

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

5/95

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT D'HYDRAULIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDE

**Etude hydrogéologique et modélisation
de la nappe du plateau de Mostaganem**

Proposé par :

Mr D. Kalèche

Etudié par :

Mlles N. Benmammar
N. Bougueria

Dirigé par :

Mlle . Zerfa
Mr D. Kalèche

SEPTEMBRE 1995

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ar :

erfa
alèche

SEPTEMBRE 1995

Résumé

Le présent travail consiste à appliquer un modèle mathématique de simulation hydrodynamique, en régime permanent et transitoire, dans un aquifère monocouche (nappe du plateau de Mostaganem) et ce, après une étude hydrogéologique, permettant la détermination des caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère (transmissivité, coefficient d'emmagasinement).

ملخص

تتمثل الدراسة التالية في تطبيق نموذج رياضي للتشابه الهيدروديناميكي؛ وذلك في النظامين المستقر والانتقالي في سطح جوفي أحادي الطبقة (الخاص بهضبة مستغانم)؛ يُمكننا من تعيين الخصائص الهيدروديناميكية لهذا الأخير وذلك بعد دراسة هيدروجيولوجية شاملة للمنطقة.

Abstract

This present work consists to apply mathematical model of hydrodynamic simulation, in permanent and transitory regime, in monolayer aquiferous (Sheet of Mostaganem high plain), after the hydrological study, which permits the determination of hydrodynamical parameters.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à:

Mes très chers parents;

Mes frères et soeurs;

Saâdia Benmamar;

Mes chères amies:

*Lila, Naoual, Keltoum, Mounira,
Nacéra, Salima, Ouahiba et Zakia;*

Tous les musulmans du monde.

A tous ceux à qui je pense et dont je ne pourrai citer le nom.

Nadia BENMAMMAR

Je dédie ce travail à:

Toute ma famille, du plus petit au plus grand;

Ma chère mère;

La mémoire de mon père;

Mes très chers soeurs et frères;

Toutes mes amies de l'ENP et de l'USTHB;

Fadila, Djamila, Taous, Fatima et Louiza.

Nacéra BOZIGUERJA

Remerciements

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à tous ceux qui ont contribué, par leur précieuse collaboration ou leur soutien moral, au bon déroulement de ce travail.

Nous remercions vivement M^E *Zerrouk*, chef de service à *HFN* (DAR-EL-BAIDA), pour son soutien sans réserve. Il nous a permis d'accueillir les données nécessaires, dans les meilleures conditions. Il a su nous faire bénéficier réellement de son expérience, grâce à ses grandes qualités humaines.

Un très grand merci à M^{elle} *Ounissa Hellal*, ingénieur hydrogéologue, pour son aide si efficace et sa patience. Nous avons découvert en elle, une personne précieuse et généreuse, qui sait faire profiter de ses riches réflexions. Qu'elle trouve ici l'expression de notre profonde estime.

Nous sommes très reconnaissantes envers tous nos enseignants du département d'hydraulique, qui ont efficacement contribué à notre formation, et nous leur souhaitons une très bonne continuité dans la plus noble tâche; l'enseignement.

Nous tenons à témoigner de la grande qualité du travail des bibliothécaires, et plus précisément *Krimo*, *Karim*, et *Salah*, et à les remercier pour leur patience et sympathie exemplaire.

Notre profonde gratitude va envers *Chahrazed Benriassi*, ingénieur hydrogéologue à la *DHW* de Mostaganem, pour son aide et son intérêt à l'égard de notre travail.

Avant-propos

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
 المكتبة — BIBLIOTHEQUE
 Ecole Nationale Polytechnique

Chaque jour, à travers le monde, chaque individu dans son environnement domestique, exprime un besoin d'eau estimé approximativement à **80 litres** (*Collectif 1991*). Ce besoin, qui ne peut être évalué de façon absolue, correspondrait à un minimum d'eau permettant une qualité de vie « raisonnable ».

Le chiffre de **80 litres** ne représente pas le minimum physiologique mais joint l'indispensable à l'utile pour les diverses activités de la vie. Notons que la demande en eau varie déjà considérablement selon les climats.

La qualité d'eau nécessaire pour la satisfaction de ce besoin dépendra donc non seulement des possibilités et de l'offre naturelle, mais aussi des modes de vie. Elle s'échelonne entre **1000 litres** d'eau par jour et par habitant aux *Etats-Unis* et quelques **5 litres** d'eau par jour et par habitant dans les régions rurales du *Kenya* (*Collectif 1991*).

On estime que **4%** seulement de la population mondiale utilise entre **300** et **400 litres** d'eau par jour et par habitant (*World Ressources Institut, 1990*) et que **75%** de cette population ne dispose que d'environ **50 litres** d'eau par jour et par habitant selon *Collectif 1991*, 2/3 selon *WRI 1990*.

Ces chiffres s'accordent à affirmer l'existence d'une disparité qui est annonciatrice d'une importante aspiration future à une plus grande consommation d'eau, qui serait alors en discordance avec l'offre en eau qui est de plus en plus limitée.

Notre pays, en général, et les régions Ouest et Sud en particulier, sont entrain de subir ces dernières décennies, des conditions climatiques défavorables (précipitation faible, évaporation intense ...). L'impact négatif de ces conditions sur l'ensemble des activités socio-économiques, révèle que la politique de l'eau doit être considérée comme un élément essentiel dans notre stratégie de développement, pour y parvenir, des études de synthèse hydrologiques et hydrogéologiques, et une bonne politique de gestion des ressources en eau s'avèrent indispensables et nécessaires.

L'eau souterraine constitue une étape particulière du cycle de l'eau. son exploitation n'exprime souvent qu'une préférence selon des critères dépendant des conditions naturelles de l'offre, mais aussi du système de valeur des responsables de cette exploitation.

Dans la plupart des pays, l'eau souterraine représente la principale source d'approvisionnement en eau potable (*AEP*) et par fois elle est quasi-exclusive. Ainsi, la part des eaux souterraines pour l'*AEP* est de 60% à une échelle mondiale, et celle relative aux prélèvement à des fins industrielles et agricoles est, respectivement, d'environ 15% et 20% (*Margat, 1990*).

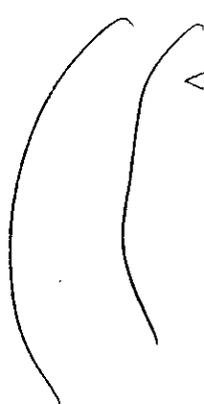
L'eau souterraine constitue un choix délibéré entre toutes les possibilités qu'offrent les autres phases du cycle de l'eau, ces phases représentant des ressources concurrentes mais non exclusives. Les « ressources » sont exploitables, consommables, de la pluie à l'eau de mer (par dessalement).

La différence ne réside que dans l'effort requis pour l'obtention de quantité d'eau désirée: qualité tolérée, préservation du milieu naturel, effort monétaire, etc...

Parmi les avantages qu'offre l'exploitation de l'eau souterraine, on peut citer:

- La qualité supérieur et la stabilité chimique;
- L'économie de grands travaux d'aménagement, sans comparaison avec ceux destinés à capter les eaux de surface;
- La disponibilité sur des grandes étendues, facilement accessible aux usages.
- La « robustesse » face aux aléas climatiques, et donc la stabilité dans le temps, bien apprécié du point de vue économique.

Margat (1986), la définit comme étant « *Un concept, une certaine (ou incertaine) idée que se fait l'homme de l'eau du milieu naturel en fonction à la fois de ce qu'il en sait, de ce qu'il en fait et de ce qu'il en attend, peut et veut en faire* ».



<<Que tu partes pour un voyage au bout du monde
ou pour aller chercher de l'eau au puits,
ton premier pas a la même longueur>>

Proverbe chinois

CHAPITRE I

INTRODUCTION

I- INTRODUCTION :

Les réserves représentent les quantités d'eau souterraines emmagasinées dans les aquifères dont le déclin a lieu dès que l'ensemble des sorties du système aquifère est supérieur à la somme des entrées "moyennes". leur exploitation est souvent qualifiée d'exploitation minière de l'eau souterraine.

L'exploitation des réserves, au milieu du **XIX^{ème}** siècle, s'est faite plus par des progrès des sciences géologiques et des techniques de forage, que par un acte conscient. Ainsi d'après l'UNESCO (1972) 85% des volumes extraits au Sahara Septentrional (Aquifère du continental Intercalcaire: Algérie et Tunisie) proviennent des réserves.

Ainsi, le premier souci a été de rechercher un débit maximal qu'il serait possible de capter sans défaillance à long terme. C'est le concept de "*Safe yield*" défini par *Meinzer* dans les années vingt, ou encore le concept le plus récent de "*Sustained yield*" (*Walton 1970*). Ce dernier terme est défini comme étant " la quantité d'eau extraite annuellement sans provoquer d'effets indésirables".

La recherche de ce débit a conduit hâtivement à l'idée que du point de vue quantitatif, les prélèvements ne doivent en aucun cas dépasser une valeur limite, celle de la recharge naturelle. c'est la forme la plus primitive de la notion de surexploitation.

A cet effet, la connaissance de l'évolution des quantités d'eau dans le temps s'impose, et elle permettra ainsi de faire face à plusieurs problèmes, plus précisément celui de la " surexploitation "

Dans le cadre de notre mémoire d'ingénieur, nous avons jugé utile de faire une synthèse de nombreuses études hydrogéologiques du plateau de *Mostaganem*.

Cette synthèse servira de base à l'élaboration d'un modèle mathématique de simulation afin de prédire le comportement de l'aquifère dans le temps et dans l'espace.

La simulation de la nappe du plateau de *Mostaganem* par modélisation, est faite en passant par de différentes études qui sont les suivantes:

-Présentation géographique de la région (*Chapitre II*);

-Aperçu géologique (*Chapitre III*);

-Etude hydroclimatologique (*Chapitre IV*);

-Etude hydrodynamique, permettant de voir l'évolution piézométrique ainsi que la détermination des paramètres hydrodynamiques (*Chapitre V*);

-Elaboration d'un modèle mathématique représentatif du fonctionnement de l'aquifère du plateau de *Mostaganem* (*Chapitres VI;VII*).

CHAPITRE II

**APERÇU
GÉOGRAPHIQUE**

II- APERÇU GEOGRAPHIQUE

II-1- Situation:

Mostaganem, deuxième port de l'Oranie, se trouve à **80Km** au nord-est d'Oran et au sud de l'embouchure du Chellif qui est le fleuve le plus important de l'Algérie (*figII-1*). La ville est construite sur un bombement côtier qui sépare une étroite zone littorale d'un plateau grésosable appelé *plateau de Mostaganem*.

Ce plateau est bien individualisé, il a comme limites:

- A l'est, les Djebels d'Ennaro et de Bel Hacel.
- A l'ouest, un bourrelet côtier qui l'isole du littoral.
- Au nord, la vallée du Chellif.
- Au sud, la pleine des Bordjias marquée par un changement brutal de l'altitude qui passe de **180** à **50 m**.

La ligne de flexure est légèrement au nord des villes Ain Sidi Cherif, Mesra, Blad Touaria.

II-2- Morphologie:

D'une superficie de **700 Km²** le plateau a une altitude moyenne de **200m**. Il ne présente l'aspect tabulaire que dans la région centrale. Ailleurs il est affecté de nombreuses ondulations orientées qui délimitent des cuvettes à fond parfois marécageuses.

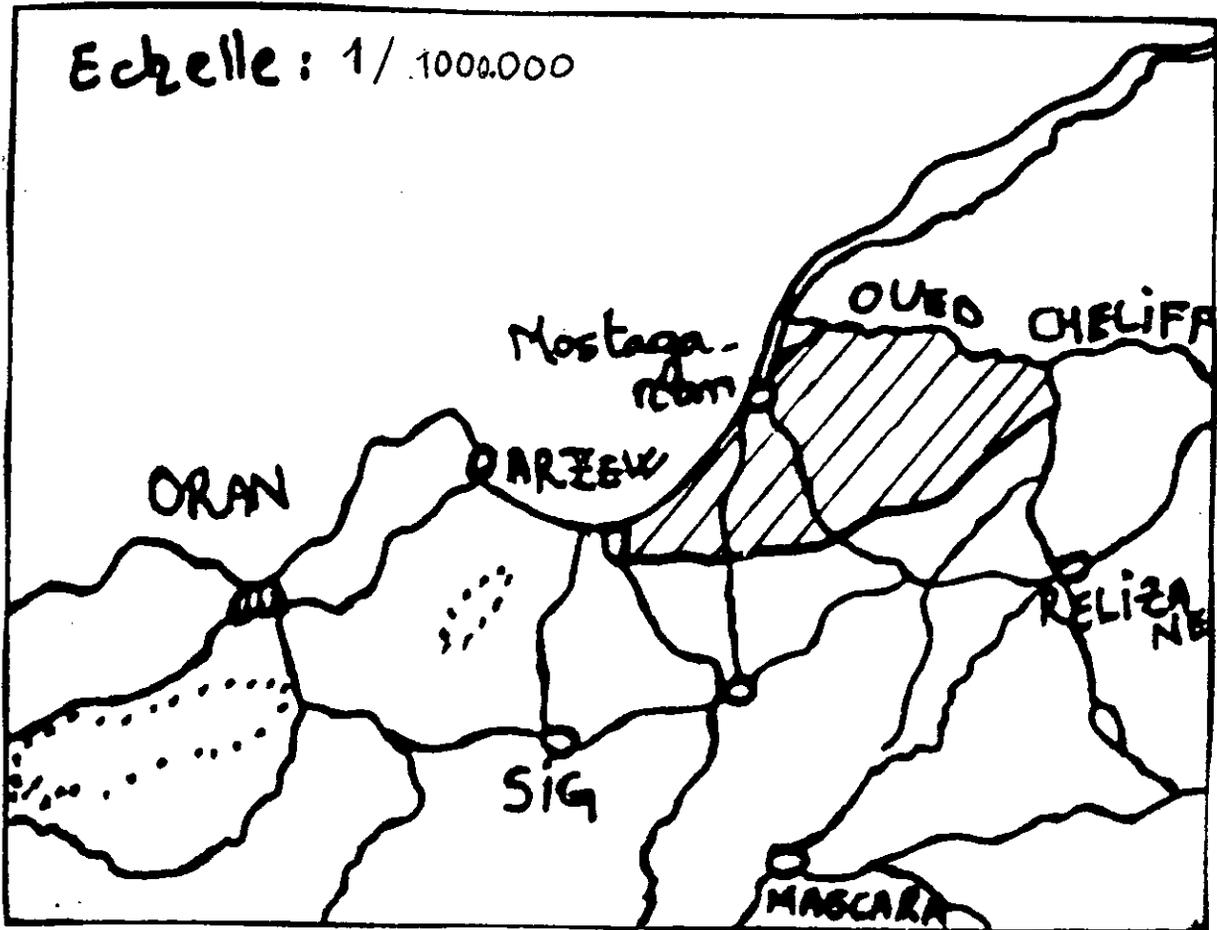
Les vents d'ouest dominant favorisent la formation de dunes de sable sur les flancs ouest des Djebels. L'abondance de ces dunes (centre du plateau, Oued Kheire) a emmené *A.Pomel* de dire: " *Le plateau de Mostaganem correspond à un petit Sahara égaré dans le Tel* ".

II-3- Hydrographie:

L'hydrographie du plateau de Mostaganem est très modeste. Elle est limitée à deux petits Oueds permanents à un réseau de drainage.

L'Oued Sefra, il prend naissance dans la région des " puits ", il est de **11Km** de longueur. Il devient pérenne à l'entrée de Mostaganem où il reçoit le trop plein de la source captée de Pélissier avant de se jeter à la mer où il sert de collecteur d'égout à la ville.

L'Oued Kheir affluent du Chellif, situé au **Nord-Est** de la région, il est d'une longueur de **6Km**, alimenté par les sources d'Ain Soltane et Ain Hallouf.



figII-1: Carte de situation

CHAPITRE III

GÉOLOGIE

III- GEOLOGIE

Deux types de formations affleurent sur le plateau :

- Des formations allochtones.
- Des formation autochtones qui constituent la majeure partie.

III-1- Les formations allochtones:

Ce sont les terrains les plus anciens, On peut définir deux types d'allochtones:

Le diapirisme.

Les nappes de charriage.

III-1-1- Le diapirisme:

Il se manifeste à l'est d'Ain Nouissy où affleure un diapir de gypse renfermant des roches volcaniques (*Ophites*), des marnes vertes ou roses, de la pyrite, de la dolomie noire fétide, du chrome de sodium et du sulfate de magnésie. Il a été étudié en détail en 1919 par *M. Dalloui*.

III-1-2- Les nappes de charriage:

Au nord du Mostaganem (Karouba-Djebel Diss) apparaît tout un ensemble de terrains appartenant aux nappes. En considérant la disposition tectonique des couches on trouve à la base :

- *Le flysch violacé* : Pélites bleu clair avec de petits bancs calcaro-ferrigineux. La macrofanne a permis d'attribuer ce niveau à l'Albien supérieur. Au sommet on peut rencontrer des niveaux de phtanites et des lambeaux de marno-calcaires.

- *Le flysch vert* : Il comporte de petits bancs calcaro-ferrigineux lie vin. Les pélites ont une texture vert sombre, les grès sont plus abondants. Son âge est crétacé inférieur à l'exclusion de l'Albien.

- *Gypse du Trias* : Il renferme des orphites, de la dolomie noire fétide, des marnes vertes et roses, de la muxovite et de la pyrite.

Pour *J. Delteil* les terrains anté miocène de cette région sont allochtones et constituent des nappes de glissement. L'unité marno-calcaire accompagnée de Trias gypseux repose indifféremment sur les flyschs vert et violacé qui sont en position stratégique inverse, formant eux aussi deux nouvelles unités entièrement allochtones.

III-2- Les formations autochtones:

Le terrain post-nappe le plus ancien est le Miocène qui affleure très largement sur la région. (*fig III-1*)

III-2-1- Le Miocène:

- *Laguno-continental* : Marnes rouges riches en galets et sables, grès quartzeux. Conglomérats avec passage latéral à des marnes brunes graveleuses à gypse. La microfaune indique un âge Miocène inférieur.

- *Marin* : Série marno-gréseuse bleue qui s'altère en jaune (Miocène moyen). Au dessus marnes bleues à cristaux de gypse fer de lance. Cet ensemble est recouvert au nord du plateau par une série de cinérites liées au volcanisme régional. Ailleurs il est surmonté par un banc de gypse qui constitue une limite approximative avec le Pliocène.

III-2-2- Pliocène marin:

- *Plaisancien* : Marnes bleues à petits filons de gypse saccharoïde passant progressivement vers le haut à des marnes sableuses et sables argileux.

- *Astien* : C'est une série de couleur jaune foncé formé par des grès à ciment calcaire. L'épaisseur maximum est de *100m*. L'extension de ces grès sous le quaternaire est mal connue.

- *Pliocène continental* : Il affleure dans la partie nord-est du plateau. Le comblement régulier du bassin a conduit à une phase continentale à

sédimentation marneuse terminée par des niveaux détritiques de grès blanchâtres.

III-2-3- Quaternaire:

Calabrien : Il est transgressifs et discordant sur les dépôts marins et continentaux du Mio-pliocène. Il débute dans la région de Mostaganem par un niveau de micropoudingue formé par des galets de grès à ciment calcaire, et se poursuit par des grès jaunâtres grossières et vacuolaires passant à des lumachelles.

Le reste du quaternaire est continental. Il est constitué de grès dunais jaunâtres à stratifications entre croisées et de limons sableux, résultants de la désagrégation des formations du calcabien. Ces séries de recouvrement sont localement masquées par une croûte grésocalcaire blanchâtre.

III-3- Tectonique:

Sur le plan régional le plateau de Mostaganem est encadré par deux accidents *NE SW* : Mercier Lacombe-Mostaganem et Mascara-Cassaigne. Ces accidents qui affectent le socle paléozoïque s'accompagnent d'un déplacement sénestre de la baie entre Mostaganem et Arsew.

(source J. GAUCHEZ, 1976)

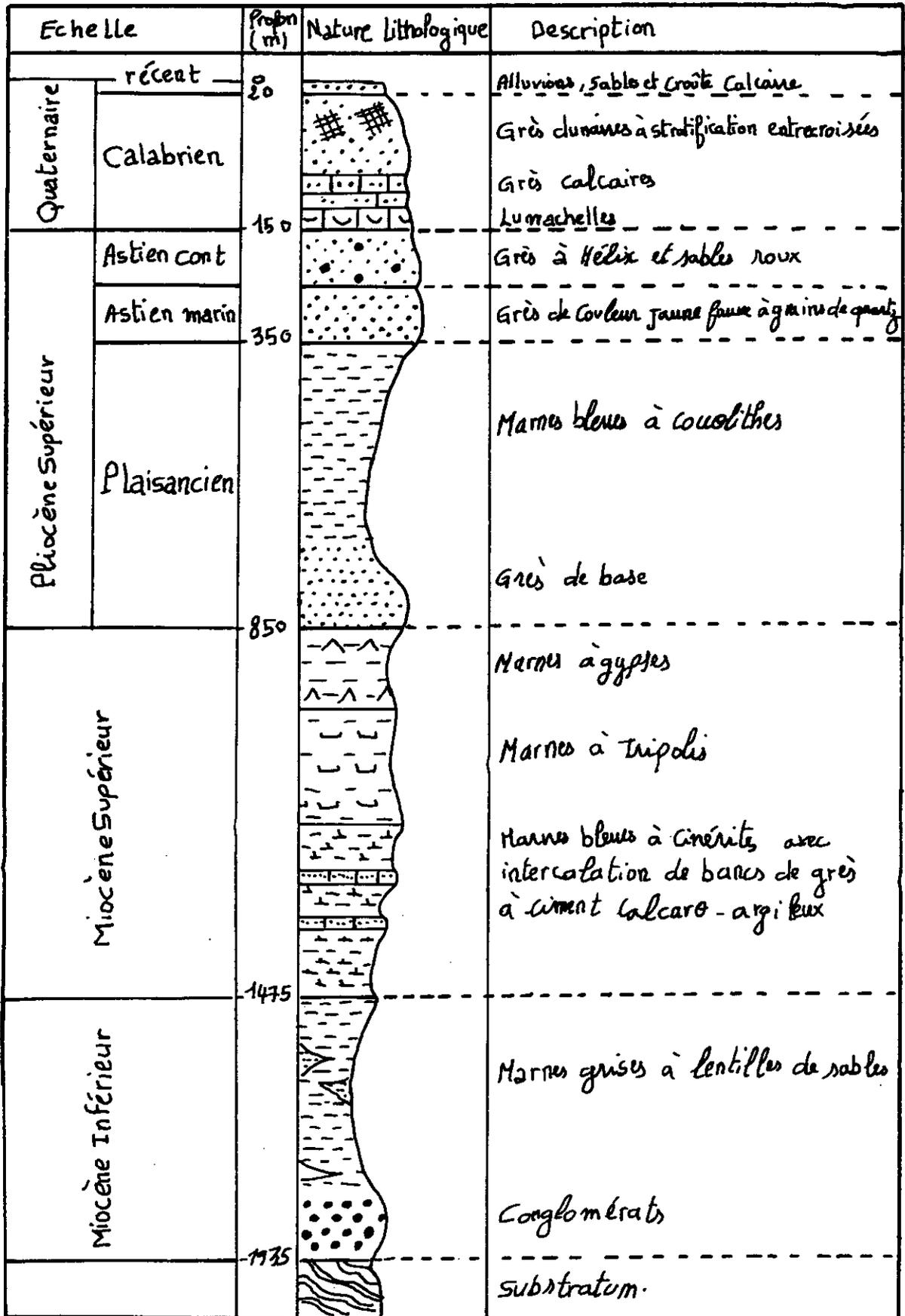


Fig III.1: LOG LITHOSTRATIGRAPHIQUE SYNTHETIQUE echelle:1/10.000

CHAPITRE IV

HYDROCLIMATOLOGIE

IV- ETUDE HYDROCLIMATOLOGIQUE

IV-1- Introduction:

L'hydroclimatologie a été établie dans le but de dégager certaines caractéristiques climatiques qui conditionnent l'écoulement superficiel et souterrain, afin d'établir un bilan hydrique rigoureux, ainsi la détermination du coefficient d'infiltration, qui représente l'un des paramètres essentiels pour la réalisation du modèle.

IV-2- Présentation climatologique de la région d'étude:

Dans l'ensemble la région de Mostaganem est caractérisée par un climat méditerranéen, doux et humide en hiver, sec et chaud en été, avec des influences marines marquées en toutes périodes.

IV-2-1- Principales stations pluviométriques:

On dispose dans la région de Mostaganem de deux séries de stations, (tableau IV-1)

Tableau IV-1: Caractéristique des stations pluviométriques

Station	Code ANRH	Coordonnées		Z (m)	Période de fonctionnement
		X	Y		
<i>Kheir-dine</i>	04-06-02	272.10	287.60	190	1969-1992
<i>Ain-Tedeles</i>	04-06-06	283.10	302.60	210	1942-1960; 1969-1981
<i>Mostaganem</i>	04-06-12	264.80	296.25	80	1913-1962; 1966-1992
<i>Marais D. cultivées</i>	04-06-11	274.0	288.3	192	1970-1992
<i>Fornaka</i>	11-16-09	250.8	278.5	35	1967-1992
<i>Bouguerat</i>	11-16-08	278.0	275.0	75	1942-1962; 1968-1989
<i>Ain-Nouissy</i>	11-16-14	260.3	281.5	100	1942-1962; 1968-1989
<i>Marais d'Ennaro</i>	11-16-17	281.2	291.8	222	1969-1989
<i>Oued Kheir</i>	01-36-06	291.5	297.6		1970-1989
<i>Col d'Ennaro</i>	01-36-08	285.4	289.5	281	1969-1978

- Des stations anciennes, qui ont cessé définitivement de fonctionner vers 1960 (Stidia, Hassi-Mamèche, Oureah, Mazagran), tandis que d'autres, après un moment négligé, font à nouveau l'objet d'observations (Mostaganem, Fornaka).

- D'autres ont été implantées à partir de 1968 (Bled Touaria, Col d'Ennaro, Kheir-dine, Oued Kheir et Marais Dunes cultivées).

Les stations choisies sont au nombre de dix. Elles sont assez bien réparties sur l'ensemble du plateau de Mostaganem (*FigIV-1*) et couvrent bien la période (1968-1989).

Ces stations pluviométriques présentent quelques lacunes d'observations que nous essayerons de combler.

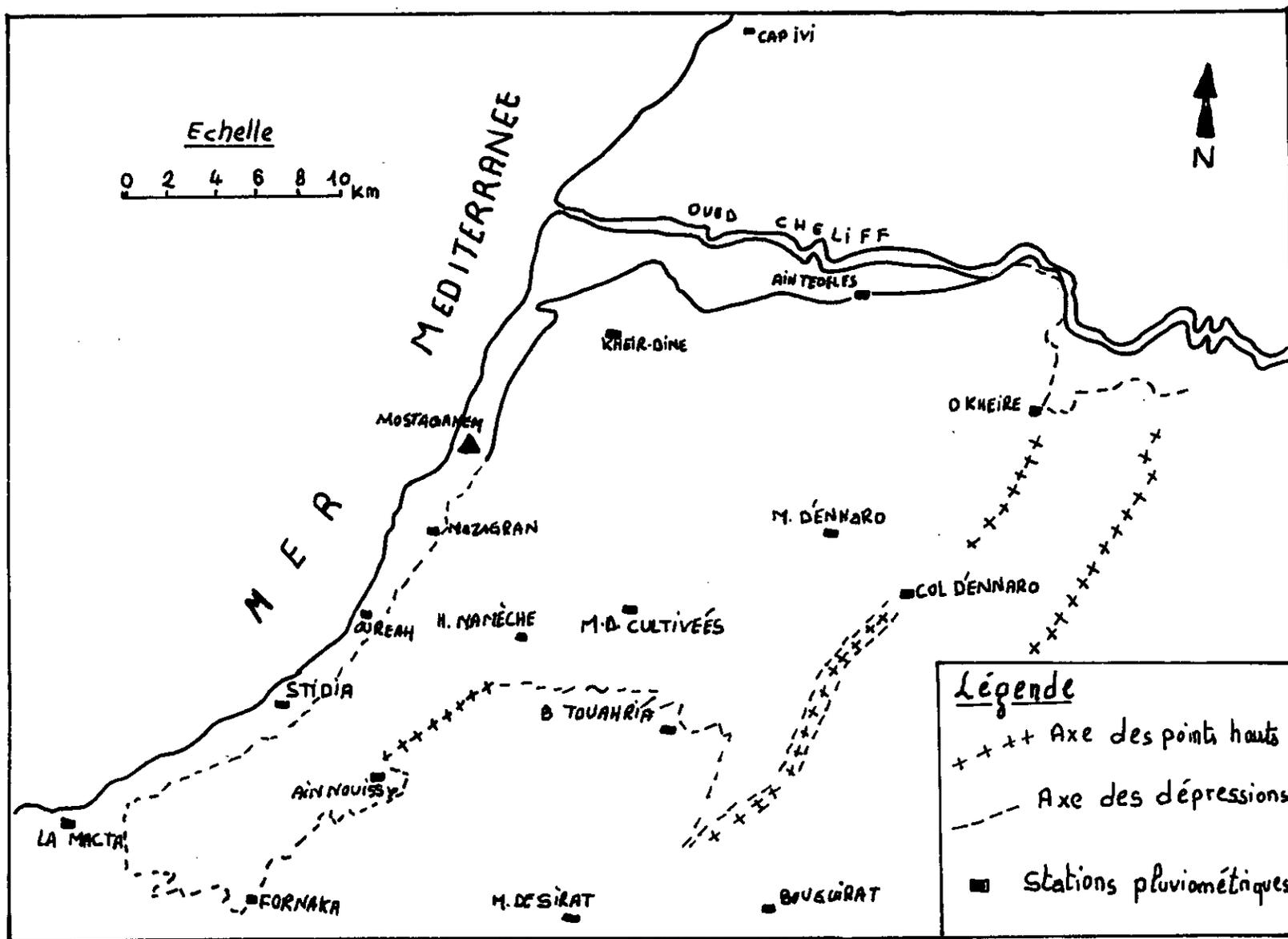


Fig IV.1 : CARTE DE SITUATION DES DIFFERENTES STATIONS PLUVIOMETRIQUES DU PLATEAU DE MOSTAGANEM

a-Analyse des données:

Pour les stations (04-06-11; 11-16-08; 11-16-17; 01-36-06; 04-06-02; 11-16-09), l'absence d'observation pendant quelques mois (au plus trois mois) fait que le total annuel réel est inconnu, on procède alors à la reconstitution de chaque mois manquant, par la moyenne mensuelle interannuelle de ce mois considéré (*tableau IV-2*)

Par contre, pour les stations (01-36-08; 04-06-06; 11-16-14; 04-06-12) qui présentent de fréquentes lacunes (plus de trois mois manquants), on procédera, dans ce cas, à l'homogénéisation des données par régression linéaire.

Tableau IV-2: Précipitations moyennes annuelles (1969-1989)

Station Année	Dunes cultivées	Fornaka	Kheir Dine	Marais d'Enn.	Bougu- erat	Oued Kheir	Mosta- ganem	Ain- Tedlès	Ain- Nouissy	Col d'Enn.
69-70	-	486.3	438.1	502.0	345.9	-	-	483.5	484.9	435.9
70-71	441.1	320.6	425.1	486.0	388.2	441.6	-	494.7	373.5	391.1
71-72	452.8	402.1	555.3	-	393.9	450.0	-	574.9	452.9	548.9
72-73	493.7	332.1	476.5	480.1	360.1	407.5	458.9	520.0	-	483.0
73-74	414.1	370.2	438.2	382.3	365.0	427.6	432.5	462.7	-	467.0
74-75	454.5	395.0	483.8	452.3	452.9	490.3	463.9	503.8	-	440.0
75-76	350.7	315.5	411.2	-	328.5	370.0	403.8	419.5	-	395.1
76-77	366.4	287.5	420.3	386.9	349.5	403.6	410.2	377.3	-	-
77-78	321.1	235.0	350.2	332.6	269.0	367.7	342.1	338.8	-	-
78-79	415.5	224.6	463.5	408.8	316.2	409.2	-	-	398.8	-
79-80	456.9	-	456.2	461.7	-	468.9	-	563.6	440.4	-
80-81	432.7	-	365.5	432.6	-	453.3	451.5	517.7	-	-
81-82	142.1	85.6	187.0	129.0	158.6	263.5	-	-	117.1	-
82-83	354.7	395.3	454.0	368.9	330.7	402.5	404.6	-	-	-
83-84	340.6	252.2	319.6	323.8	293.1	393.4	361.9	-	-	-
84-85	357.9	271.9	290.8	263.3	284.8	398.1	-	-	403.1	-
85-86	428.3	270.1	445.9	450.0	343.2	-	460.6	-	-	-
86-87	307.4	231.2	333.8	356.1	342.1	-	318.3	-	285.9	-
87-88	-	262	343.1	-	348.5	394.4	350.7	-	-	-
88-89	-	164.0	-	168.4	214.2	299.8	-	-	-	-
89-90	-	-	-	250.0	-	356.4	-	-	-	-

a-1- Régression linéaire:

Cette méthode permet d'établir une relation mathématique pouvant exister entre deux séries de mesure aux stations.

Elle permet aussi d'effectuer, éventuellement, une extension d'une série à l'aide d'une autre station beaucoup plus longue et ne présentant pas de lacunes d'observations. Pour que la méthode puisse être applicable, il faudrait que la

régression soit linéaire, que le rapport de corrélation soit élevé et que les deux stations soient soumises au même régime pluviométrique (fig IV-2-a, IV-2-b).

Le principe de la méthode des moindres carrés permettra de déterminer l'équation de la droite de régression, qui est de la forme suivante : $y = a x + b$

avec:

a : Pente de la droite de régression;

b : Ordonnée à l'origine de la droite de régression.

$$a = [K \Sigma xy - \Sigma x \Sigma y] / [K \Sigma x^2 - (\Sigma x)^2]$$

$$b = [\Sigma y \Sigma x^2 - \Sigma x \Sigma xy] / [K \Sigma x^2 - (\Sigma x)^2]$$

Le rapport de corrélation R est obtenu à l'aide la relation suivante :

$$R^2 = a [K \Sigma xy - \Sigma x \Sigma y] / [K \Sigma y^2 - (\Sigma y)^2] ;$$

$$-1 < R < 1$$

avec:

K : Nombre de mesures communes aux deux stations (x et y);

x : Précipitation moyenne annuelle à la station de base (x) à partir de K valeurs;

y : Précipitation moyenne annuelle à la station y .

Les résultats obtenus sont portés dans le *Tableau IV-3*.

Tableau IV-3: Résultats des corrélations par régression linéaire

Stations X	Corrélées Y	R	a (mm)	b (mm)	Equation de la droite de régression
Kheir Dine	Mostaganem	0.81	0.71	119.15	$y = 0.71 x + 119.15$
Kheir Dine	Col d'Ennaro	0.89	0.99	-7.25	$y = 0.99 x - 7.25$
Kheir Dine	Ain Nouissy	0.84	0.75	60.1	$y = 0.75 x + 60.1$
Kheir Dine	Ain Tedlès	0.70	0.88	89.67	$y = 0.88 x + 89.67$

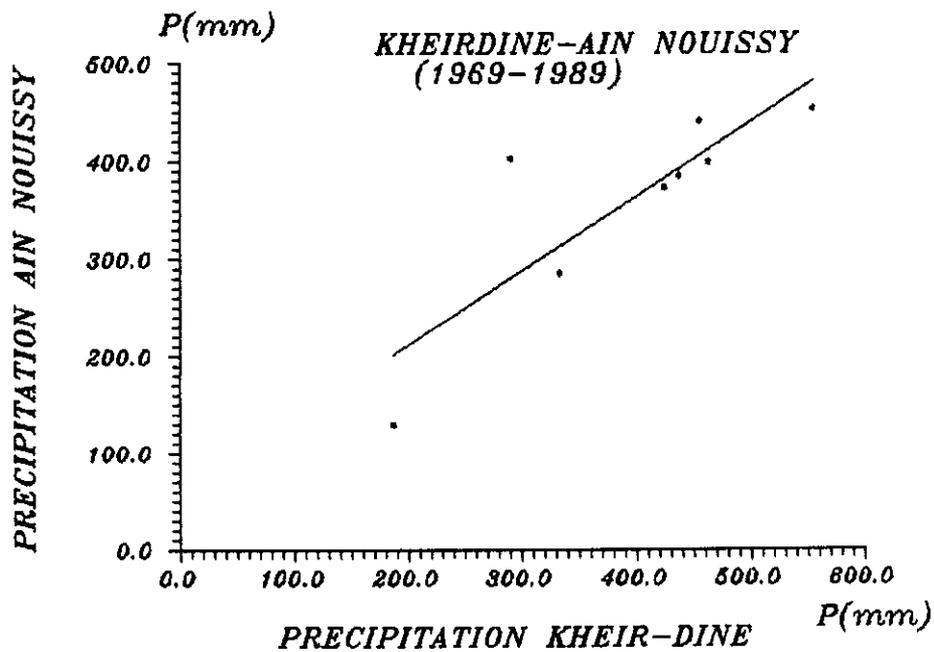
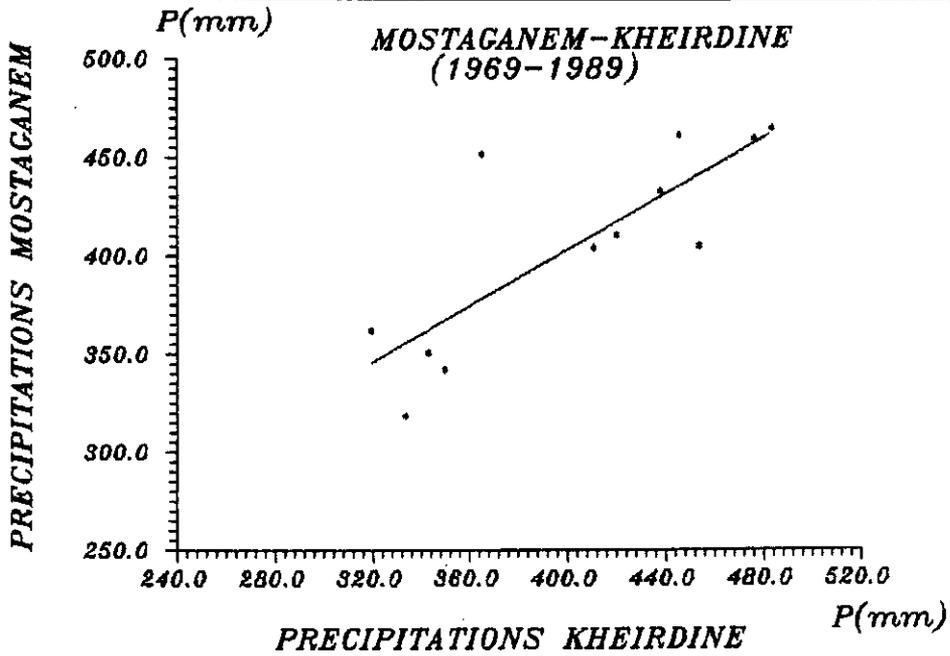


FIG:IV-2a REGRESSION LINEAIRE

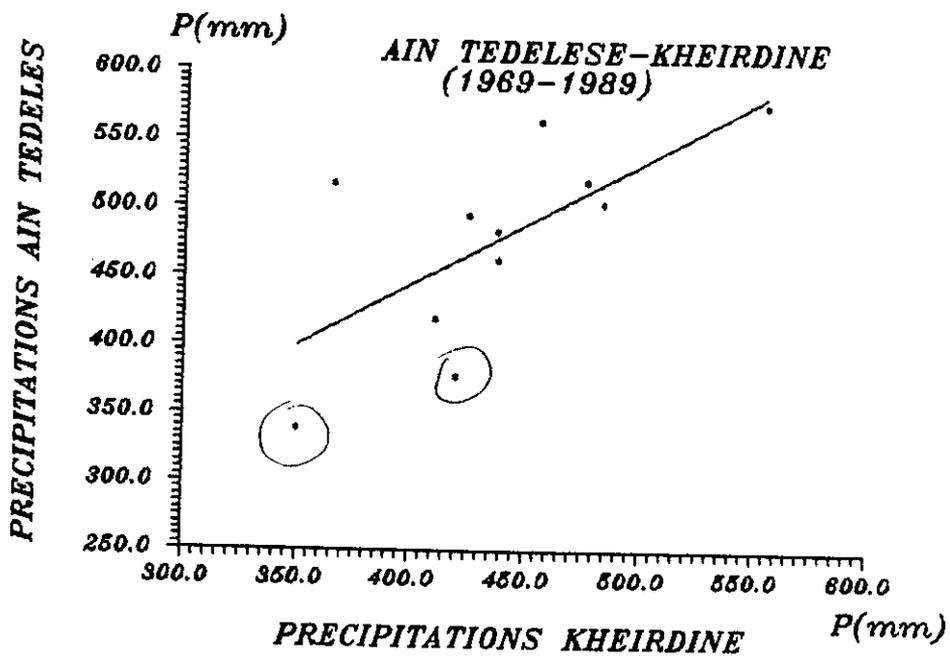
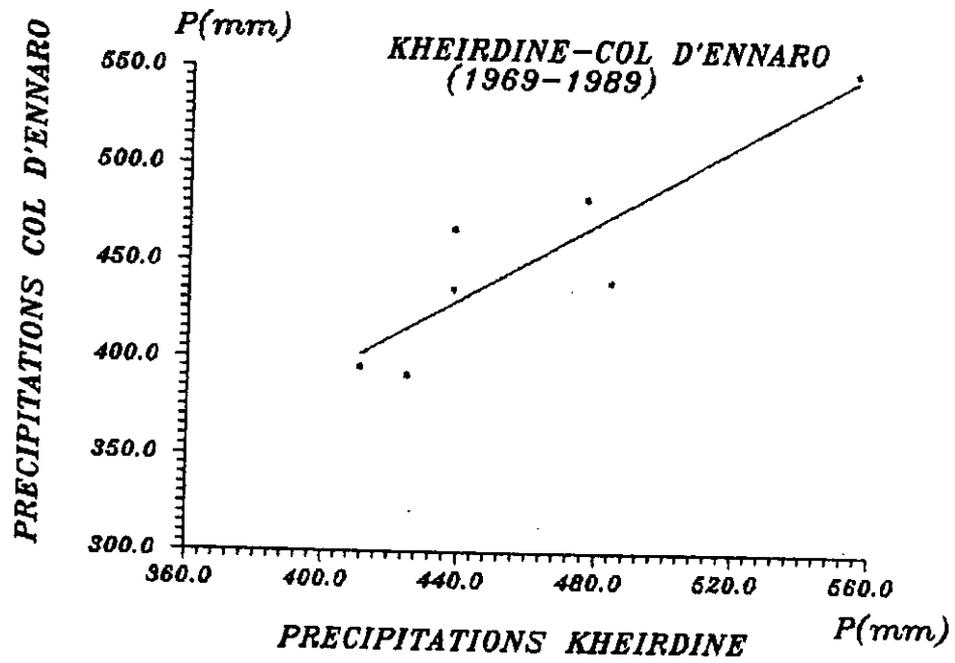


FIG:IV-2b REGRESSION LINEAIRE

Tableau IV-4: Précipitations moyennes annuelles après reconstitution des données (mm)

Station Année	Dunes cultivées	Fornaka	Kheir Dine	Marais d'Enn.	Bougu- erat	Oued Kheir	Mosta- ganem	Ain- Tedlès	Ain- Nouissy	Col d'Enn.
69-70	380.5	486.3	438.1	502.0	345.9	384.9	429.3	483.5	384.9	435.9
70-71	441.1	320.6	425.1	486.0	388.2	373.5	420.1	494.7	373.5	391.1
71-72	452.1	402.1	555.3	494.0	393.9	452.9	412.3	574.9	452.9	548.9
72-73	493.7	332.1	476.5	480.1	3360.1	419.5	458.9	520.0	422.2	483.0
73-74	414.1	370.2	438.2	382.3	365.0	494.4	432.5	462.7	393.1	467.0
74-75	454.5	395.0	483.8	452.3	452.9	424.3	463.9	503.8	427.8	440.0
75-76	350.7	315.5	411.2	427.7	328.5	367.2	403.8	419.5	372.6	395.1
76-77	366.4	287.5	420.3	386.9	349.5	373.2	410.2	377.3	379.5	408.8
77-78	321.1	235.0	350.2	332.6	269.0	308.5	342.1	338.8	326.2	339.5
78-79	415.5	224.6	463.5	408.8	316.2	398.8	447.3	497.5	398.8	451.6
79-80	456.9	336.4	456.2	461.7	327.1	440.4	442.1	563.6	440.4	444.4
80-81	432.7	416.0	365.5	432.6	412.0	412.5	451.5	517.7	337.8	354.6
81-82	142.1	85.6	187.0	129.0	158.6	263.5	251.5	254.3	129.9	177.9
82-83	354.7	395.3	454.0	368.9	330.7	402.5	404.6	489.2	405.1	442.2
83-84	340.6	252.2	319.6	323.8	293.1	393.4	361.9	370.9	302.9	309.1
84-85	357.9	271.9	290.8	263.3	284.8	398.1	325.0	345.5	403.1	280.6
85-86	428.3	270.1	445.9	450.0	343.1	450.4	460.6	482.0	398.9	434.2
86-87	307.4	231.2	333.8	356.1	342.1	371.8	318.3	383.4	285.9	323.2
87-88	342.2	262.0	343.1	346.6	348.5	394.4	350.7	391.5	320.8	332.4
88-89	196.7	164.0	192.2	168.4	214.2	299.8	255.2	258.8	206.2	183.0
89-90	236.1	228.1	283.8	250.0	253.5	356.4	320.1	339.4	275.7	273.7
Total	366.0	299.1	392.1	376.0	327.5	402.1	393.4	431.8	354.2	376.9

a-2 Conclusion:

La méthode de régression linéaire nous a permis de combler les lacunes et d'étendre les séries concernant les dix stations choisies. Les résultats finaux sont portés dans le *Tableau IV-4*.

IV-2-2- Détermination de la lame d'eau précipitée:

Il s'agit de calculer, pour l'ensemble du secteur d'étude, la lame d'eau précipitée, pour cela, on utilisera les méthodes suivantes:

- La méthode arithmétique;
- La méthode de Thiessen;
- La méthode des isoyètes.

a- Méthode arithmétique:

C'est une méthode qui donne une grande importance aux valeurs extrêmes. Elle consiste à déterminer la moyenne arithmétique des précipitations mesurées à chaque station (*Tableau IV-5*).

Cette méthode donne de bons résultats pour les petits bassins versants, où l'influence de certains paramètres tels que : l'altitude, l'exposition et la latitude influent très peu sur les précipitations.

Nous pouvons la qualifier comme étant la méthode la plus simple, calculée d'après l'expression suivante:

$$P = \sum P_i / N$$

avec:

P_i : Précipitation moyenne à chaque station (*mm*)

N : Nombre de stations.

Tableau IV-5: Précipitations moyennes annuelles observées à chaque station

Stations	Mostaganem	Ain-Nouissy	Dunes cultivées	Ain-Tedlès.	Marais d'Enn	Col d'Enn.	Kheir Dine	Oued Kheir	Fornaka	Bougouerat
<i>P moy annuelle (mm)</i>	393.6	354.2	366.0	431.8	376.0	376.9	392.1	402.1	294.1	327.5

La moyenne arithmétique des précipitations annuelles relatives aux dix stations donne, pour la période (1969-1989), une valeur de *371.43 mm*

b- Méthodes des isoyètes:

En général, l'estimation des précipitations moyennes sur une surface ou une région par la méthode des isoyètes est préférable, cette méthode tient compte des fluctuations des précipitations en fonction de l'altitude (*figIV-3*).

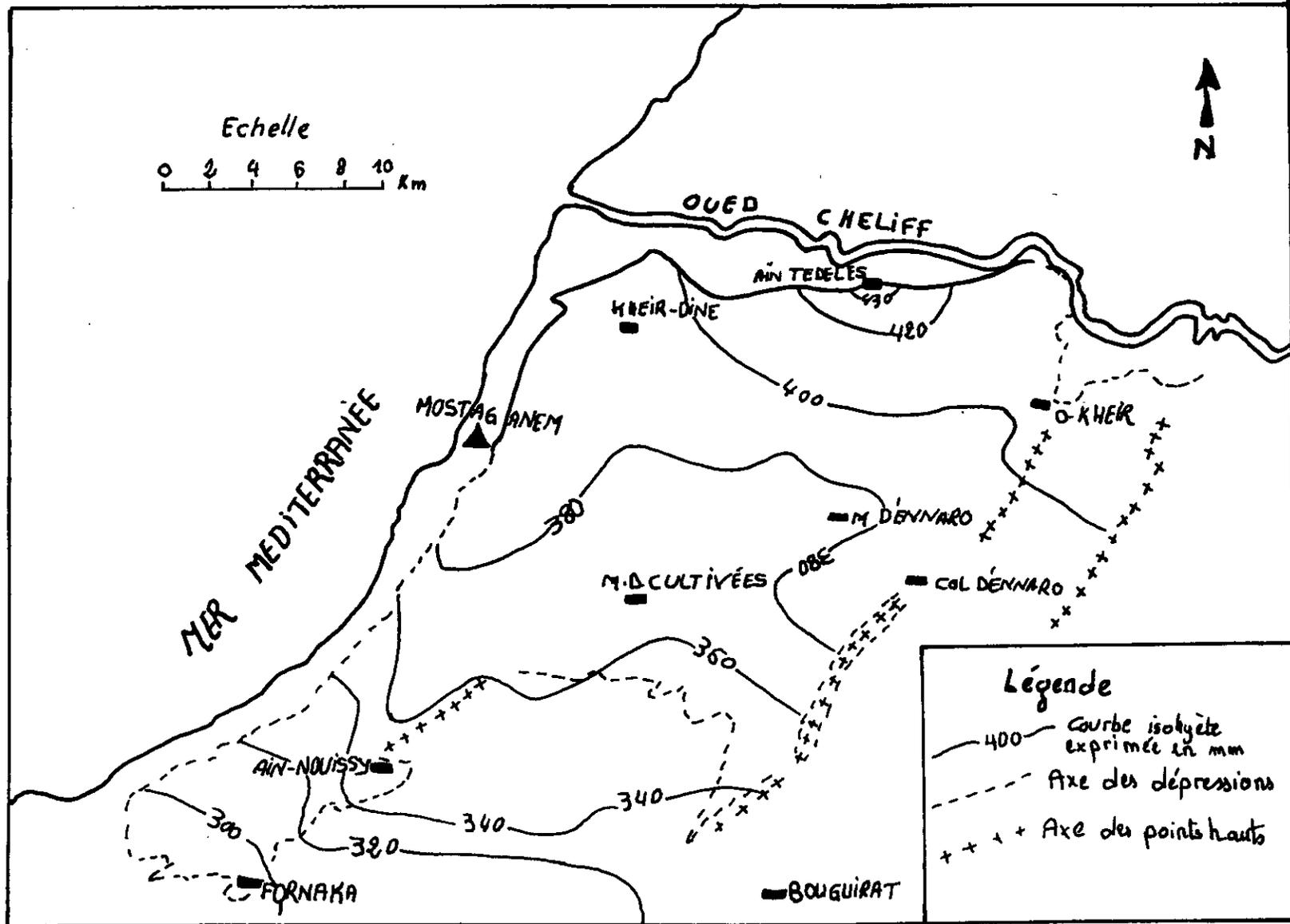


Fig IV. 3:

CARTE DES ISOHYETES (1969-1989)

La lame d'eau totale précipitée est donnée comme suit:

$$Pt = \sum [Pi . Si] / S = Vt / S$$

avec:

Vt : Volume d'eau tombé sur la région (m^3);

S : Surface totale de la région (m^2);

Si : Surface inter-isoyètes (m^2);

Pi : Pluviométrie moyenne dans la surface inter-isoyète considérée (mm).

c- Méthode de Thiessen:

Cette méthode se base sur un découpage géométrique spatial de la surface, et en considérant que chaque pluviomètre est sensé être représentatif d'une zone bien déterminée (*figIV-4*).

La précipitation moyenne sur le bassin versant est la moyenne des précipitations des différents pluviomètres, pondérée par les surfaces des zones d'influence respectives.

La lame d'eau moyenne tombée sur le bassin est déterminée par la relation suivante:

$$Pt = \sum [Pi . Si] / S = .Vt / S$$

avec:

Vt : Volume total d'eau tombé sur le bassin (m^3);

S : Surface totale du plateau (m^2);

Pi : Précipitation au centre du polygone considéré (mm);

Si : Surface du polygone (m^2).

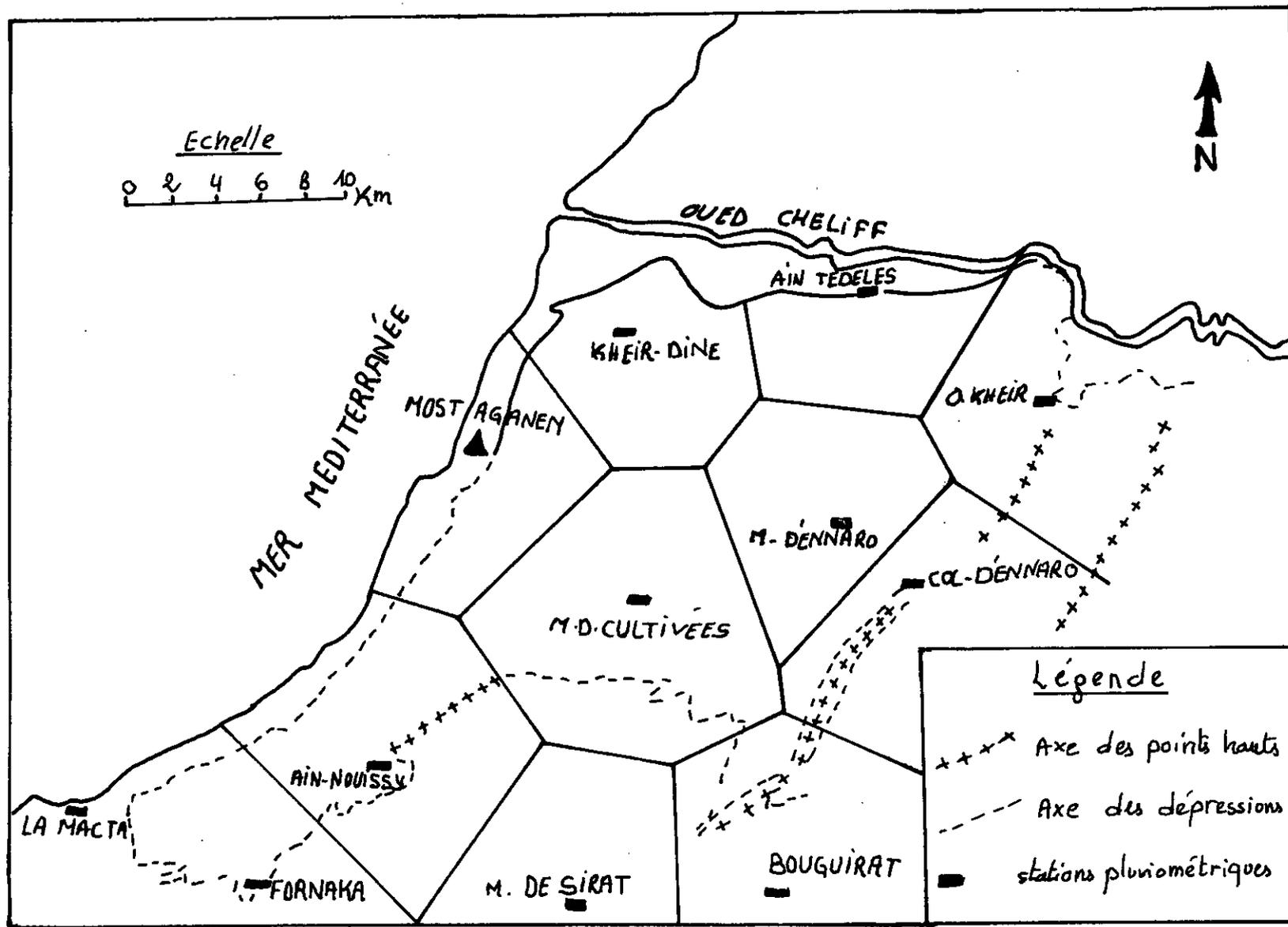


Fig: IV.4 Découpage du plateau de Mostaganem par la méthode de THIESSEN pour la détermination de la lame d'eau moyenne précipitée période (1969-1989)

d- Volume et lame d'eau tombés sur le plateau:

Les tableaux (*Tableau IV-6*) et (*Tableau IV-7*) montrent les étapes de calcul des précipitations tombées sur le plateau de Mostaganem. Les résultats obtenus par les méthodes des isoyètes et de Thiessen montrent que le volume moyen précipité est de ($229.10^6 m^3$), correspondant à une lame d'eau de ($379 mm$), et ce pour la période ($1969-1989$).

Tableau IV-6: Evaluation du volume et de la lame d'eau tombée sur le plateau de Mostaganem (1969-1989) par la méthode des polygones de Thiessen

Stations pluviométriques	Surface du polygone ($10^6 m^2$)	Pluviométrie moyenne annuelle (m)	Volume d'eau ($10^6 m^3$)
Mostaganem	43.492	0.393	17.092
Ain-Nouissy	55.161	0.354	19.527
M.D.cultivées	113.179	0.366	41.423
Ain-Tedlès	51.571	0.431	22.227
Marais D'Ennaro	80.376	0.376	30.221
Kheir Dine	65.443	0.392	25.653
Oued Kheir	90.331	0.402	36.313
Fornaka	37.699	0.299	11.272
Bouguerat	13.137	0.327	4.296
Col D'Ennaro	43.329	0.377	16.335
Total	593.712		224.359
Hauteur moyenne des précipitations (m)			0.378

Tableau IV-7: Evaluation du volume et de la lame d'eau tombée sur le plateau de Mostaganem (1969-1989) par la méthode des isoyètes

Limites des isoyètes	Pluviométrie inter- isoyètes (m)	Surface inter-isoyètes ($10^6 m^2$)	Volume d'eau ($10^6 m^3$)
300≤	0.300	17.380	5.214
300-320	0.310	22.644	6.829
320-340	0.330	16.891	5.574
340-360	0.350	42.513	14.879
360-380	0.370	165.403	61.199
380-400	0.390	214.934	83.824
400-420	0.410	113.587	46.570
420-440	0.430	11.913	5.122
Total		605.268	229.215
Hauteur moyenne des précipitations (m)			0.379

e- Discussion des résultats:

Le tableau (*Tableau IV-8*) regroupe les résultats obtenus par les trois méthodes.

Tableau IV-8: Tableau récapitulatif des valeurs obtenues par les trois méthodes

<i>Méthodes</i>	<i>Arithmétique</i>	<i>Thiessen</i>	<i>Isoyètes</i>
<i>Précipitations moyennes (mm)</i>	371.43	378.00	379.00

La hauteur moyenne annuelle des précipitations déterminée par les méthodes de Thiessen et des isoyètes sera retenue pour le calcul du bilan hydrologique.

IV-2-3- Température:

La température constitue avec les précipitations les éléments majeurs qui régissent le climat d'une région.

Pour notre secteur, seule la station de Mostaganem qui a fonctionné durant un temps suffisamment long pour y être prise en compte.

Les mesures enregistrés portent sur trois périodes:

- Période 1913-1936 (*SELTZER*)
- Période 1943-1962 valeurs moyennes mensuelles (*OMN*)
- Période 1966-1981 (*ITA*)

Le tableau (*Tableau IV-9*) montre les moyennes mensuelles des trois périodes à cette station.

**Tableau IV-9: Températures moyennes mensuelles
à la station de Mostaganem**

Mois Période	Ja	F	Ms	Av	M	Ju	Jt	Ao	S	O	N	D	Moye nne
1913- 1936	12.45	13.25	14.40	16.15	18.5	21.65	24.10	24.90	23.15	20.10	16.30	13.45	18.2
1943- 1962	12.79	12.97	14.93	16.70	19.33	22.46	23.35	25.81	23.95	20.07	16.72	13.72	18.56
1966- 1981	11.87	12.45	13.26	15.07	17.78	20.84	23.96	25.01	22.70	19.06	15.45	12.58	17.50

Les résultats obtenus pour les périodes 1913-1981 et 1969-1989 à la station de Mostaganem, se résument dans le **Tableau IV-10** :

**Tableau IV-10: Températures moyennes mensuelles à la station
de Mostaganem (1913-1981), (1969-1989)**

Mois Période	J	F	Ms	Av	M	Ju	Jt	Ao	S	O	N	D	moy enne
1913- 1981	12.23	12.71	14.09	15.89	18.56	21.65	24.08	25.41	23.32	19.56	16.09	13.20	18.07
1969- 1989	11.80	12.40	13.20	15.00	17.70	20.80	23.90	25.00	22.70	19.00	15.40	12.50	17.45

IV-2-4- Evaporation ou déficit d'écoulement:

L'évapotranspiration englobe les phénomènes thermodynamiques (*évaporation*) et les phénomènes biodynamiques (*transpiration*).

Elle représente la quantité d'eau qui est restituée à l'atmosphère sous forme de vapeur. On distingue une évapotranspiration potentielle (*ETP*) qui se calcule indépendamment de la pluviosité pour des surfaces évaporantes convenablement alimentées en eau, et une évapotranspiration réelle (*ETR*) qui tient compte de la lame d'eau précipitée; celle-ci est inférieure ou égale à l'*ETP* qui correspond à une restitution hydrique maximale à l'atmosphère.

IV-4-2-1- Evapotranspiration potentielle:

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

○- Méthode de THORNTHWAITE:

$$ETP = 1.6 (10 T / I)^a$$

avec:

$$I = \sum i_n \quad ; \quad i = (T/5)^{1.514}$$

$$a = 0.492 + 1.79 \cdot 10^{-2} i - 7.71 \cdot 10^{-5} i^2 + 6.75 \cdot 10^{-7} i^3$$

ETP : Evapotranspiration potentielle en *mm*;

I : Indice thermique annuel;

i : Indice thermique mensuel;

T : Température moyenne mensuelle du mois considéré en °C

$$ETP_c = ETP_{\text{corrigée}} = \textcircled{K} ETP$$

où :

K est un paramètre de corrélation.

Les résultats de l'**ETP** mensuelle obtenus par la méthode de **Thornthwaite** sont portés dans le **Tableau IV-11**:

Tableau IV-11 : Calcul de l'ETP par la formule de C.W Thornthwaite

Périodes		1913-1981			1969-1989		
Mois	K_w	T°	ETP	ETPc	T°	ETP	ETPc
Ja	0.87	12.33	31.40	27.30	11.80	31.00	26.90
F	0.85	12.71	33.20	28.20	12.40	33.90	28.80
Ms	1.03	14.09	40.30	41.50	13.20	37.90	39.00
Av	1.10	15.89	50.50	55.50	15.00	47.80	52.60
M	1.21	18.56	67.50	81.60	17.70	64.40	77.90
Ju	1.22	21.65	90.00	109.80	20.80	86.10	105.00
Jt	1.24	24.08	109.90	136.20	23.90	110.50	137.00
Ao	1.16	25.41	121.50	140.90	25.00	119.90	139.70
S	1.03	23.32	103.50	106.60	22.70	100.7	103.70
O	0.97	19.50	74.50	72.20	19.00	73.10	70.90
N	0.85	16.09	51.30	43.90	15.40	50.10	42.60
D	0.84	13.20	35.70	29.90	12.50	34.40	28.90
ETPc(mm/an)			873.60			852.30	

IV-2-4-2- Evaporation réelle:

L'estimation de la lame d'eau évaporée, se fait couramment à l'aide des formules empiriques et des diagrammes élaborés par *Turc* et *Coutagne*.

Ces formules et diagrammes font intervenir des paramètres faciles à quantifier comme la température et la pluviométrie.

a- Formule de Turc:

$$ETR = P / [0.9 + P^2 / L^2]^{1/2}$$

avec:

ETR : Evapotranspiration réelle (*mm*);

P : Précipitation moyenne annuelle (*mm*);

L : Pouvoir évaporant avec $L = 300 + 25 T + 0.05 T^3$;

T : Température moyenne annuelle ($^\circ\text{C}$).

L'application de la relation de *Turc* donne les résultats résumés dans le *Tableau IV-12*:

Tableau IV-12: Calcul de l'ETR à la station de Mostaganem

Périodes	T°	P(mm)	ETR(mm)
1913-1981	18.07	399.00	390.00
1969-1989	17.45	379.00	371.00

On remarque que l'ETR, obtenus par l'application de la formule de *Turc*, sont proches des précipitations, alors que le ruissellement et l'infiltration sont très faibles, ce qui explique la limite d'application de cette méthode.

b- Méthode de Coutagne:

Le déficit d'écoulement, dans cette formule, est déduit à partir de la hauteur moyenne des précipitations et de la température moyenne annuelle.

$$D = P - \lambda P^2$$

avec:

D : Déficit d'écoulement (*m*);

P : Précipitation moyenne (*m*);

T : Température moyenne annuelle (°C).

Le paramètre λ a pour expression :

$$\lambda = 1 / [0.8 + 0.14 T]$$

La méthode n'est applicable que pour *P* comprise entre $1 / 8\lambda$ et $1 / 2\lambda$.

Les résultats sont récapitulés dans le *Tableau IV-13*:

Tableau IV-13: Calcul de l'ETR par la méthode de Coutagne

Périodes	T°	P(mm)	Limites d'application	λ	ETR (mm)
1913-1981	18.07	399.00	0.41-1.66	0.30	351.00
1969-1989	17.45	379.00	0.41-1.66	0.30	336.00

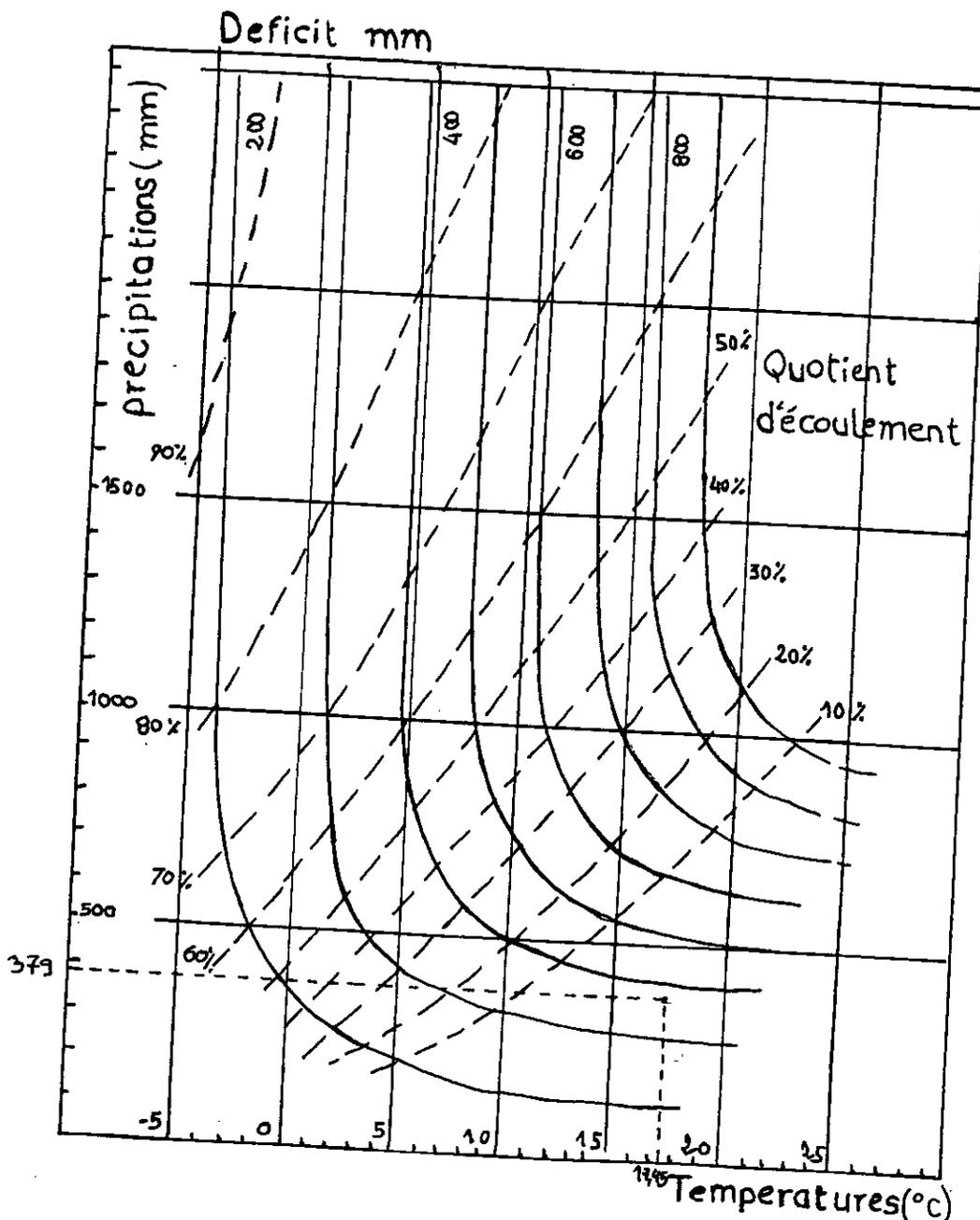
Comme la condition d'application de la formule de *Coutagne* n'étant pas satisfaite (*P* n'est pas comprise entre $1 / 8\lambda$ et $1 / 2\lambda$), il est donc difficile de se fier aux résultats obtenus par cette méthode.

c- Méthode de Wundt:

C'est une méthode graphique qui donne le déficit d'écoulement en fonction de la température et des précipitations *figIV-5*.

Pour $P = 379 \text{ mm}$ reportée en ordonnée et $T = 17.45 \text{ }^\circ\text{C}$ en abscisse, on obtient un déficit d'écoulement $D = ETR = 370 \text{ mm}$.

figIV-5: Abaque de Wundt modifié par Coutagne



IV-2-4-3- Calcul de l'évapotranspiration selon la méthode du bilan de Thornthwaite:

Pour le calcul de l'*ETR*, selon cette méthode, nous prendrons pour le sol une valeur de la réserve utile de *100mm*, qui correspond à la quantité maximale d'eau que peut retenir ou soustraire à l'écoulement. *TableauIV-14*.

Nous considérons, pour le calcul de l'*ETR*, mois par mois, l'effet de la recharge par les précipitations (*P*) correspondant à chaque mois et la décharge due à l'évapotranspiration potentielle (*ETP*).

*TableauIV-14: Bilan hydrologique d'après C.W Thornthwaite
à la station de Mostaganem (1913-1981)*

Mois	Précipitation moyenne (mm)	ETPc (mm)	Réserve d'eau utile (mm)	ETR (mm)	Déficit (mm)
S	18.95	106.60	0.00	18.95	• 87.65
O	48.50	72.20	0.00	48.50	23.70
N	63.10	43.90	19.20	43.90	-
D	65.80	29.90	55.10	29.90	-
Ja	53.55	27.30	81.35	27.30	-
Fv	39.55	28.20	92.70	28.20	-
Ms	37.60	41.50	88.80	42.50	-
Av	30.05	55.50	63.45	55.50	-
M	30.15	81.60	12.00	81.60	-
Ju	7.90	109.80	0.00	19.90	89.90
Jt	0.65	136.20	0.00	0.65	135.55
Ao	3.25	140.90	0.00	3.25	137.65
Moy annuell	399.00	873.60	-	399.15	-

Nous pouvons distinguer trois cas:

* $P < ETP$: la lame précipitée sera entièrement reprise pour l'*ETR* et les réserves du sol partiellement ou totalement utilisées, jusqu'à épuisement de celle-ci;

* $P = ETP$: la lame précipitée sera entièrement reprise par l'*ETR*, mais les réserves du sol seront conservées;

* $P > ETP$: l'évapotranspiration potentielle est égale à l'évapotranspiration réelle. L'évapotranspiration va se dérouler normalement; mais il reste une certaine quantité d'eau disponible.

($P - ETP$) cet excédent d'eau emmagasiné dans le sol jusqu'à saturation, permet de reconstituer la réserve du sol.

- Discussion des résultats:

Les mois de Septembre à Novembre correspondent au début de l'année hydrologique qui est aussi la période où les réserves d'eau utiles du sol sont épuisées.

Le mois de Décembre est le mois où les précipitations deviennent supérieures à l' ETP .

On remarque aussi que le sol n'arrive pas à la saturation aux mois de Juin à Octobre, les précipitations sont inférieures à l' ETP donc, les réserves du sol s'épuisent et on obtient un déficit en eau.

IV-2-5- Détermination de la lame d'eau ruissellée:

Dans le plateau de Mostaganem, il n'existe pratiquement pas d'Oueds. Ceux qui ont une certaine importance tels: Ain Sefra, l'Ain Hallouf et l'Ain soltan sont pris en compte comme sources et il n'y a aucune relation entre la nappe et l'Oued Chellif qui longe la bordure Nord du plateau.

A cet effet, pour le calcul de la lame d'eau ruissellée, on a adopté la méthode de *Tixeront-Berkaloff* :

$$R = P^3 / 3 (ETP)^2$$

avec:

R : Ruissellement moyen annuel (mm);

P : Précipitation moyenne annuelle (mm);

ETP : Evapotranspiration potentielle annuelle (mm).

Application:

$$P = 379 \text{ mm}$$

$$ETP = 852.3 \text{ mm}$$

$$R = 25 \text{ mm} \quad \text{soit} \quad 6.6\% \text{ des précipitations}$$

IV-2-6- Estimation de l'infiltration:

On déterminera la valeur de la lame infiltrée d'après l'abaque proposée par *Sogetha-Sogreah* (*figIV-6*).

Cette abaque se base sur la perméabilité des terrains géologiques et la lame d'eau précipitée. Ainsi la valeur de la lame d'eau infiltrée est de **16 mm** pour une lame d'eau précipitée de **379 mm** et pour des terrains assez perméables (grès et sables).

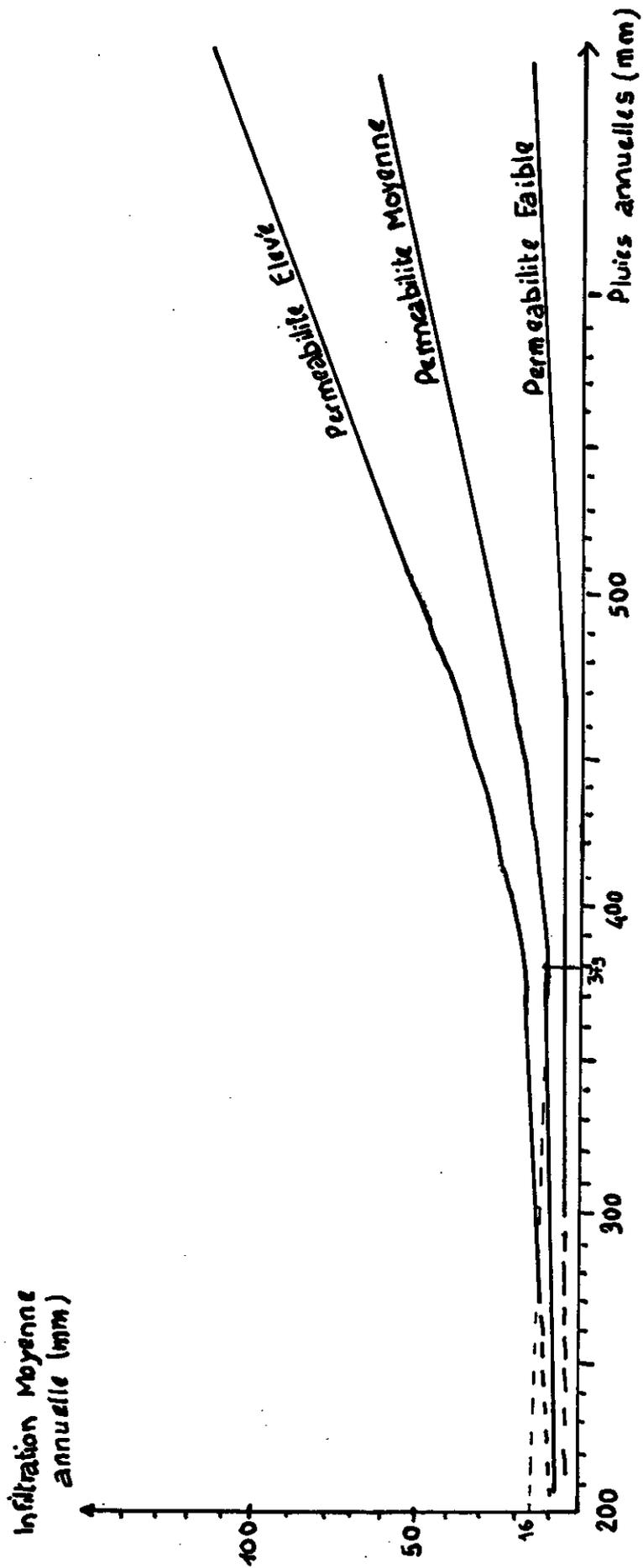


Fig:IV.6 RELATION PLUIE - INFILTRATION (par SOGETHA et SOGREAH)

IV-3- Conclusion:

Caractérisé par des étés chauds et des hivers pluvieux, le plateau de Mostaganem est soumis à un climat semi-aride de type méditerranéen, malgré la proximité de la mer.

La température moyenne à la station de Mostaganem est de 18.07°C pour la période (*1913-1981*).

Le plateau de Mostaganem est caractérisé par une pluviométrie interannuelle faible, la lame d'eau précipitée est de 379 mm pour la période pluvieuse (*1969-1989*). La pluviométrie mensuelle, nous montre qu'il existe une période pluvieuse d'Octobre à Février et une période sèche de Mars à Octobre.

L'évapotranspiration réelle calculée par la méthode de *Turc* pour la station de Mostaganem donne 390 mm pour la période (*1913-1981*) et 383 mm pour la période (*1969-1989*) ainsi toutes les précipitations sont reprises par l'évaporation, ceci montre les limites de cette méthode appliquée dans notre région d'étude.

En effet, il est impossible que le ruissellement et l'infiltration soient nuls, pour les calculer, nous avons utilisé la formule de *Tixeront-Berkaloff* pour le ruissellement et l'abaque de *Sogetha-Sogreah* pour l'infiltration.

Dans ce cas le ruissellement trouvé est de 25 mm soit 6.6% des précipitations et l'infiltration est de 16 mm soit 4.2% des précipitations.

CHAPITRE V

ETUDE

HYDROGEOLOGIQUE

V- Etude hydrogéologique

V-1- Terminologie et grandeurs fondamentales:

V-1-1- Concept du système aquifère:

Un aquifère est une formation géologique où l'eau est abondante et facile à extraire. Le système aquifère est le domaine fini dont toutes les parties sont en liaison hydraulique continue et qui est circonscrit par des limites faisant obstacle à la propagation d'influence appréciable vers l'extérieur, pour une constante de temps donnée (*Castany et Margat 1977*).

La définition insiste sur l'aspect structurel, et on retrouve la notion " *d'élément en relation formant un tout* ".

V-1-2- Nappes souterraines:

Une nappe est la partie saturée en eau d'une couche aquifère.

V-1-2-1- Nappe captive:

Une nappe est dite captive si l'aquifère qui la contient est saturé sur toute son épaisseur. Le toit de l'aquifère constitue la limite supérieure d'une telle nappe, où la pression de l'eau est supérieure à la pression atmosphérique.

V-1-2-2- Nappe libre:

Une nappe est dite libre si l'aquifère qui la contient n'est pas saturé sur toute son épaisseur; le toit de l'aquifère se trouve au-dessus de la surface libre de la nappe, laquelle est la pression atmosphérique. (Notre nappe d'étude est libre en grande partie).

V-1-2-3- Nappe monocouche:

C'est une nappe limitée en haut et bas par deux couches imperméables.

V-1-2-4- Nappe multicouche:

Une nappe constituée par la superposition de plusieurs couches aquifères perméables entre les quelles s'intercalent des couches semi-perméables.

V-2- Loi de comportement hydrodynamique:

Le comportement hydrodynamique est expliqué par la notion de potentiel introduite en hydrodynamique souterraine par *Hubbert* en 1940 (*Walton, 1970*). Ce modèle conceptuel est la combinaison du modèle d'écoulement de *Darcy* avec celui de la continuité; la formulation et les hypothèses sont largement décrites dans *G. De Marsily (1986)*.

Loi de Darcy:

Elle fait état de la proportionnalité entre le flux qui traverse un matériau poreux et le gradient hydraulique. La constante de proportionnalité est alors la perméabilité. Formellement sous sa forme tensorielle, elle est notée comme suit:

$$q_i = K_{ij} \, d h / d x_j \quad i, j = 1, 2, 3$$

avec:

q_i : Débit spécifique (LT^{-1});

K_{ij} : Perméabilité (LT^{-1});

h : Charge hydraulique ou potentiel hydraulique (L);

x_j : Coordonnées cartésiennes (L).

La loi de continuité:

La combinaison de cette équation de *Darcy* avec l'équation de continuité qui présente la conservation de la masse du fluide, pour des conditions isothermes et des propriétés homogènes du fluide, abouti à la forme générale de l'équation aux dérivées partielles décrivant le comportement hydrodynamique souterrain:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} + q \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (\text{V-1})$$

avec:

S_s : Coefficient spécifique (L^{-1});

q : Débit par unité de volume du fluide prélevé (ou apporté s'il est négatif) dans le milieu poreux (T^{-1});

t : Temps (T).

Dans la plupart des applications, l'expression tridimensionnelle est réduite à deux dimensions, en considérant que les champs des vitesses selon la composante horizontale, sont nettement plus importantes que selon la composante verticale.

L'intégration est alors faite sur la hauteur saturée de l'aquifère, l'équation devient :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} + Q \quad (\text{V-2})$$

avec:

S : Coefficient d'emmagasinement ($S = S_s b$) (L^0);

T : Transmissivité ($T = K b$) ($L^2 T^{-1}$);

Q : Terme de débit ($Q = q b$) ($L T^{-1}$);

b : Epaisseur saturée de l'aquifère (L);

x, y : Coordonnées cartésiennes horizontales.

Le terme de débit Q représente la quantité d'eau échangée entre le système aquifère et son environnement. Ce débit est sommé sur l'ensemble du domaine, il s'agit donc d'un flux par unité de surface. Il peut être rapporté à une surface (infiltration des précipitations, évaporation, etc...).
Unitaire

Les caractéristiques hydrodynamiques ($T, S \dots$) seront évaluées par des essais de pompage, effectués sur un ensemble de forage.

V-3- Essais de pompage:

Les données des essais de pompage sont recueillies au niveau de *Hydro-Forage-Nord* (Dar-El-Baida) et la *DHW* de Mostaganem.

V-3-1- Essais par palier de débit de courte durée:

Ces essais permettent d'évaluer les caractéristiques du complexe aquifère/ouvrage de captage. Ce sont : le débit critique et le débit maximum d'exploitation.

V-3-1-1- Courbes débit-rabattement:

Pour chaque forage le couple de données, de chaque palier de débits (abattement en *m* et débits en *l/s*), sont portés sur un papier graphique linéaire.

La courbe caractéristique permet de distinguer deux segments différents. Pour les faibles débits on obtient un secteur assimilable à une droite, et pour les forts débits on obtient une parabole. Le point de rupture est le point critique.

Les courbes caractéristiques ont été tracé à partir des essais de pompage effectués sur un ensemble de cinq forages (*fig V-1-a, V-1-b, V-1-c*).

V-3-1-2- Débit critique et débit définitif:

Au cours du pompage, au delà d'une certaine limite, l'écoulement laminaire au voisinage de l'ouvrage devient turbulent, provoquant ainsi l'entraînement des particules fines du terrain, d'où colmatage de la partie captante et ensablement du puits.

Le débit critique est déterminé par le point de rupture de la courbe *Débit-rabattement*.

Le débit définitif représente **60 à 75%** du débit critique.

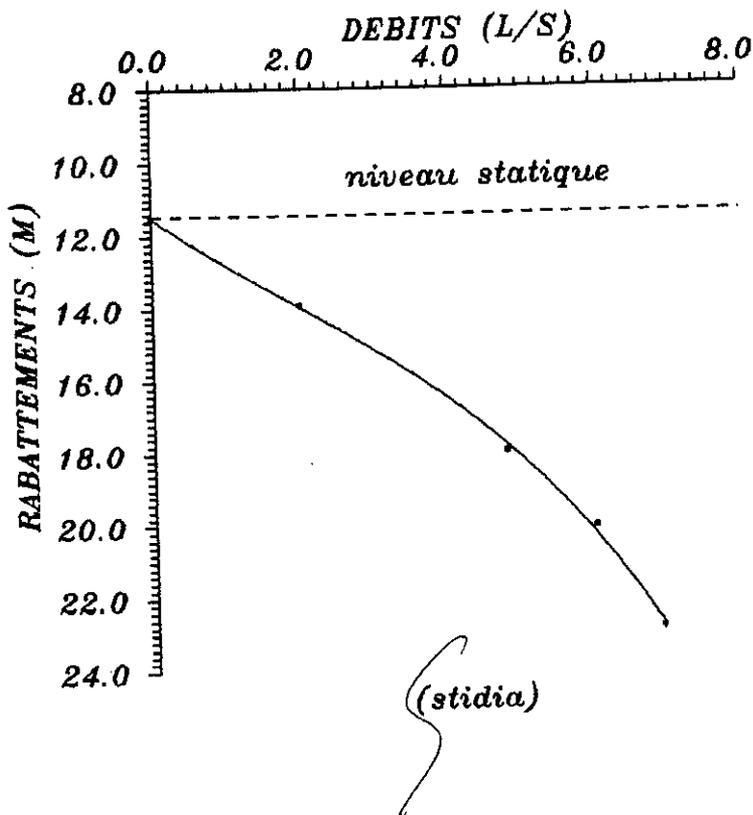
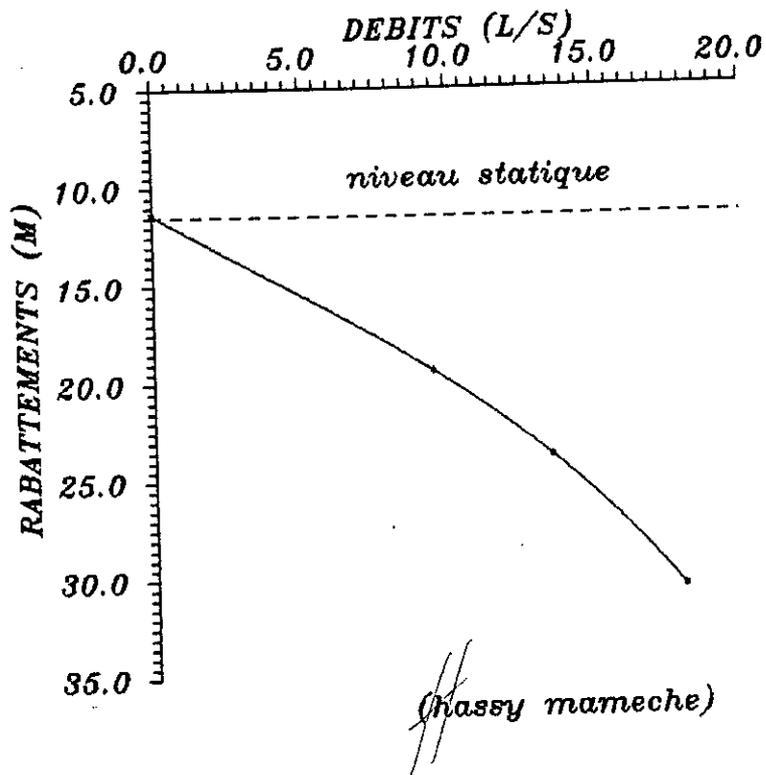


FIG:V-2a COURBES DE DEBITS

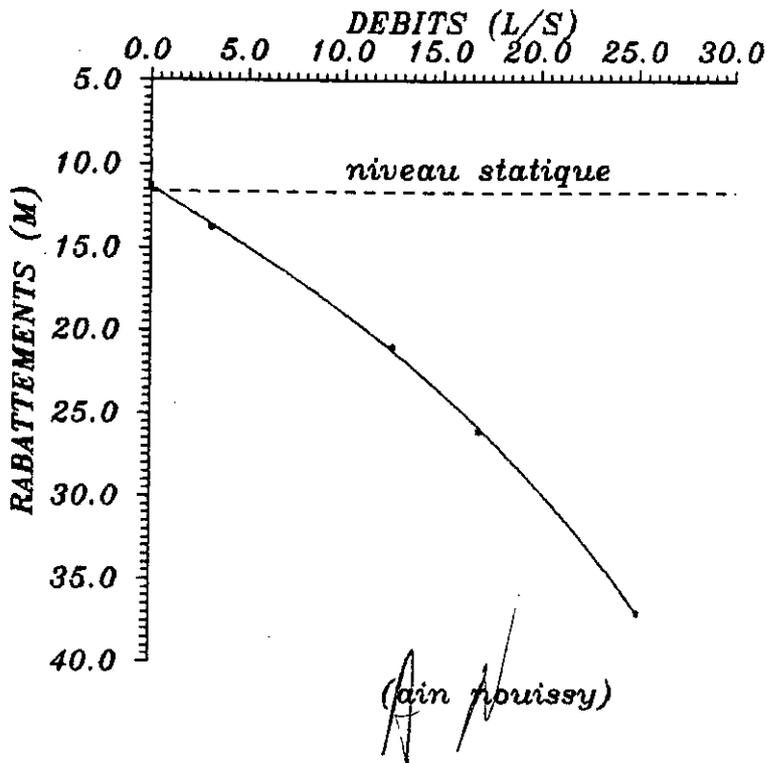
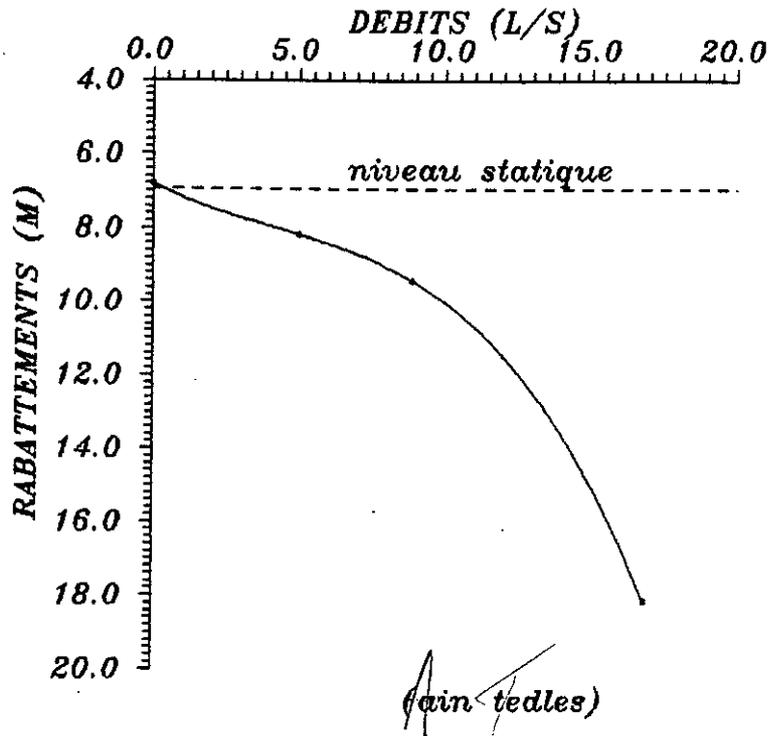


FIG:V-2b COURBES DE DEBITS

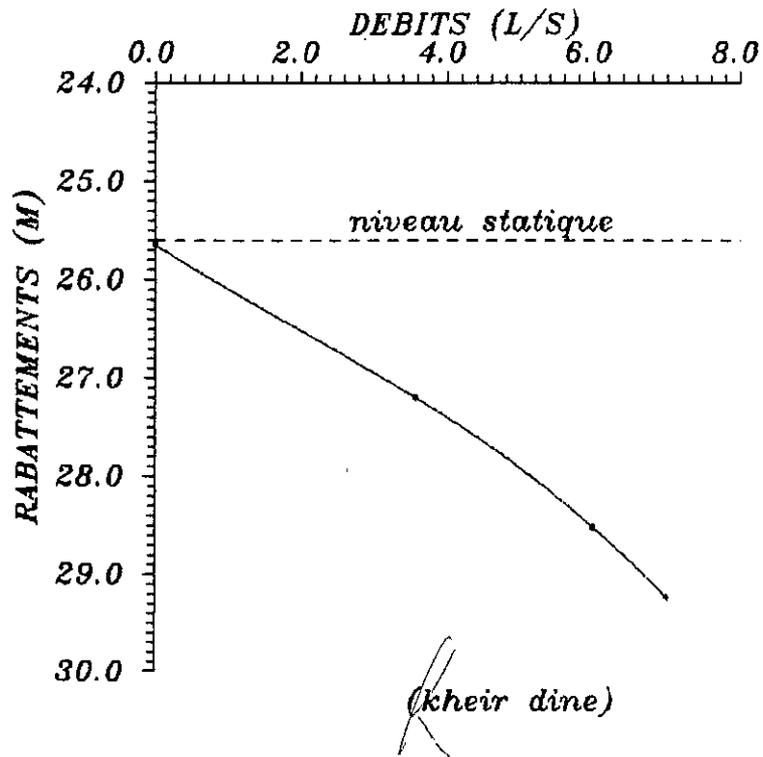


FIG:V-2c COURBES DE DEBITS

Les résultats obtenus pour les cinq forages sont représentés dans le tableau ci-dessous:

Tableau V-1: Valeurs des débits critiques et définitifs

<i>Forages</i>	<i>Coordonnées</i>		<i>Débits critiques (l/s)</i>	<i>Débits définitifs (l/s)</i>
	<i>X(m)</i>	<i>Y(m)</i>		
<i>kheir-Dine</i>	272.14	300.785	6.0	4.20
<i>Stidia</i>	258.80	283.600	5.0	3.50
<i>Ain Tedles</i>	280.30	297.150	7.5	5.04
<i>Ain Nouissy</i>	263.70	279.700	12.5	8.75
<i>Hassi Maameche</i>	263.60	287.950	9.5	6.65

D'après les résultats du *Tableau V-1*, on constate une grande diminution des débits d'exploitation, comparés à ceux qu'on exploitait au début des années 70, et ceci à cause de la surexploitation de la nappe.

V-3-2- Essais de longue durée:

Les pompages d'essai de longue durée sont exécutés par un seul palier de débit, à débit constant, prolongé durant au moins *42 heures*, avec un optimum de *72 heures*.

Ces essais permettent d'estimer les caractéristiques hydrodynamiques (*Transmissivité T (m^2/s) ; perméabilité K (m/s); Coefficient d'emmagasinement s (%)*).

Partant d'une conception nouvelle du comportement hydrodynamique de l'aquifère, *C.V.Theis* (1935) a établi, le premier, les expressions de l'écoulement de l'eau souterraine vers les ouvrages de captage.

Dans un milieu de transmissivité T et de coefficient d'emmagasinement s , l'influence Δ du puits, de débits Q , sur un point situé à la distance r , est donnée par l'expression générale de *C.V.Theis* :

$$\Delta = \frac{Q}{4\pi T} \int_a^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du$$

$$\Delta = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad \text{avec} \quad u = \frac{r^2 S}{4 T t} \quad (V-3)$$

Le terme $W(u)$ est une fonction exponentielle intégrale décroissante, du type $E_1(u)$. C'est la fonction du puits (*Well function*) donnée par des tables:

$$W(u) = -0.577216 - \lg u + u - \frac{u^2}{2.2!} + \frac{u^3}{3.3!} - \frac{u^4}{4.4!} + \dots$$

avec:

Δ : Rabattement mesuré dans un piézomètre (m);

Q : Débit de pompage constant (m^3/s);

T : Transmissivité (m^2/s);

s : Coefficient d'emmagasinement (sans dimension);

t : Temps écoulé, à un instant donné, depuis le début de pompage (s);

r : Distance du piézomètre à l'axe du puits (m).

La résolution numérique de cette expression a été obtenue par *C.E. Jacob (1950)* en deux équations, une pour la descente et une pour la remontée.

V-3-2-1- Equation de la descente:

$$D = \frac{0.183 Q}{T} \lg \frac{2.25 T t}{r^2 S}$$

Cette formule n'est valable que pour des durées de pompage assez longues et des piézomètres pas trop éloignés du puits.

Sur un papier semi-logarithmique, on porte les temps t en abscisses et en ordonnées les rabattements correspondants (*fig: V-2-a, V-2-b, V-2-c*).

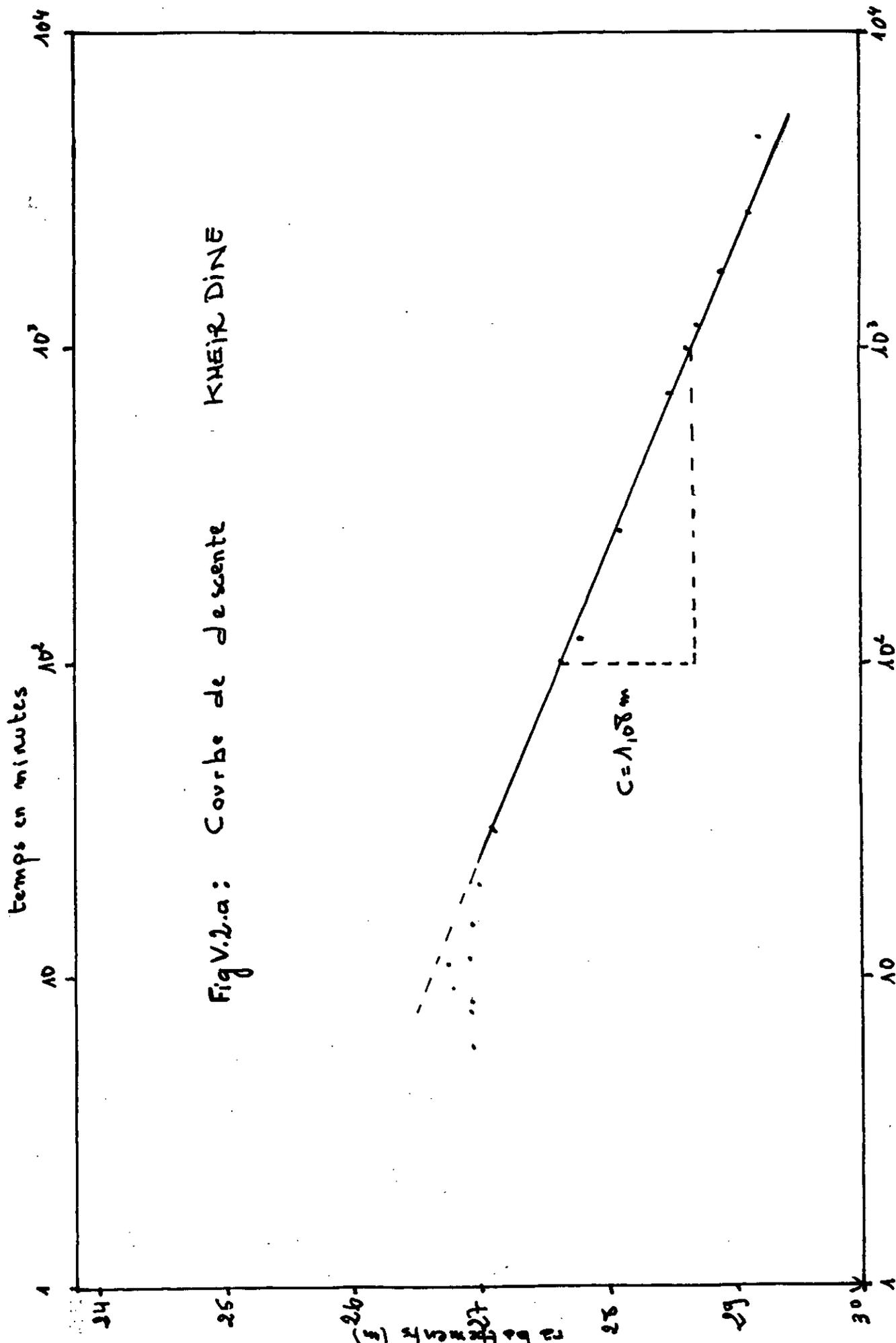
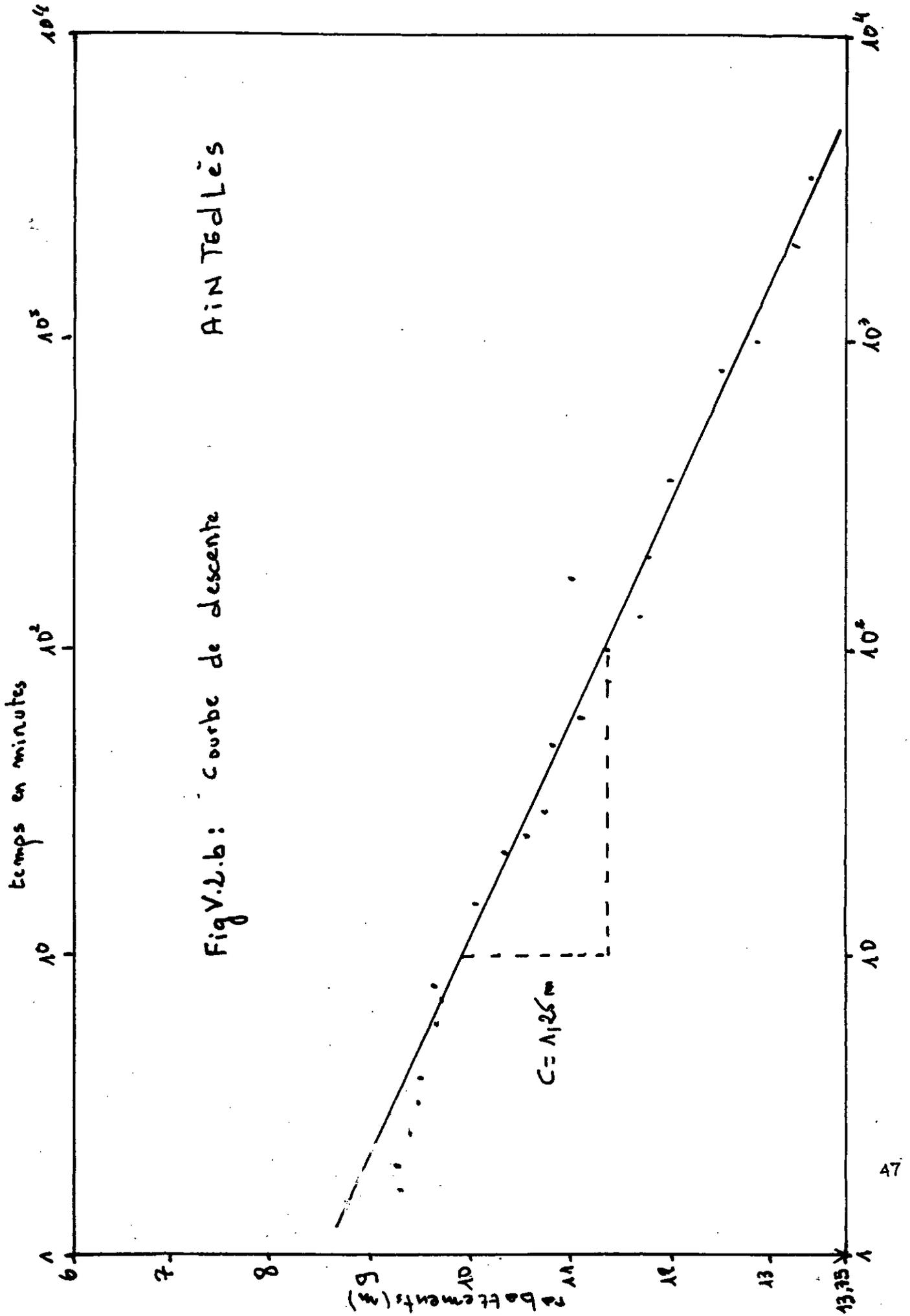
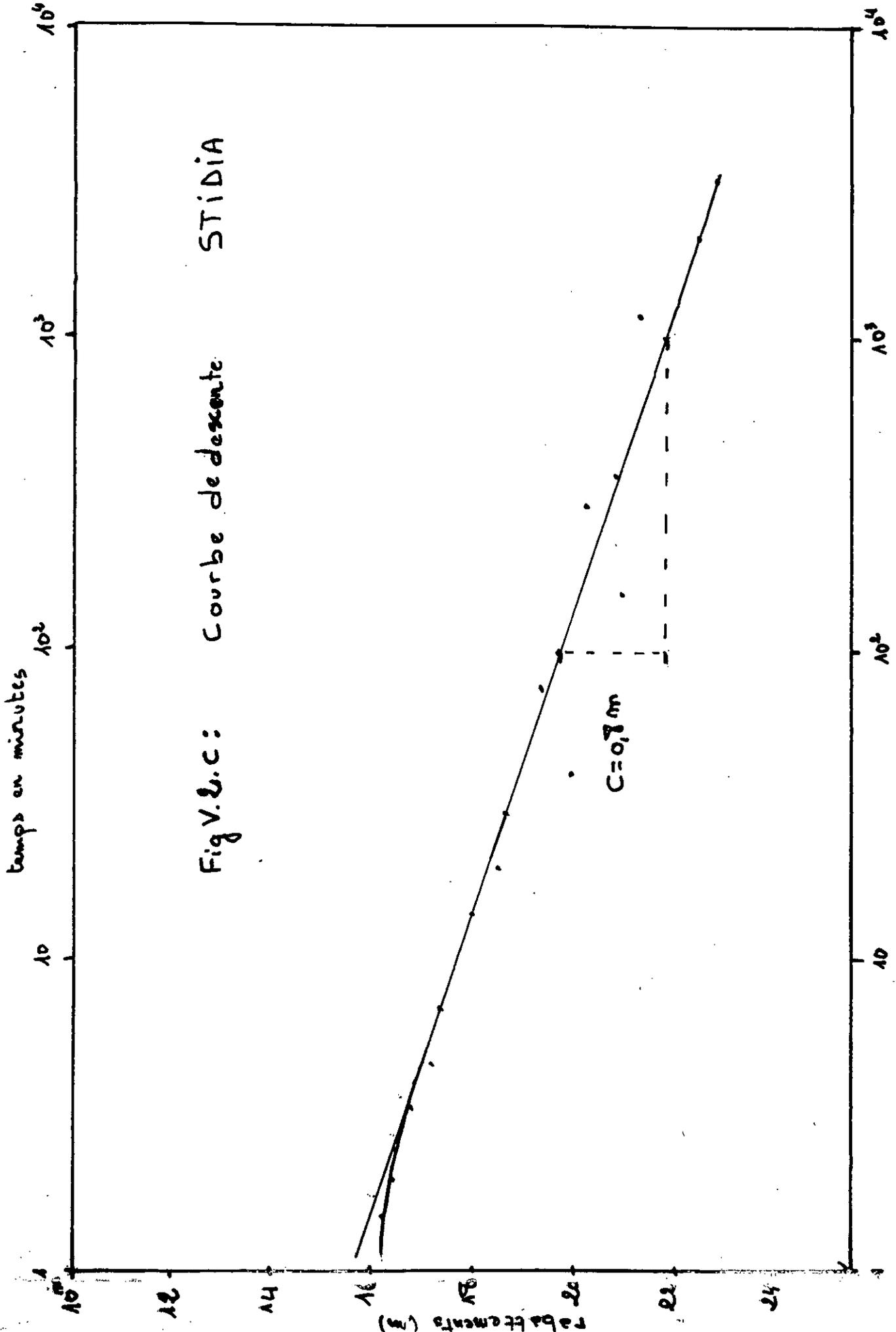


Fig.V.2.a: Courbe de descente KHEIR DINE





la courbe résultante aura pour équation :

$$D = \frac{0.183 Q}{T} \left[\lg 2.25 \frac{T}{r^2 S} + \lg t \right] \quad (V-4)$$

C'est en fait, une équation linéaire de la forme : $y = c x + b$

avec :

c : Pente de la droite représentative de la descente.

Calcul de transmissivité :

Considérons l'accroissement de rabattement, correspondant au module de l'échelle logarithmique des abscisses, c'est à dire correspondant à la différence des abscisses d'une valeur quelconque de t et de sa valeur décuple.

On aura :

$$\operatorname{tg} \alpha = c = 0.183.Q / T$$

d'où :

$$T = 0.183.Q / c$$

Les valeurs des transmissivités obtenues par les essais de pompage de longue durée, effectués sur trois forages, sont récapitulées dans le tableau suivant :

Tableau V-2 : Valeurs des transmissivités pour la descente

Forage	Kheir Dine	Stidia	Ain Tedlès
T ($10^{-3} m^2/s$)	0.71	0.78	0.90

Calcul du coefficient d'emmagasinement :

Le coefficient d'emmagasinement est obtenu simplement à partir du point d'intersection de la droite représentative avec le niveau piézométrique.

C'est à dire:

$$\frac{0.183 Q}{T} \lg 2.25 \frac{T t_0}{S r^2} = 0$$

d'où:

$$\frac{2.25 T t_0}{S r^2} = 1 \quad (V-5)$$

En connaissant T et r on déduit S :

$$S = \frac{2.25 T t_0}{r^2}$$

avec :

t_0 : Temps fictif pour lequel $D = 0$

Mais, vu l'inexistence, actuellement, de piézomètres au voisinage des forages, on a eu recours aux valeurs des coefficients d'emmagasinement déjà calculés pour *J. Gauchez (1973)*.

V-3-2-1-2-Equation de la remontée :

L'équation de la remontée après arrêt de pompage est donnée par :

$$D = \frac{0.183 Q}{T} \lg \frac{t + t'}{t'} \quad (V-6)$$

avec :

D : Rabattement;

t : Temps écoulé depuis le début du pompage;

t' : Temps écoulé depuis l'arrêt du pompage.

La courbe de remontée est tracée sur un papier semi-logarithmique.

Les rabattements sont portés en ordonnées linéaires, la valeur $(t + t') / t'$ en abscisses logarithmiques (*fig V-3-a, V-3-b, V-3-c*)

Seule la transmissivité T peut être calculée dans le cas de la remontée.

Tableau V-3: Valeurs des transmissivités pour la remontée

<i>Forage</i>	<i>Kheir Dine</i>	<i>Stidia</i>	<i>Ain Tedlès</i>
T ($10^{-3} m^2/s$)	0.64	0.80	0.81

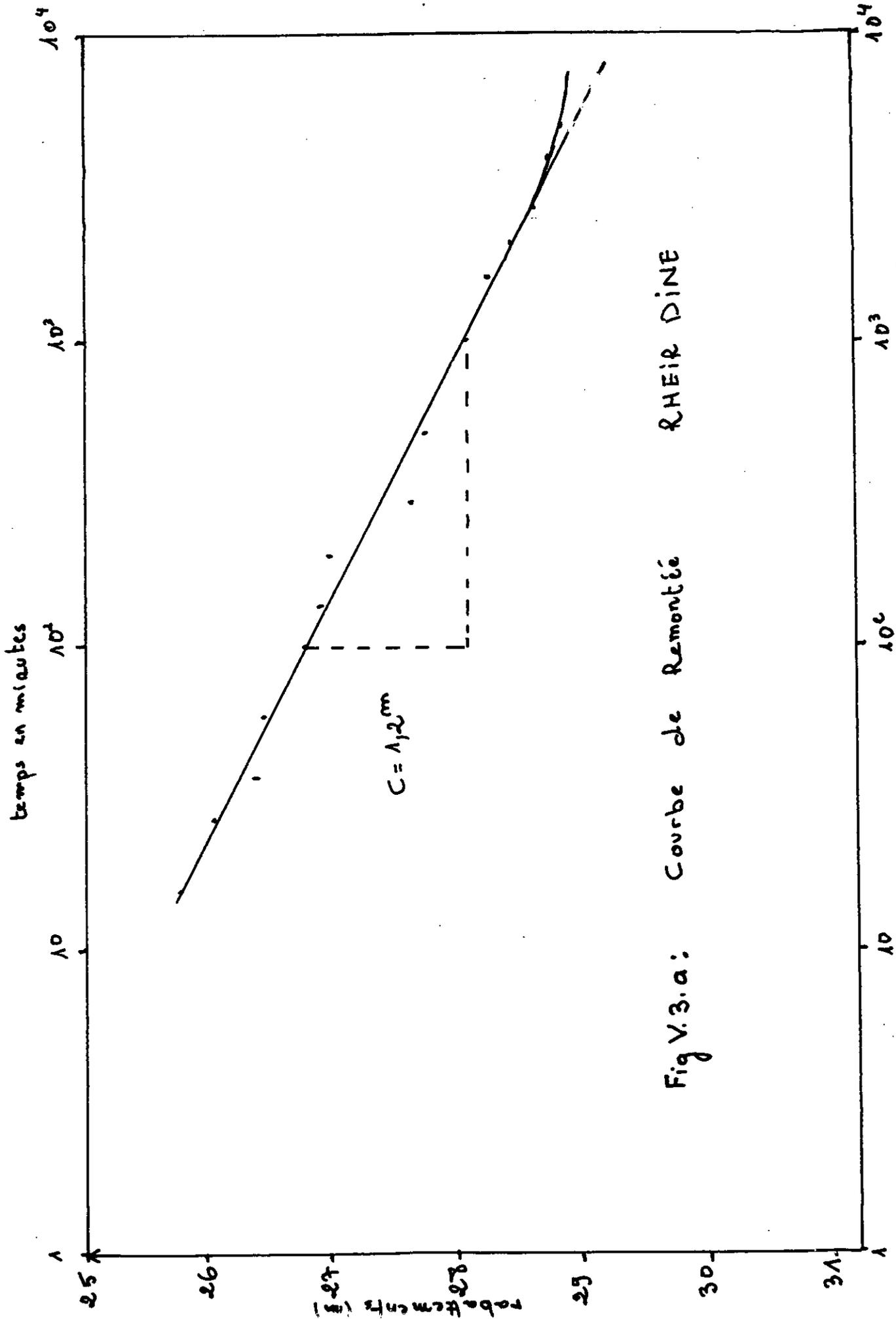
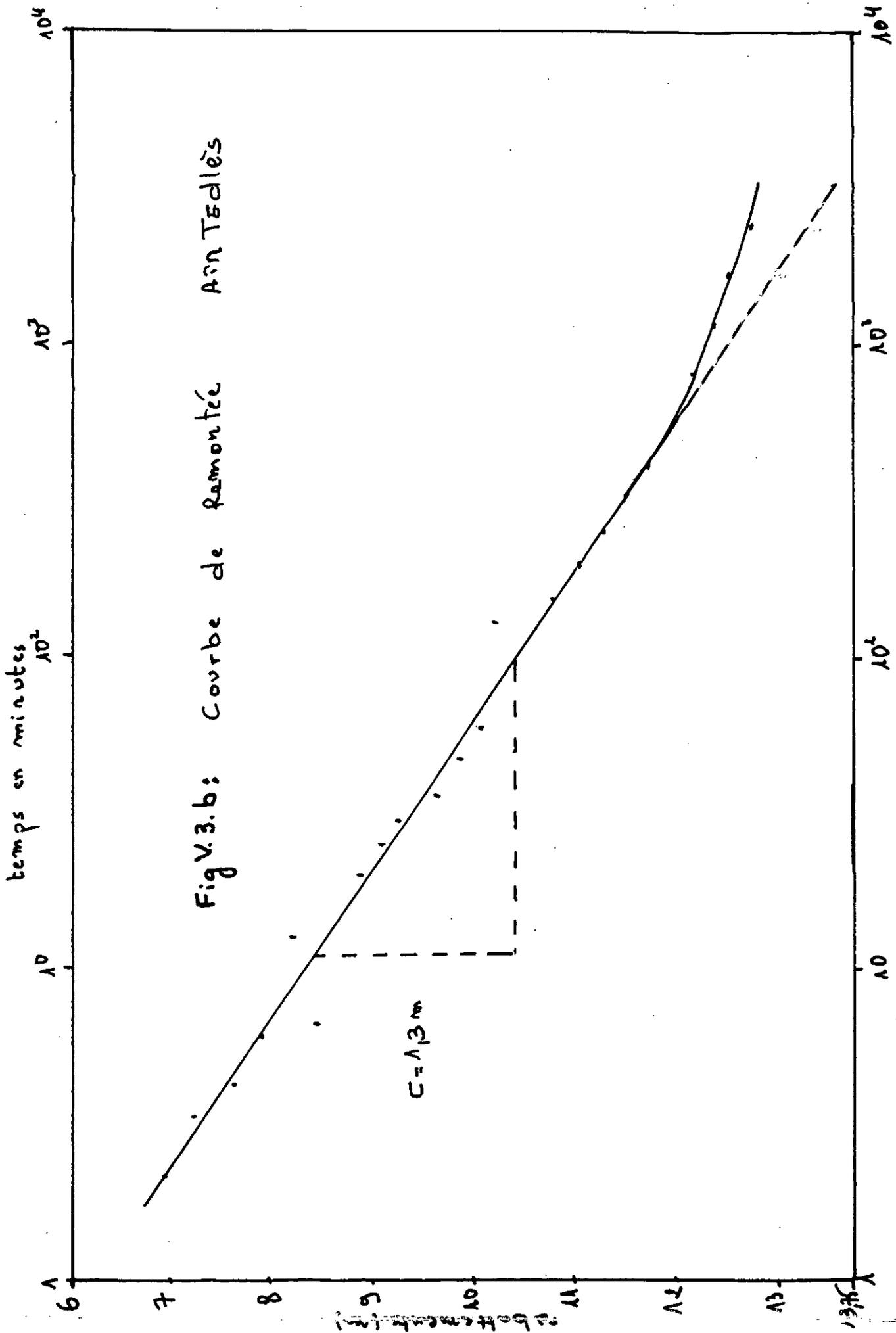
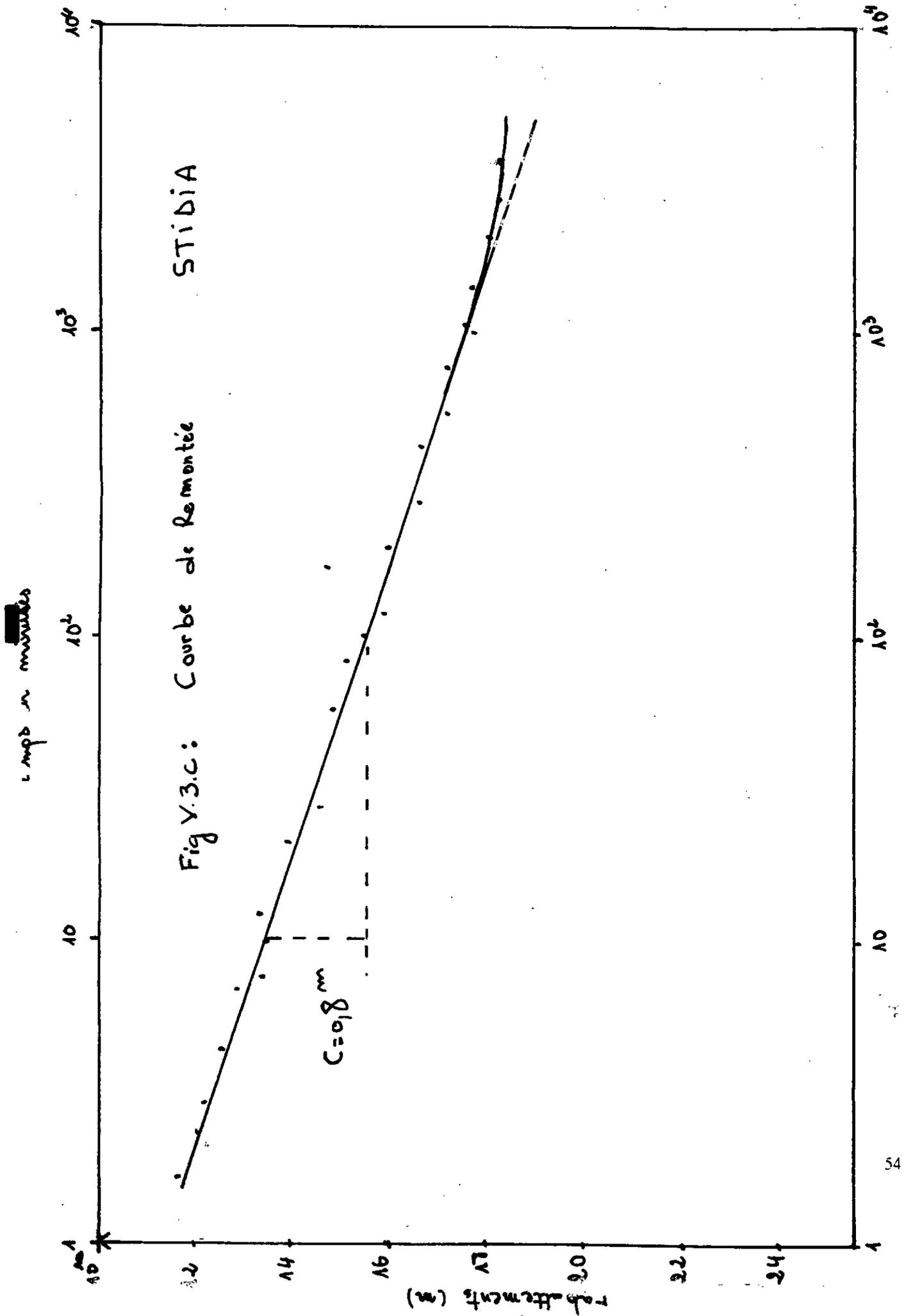


Fig V.3.a: Courbe de Remontée RHEIR DINE





Interprétation:

L'interprétation des résultats des essais de pompage effectués sur les trois forage révèle:

- Pour les courbes de descente, deux phases sont observées, une première phase (courbe), marquée en début de pompage, traduit l'effet de capacité de l'ouvrage, provoquant un écoulement turbulent non linéaire, et une deuxième phase qui est en fait la réponse de la nappe au pompage.
- Pour les courbes de remontée, deux phases sont également observées, la première dite de post production, ou le niveau d'eau remonte rapidement, la deuxième dite normale jusqu'à stabilisation du niveau d'eau.

On voit donc que les valeurs des transmissivités (*remonté ou descente*) trouvées ci-dessus coïncident avec celles obtenues par *J. Gauchez*.

A cet effet, les valeurs des transmissivités et des coefficients d'emmagasinement, sont récapitulées dans le tableau suivant:

Tableau V-4: Valeurs des transmissivités et des coefficients d'emmagasinement

<i>Forages</i>	<i>X(m)</i>	<i>Y(m)</i>	<i>T(m²/s)</i>	<i>s(%)</i>
<i>Kheir Dine</i>	272.14	300.78	0.7 10 ⁻³	12.50
<i>Stidia</i>	258.80	283.60	0.78 10 ⁻³	10.70
<i>Ain Tedles</i>	280.30	297.15	0.91 10 ⁻³	1.50
<i>SK4</i>	288.10	301.40	1.20 10 ⁻³	18.00
<i>Hassi Maameche</i>	263.60	287.95	5.50 10 ⁻³	1.63
<i>194-128</i>	274.05	288.35	3.70 10 ⁻³	0.55
<i>191-128</i>	270.00	295.29	1.30 10 ⁻³	6.70
<i>142-129</i>	277.42	291.87	3.30 10 ⁻³	1.60
<i>154-129</i>	276.80	290.00	5.00 10 ⁻³	16.00
<i>148-129</i>	281.35	291.94	7.30 10 ⁻³	8.60

V-3- Structure et géométrie de l'aquifère:

La région étudiée comporte un substratum marneux imperméable surmonté de grès à passées sableuses ou argilo-sableuses qui contiennent l'aquifère principal.

Les sables surmontent le tout, de faciés et d'épaisseur variable en fonction de leur localisation.

On peut enfin noter la présence d'une croûte calcaréo-gréseuse associée ou non à un sol rouge.

Les formations aquifères présentent des épaisseurs variables; ainsi le calabien peut atteindre une épaisseur de *100 à 120m* dans les dépressions topographiques, alors que sur les bombements du sol la formation n'aura plus que *20 à 30m*.

D'une manière générale, l'épaisseur de cette série va en diminuant selon la direction *E.NE* à *W.SW*.

L'étude géophysique réalisée sur le plateau de Mostaganem montre qu'il existe dans la partie Nord, des zones à basse résistance transversale, et cela peut être en relation avec une remontée du substratum mio-pliocène.

Cet effet est visible au Sud de l'aérodrome entre *Hassi-Ilamèche* et *Stidia* ainsi qu'à l'Est de *Mazagran*.

Donc le fait que le substratum soit en position haute entraîne une réduction de la nappe. A l'inverse dans les zones à forte résistance, le substratum est en position basse et l'aquifère pourra présenter une épaisseur maximale.

V-4- Inventaire des points d'eau:

Le premier inventaire a été réalisé par les équipe de *B.I.R.H (Bureau Inventaire et Recherche hydraulique)* de l'*A.N.R.H d'Alger* en *1970*, puis revu et complété en même temps que l'enquête sur les débits extraits en *Janvier. 1973*.

Au niveau du plateau de Montaganem 274 points d'eau ont été dénombrés dont 201 puits, 16 forages et 57 sources.

V-5- Etude de la piézométrie:

Documents utilisés:

Notre étude s'est basée sur les documents piézométriques suivants:

- Carte piézométrique du début *Octobre 1970* établie par *J. Gauchez*, cette carte sera prise comme carte de référence pour l'élaboration d'un modèle mathématique, (*fig V-4*) .
- Carte piézométrique de *Juin 1990* établie par *A. Baiche*. (*fig V-5*)

V-5-1- Interprétation des cartes piézométriques:

Carte piézométrique de 1970:

La carte piézométrique dressée par *J. Gauchez* en 1970, montre l'existence de sept bassins hydrogéologiques, (*fig V-4*).

Bassin hydrogéologique de l'Oued Séfra:

C'est le bassin le plus important du point de vue superficie. Les axes d'écoulement sont de direction *E-W* et *NE-SW*, convergeant au droit de la ville de Mostaganem.

Bassin hydrogéologique de Mazagran:

L'écoulement se fait suivant la direction *S-N* (*Hassi-Mamèche*) et *SE-NW*, il donne naissance aux sources de Mazagran (*affaissement de substratum*).

Bassin hydrogéologique d'Ouereah-Stidia:

C'est le plus petit des bassins étudiés, il comporte deux sous bassins, celui d'Ouereah et celui de Stidia.

L'écoulement suit les directions *E-W* et *NE-SW* alimentant les sources d'Ouereah et la Stidia.

Bassin hydrogéologique d'Ain-Nouissy:

L'axe principal d'écoulement est de direction *NE-SW*, il aboutit aux sources captées de la distillerie d'Ain Nouissy.

Bassin hydrogéologique de la Macta:

L'axe principal d'écoulement est orienté *NE-SW*.

Bassin hydrogéologique d'Ain Sidi Cherif-Mesra:

L'écoulement est orienté *NE-SW* et aboutit aux sources de Mesra.

Bassin hydrogéologique de Bled Touaria:

L'écoulement se fait du *Nord-Est* vers le *Sud-Ouest* et communique avec la nappe de la plaine des Bordjas.

Carte piézométrique de 1990:

Cette carte a été dressée par *A. Baiche* 1990, elle a conduit à une représentation de bassins hydrogéologiques, proche de celle établie par *J. Gauchez* en 1970, avec des différences dans la configuration. (*fig V-5*)

Baiche considère que le seuil de Djebel-Trek et Toures sépare deux nappes:

- L'une au nord de Djebel Trek et Toures;
- L'autre au sud de celui-ci.

La nappe du Nord de Djebel Trek et Toures:

Cette nappe est subdivisée en cinq bassins hydrogéologiques cités déjà par *J. Gauchez* qui sont:

Bassin de l'Oued Séfra;
Bassin de Mazagran;
Bassin de Stidia-Oureah;
Bassin d'Ain-Nouissy;
Bassin d'Ain Sidi Cherif-Masra.

La nappe du Sud:

Cette nappe serait le prolongement de la nappe du Nord dont la limite est floue, surtout du côté de la Mesra (*pas de point d'eau*).

Elle est subdivisée en deux bassins qui sont:

Bassin de la Macla;
Bassin de Bled Touahria.

D'une manière générale, l'analyse de ces deux cartes piézométriques montre que les zones d'alimentation de ces nappes sont constituées par les différents djebels ou bombement, affectant le plateau de Mostaganem.

Aussi les axes principaux d'écoulement ont des directions divergentes.

La direction NE - SW reste la direction privilégiée, correspondant à la direction des structures du plateau.

Fig: V.5

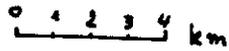
CARTE PIEZOMETRIQUE
DE LA
REGION DE MOSTAGANEM

(d'après A. BATCHE 1990)

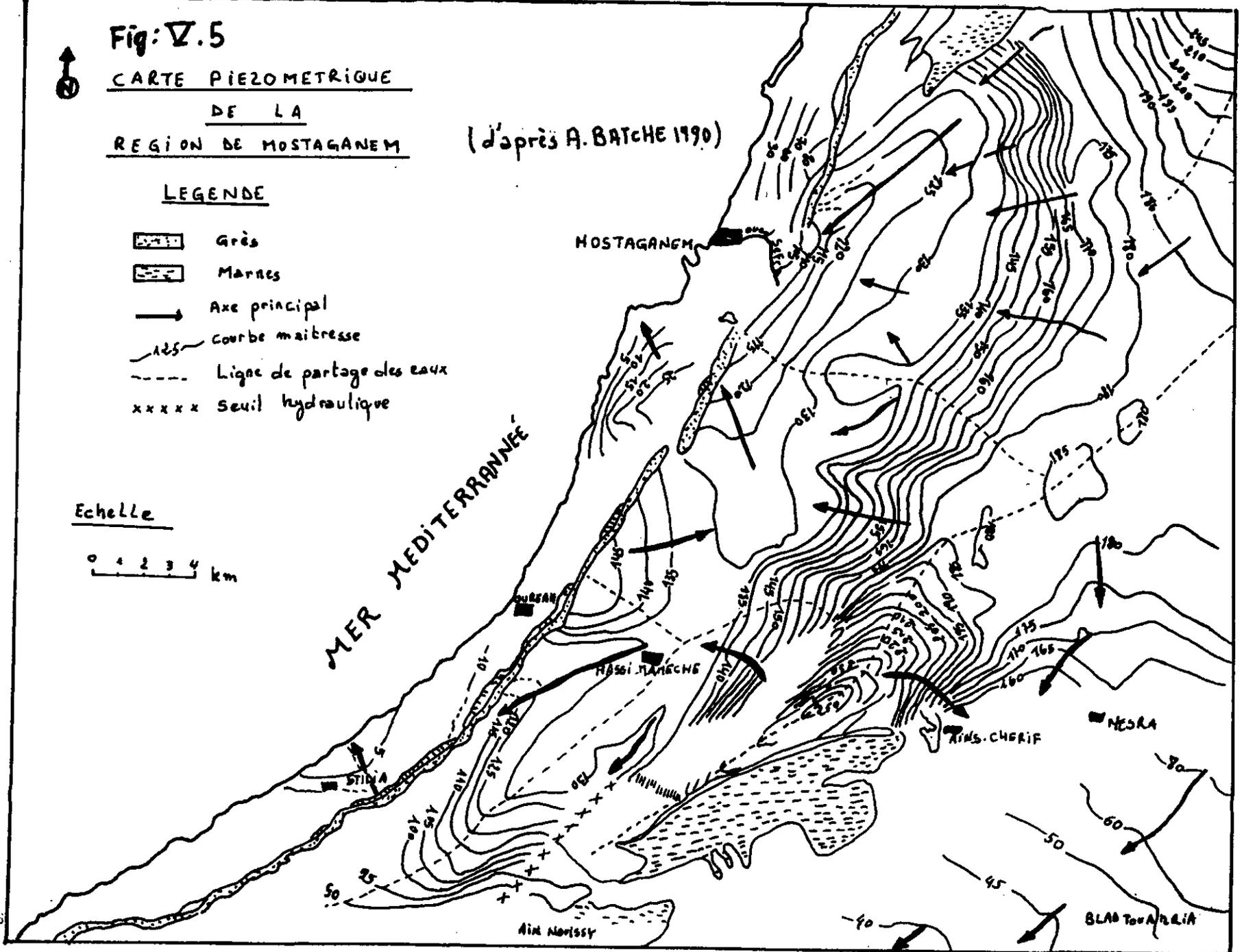
LEGENDE

- Grès
- Marnes
- Axe principal
- courbe maîtresse
- Ligne de partage des eaux
- seuil hydraulique

Echelle



07



V-5-2- Gradient hydraulique:

Le gradient hydraulique est déterminé en fonction de la pente entre les isopièzes, il a été évalué à différents endroits du tableau.

*Tableau V-5: Valeurs du gradient hydraulique
(d'après A.BAICHE 1990)*

Zones	Gradient hydraulique
<i>Bassin de l'Oued Séfra</i>	<i>0.005 -0.025</i>
<i>Bassin de Mazagran de Djijel Trek et Toures</i>	<i>0.025</i>
<i>Au niveau du bombement de Hassi Mamèche</i>	<i>0.010</i>
<i>des sources</i>	<i>0.005</i>
<i>Bassin de Stidia-Oureah</i>	<i>0.010</i>
<i>Bassin d'Ain Nouissy</i>	
<i>- en amont de Trek et Tourès</i>	<i>0.050</i>
<i>- en aval de Trek et Tourès</i>	<i>0.010</i>
<i>Bassin d'Ain Sidi-Cherif</i>	
<i>- Mesra</i>	<i>0.010-0.050</i>
<i>Bassin de Blad Touahria</i>	<i>0.003</i>

V-5-3- Fluctuation de la nappe :

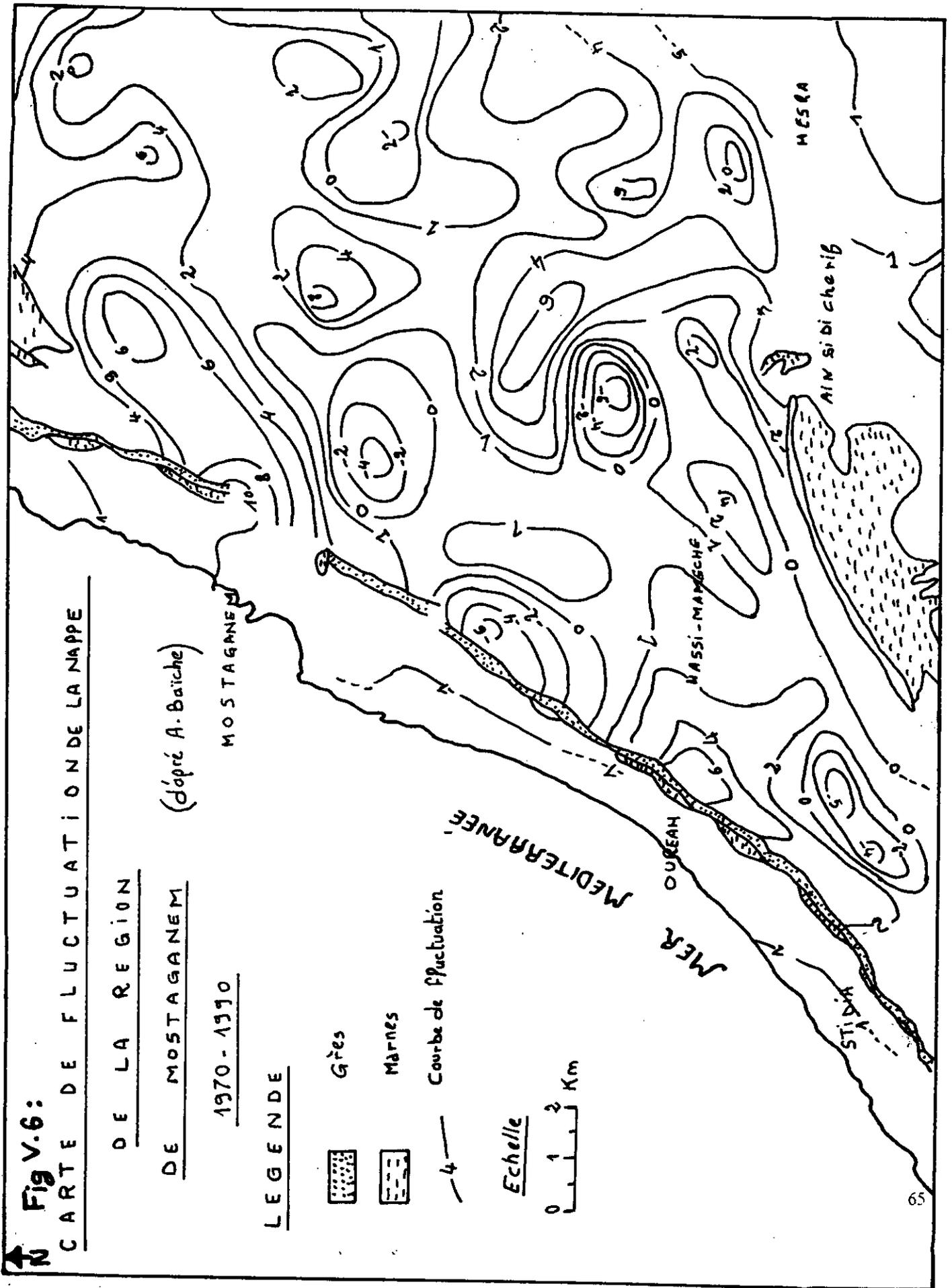
A partir des mesures piézométriques réalisées durant la période allant d'*Octobre 1970 à Juin 1990*, une étude de la fluctuation piézométrique a permis la réalisation d'une carte d'équibattement de la nappe (*fig V-6*).

Durant cette période, la piézométrie accuse une baisse très importante, elle est de l'ordre de *0 à 8m*, et même jusqu'à *11m* en certain endroits (région de Mostaganem).

les baisses les plus importantes se situent dans les zones de pompage et en particulier dans les bassins de l'oued Séfra, Mesra et Sidi Chérif.

D'une manière générale, les baisses se font sentir le long des axes de drainage, le niveau piézométrique est remonté dans quelques zones de faibles étendues qui sont :

- L'aval du bassin de l'Oued Séfra ;
- La bordure Ouest du bassin de Mazagran et à l'amont de ce bassin (Flanc du Djebel Trek et Toures) ;
- Le bassin de bled Touahria.



CHAPITRE VI

MODELISATION

VI- MODELISATION

VI-1- Introduction:

La simulation en Hydrogéologie a été d'une aide considérable pour la compréhension du fonctionnement des systèmes aquifères; ceci grâce à la formulation des modèles basés sur l'approximation numérique, et les développements en informatique, qui ont permis de contracter le temps et l'espace à une échelle plus humaine.

L'approche par simulation (en Hydrologie ou dans tout autre domaine) est heuristique; c'est à partir d'essais et d'erreurs qu'on déduit l'enseignement qui gouvernera le choix du nouvel essai.

C'est par excellence l'approche qu'on peut qualifier de constructive. Son intérêt est net pendant le calage du modèle par rapport à la réalité; on change les paramètres pour voir, les limites, pour voir, etc... .

La simulation par modèle, implique donc, la possibilité de prévoir les conséquences apportées au niveau des prélèvements ou de l'alimentation, donc de disposer d'un moyen de calcul pour effectuer des prévisions fiables.

Les modèles assurent aux hydrologues, rapidité et fiabilité dans toutes les opérations liées à la gestion de l'aquifère notamment dans:

- La quantification des apports et des prélèvements.
- Définition des caractéristiques hydrauliques de l'aquifère.
(Classement et traitement des données)
- Simulation des écoulements.
- Mise en forme des résultats.

VI-2- Différents types de modèles de nappes:

VI-2-1- Les modèles réduits de nappes:

L'idée la plus simple consiste à réaliser un modèle réduit (généralement en sable) pour représenter un aquifère et à faire des mesures sur ce modèle.

Les résultats relatifs à l'aquifère réel sont déduits de ces mesures par des coefficients de similitude.

Ce type de modèles est pratiquement abandonné en hydrogéologie car il est onéreux et très difficile à mettre en oeuvre.

VI-2-2- Les modèles analogiques de nappes:

L'étude mathématique des lois physiques a montré qu'un certain nombre de phénomènes physiques était décrit par des équations similaires, il est donc possible d'étudier un phénomène plus facile à mettre en oeuvre qu'un phénomène hydrodynamique.

Un phénomène des fluides visqueux (entre des plaques) est analogue à un écoulement dans un milieu poreux (dans un aquifère).

Dans les modèles analogiques électriques on a les correspondances:

<i>Modèle électrique</i>	<i>Aquifère</i>
Intensité	Débits (par unité de largeur)
Potentiel	Charge
Conductance	Transmissivité
Capacité d'un conducteur	Coefficient d'emmagasinement

Tous ces modèles analogiques qui étaient employés dans les années 1960-1970 sont maintenant quasiment abandonnés, du fait de leurs coûts élevés.

VI-2-3- Modèles mathématiques maillés:

Etant donné qu'on connaît les lois fondamentales de l'hydrodynamique, on peut au lieu de chercher un phénomène décrit par les mêmes équations, appliquer directement ces équations à tout élément de l'aquifère qu'on considère comme homogène. On peut alors découper par la pensée l'aquifère à étudier en éléments de formes variables (généralement triangulaires), ou bien en petites surfaces (carrées ou rectangles) appelées mailles auxquelles on applique l'une des méthodes suivantes:

VI-2-3-1- Méthode des éléments finis:

Adoptée dès la moitié des années soixante, la méthode des éléments finis représente une technique très performante pour la résolution des problèmes d'écoulement dans les milieux poreux.

Elles s'adoptent à n'importe quelle forme de domaine et à n'importe quelle combinaison des conditions aux limites.

Le principe de cette méthode est la transformation de l'équation aux dérivées partielles en une intégrale comprenant des dérivées du 1^{er} ordre seulement, l'intégration est ensuite faite sur les éléments en lesquels le domaine considéré a été divisé.

La méthode des éléments finis est difficile à programmer car elle nécessite un nombre de données important à introduire et donc une grande capacité de mémoire et un temps de calcul important.

VI-2-3-2- Méthode des différences finies:

Un des principes fondamentaux des méthodes numériques est la réduction d'une équation différentielle à une approximation en terme d'équations algébriques.

Cette réduction remplace l'équation différentielle continue dont l'espace de la solution est généralement infini par un ensemble fini d'équations algébriques dont l'espace de la solution est de dimension finie.

La méthode des différences finies est un moyen par lequel cette réduction peut être faite. Cette méthode est plus facile à programmer que celle des éléments finis. Cependant elle est limitée à l'utilisation des maillages simples carrés ou rectangulaires.

VI-3- Principe des modèles mathématiques:

L'opération aux dérivées partielles de l'écoulement souterrain dans un aquifère en charge, équation (V-2) ramené à deux dimensions s'écrit:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} + q(x, y, t) \quad (\text{VI-1})$$

avec:

T_x, T_y : Composantes de la transmissivité dans les directions x et y ($L^2 T^{-1}$);

h : Charge hydraulique (L);

S : Coefficient d'emmagasinement (sans dimension);

$q(x, y, t)$: Débit volumique (pompage ou injection) par unité de surface (LT^{-1}).

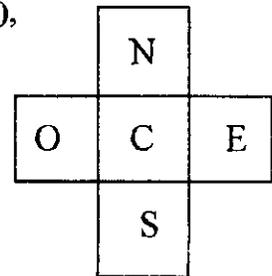
Afin de résoudre l'équation (VI-1) dans le cas d'un aquifère hétérogène possédant des limites irrégulières, on découpe le domaine à étudier en blocs homogènes ou en mailles, à l'intérieur desquels les propriétés de l'aquifère sont supposées uniformes.

Nous considérons le cas de mailles carrées.

Une maille est un élément d'aquifère, qui est caractérisé par une valeur moyenne de:

- Transmissivité T .
- Coefficient d'emmagasinement S .
- Débit prélevé ou injecté Q .
- Infiltration par la pluie efficace Inf .
- Charge : la valeur moyenne dans la maille H .

Pour résoudre l'équation de l'hydrodynamique (VI-1), on considère une maille (la maille centre ou la maille de calcul) et les quatre mailles voisines; Nord(*N*), Sud (*S*), Est (*E*) et Ouest (*O*)



Les dérivées de l'équation (VI-1) sont remplacées par leurs approximations aux différences finies exprimées aux centres des mailles.

Si *N* est le nombre de mailles décrivant l'aquifère, il en résultera *N* équations comportant *N* inconnus représentant les charges hydrauliques *H* aux centres des mailles.

H représente les valeurs *discrètes* de la fonction continue *h* résultant du découpage adapté.

Sur un maillage carré, régulier de coté *a*, et conformément aux notations du schéma, l'équation (VI-1) peut s'écrire:

$$\frac{1}{D_x} \left[\left(T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right)_2 - \left(T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right)_1 \right] + \frac{1}{D_y} \left[\left(T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right)_4 - \left(T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right)_3 \right] = S \frac{\partial h}{\partial t} + q \quad (\text{VI-2})$$

Soit:

$$\frac{1}{a} \left[\left(T_{EC} \frac{H_E - H_C}{a} \right) - \left(T_{OC} \frac{H_C - H_O}{a} \right) \right] + \frac{1}{a} \left[\left(T_{NC} \frac{H_N - H_C}{a} \right) - \left(T_{SC} \frac{H_C - H_S}{a} \right) \right] = S_c \frac{\partial h}{\partial t} + q_c$$

qui peut s'écrire:

$$T_{EC}(H_E - H_C) - T_{OC}(H_C - H_O) + T_{NC}(H_N - H_C) = a^2 S_c \frac{dH_C}{dt} + Q_C \quad (\text{VI-3})$$

avec:

T_{EC} : Transmissivité moyenne entre la maille E et C (de passage);

Q_C : Somme des débits d'injection + l'Infiltration -
le débit pompé.

La transmissivité de passage peut être calculée par trois possibilités:

- La moyenne arithmétique $T = (T_1 + T_2)/2$
- La moyenne géométrique $T = \sqrt{T_1 \times T_2}$
- La moyenne harmonique $T = 2 T_1 T_2 / (T_1 + T_2)$

VI-3-1- Régime permanent:

Dans l'hypothèse d'un état pseudo-stationnaire ou les termes du bilan de flux sont invariants dans le temps, on obtient un système $T \cdot H = A$

avec:

T : Matrice des transmissivités de passage;

H : Vecteur contenant les charges inconnues;

A : Vecteur contenant les valeurs imposées aux limites en charges et en débits.

Pour la résolution de ce système d'équations, deux méthodes peuvent être utilisées:

- *Méthode directe*
- *Méthode itérative*

VI-3-1-1- Méthode directe:

Pour un nombre de mailles, $N < 200$, le système peut être résolu exactement par des algorithmes, d'inversion directe ($H = A T^{-1}$); mais dans le domaine de l'hydrogéologie, c'est rarement le cas. Les modèles de ressources en eau à l'échelle régionale dépassent largement les *1000 mailles*. On a alors recourt aux méthodes itératives de *Gauss-Seidel* permettant une surrelaxation vers une convergence rapide.

VI-3-1-2- Méthode itérative:

Elle consiste à déterminer chaque valeur du vecteur H par une formule itérative à partir d'une approximation initiale H_0 . La méthode est convergente si H_n^2 tend vers H_n quand n (numéro de l'itération) croit. La vitesse de convergence dépend de la formule d'itération des coefficients de H dans la formule du choix de l'approximation initiale.

Parmi ces méthodes nous citerons la méthode de *Jacobi*, *Gauss-Seidel* et la méthode de relaxation, etc ...

Vu que la taille de la matrice est trop importante ($n > 400$), nous avons opté pour la méthode de *Gauss-Seidel* avec surrelaxation par points.

VI-3-1-2-1- Méthode de Gauss-Seidel

Le principe de la méthode est le suivant: Dès qu'on a calculé une nouvelle valeur de H , on s'en sert immédiatement pour l'itération encours.

La matrice des transmissivités T est décomposée en :

$$T = (D - L) U = M - N \quad (\text{VI-4})$$

avec:

D : Matrice diagonale
 L : Matrice triangulaire
 U : Matrice supérieur

Dans la méthode itérative le système s'écrit comme suit :

$$[T_1] [H_1] = [A_1] \quad T_1 H_1 = A_1$$

$$[(D - L) - U] H_1 = A_1$$

$$(D - L) H_1^{(k+1)} = U H_1^{(k)} + A_1$$

Soit:

$$D H_1^{(k+1)} - L H_1^{(k+1)} = U H_1^{(k)} + A_1$$

$$D H_1^{(k+1)} = L H_1^{(k+1)} + U H_1^{(k)} + A_1$$

$$H_1^{(k+1)} = D^{-1} L H_1^{(k+1)} + D^{-1} U H_1^{(k)} + D^{-1} A_1$$

qui peut s'écrire sous forme développée :

$$H_1^{(k+1)} = [A_1 - T_{12} H_2^{(k)} - T_{13} H_3^{(k)} - \dots - T_{1n} H_n^{(k)}] / T_{11}$$

$$H_2^{(k+1)} = [A_2 - T_{21} H_1^{(k+1)} - T_{23} H_3^{(k)} - \dots - T_{2n} H_n^{(k)}] / T_{22} \quad (\text{VI-5})$$

.

$$H_n^{(k+1)} = [A_n - T_{n1} H_1^{(k+1)} - T_{n2} H_2^{(k+1)} - \dots - T_{n, n-1} H_{n-1}^{(k+1)}] / T_{nn}$$

En résumé, l'algorithme de *Gauss-Seidel* se formule :

$$H_i^{(k+1)} = [A_i - \sum_{j=1}^{i-1} T_{ij} H_j^{(k+1)} - \sum_{j=i+1}^n T_{ij} H_j^{(k)}] / T_{ii} \quad (\text{VI-6})$$

VI-3-1-2-2- La surrelaxation:

Dans la méthode itérative, il est intéressant de réduire le nombre de sauts successifs de H_0 vers H_n en multipliant la correction ($H - H_0$) par un coefficient approprié; on peut ainsi accélérer la convergence de H_0 vers H_n . Ce coefficient s'appelle : *Coefficient de relaxation*.

Le vecteur $H(K+1)$ estimé à l'itération $(K+1)$ par la méthode de surrelaxation est :

$$H^{(k+1)} = H^k + R (H^{(k+1)} - H^{(k)}) \quad (\text{VI-7})$$

où $H^{(k+1)}$ est le vecteur estimé par la méthode de *Gauss-Seidel*.

L'équation (VI-6) nous permet alors d'écrire:

$$H_i^{(k+1)} = H_i^k + R \left[\frac{A_i - \sum_{j=1}^{i-1} T_{ij} H_j^{(k+1)} - \sum_{j=i+1}^n T_{ij} H_j^k}{T_{ii}} - H_i^{(k)} \right] ; \quad i = 1, n$$

Soit:

$$H_i^{(k+1)} = H_i^k + \frac{R}{T_{ii}} \left[A_i - \sum_{j=1}^{i-1} T_{ij} H_j^{(k+1)} - \sum_{j=i+1}^n T_{ij} H_j^k - T_{ii} H_i^{(k)} \right] ; \quad i = 1, n$$

où

$$H_i^{(k+1)} = H_i^k + \frac{R}{T_{ii}} \left[A_i - \sum_{j=1}^{i-1} T_{ij} H_j^{(k+1)} - \sum_{j=i+1}^n T_{ij} H_j^k \right] ; \quad i = 1, n \quad (\text{VI-8})$$

On arrête l'itération si la condition suivante est vérifiée : $U < EPS$

avec :

$$U : \text{Résidu} (U = \sum (H_{L-1}^2 - H_{L-1}))$$

EPS : Tolérance sur le résidu (seuil de convergence).

Si R est bien choisi, c'est à dire proche d'un coefficient optimal, la formule de surrelaxation converge plus rapidement que la formule de *Gauss-Seidel*. Pour cette formule la valeur de R est comprise entre 1 et 2 ($1 < R < 2$).

VI-3-2- Régime transitoire:

En régime transitoire il faut tenir compte de la variation de stockage (emmagasinement) due à la variation du niveau dans la maille de calcul. Outre la discrétisation de l'espace, la solution en régime transitoire va procéder à une discrétisation du temps en un certain nombre d'intervalles Δt . On considère pour cela l'inégalité du système d'équation suivant :

$$[T] \{h\} = \{Q\} + a^2 [S] \frac{\{h\}_{t+\Delta t} - \{h\}_t}{\Delta t}$$

L'équation de diffusivité s'écrit à une date t :

$$\frac{dH'_C}{dt} = \frac{1}{a^2 S} [T_{NC} H'_N + T_{EC} H'_E + T_{SC} H'_S + T_{WC} H'_W - H'_C (T_{NC} + T_{SC} + T_{WC} + T_{EC}) - Q'_C] \quad (\text{VI-9})$$

avec H_C : Charge initiale.

L'expression (VI-9) représente la pente de la tangente à la courbe d'évolution de H en C au cours du temps.

Or on a calculé H qu'à des dates discrètes (t_1, t_2, \dots, t_n) connaissant la charge initiale en t_0 .

Si le pas de temps $\Delta t = t_1 - t_0$ est suffisamment petit, on pourra donc approximer la courbe $H(t)$ par sa tangente, en admettant que H évolue linéairement entre t_0 et t_1 .

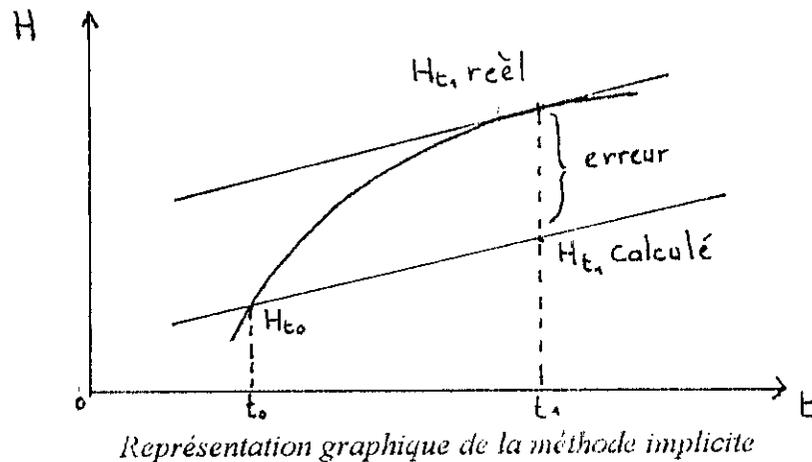
Soit :

$$dH_1/dt = (Ht_1 - Ht_0) / (t_1 - t_0) \quad (\text{VI-10})$$

on extrapole la charge de t_0 à t_1 en construisant la corde $Ht_0 Ht_1$ parallèle à la tangente. A partir de la valeur dh/dt , il en résulte trois méthodes pour le calcul de Ht_1 :

VI-3-2-2- Méthode implicite:

Sans connaître H^{t_1} , on veut calculer la pente de la tangente en t_1 , soit dH^{t_1}/dt . On dit ensuite que H^{t_1} se trouve sur la droite de pente dH^{t_1}/dt passant par H^{t_0} (soit la parallèle à la tangente au point H^{t_1} réel).



On obtient alors :

$$H^{t_1} = H^{t_0} + \Delta t \frac{dH^{t_1}}{dt} \quad (\text{VI-12})$$

Le terme dH^{t_1}/dt est inconnu, mais on peut le déduire de l'expression (VI-9). L'expression (VI-10) permet d'écrire :

$$\frac{dH_C^{t_1}}{dt} = (H_C^{t_1} - H_C^{t_0}) / \Delta t \quad (\text{VI-13})$$

Par substitution dans (VI-9), on élimine $dH_C^{t_1}/dt$, soit :

$$(H_C^{t_1} - H_C^{t_0}) \alpha^2 S / \Delta t + Q_C^{t_1} = T_N H_u^{t_1} + T_E H_E^{t_1} + T_S H_s^{t_1} + T_W H_w^{t_1} - H_C^{t_1} (T_N + T_E + T_S + T_W)$$

En regroupant les termes connus au second membre, on obtient :

$$T_N H_u^{t_1} + T_E H_E^{t_1} + T_S H_s^{t_1} + T_W H_w^{t_1} - H_C^{t_1} (T_N + T_E + T_S + T_W + \alpha^2 S / \Delta t) = Q_C^{t_1} - (\alpha^2 S / \Delta t) H_C^{t_0} \quad (\text{VI-13})$$

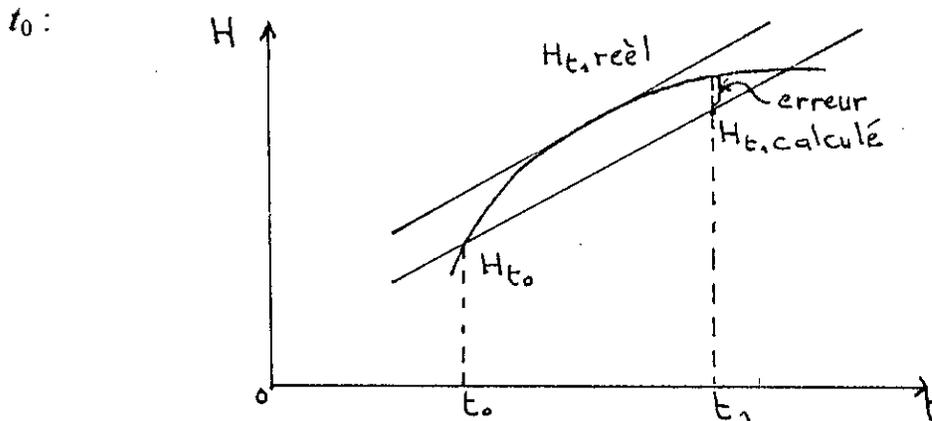
C'est une équation linéaire qui ne fait intervenir que l'inconnue H^{t_1} .

Pour chacune des mailles du modèle, on écrit une équation analogue pour aboutir soit à un problème similaire à celui du régime permanent, soit un

système linéaire avec autant d'équations que d'inconnues, que l'on doit résoudre à chaque pas de temps Δt . Une fois qu'on a calculé H^{t_1} , on fera de même pour passer de t_1 à t_2 , etc.

VI-3-2-3- Méthode mixte:

On calcule la pente de la tangente à la courbe en un point situé entre t_1 et



Représentation graphique de la méthode mixte

d'où :

$$H^{t_1} = H^{t_0} + \Delta t [\theta \frac{dH^{t_0}}{dt} + (1-\theta) \frac{dH^{t_1}}{dt}] \quad (\text{VI-14})$$

avec: $0 \leq \theta \leq 1$

Si: $\theta = 1$ \rightarrow Explicite pure

$\theta = 0$ \rightarrow Implicite pure

$\theta = 0.5$ \rightarrow Méthode dite de Crank-Nicholson
(moyenne des deux pentes en t_0 et en t_1).

Pour la résolution, c'est la méthode implicite qui sera utilisée car il existe toujours une solution, même s'il n'existe aucun potentiel imposé.

VI-4- Mise en oeuvre d'un modèle mathématique:

VI-4-1- Géométrie de l'aquifère:

Un modèle mathématique est une représentation d'une nappe souterraine, un peu comme un modèle réduit. Pour que le modèle représente correctement la réalité, il faut d'abord qu'il représente correctement la géométrie de la nappe. On peut considérer que c'est le plus important, car la fiabilité des résultats obtenus en dépend étroitement.

VI-4-1-1- Les limites:

La connaissance des valeurs des paramètres et de la géométrie n'est pas encore suffisante pour obtenir une solution unique de l'équation (I). Le système admet une infinité de solutions (explications de son état) possibles, si on ne connaît pas les conditions aux limites. Ces conditions aux limites doivent être par ailleurs, indépendantes du fonctionnement du système lui-même. (*Bonnet, 1978*).

On distingue principalement trois types de limites:

Limites étanches:

Ce sont les contacts entre corps aquifère et corps imperméables. Par définition une limite de maille est étanche si aucun débit ne la traverse. Dans la formule du bilan discrétisé, le terme de débit :

$$Q_{0i} = T_{0i} (H_i - H_0) \text{ à travers cette facette est nul.}$$

Limites à niveau imposé:

Appelées encore *limites de Dirichlet* ou limites du premier type, dans la théorie des équations aux dérivées partielles, elles sont de la forme $h = h_0$; h_0 étant une valeur connue de potentiel; soit sur la frontière extérieur du système, soit à l'intérieur du domaine considéré, là où existent des « fenêtres » sur la nappe, avec une condition qui maintient le potentiel indépendamment du fonctionnement du système: étants, lacs, etc.

Limites à flux imposé:

Appelées encore *limites de Neumann*, elles sont de la forme $q \cdot n = q_0$; q_0 étant une valeur de flux connue et n un vecteur unitaire normal à la limite considérée. Ces flux peuvent être des débits unitaires, linéaires ou ponctuels.

Parfois une limite mixte peut être considérée, dite aussi *limite de Cauchy*, elle caractérise les endroits où il y a drainance.

Enfin, pour les problèmes dépendants du temps (*transitoires*) une autre condition est nécessaire: c'est *la condition initiale*. Elle représente la répartition des potentiels à l'intérieur du domaine considéré à l'instant initial : c'est une fonction $h_0 = f(x, y, z, 0)$.

Les limites ainsi décrites, constituent l'enveloppe qui isole le domaine où règne la loi de comportement, elles constituent aussi les « *postes frontières* » où vont s'établir les échanges avec l'extérieur.

VI-4-2- Maillage:

La zone à l'intérieur des limites latérales sera alors décomposée en mailles égales ou non, carrées ou rectangulaires.

La taille des mailles dépendra de plusieurs facteurs:

- de la précision souhaitée sur les calculs;
- des contours plus ou moins sinueux des limites;
- du nombre et de l'éloignement des singularités (Puits);
- de la capacité de l'ordinateur.

VI-5- Données nécessaires à la modélisation:**VI-5-1- Perméabilité:**

En principe, pour utiliser un modèle, il faudrait connaître la perméabilité en tout point, c'est à dire dans toutes les mailles. En fait, la perméabilité n'est généralement connue qu'en quelques points, par interprétation de pompages

d'essai. Il faut alors essayer d'en déduire une carte de perméabilité en tenant compte de la géologie de l'aquifère.

C'est le calage du modèle qui permettra de corriger ces valeurs de départ.

VI-5-2- Débit d'échange et alimentation:

Il faut essayer de déterminer le plus précisément possible:

- Les débits effectivement pompés dans les ouvrages, en faisant attention que le débit réel est par fois très différent du débit nominal des pompes;
- Les débits des sources.

Il faut aussi évaluer la recharge par la pluie en déduisant l'évapotranspiration réelle et éventuellement par les cours d'eau.

VI-5-3- Niveau piézométrique (ou charge):

Le niveau piézométrique n'est pas une caractéristique intrinsèque d'un aquifère. Il peut varier suivant la saison et les sollicitations, c'est cependant un élément indispensable pour le calage (réglage) du modèle. C'est la carte piézométrique qui permettra de déterminer les zones peu perméables (équipotentiels resserrés) ou très perméables (équipotentiels espacés).

VI-5-4- Pluie:

Etant donné qu'on étudie le bilan de la nappe, il ne faut pas oublier la recharge de la nappe par pluie dans les zones où la nappe est libre.

En fait, il faut considérer la pluie efficace « c'est à dire la pluie à laquelle on soustrait l'évaporation (et éventuellement le ruissellement par les rivières).

VI-5-5- Coefficient d'emmagasinement:

Il est nécessaire de connaître le coefficient d'emmagasinement, uniquement :

- Si on s'intéresse au régime transitoire, c'est à dire aux variations au cours du temps des débits et des niveaux ;
- Si aucun régime permanent (*régime d'équilibre*) n'existe ou n'existera pendant l'exploitation de l'aquifère.

Le coefficient d'emmagasinement est en général mal connu. Il peut être déterminé en certains points par la réalisation de pompages d'essai (à *débit constant*) avec un piézomètre d'observation.

Le coefficient d'emmagasinement sera ajusté lors du réglage en régime transitoire de façon à reproduire l'évolution des niveaux et des débits en des points de contrôle où des mesures ont été réalisées sur le terrain.

VI-6- Calage du modèle:

Si on connaît parfaitement toutes les données relatives à la nappe: géométrie, perméabilité en tout point, degré de colmatage des cours d'eau, débits d'échange, recharge par infiltration, coefficient d'emmagasinement, il n'y a pas de calage à réaliser.

En réalité, on connaît, généralement, assez bien la géométrie de l'aquifère, mais assez mal le champ des perméabilités, le colmatage des cours d'eau et la recharge par infiltration, le calage consiste donc à ajuster ces valeurs pour reproduire au mieux:

- Les niveaux observés en tout point, synthétisés par une carte piézométrique;
- Les débits des sources ou des émergences.

Si on dispose des données de plusieurs états de la nappe correspondants à des périodes différentes : hautes eaux et basses eaux par exemple, on pourra régler les perméabilités sur un état et les contrôler sur le deuxième état.

Le calage du modèle permet d'ajuster les paramètres tels que perméabilité, colmatage, infiltration, mais aussi de vérifier la cohérence des données et du schéma d'interprétation choisi (influence des limites, débits provenant des couches profondes ...). Le modèle calé permet alors de connaître le bilan global de la nappe (débits entrants, débits sortants, infiltration, débits d'échange par des cours d'eau).

CHAPITRE VII

FONCTION DU PROGRAMME

VII- FONCTION DU PROGRAMME

Le programme *GEOHYD* permet la simulation des transferts de pression en régime permanent ou transitoire dans un aquifère monocouche par la méthode des différences finies appliquées à un réseau de mailles carrées régulières. Le programme intègre l'équation aux dérivées partielles décrivant les écoulements en milieu poreux saturé, suivant deux types de conditions aux limites : Charge imposée et flux imposé.

Le programme est entièrement commandé par un fichier de données comportant :

1) Le découpage du modèle en maille et sa géométrie

2) Les paramètres hydrauliques

- En régime permanent :

- # La transmissivité en chaque maille;
- # L'emplacement et les charges imposées;
- # Les débits imposés.

- En régime transitoire :

- # Les charges initiales pour chaque phase;
- # Les coefficients d'emmagasinement;
- # Les débits et charges imposées.

3) Les paramètres numériques de simulation

4) Les paramètres d'édition de tables et cartes sur imprimantes:

- Un tableau de l'ensemble des paramètres hydrogéologiques;
- Les cartes des paramètres (*H*, *T*, *Q*, *S*);
- Le bilan en eau du système.

VII-1- Maillage du modèle:

Il est constitué d'une grille régulière de mailles carrées et se trouve définie lorsque on précise: (Fig VII-1)

- Le nombre total de mailles et leurs numéros respectifs.
- La dimension du côté de la maille.
- Les positions géographiques des mailles dans un système de coordonnées appelé *Schéma-type*.

VII-1-1- Découpage et numérotation des mailles:

Le domaine étudié est découpé en mailles régulières de dimensions données selon la taille mémoire, la précision demandée et selon les données disponibles.

La numérotation des mailles se fait de gauche à droite et de haut en bas, de 1 à *NMAI*.

La numérotation obtenue est appelée numérotation opérateur. Elle permet d'identifier chacune des mailles du modèle, que ce soit au niveau de l'introduction des données de calcul, ou au niveau des sorties du programme.

VII-1-2- Repérage géographique:

Pour repérer la position relative des mailles par rapport aux autres, on utilise le système de coordonnées dit « *Schéma-type* ». Cette méthode a deux fonctions essentielles:

- Pour chacune des mailles, le repérage de ses voisins *N, S, E, W*;
- La possibilité d'édition de carte des paramètres hydrauliques.

La méthode consiste à superposer le maillage du modèle à une grille de mailles de même taille, entourant complètement le domaine modélisé d'au moins une rangée de mailles.

La correspondance Numéro-Opérateur/ Numéro-Schéma type est réalisée en introduisant les données du tableau de correspondance *NUM* dimensionné à *NMAI*.

Exemple de schéma type:

- Nombre de mailles du modèle
NMAI = 9
- Nombre de mailles du schéma type
IDIM = 30
- Nombre de colonnes du schéma type
ICOL = 5
- Nombre de lignes de schéma type
ILIN = 6

1	2	3	4	5
6	7 1	8 2	9	10
11	12 3	13 4	14 5	15
16	17	18 6	19 7	20
21	22	23 8	24 9	25
26	27	28	29	30

Exemple sur le schéma précédent:

- Num* (1) = 7
- Num* (2) = 8
- Num* (3) = 12
- Num* (9) = 24

VII-2- Description du programme GEOHYD :

Le programme *GEOHYD* comporte une subroutine *GEOHYD* sur laquelle sont articulées les six subroutines suivantes: (voir l'*Organigramme*)

GEOME - LECTU - PERMA - BILAN - EDIT - TRANS

VII-2-1- Subroutine GEOHYD:

Sa fonction est le dimensionnement, l'initiation des variables indicées et l'articulation des sous-routines.

VII-2-2- Subroutine GEOME:

Elle remplit les tableaux *NN*, *NS*, *NW* à partir du tableau des correspondances *NUM* introduit en données. Elle édite aussi la grille des numéro-opérateurs.

VII-2-3- Subroutine LECTU:

La sous-routine *LECTU* réalise l'introduction des paramètres hydrauliques définis par leur code (le paramètre *ICODE*), selon le mode de lecture défini par le paramètre *LEC*. Les valeurs lues sont multipliées par le facteur d'échelle *ECH* propre à chaque paramètre hydraulique. A ce niveau, on a deux variables indicées : *NN* et *X₂* qui sont les tableaux de manoeuvre. Cette sous-routine comporte deux autres variables non indicées *IDEB*, *IFIN* (début et fin d'une séquence).

VII-2-4- Subroutine PERMA:

Elle permet le calcul des charges hydrauliques dans les mailles de travail en régime permanent, La résolution du système linéaire est faite par la méthode de *Gauss-Seidel* avec surrelaxation par points. (illustrée au § *VI-*)

VII-2-5- Subroutine BILAN:

Elle effectue la somme des débits imposés, et permet le calcul des débits échangés entre la nappe et les mailles à potentiel imposé.

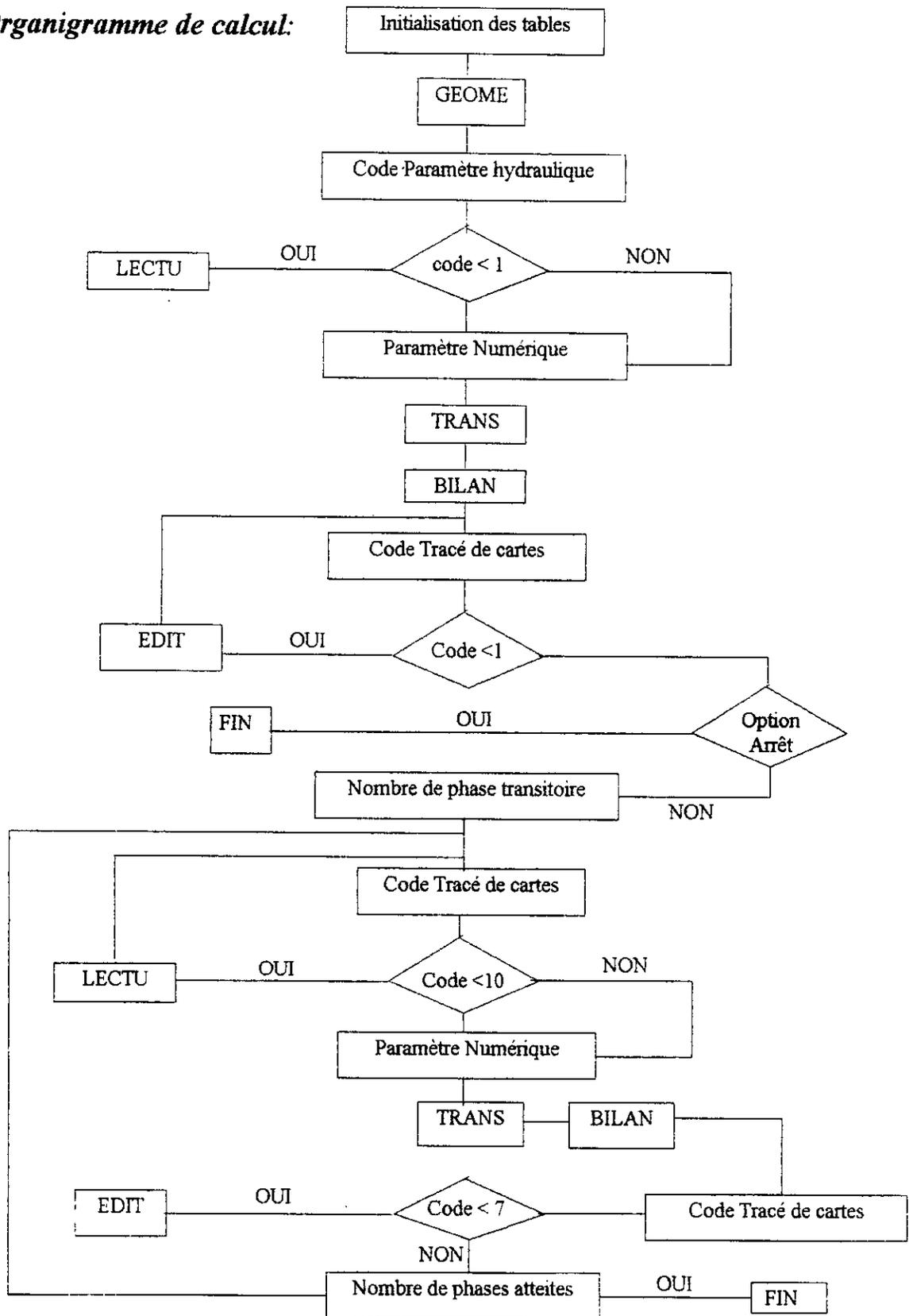
VII-2-6- Subroutine EDIT:

Cette subroutine permet l'impression des cartes des paramètres hydrauliques définis par leurs codes *ICODE* et par leurs facteurs d'échelle *ECH*. L'impression s'effectue selon la grille du schéma-type.

VII-2-7- Subroutine TRANS:

Elle permet le calcul des charges hydrauliques en régime transitoire par la méthode implicite (illustrée au § *VI-*).

Organigramme de calcul:



VII-3- Application du programme:

L'application du programme *GEOHYD* au plateau de Mostaganem a été réalisée malgré quelques lacunes d'information quant aux apports latéraux de la nappe et la non fiabilité de certains paramètres (débit entrant, transmissivité).

VII-3-1- Géométrie du modèle:

Le secteur d'étude a été décomposé suivant une grille de mailles régulières carrées (*fig VII-1*), les caractéristiques morphométriques sont les suivantes :

- | | |
|------------------------------------|----------------|
| - Dimension du côté de la maille | 2000m ; |
| - Nombre de mailles du schéma type | 416; |
| - Nombre de colonnes | 16, |
| - Nombre de lignes | 26, |
| - Nombre de mailles utiles | 130; |

Fig VII-1

numéros des mailles dans le schéma de la limite réelle de l'aquifère
("numérotation-opérateur")

"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
"	"	"	"	"	1	2	"	"	"	"	"	"	"	"
"	"	"	"	"	3	4	5	6	"	"	"	"	"	"
"	"	"	7	8	9	10	11	12	13	"	"	"	"	"
"	"	"	14	15	16	17	18	19	20	"	"	"	"	"
"	"	"	21	22	23	24	25	26	"	"	"	"	"	"
"	"	"	27	28	29	30	31	32	"	"	"	"	"	"
"	"	33	34	35	36	37	38	39	40	"	"	"	"	"
"	"	41	42	43	44	45	46	47	48	"	"	"	"	"
"	"	49	50	51	52	53	54	55	56	"	"	"	"	"
"	"	57	58	59	60	61	62	63	64	"	"	"	"	"
"	"	65	66	67	68	69	70	71	72	"	"	"	"	"
"	73	74	75	76	77	78	79	80	81	"	"	"	"	"
"	"	82	83	84	85	86	87	88	89	"	"	"	"	"
"	"	"	90	91	92	93	94	95	96	"	"	"	"	"
"	"	"	"	97	98	99	100	101	102	103	"	"	"	"
"	"	"	"	"	"	104	105	106	107	108	109	"	"	"
"	"	"	"	"	"	"	110	111	112	113	114	"	"	"
"	"	"	"	"	"	"	"	"	115	116	117	118	"	"
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	119	120	121	"	"
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	122	123	"	"
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	124	125	"
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	126	127
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	128	129
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	130	"
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"

Correspondance avec le schéma type dans
l'ordre de la "numérotation opérateur"

"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
"	"	"	"	"	22	23	"	"	"	"	"	"	"	"
"	"	"	"	"	38	39	40	41	"	"	"	"	"	"
"	"	"	52	53	54	55	56	57	58	"	"	"	"	"
"	"	"	68	69	70	71	72	73	74	"	"	"	"	"
"	"	"	84	85	86	87	88	89	"	"	"	"	"	"
"	"	"	100	101	102	103	104	105	"	"	"	"	"	"
"	"	115	116	117	118	119	120	121	122	"	"	"	"	"
"	"	131	132	133	134	135	136	137	138	"	"	"	"	"
"	"	147	148	149	150	151	152	153	154	"	"	"	"	"
"	"	163	164	165	166	167	168	169	170	"	"	"	"	"
"	"	179	180	181	182	183	184	185	186	"	"	"	"	"
"	194	195	196	197	198	199	200	201	202	"	"	"	"	"
"	"	211	212	213	214	215	216	217	218	"	"	"	"	"
"	"	"	228	229	230	231	232	233	234	"	"	"	"	"
"	"	"	"	245	246	247	248	249	250	251	"	"	"	"
"	"	"	"	"	"	263	264	265	266	267	268	"	"	"
"	"	"	"	"	"	"	280	281	282	283	284	"	"	"
"	"	"	"	"	"	"	"	"	298	299	300	301	"	"
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	315	316	317	"	"
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	332	333	"	"
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	349	350	"
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	366	367
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	382	383
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	398	"
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"

VII-3-2- Conditions aux limites:

Les conditions aux limites sont représentées par:

- Les limites latérales qui sont considérées comme conditions à flux nul sur toute l'extension de l'aquifère;
- Le potentiel imposé au niveau des exutoires de la nappe qui se trouvent au *Nord-Est, Sud, Sud-Ouest* et *Ouest* du plateau de Mostaganem;
- Un flux imposé sur chaque maille de la grille, correspondant à la quantité d'eau entrant dans le système, estimé à $5.10^3 \text{ m}^3/\text{s}$.

Le potentiel imposé est évalué sur les 19 mailles suivantes:

N°de la maille	Potentiel imposé(m)						
3	240	27	200	64	175	96	180
8	220	33	190	72	165	98	115
14	200	48	180	81	165	103	200
20	200	56	160	89	160	104	120
110	115	127	60	129	401		

Le potentiel imposé est spécifié à l'aide d'un indicateur égale à 1.0.

VII-3-3- Paramètres hydrauliques:

Les paramètres hydrauliques introduits dans le modèle sont:

- La charge initiale qui reflète l'état piézométrique moyen du système hydraulique, fixée à 175 m ;
- La transmissivité qui varie de $0.15 \cdot 10^{-3}$ à $17 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$;
- Les prélèvements introduits au niveau de tout le plateau de Mostaganem qui sont de l'ordre de $544.10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$;

- Les charges de références introduites par maille correspondant à la côte piézométrique réelle en cette maille;
- Le coefficient d'emménagement, qui a été fixé à une moyenne de 6%.

VII-3-4- Simulation de la nappe en régime permanent:

En partant d'une piézométrie de référence observée sur 13 mailles assez bien réparties sur le plateau, le calage, en régime permanent, a été réalisé à partir de la carte piézométrique présentée sur la (*figV-4*) (*Octobre 1970*)

Pour les calculs préliminaires, nous nous sommes basés sur les transmissivités obtenues par les essais de pompage.

Les premiers passages nous ont fait modifier les valeurs de transmissivité pour qu'elles soient régulières. Le calage a été difficile au voisinage des Djebels et aux exutoires pour relever ou baisser le niveau de la nappe ou la modeler conformément à la piézométrie mesurée.

Il a fallu aussi ajuster les valeurs des débits entrants, pour les zones d'alimentation de la nappe.

Donc, après plusieurs ajustements de ces deux paramètres (Transmissivité, débits entrants) nous sommes arrivées à établir:

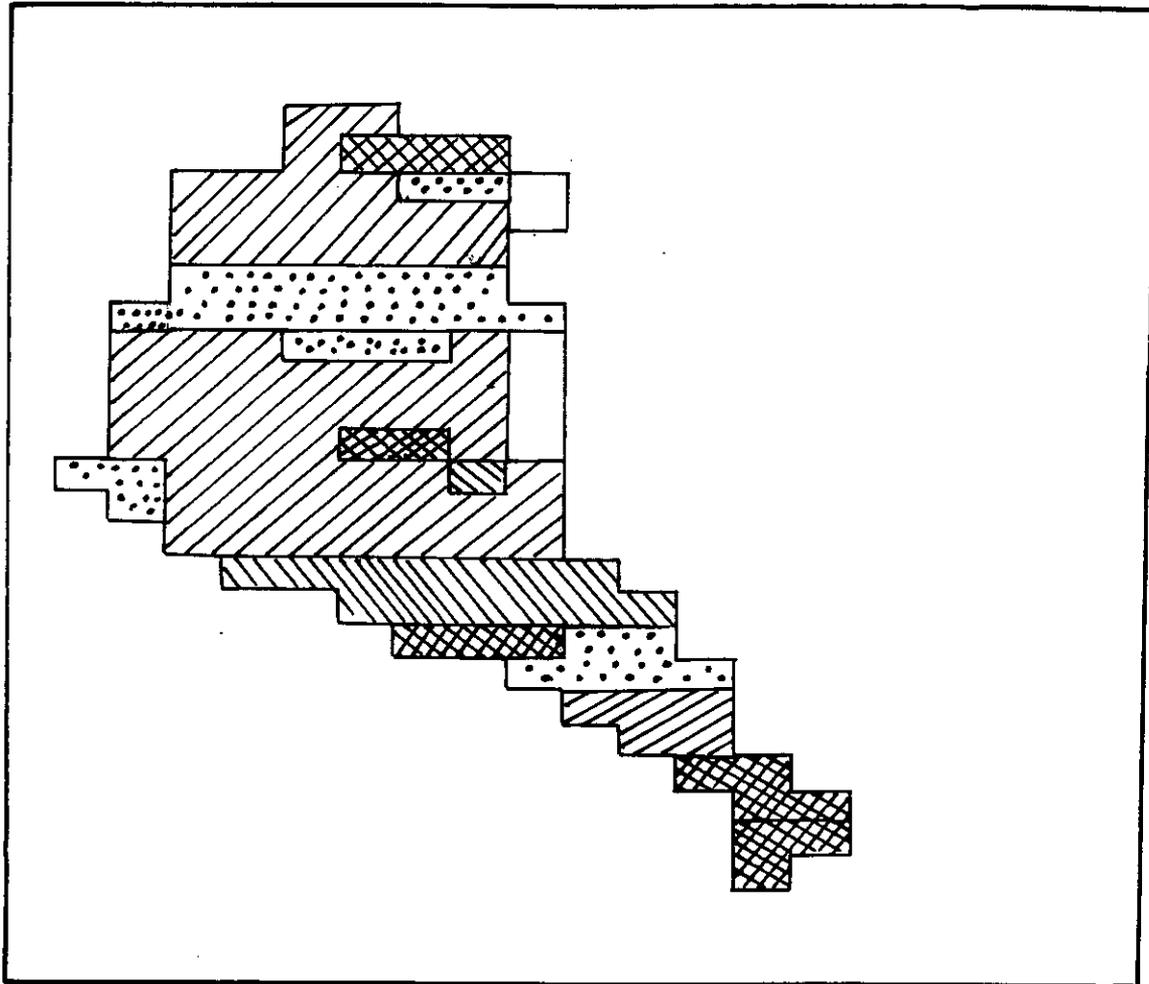
- Une carte piézométrique calculée (*figVII-2*);
- Une carte de transmissivités (*figVII-3*) délimitant les zones de bonnes ou de mauvaises transmissivités; les différentes valeurs de transmissivité introduites dans le modèle lors des phases d'ajustement restent cependant du même ordre de grandeur que celles mesurées par les essais de pompage ($10^{-5} \leq T \leq 10^{-3} m^2/s$);
- Une carte de débits prélevés indiquant les champs de captage des eaux souterraines (*figVII-4*);
- Une carte de différence de charge ($HR - H$) (*figVII-5*), indiquant le calage entre la carte mesurée et la carte calculée.

L'écart entre la carte calculée et celle mesurée est peu important, sauf au niveau de certaines zones, notamment en amont de la nappe (*Djebel Bel-Nacel*) (*figVII-6*), cela est dû, probablement, au mode d'écoulement de la nappe et aussi à la grande taille des mailles.

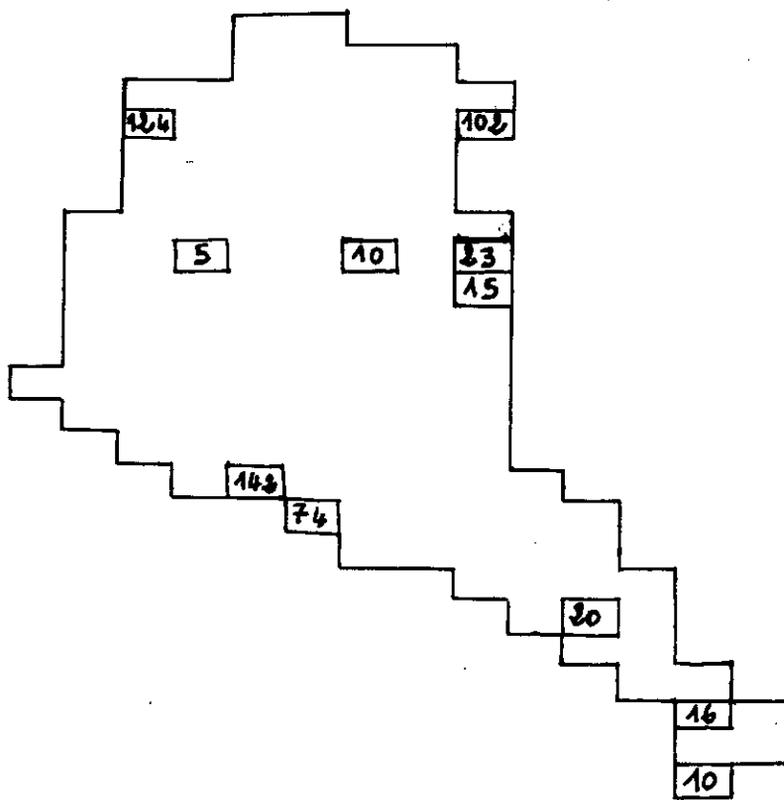
Fig: VII-2

REGIME PERMANENT

PIEZOMETRIE CALCULEE				ECHELLE		=		.100E+01							
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
"	"	"	"	"	239.	236.	"	"	"	"	"	"	"	"	"
"	"	"	"	"	240.	230.	220.	215.	"	"	"	"	"	"	"
"	"	"	209.	220.	223.	220.	215.	211.	206.	"	"	"	"	"	"
"	"	"	200.	210.	215.	216.	214.	209.	200.	"	"	"	"	"	"
"	"	"	204.	208.	227.	236.	236.	233.	"	"	"	"	"	"	"
"	"	"	200.	225.	243.	250.	249.	246.	"	"	"	"	"	"	"
"	"	190.	221.	233.	239.	237.	230.	222.	207.	"	"	"	"	"	"
"	"	223.	224.	222.	221.	215.	202.	193.	180.	"	"	"	"	"	"
"	"	225.	225.	222.	218.	210.	198.	185.	160.	"	"	"	"	"	"
"	"	224.	222.	218.	211.	203.	190.	179.	175.	"	"	"	"	"	"
"	"	221.	217.	212.	205.	198.	189.	179.	165.	"	"	"	"	"	"
"	220.	212.	204.	196.	189.	185.	181.	174.	165.	"	"	"	"	"	"
"	"	197.	187.	175.	167.	167.	169.	168.	160.	"	"	"	"	"	"
"	"	"	172.	151.	142.	147.	157.	168.	180.	"	"	"	"	"	"
"	"	"	"	126.	115.	128.	141.	158.	175.	200.	"	"	"	"	"
"	"	"	"	"	"	120.	130.	146.	161.	177.	175.	"	"	"	"
"	"	"	"	"	"	"	115.	136.	148.	162.	167.	"	"	"	"
"	"	"	"	"	"	"	"	"	152.	153.	153.	148.	"	"	"
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	146.	144.	143.	"	"	"
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	143.	141.	"	"	"
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	137.	132.	"	"
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	127.	175.	"
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	76.	40.	"
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	75.	"	"
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"

Légendefig^vII-3: Carte des transmissivités

-  $T < 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
-  $10^{-4} < T < 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$
-  $10^{-3} < T < 5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$
-  $5 \cdot 10^{-3} < T < 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$

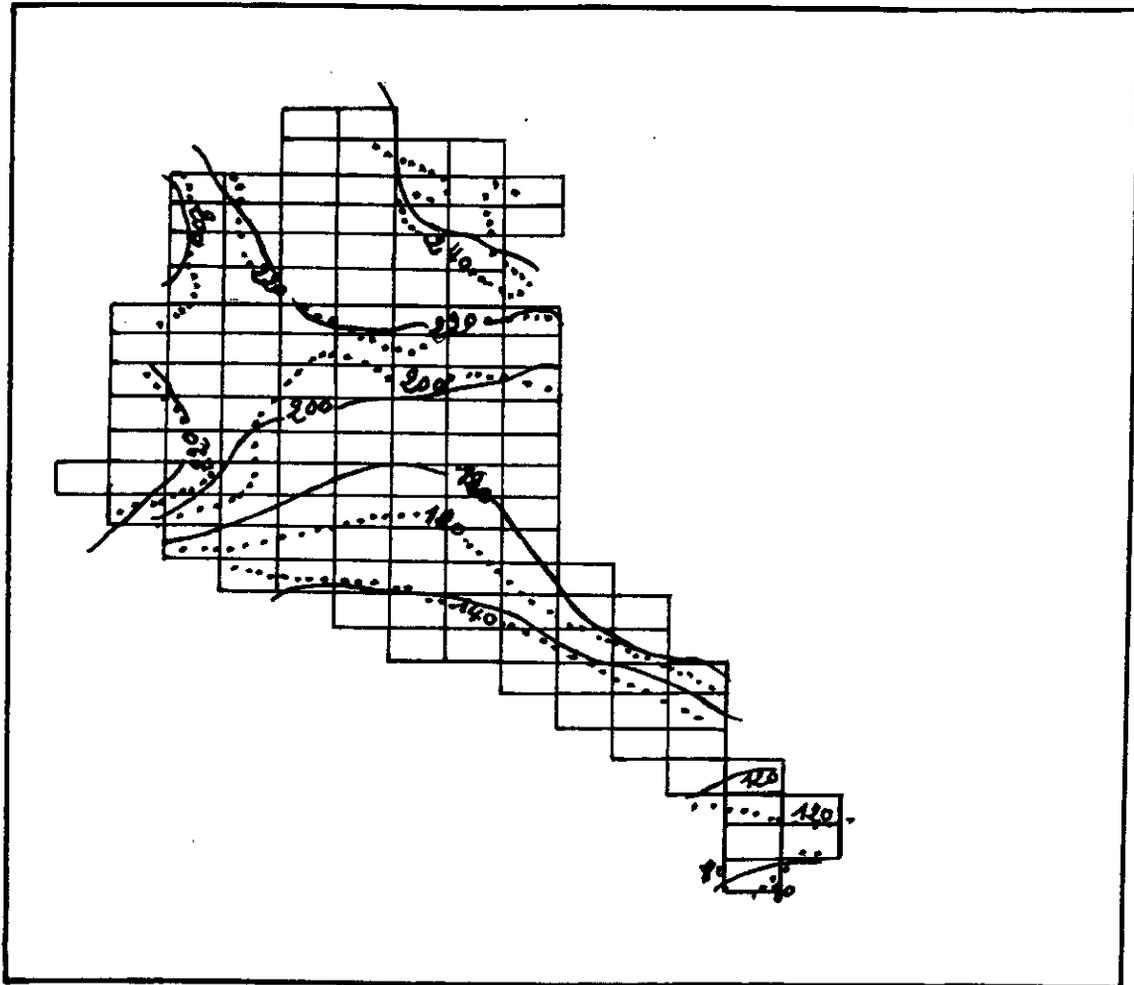


figVII-4: Carte des dents prélevés ($10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$)

Fig: VII- 5

REGIME PERMANENT

DIFFERENCES (HR-H)				ECHELLE		= .100E+01											
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
"	"	"	"	"	-3.	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
"	"	"	"	"	"	"	3.	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
"	"	-3.	"	"	"	"	3.	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
"	"	"	"	"	"	"	0.	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
"	"	3.	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
"	"	"	"	"	3.	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
"	"	"	"	"	"	"	"	2.	"	"	"	"	"	"	"	"	"
"	"	"	"	"	"	"	0.	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
"	"	"	"	"	"	"	"	"	-3.	"	"	"	"	"	"	"	"
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	1.	"	"	"	"	"	"	"
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	-2.	"
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	2.	"
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"



figVII-6: Carte piézométrique calculée (—) et carte piézométrique mesurée (.....)

Bilan du système:

Les résultats obtenus en régime permanent sont comme suit:

Nombre d'itérations $L = 29$;

Résidu (somme du carré des écarts) $U = 0.00098$

<i>Maille</i>	<i>Débit</i>
3	-0.05594
8	-0.04798
14	0.12443
20	0.10168
27	0.00818
33	0.01344
48	0.02254
56	0.01483
64	0.00889
72	0.00848
81	0.00703
89	0.00837
96	-0.06952
89	0.14178
103	-0.19093
104	0.07383
110	0.19913
127	-0.54227
129	0.56949

DEBIT POT.IMPOS : ENTREE -.90665 SORTIE 1.30208 TOTAL .39544

DEBITS IMPOSES : ENTREE -.50500 SORTIE .10970 TOTAL -.39530

BILAN : << m³ /s >> 0.00014

VII-3-5- Simulation de la nappe en régime transitoire:

La simulation en régime transitoire est basée sur les apports mensuels pour l'année 1970. Douze phases ont fait l'objet de cette opération, chaque phase correspond à un mois de *30 jours* ou nous avons introduit les différents termes du bilan à savoir:

- Apports à la nappe : infiltration;
- Sorties : Prélèvements mensuels.

Les cartes piézométriques obtenues restent similaires à la carte de référence, avec quelques rabattements de la nappe en période d'étiage.

TRANSITOIRE * PHASE NUMERO: 1

PIEZOMETRIE CALCULEE		ECHELLE		=		.100E+01									
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
"	"	"	"	"	239.	236.	"	"	"	"	"	"	"	"	"
"	"	"	"	"	242.	230.	220.	215.	"	"	"	"	"	"	"
"	"	"	209.	221.	223.	220.	215.	211.	206.	"	"	"	"	"	"
"	"	"	198.	209.	215.	216.	214.	209.	200.	"	"	"	"	"	"
"	"	"	204.	208.	227.	236.	236.	233.	"	"	"	"	"	"	"
"	"	"	202.	225.	243.	250.	249.	246.	"	"	"	"	"	"	"
"	"	190.	221.	233.	239.	237.	230.	222.	207.	"	"	"	"	"	"
"	"	223.	224.	222.	221.	215.	202.	193.	183.	"	"	"	"	"	"
"	"	225.	225.	222.	218.	210.	198.	185.	158.	"	"	"	"	"	"
"	"	224.	222.	218.	211.	203.	190.	180.	177.	"	"	"	"	"	"
"	"	221.	217.	212.	205.	198.	189.	179.	165.	"	"	"	"	"	"
"	220.	212.	204.	196.	189.	185.	180.	174.	164.	"	"	"	"	"	"
"	"	197.	187.	175.	167.	167.	169.	168.	162.	"	"	"	"	"	"
"	"	"	172.	151.	142.	147.	157.	168.	181.	"	"	"	"	"	"
"	"	"	"	126.	110.	128.	141.	158.	175.	202.	"	"	"	"	"
"	"	"	"	"	"	122.	130.	146.	161.	177.	175.	"	"	"	"
"	"	"	"	"	"	"	110.	136.	148.	162.	167.	"	"	"	"
"	"	"	"	"	"	"	"	"	152.	153.	153.	148.	"	"	"
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	146.	144.	143.	"	"	"
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	143.	141.	"	"	"
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	137.	131.	"	"
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	116.	61.	"
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	75.	43.	"
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	75.	"	"

TRANSITOIRE * PHASE NUMERO: 4

PIEZOMETRIE CALCULEE ECHELLE = .100E+01

"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
"	"	"	"	"	239.	235.	"	"	"	"	"	"	"	"
"	"	"	"	"	239.	230.	220.	215.	"	"	"	"	"	"
"	"	"	208.	218.	223.	220.	215.	211.	206.	"	"	"	"	"
"	"	"	195.	209.	215.	216.	214.	209.	200.	"	"	"	"	"
"	"	"	204.	208.	227.	236.	236.	233.	"	"	"	"	"	"
"	"	"	199.	225.	243.	250.	249.	246.	"	"	"	"	"	"
"	"	189.	221.	233.	239.	237.	230.	222.	207.	"	"	"	"	"
"	"	223.	224.	222.	221.	214.	202.	193.	180.	"	"	"	"	"
"	"	225.	224.	222.	218.	210.	198.	185.	157.	"	"	"	"	"
"	"	224.	222.	218.	211.	202.	190.	180.	174.	"	"	"	"	"
"	"	221.	217.	212.	205.	198.	189.	179.	163.	"	"	"	"	"
"	220.	212.	204.	196.	189.	184.	180.	174.	163.	"	"	"	"	"
"	"	197.	187.	175.	167.	167.	168.	168.	155.	"	"	"	"	"
"	"	"	172.	151.	142.	147.	157.	167.	178.	"	"	"	"	"
"	"	"	"	126.	115.	128.	141.	158.	175.	197.	"	"	"	"
"	"	"	"	"	"	117.	129.	146.	161.	177.	175.	"	"	"
"	"	"	"	"	"	"	113.	135.	148.	162.	167.	"	"	"
"	"	"	"	"	"	"	"	"	152.	153.	152.	148.	"	"
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	146.	144.	143.	"	"
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	143.	141.	"	"
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	136.	126.	"
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	96.	59.
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	71.	40.
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	74.	"

TRANSITOIRE * PHASE NUMERO: 11

PIEZOMETRIE CALCULEE ECHELLE = .100E+01

"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
"	"	"	"	"	238.	235.	"	"	"	"	"	"	"	"
"	"	"	"	"	230.	228.	219.	215.	"	"	"	"	"	"
"	"	"	206.	210.	221.	220.	214.	209.	201.	"	"	"	"	"
"	"	"	200.	206.	214.	216.	213.	205.	186.	"	"	"	"	"
"	"	"	201.	206.	226.	235.	236.	233.	"	"	"	"	"	"
"	"	"	186.	225.	243.	249.	248.	245.	"	"	"	"	"	"
"	"	179.	220.	233.	238.	237.	230.	222.	207.	"	"	"	"	"
"	"	223.	224.	222.	221.	214.	202.	192.	170.	"	"	"	"	"
"	"	225.	224.	222.	217.	209.	197.	184.	148.	"	"	"	"	"
"	"	224.	222.	217.	211.	202.	190.	178.	161.	"	"	"	"	"
"	"	221.	217.	212.	205.	198.	189.	178.	155.	"	"	"	"	"
"	220.	211.	204.	195.	188.	184.	180.	174.	157.	"	"	"	"	"
"	"	197.	187.	175.	166.	166.	168.	167.	148.	"	"	"	"	"
"	"	"	171.	151.	141.	146.	156.	166.	171.	"	"	"	"	"
"	"	"	"	124.	107.	125.	140.	157.	172.	191.	"	"	"	"
"	"	"	"	"	"	114.	127.	145.	160.	175.	175.	"	"	"
"	"	"	"	"	"	"	104.	133.	148.	162.	167.	"	"	"
"	"	"	"	"	"	"	"	"	151.	153.	152.	148.	"	"
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	145.	144.	143.	"	"
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	142.	140.	"	"
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	131.	113.	"
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	77.	56.
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	59.	33.
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	66.	"

CHAPITRE VIII

CONCLUSION

VII -CONCLUSION GENERALE:

La nécessité d'une méthode pour l'évaluation des ressources en eau souterraine est devenue déjà une urgence. Les tendances actuelles montrent que les conflits entre les usagers de l'eau sont cruciaux et le seront de plus en plus dans un proche avenir.

Le déclin de la ressource est difficilement maîtrisable, au moins dans l'immédiat, à cause de la dégradation vertigineuse de la qualité et de l'accentuation de l'exploitation.

Lorsqu'on admet que l'eau souterraine n'est qu'une partie de résolution d'un problème plus global, faisant intervenir d'autres systèmes (eau de surface, écologie, technique, culture, économie, ...), on se retrouve classiquement face à un obstacle d'ordre technique; la plus part des modèles utilisés en hydrogéologie sont des modèles basés uniquement sur le comportement du système aquifère, par conséquent, ils sont incapables d'intégrer dans un environnement de gestion, laquelle, actuellement est devenue une nécessité et un outil très efficace de se prémunir contre les conséquences non souhaitées de l'exploitation non rationnelle de l'eau souterraine.

Nous souhaitons, enfin, que le but de notre étude soit atteint, malgré notre mince connaissance en hydrogéologie, qui est un domaine très vaste, complexe et important du point de vue technique ou économique, ainsi que l'effort énorme que nous avons fait afin de rassembler le maximum de données possibles.

Notre première tentative de modélisation du plateau de Mostaganem, est certe une contribution modeste, mais elle permettra, peut être, dans un avenir très proche, par une meilleure maîtrise de l'information (données hydrogéologiques) de réaliser un modèle performant de gestion rationnelle de la ressource en eau.

Il faut cependant garder à l'esprit que l'efficacité des solutions dépend largement de la précision des données utilisées dans les modèles; or, ces données sont toujours entachées d'erreurs et d'imprécisions; Il n'est malheureusement pas possible d'évaluer le résultat des combinaisons des intervalles à l'intérieur desquels varient ces paramètres (par des procédés stochastiques, etc.) puisqu'il s'agit d'imprécision des nombres utilisés.

BIBLIOGRAPHIE

- Baiche. A (1994)** Hydrogéologie de la région de mostaganem
Thèse de magister. *IST,USTO,Oran.*
- Bonnet. M (1982)**, Méthodologie des modèles de simulation en hydrogéologie.
- Besbes. M (1987-1989)**, Simulation en hydrogéologie.
Cours organisé sous l'égide de l'*UNESCO* par l'*ENIT, Tunis.*
- Boumahrat. M et Gourdin. A (1983)**, Méthodes numériques appliquées.
- Castany. G(1977)**, Dictionnaire français hydrogéologie.
BRGH, Paris.
- Castany. G(1982)**, Principes et méthodes de l'hydrogéologie.
Dunod, Université Bordas, Paris.
- Castany. G(1968)**, Prospection et exploitation des eaux souterraines.
Dunod, Paris.
- Castany. G(1963)**, Traité pratique des eaux souterraines
Dunod, Paris.
- Carasso. C (1970)**, Analyse numérique, éléments de mathématiques modernes.
Canada.
- De Marsily (1981)**, Hydrogéologie quantitative.
Masson, Paris.
- Emsellem. Y(1970)**, Construction de modèles mathématiques en hydrogéologie
ENSMP-Paris.
- El Magnouni. S (1993)**, Methodologie d'aide à la décision pour l'évaluation
et la gestion multicritères des ressources en eau souterraine.
Thèse de doctorat, INP, ENSG de Nancy, France.
- Gauche. J(1971)**, Alimentation en eau de l'usine de pâte à papier de
Mostaganem, Rapport *D.E.M.R.H, Alger, (ANRH).*

Gaucher J(1972), Alimentation en eau peu minéralisée de l'usine de pâte à papier de Mostaganem, Rapport de synthèse **DEMRH, Alger, (ANRH)**.

Hellal. O et Tezkratt. N(1993), Essai d'approche par modélisation des caractéristiques hydrodynamiques de la nappe alluviale de la haute Soummam (**W.Bejaia**)

Thiery. D(1985), Initiation à la modélisation des nappes souterraines. **BRGM (France)**.

Autres sources bibliographiques:

- Carte hydrogéologique du plateau de Mostaganem au **1/100.000^e**.
- Notice explicative de la carte hydrogéologique de Mostaganem au **1/100.000^e**. **DEMRH**, service hydrogéologique **Alger (ANRH) 1978**.

Sommaire

AVANT PROPOS	1
I- INTRODUCTION	4
II- APERCU GEOGRAPHIQUE	6
II-1-SITUATION	6
II-2-MORPHOLOGIE	6
II-3-HYDROGRAPHIE	7
III-GEOLOGIE	9
III-1-LES FORMATIONS ALLOCHTONES	9
III-2-LES FORMATIONS AUTOCHTONES	10
III-3-TECHTONIQUE	11
IV-HYDROCLIMATOLOGIE	13
IV-1-INTRODUCTION	13
IV-2-PRESENTATION CLIMATOLOGIQUE DE LA REGION	13
D'ETUDE	13
IV-2-1-PRINCIPALES STATIONS PLUVIOMETRIQUES	13
IV-2-2-DETERMINATION DE LA LAME D'EAU PRECIPITEE	20
IV-2-3-TEMPERATURE	26
IV-2-4-EVAPORATION OU DEFICIT D'ECOULEMENT	27
IV-2-5-DETERMINATION DE LA LAME D'EAU RUISSELEE	33
IV-2-6-ESTIMATION DE L'INFILTRATION	34
IV-3-CONCLUSION	36
V-ETUDE HYDROGEOLOGIQUE	37
V-1-THERMINOLOGIE ET GRANDEURS FONDAMENTALES	37
V-2-LOI DU COMPORTEMENT HYDRODYNAMIQUE	38
V-3-ESSAIS DE POMPAGE	40
V-3-1-ESSAIS PAR PALIER DE COURTE DUREE	40

V-3-2-ESSAIS DE LONGUE DUREE	44
V-4-STRUCTURE ET GEOMETRIE DE L'AQUIFERE	56
V-5-INVENTAIRE DES POINTS D'EAU	56
V-6-ETUDE DE LA PIESOMETRIE	57
V-6-1-INTERPRETATION DES CARTES PIESOMETRIQUES	57
V-6-2-GRADIENT HYDRAULIQUE	63
V-6-3-FLUCTUATION DE LA NAPPE	63
VI- MODELISATION	66
VI-1-INTRODUCTION	66
VI-2-DIFFERENTS TYPES DE MODELES DE NAPPES	67
VI-2-1-LES MODELES REDUITS DE NAPPES	67
VI-2-2-LES MODELES ANALOGIQUES DE NAPPES	67
VI-2-3-MODELES MATHEMATIQUES MAILLES	68
VI-3-PRINCIPES DES MODELES MATHEMATIQUES	69
VI-3-1-REGIME PERMANENT	71
VI-3-2-REGIME TRANSITOIRE	75
VI-4-MISE EN OEUVRE D'UN MODELE MATHEMATIQUE	79
VI-4-1-GEOMETRIE DE L'AQUIFERE	79
VI-4-2-MAILLAGE	80
VI-5-DONNEES NECESSAIRES A LA MODELISATION	80
VI-5-1-PERMEABILITE	80
VI-5-2-DEBIT D'ECHANGE ET ALIMENTATION	81
VI-5-3-NIVEAU PIEZOMETRIQUE	81
VI-5-4-PLUIE	81
VI-5-5-COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT	82
VI-6- CALAGE DU MODELE	82
VII-FONCTION DU PROGRAMME	84
VII-1-MAILLAGE DU MODELE	85
VII-1-1-DECOUPAGE ET NUMEROTATION DES MAILLES	85
VII-1-2-REPERAGE GEOGRAPHIQUE	85
VII-2-DESCRIPTION DU MODELE	86
VII-3-APPLICATION DU PROGRAMME	90
VII-3-1-GEOMETRIE DU MODELE	90
VII-3-2-CONDITIONS AUX LIMITES	92
VII-3-3-PARAMETRES HYDRAULIQUES	92
VII-3-4-SIMULATION DE LA NAPPE EN REGIME	

PERMANENT	93
VII-3-5-SIMULATION DE LA NAPPE EN REGIME TRANSITOIRE	100
VIII-CONCLUSION GENERALE	105
BIBLIOGRAPHIE	106