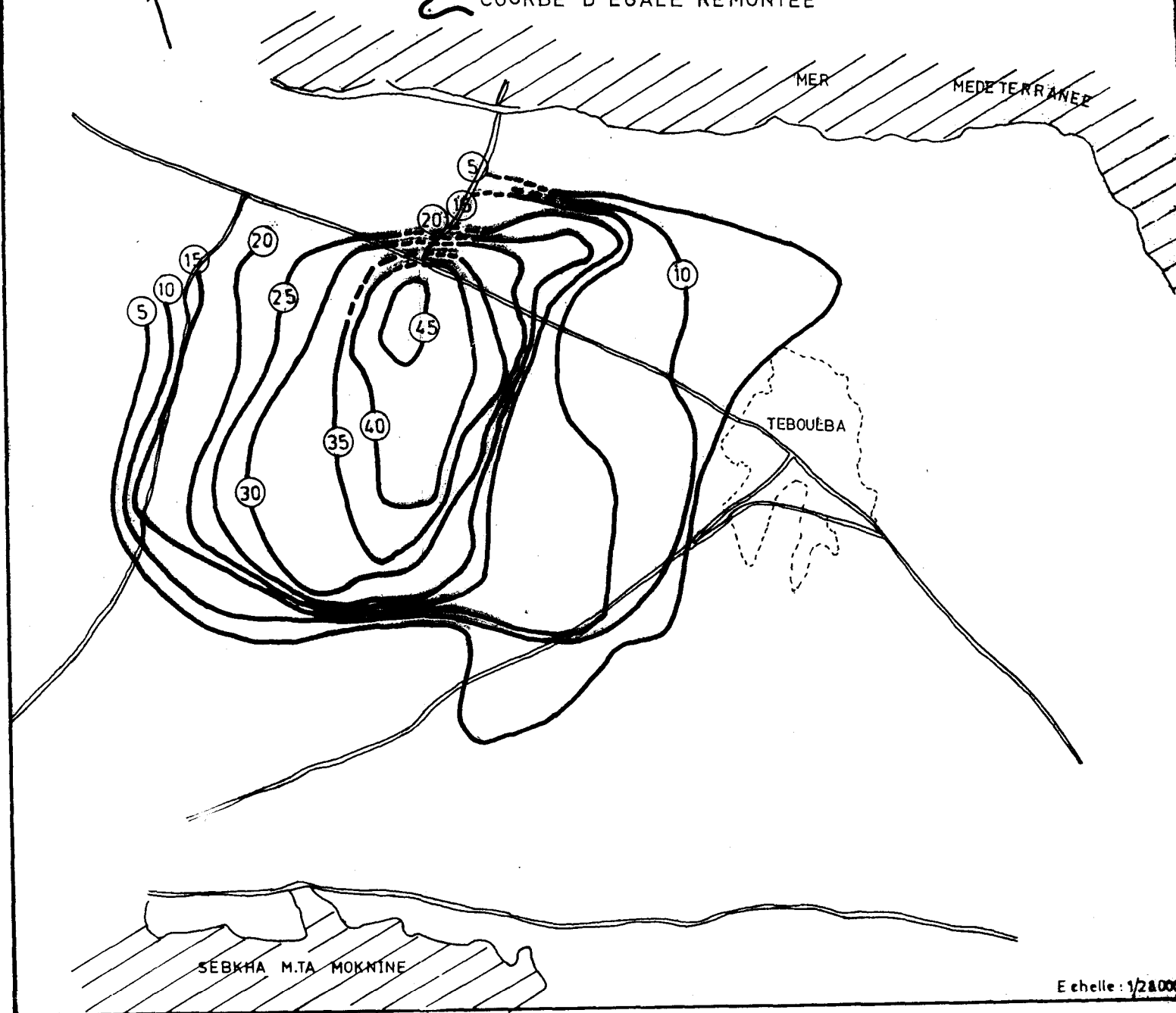
Dans ces conditions, on peut considérer que la remontée de la nappe ainsi représentée (fig. 4) correspond à des valeurs en dessous de la réalité ; on peut notamment mettre en évidence :

- **que la recharge aboutit à un relèvement important** de la nappe atteignant un maximum de plus de 40 m dans la partie centrale ; considérés pour chaque campagne les relèvements nets sont de l'ordre de 5 à 6 m et s'additionnent d'une campagne à l'autre.
- **La diffusion de la recharge** à partir des puits d'injection s'est développée de façon préférentielle vers le N.E et vers l'Est, alors qu'il n'y a pratiquement aucune diffusion vers le Sud et cela malgré la présence de plusieurs puits d'injection.
- **La propagation de la recharge** s'est opérée régulièrement vers l'Ouest, de façon très irrégulière vers l'Est ce qui dénote une grande variabilité dans les transmissivités.
- **Ainsi les volumes d'eau injectés** sont venus remplir la vaste dépression créée dans la nappe par les pompages intensifs ; c'est ce qui explique la diffusion sélective de l'eau injectée ainsi que la position du maximum de relèvement observé qui correspond à la zone qui était la plus déprimée.

Les valeurs de relèvement observées sont nettement supérieures aux prévisions du modèle ce qui dénoterait des valeurs du coefficient d'emmagasinement encore plus faibles que celles retenues initialement.

NAPPE DE TEBOULBA
REMONTEE DE LA NAPPE 1978
COURBE D'EGALE REMONTEE

Fig:4



Troisième partie

**aperçu sur les principales
études réalisées**

**CONTRIBUTION A L'ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE
DU BASSIN VERSANT DE L'OUED RMEL
(Zaghouan - Bou Fichta)
TUNISIE**

**Résumé de la Thèse de 3ème Cycle
soutenue le 19 Mai 1981**

*Par : M. Rekaya**

La plaine quaternaire de l'Oued Rmel - Bou Fichta s'étend sur environ 320 km² et fait partie d'un bassin versant côtier de 900 km².

La pluviométrie moyenne interannuelle reçue par le bassin est de 400 mm, l'évapotranspiration potentielle déduite à partir de la méthode de Thornthwaite est proche de 920 mm/an.

L'Oued Rmel qui parcourt la plaine de l'amont vers l'aval sur 46 km, se caractérise par un écoulement pérenne.

Le dépouillement d'une trentaine d'années de mesures hydrométriques a montré que la période de hautes eaux correspond au mois de Mars alors que celle de basses eaux se situe au mois d'Août.

L'application de la méthode de Maillet au régime de tarissement de l'Oued, en période non influencée, a révélé la grande variabilité de la capacité d'emménagement du système aquifère en rapport avec le régime pluviométrique.

L'étude hydrogéologique de cette plaine d'effondrement au moyen de 250 sondages électriques et 17 sondages mécaniques a permis de mettre en évidence la structure complexe et l'hétérogénéité du remplissage.

Le système peut-être, en première approximation, assimilé à un aquifère monocouche.

Le nombre de puits dépasse 600 concentrés en majeure partie dans la dépression de Zaghouan et dans la plaine de Bou Fichta.

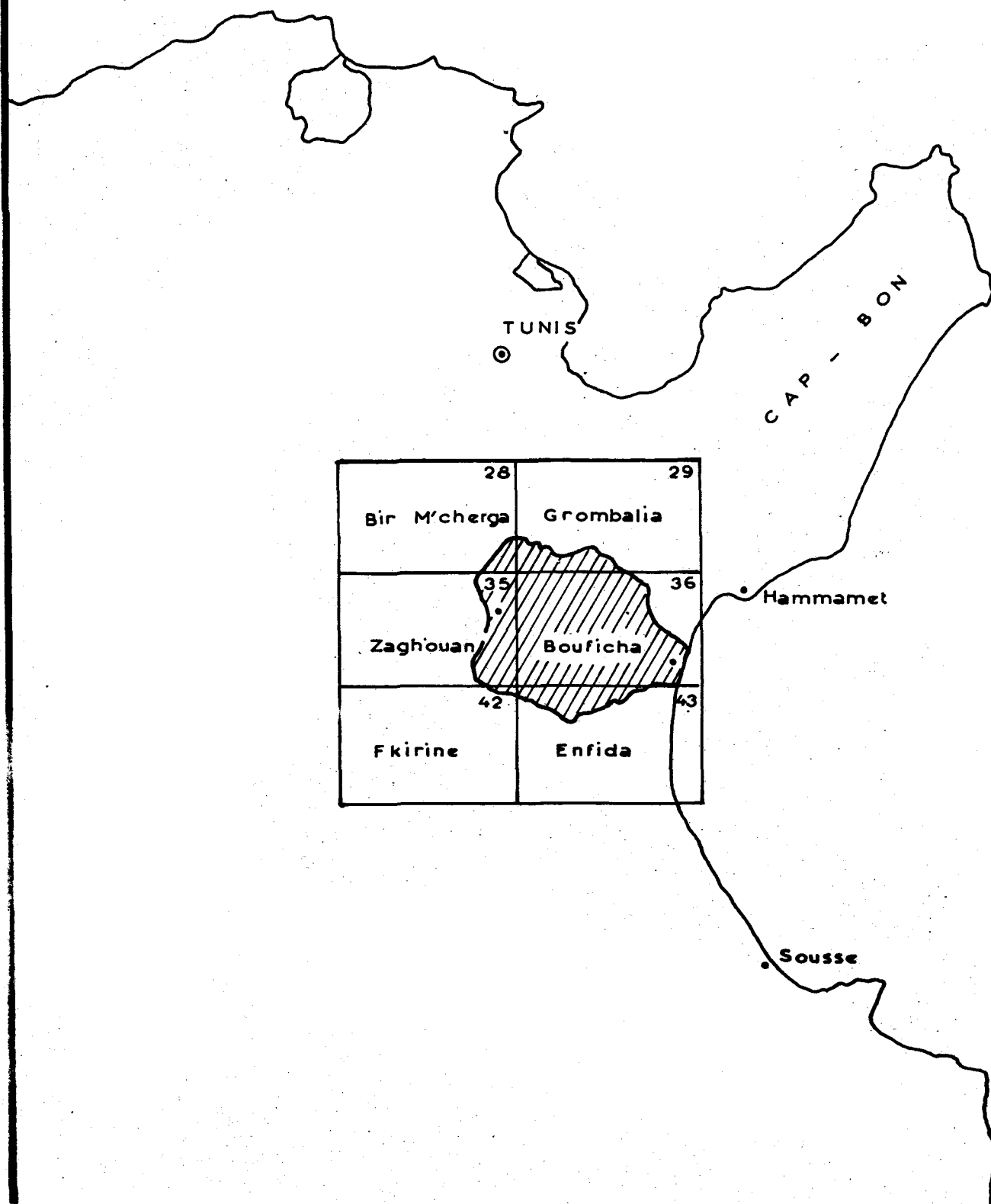
La piézométrie a montré que l'écoulement souterrain de la nappe se développe dans les limites de la vallée de l'Oued Rmel et s'effectue en direction de la mer.

L'alimentation s'effectue à partir des piémonts de bordure et principalement au droit des lits des oueds.

****Ingénieur Hydrogéologue de la Division des Ressources en Eau - DRES - Ministère de l'Agriculture - TUNIS.***

DE OUED RMEL

PL.1



La décharge se fait, en plus de l'exploitation, par le drainage de la nappe au niveau de l'Oued Rmel qui rejoint la mer.

De même, l'évaporation est prédominante le long du lit de l'Oued et dans les zones où le plan d'eau de la nappe est très proche de la surface du sol.

La concentration en sels des eaux est très variable puisqu'elle passe de 1 g/l dans les zones amont à plus de 6 g/l dans la zone aval.

L'étude géochimique montre qu'il se produit une évolution dans la composition chimique des eaux de l'amont vers l'aval, en passant d'un faciès chloruré et sulfaté sodi-calcique et magnésien à un faciès franchement chloruré sodique et potassique. Cette évolution est liée à la lithologie, à l'évaporation ainsi qu'à l'apport des eaux thermales des Hammams Djedidi et Zriba.

L'analyse de l'isotope lourd de l'oxygène a permis de montrer que la forte concentration en sels des eaux dans le secteur médian de l'aquifère, au point de confluence de l'Oued Rmel avec ses affluents, est due essentiellement à la mise en solution souterraine. Par contre vers l'aval, tout près de la cote, la forte minéralisation est liée à l'évaporation de surface ou de subsurface.

La réalisation et l'interprétation de 93 pompages d'essai répartis à travers toute la plaine a montré que la transmissivité moyenne de l'aquifère est d'environ 5.10^{-4} m²/s.

L'application d'un modèle mathématique au système aquifère de la plaine de l'Oued Rmel a permis une meilleure connaissance du fonctionnement hydraulique du système. En ce qui concerne l'alimentation, le modèle a permis de souligner que c'est à partir des lits des Oueds que s'effectue l'essentiel de l'alimentation notamment pendant les périodes de crue. Les structures aquifères limitrophes comme par exemple le massif karstique de Zaghuan et le synclinal de Dj. Ahmar contribuent aussi de façon efficace à l'alimentation du système. Le coefficient d'infiltration tel qu'il est calculé par le modèle, se réduit à 5,4 %. Le coefficient d'emménagement est de 1 %.

Les ressources renouvelables évaluées pour la plaine de l'Oued Rmel s'élèvent à 8 millions de m³/an. Celles de la plaine de Bou Fichta, déduites à partir de la méthode de Darcy, se réduisent à 2 millions de m³/an. Les ressources exploitables sont ainsi évaluées à 10 millions de m³/an, tandis que l'exploitation actuelle ne dépasse pas 2,5 millions de m³/an. Il apparaît donc que la nappe phréatique du bassin versant de l'Oued Rmel est une nappe sous exploitée.

Il semble que cette situation provienne du développement très peu important des cultures irriguées dans cette région où l'agriculture constitue pourtant l'activité principale de la population locale. Les grandes cultures y constituent l'unique spéculation.

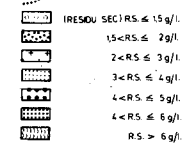
Une réorientation vers les cultures irriguées serait éventuellement à envisager et permettrait l'exploitation des ressources disponibles.

Il faut souligner que les ressources exploitables pourraient en réalité être supérieures, la relation existant entre le bassin de l'Oued Rmel et celui du Miliane laisse en effet supposer qu'une intensification de l'exploitation notamment dans la dépression de Zaghuan implique un appel d'eau venant de la plaine de Smindja.

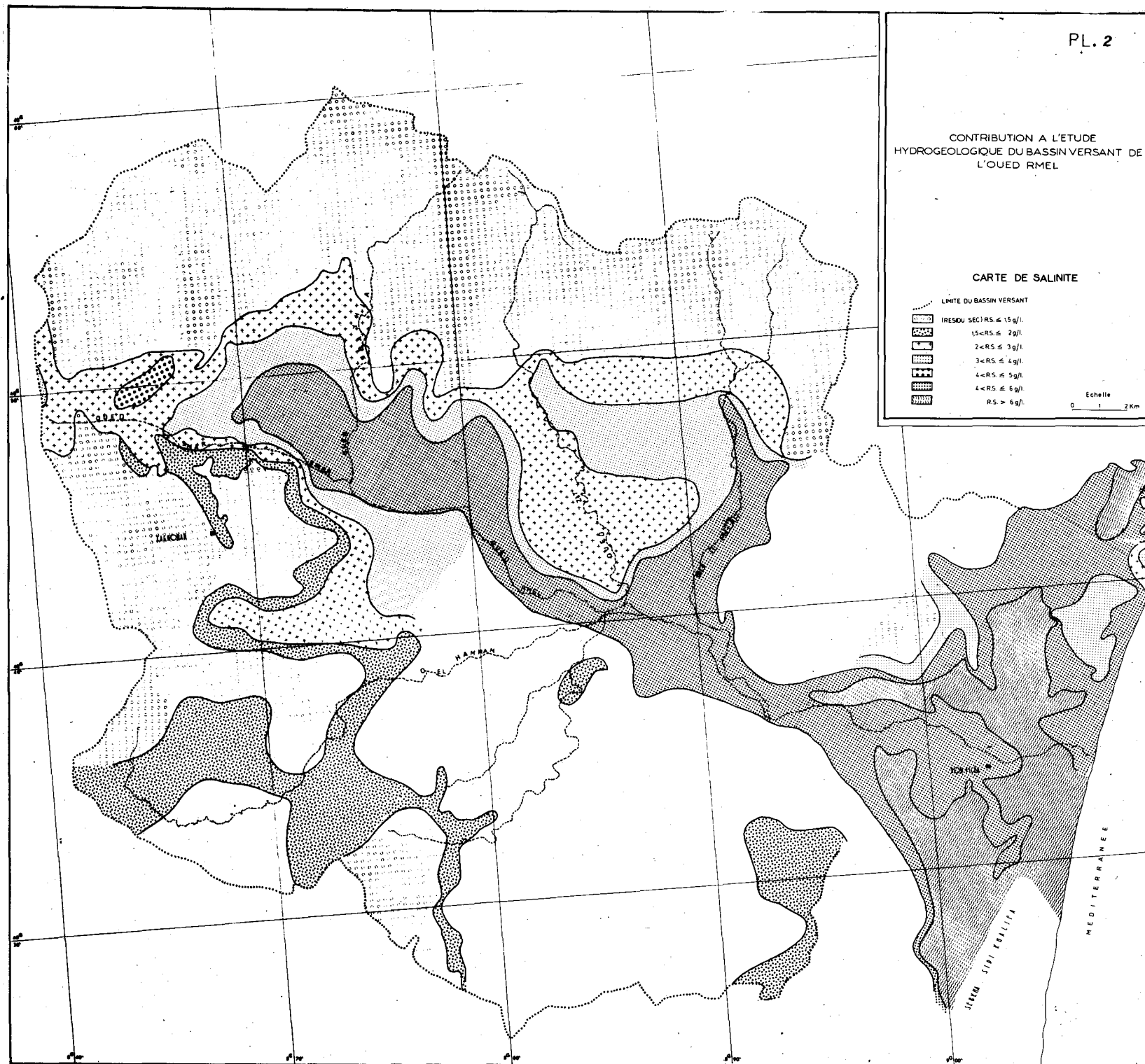
CONTRIBUTION A L'ETUDE
HYDROGEOLOGIQUE DU BASSIN VERSANT DE
L'OUED RMEL

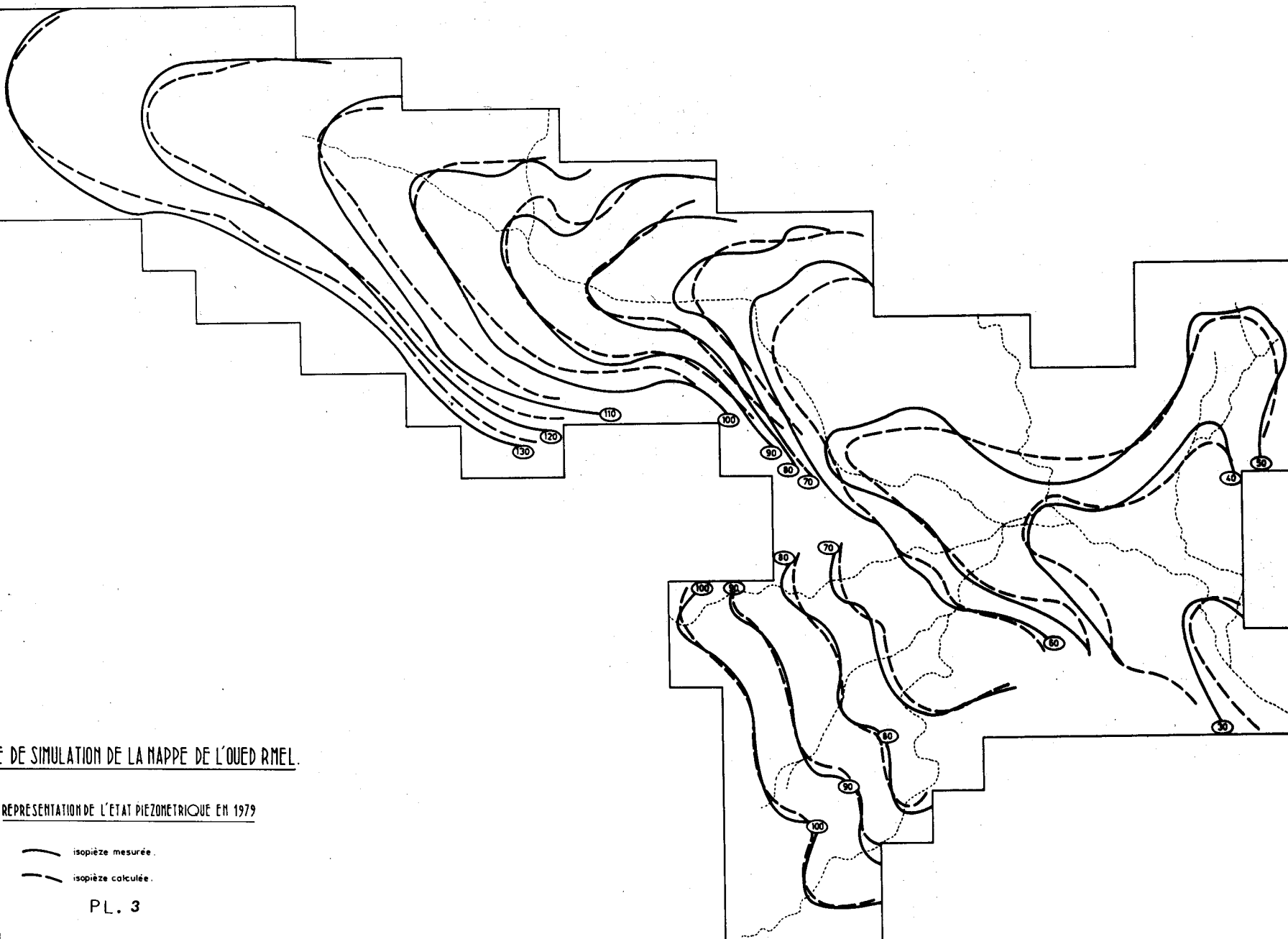
CARTE DE SALINITE

LIMITE DU BASSIN VERSANT



Echelle
0 1 2 Km





REPRESENTATION DE LA MAPPE DE L'OUED RMEL.

REPRESENTATION DE L'ETAT PIEZOMETRIQUE EN 1979

De même, les grandes structures synclinales amont de Bordj Slouguia et Sidi Hamedène peuvent constituer un potentiel en eau très important pour la totalité du système aquifère de l'Oued Rmel.

Une intensification de l'exploitation risquerait cependant de provoquer le tarissement de l'Oued Rmel impliquant une infiltration des rejets provenant de la laverie de Hammam Zriba. Une surveillance régulière de la qualité chimique de ces rejets serait donc à entreprendre à cause notamment de la présence de chrome et probablement de fluor dans ces rejets constituant un risque de contamination de la nappe.

La salinité élevée le long du lit de l'Oued Rmel et surtout dans la basse plaine de Bou-Ficha constitue un facteur limitant pour l'utilisation des ressources disponibles. L'on remarque que 50 % des ressources ont une salinité inférieure ou égale à 3 g/l ; 35 % ont une salinité comprise entre 3 et 6 g/l et 15 % montrent une salinité supérieure à 6 g/l.

Il semble qu'une relance du projet d'irrigation de la plaine de Bou-Ficha à partir des épandages des eaux de crue de l'Oued Rmel soit à reprendre ; la salinité de ces eaux étant très acceptable et l'infrastructure déjà existante.

De même, l'aménagement du bassin versant par des travaux de C.E.S et l'exécution de petits ouvrages d'écrêtement de crues, notamment sur les oueds descendants du massif de Zaghuan et de Dj. El Ahmar, seraient très favorables à une réalimentation induite du système aquifère.

