

وزارة التعليم العالي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

2ex

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : HYDRAULIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

ETUDE HYDROGEOLOGIQUE
ET MODELISATION DE LA NAPPE
DE LOUED IN AMGUEL
W. TAMANRASSET

2 PLANCHES

Proposé par :

A. N. R. H

Etudié par :

A. LARBES

M. SAMI

Dirigé par :

Mr B. M. UPALURI

- PREFACE -

La réalisation de ce mémoire n'a pu être menée à bien que grâce à la collaboration et le dévouement de l'équipe qui nous a assisté le long du déroulement de notre travail.

A ce titre, il est de notre devoir de témoigner notre reconnaissance à notre promoteur Mr. B.M APPALURU (Enseignant à l'E.N.P.) qui nous a préparé et dirigé nos premiers pas dans un domaine aussi complexe qu'est l'hydrogéologie .

C'est sous sa conduite que nous avons entamé la réalisation de cette étude hydrogéologique, nous avons pu bénéficier dans toutes les étapes de ce travail de ses conseils désintéressés.

Nous lui témoignons ici notre profonde admiration pour son dévouement qui ne s'est jamais démenti.

Ses idées toujours fécondes ont influencé profondément ce travail aussi bien dans la forme que dans le fond.

Nos remerciements s'adressent également à Mr. B. KHAMMARI (Enseignant à l'INA - Alger), pour nous avoir fait découvrir l'utilité des modèles informatiques et conseillé sur la méthode de simulation en hydrogéologie.

C'est à Mr. LATRECH (Chef de Département hydrogéologie à l'A.N.R.H.) que nous devons la proposition de ce thème de mémoire.

C'est à lui que nous devons également la documentation qui nous a permis de faire la synthèse bibliographique des connaissances en hydrogéologie ainsi que l'exploitation des études réalisées au niveau de notre zone d'intervention .

Ainsi nous lui témoignons notre reconnaissance et le remercions d'avoir accepté de faire partie de ce JURY.

Nous sommes redevables envers Mr. H. SARI (Chef de Centre de calcul de l'E.N.P) pour sa contribution dans la mise au point du modèle hydro-géologique et nous le remercions pour ses suggestions dans la présentation au dessus de tout éloge.

Enfin, nous témoignerons notre reconnaissance à Mr. N. DECHMI (Chef de Département "Hydraulique" pour son soutien moral, ses encouragements constants, ainsi que pour sa disponibilité a nous solutionner tous les problèmes matériels.

Nous le remercions également pour avoir accepté de présider le JURY de ce mémoire. C'est un honneur auquel nous sommes très sensibles et nous tenons à lui exprimer nos vifs remerciements tout en espérant que notre travail aura répondu à ses espoirs.

LES AUTEURS

A. LARBES

M. SAMI

-o- AVANT PROPOS -o-

"Quelle boisson veux-tu?"

As-Sabi répondit: La plus précieuse lorsqu'on l'a perdue et la plus accessible lorsqu'elle existe. Et l'autre lui donna de l'eau

(Eloge à l'eau Ibn-Al-Faqui)

L'eau fait partie de l'histoire des pays, elle se lie inextricablement à la vie de l'homme, elle influence l'imaginaire collectif et conditionne profondément la société qui bien qu'avec des systèmes différents à toujours du la contrôler en mettant en oeuvre toutes ces capacités intellectuelles et créatives.

Ceci s'est vérifiée principalement dans la civilisation arabo-musulmane qui partit du désert du HIDJAZ s'est accrue presque toujours au cours de son histoire dans les zones arides est semi-aride.

Pour ces "hommes du désert" l'eau a pris non seulement une signification historique rituelle et purificatoire, mais elle est devenue un thème fondamental, inhérent à la vie même.

J.B Magnin et M. Callens notent que:

"La littérature la plus ancienne d'Arabie sait minutieusement décrire et distinguer chaque espèce d'eau rencontrés dans le désert" (...). Les poésies anciennes gardent encore les toponymes et indiquent la situation précise de nombreux puits d'Arabie".

On affirme que bien des nomades égarés durent à la mémoire exacte qu'ils avaient de ces vers de ne pas mourir de soif dans la solitude.

D'ailleurs, les puits et leurs périmètres immédiats devaient à leur importance vitale, tout le caractère intangible d'un territoire sacré.

Au niveau du Maghreb Arabe, la vallée du M'zab en Algérie (zone aride) où l'on a bâti cinq villes donne une image du génie arabo-musulman dans l'utilisation savante de l'eau de crues.

.../...

S O M M A I R E

	<u>Pages</u>
I - <u>INTRODUCTION</u>	1
1.1. Généralités	1
1.2. Objectif du travail	2
II - <u>SITUATION DU SITE</u>	3
2.1. Situation géographique	3
2.2. Caractéristiques générales	3
2.3.1. Introduction et climat régional	3
2.3.2. Climat de la zone d'étude.	5
2.3.2.1. Températures	6
2.3.2.2. Evaporation	6
2.3.2.3. Les vents	7
2.3.2.4. Précipitations	7
2.4. Géologie - géomorphologie	10
2.4.1. Géologie	10
2.4.2. Géomorphologie	10
2.5. Hydrologie - Hydrographie	12
2.5.1. Hydrologie	12
2.5.2. Hydrographie	12
III - <u>ETUDE HYDROGEOLOGIQUE</u>	13
3.1. Généralités	13
3.2. Caractéristiques générales	
3.3. Evaluation des caractéristiques hydrodynamiques	13
3.3.1. Essai par palier	13
3.3.1.1. Résultats et interpretation	14
3.3.1.2. Calcul des pertes de charge	19
3.3.2. Essai définitif.	20
3.3.2.1. Méthode de Jacob	23
3.3.2.2. Résultats des essais de pompage.	24

3.4. Evaluation du débit de la nappe	42
3.5. Qualité des eaux	43
IV - <u>MODELISATION</u>	44
4.1. Généralités sur les modèles	44
4.1.1. Etapes d'élaboration d'un modèle	46
4.2. Modèle hydrogéologique.	47
4.2.1. Introduction	47
4.2.1.1. Différences finies	48
4.2.1.2. Eléments finis	48
4.2.2. Présentation générale de la méthode des différences finies	49
4.2.3. L'équation hydrodynamique	49
4.2.4. Application aux différences finies	50
4.2.5. Application à un maillage régulier orthogonal	50
4.2.5.1. Approximation de l'équation d'écoulement	52
4.2.6. Bilan des flux	53
4.2.7. Calcul des transmissivités de passage	55
4.2.8. Les conditions aux limites	55
4.2.9. Présentation du système aquifère	56
V - <u>METHODE DE RESOLUTION</u>	57
5.1. Méthodes directes	57
5.2. Méthodes itératives	57
5.3. Régime permanent	60
5.4. Régime transitoire	60
VI - <u>ORGANISATION DU PROGRAMME ADAPTE</u>	63
6.1. Introduction	63
6.2. Fonction du programme et constructions du modèle	64
6.3. Organigramme du programme	67
6.4. Description du programme.	69
VII - <u>APPLICATION DU MODELE</u>	71
CONCLUSION	78
BIBLIOGRAPHIE.	80

CHAPITRE : PREMIER

I - INTRODUCTION:

1.1. Généralités :

Dans le monde en général et dans les pays du Maghreb en particulier les eaux souterrains revêtent une importance fondamentale pour le développement économique et social.

Les découvertes de ces dernières décades ont joué un rôle déterminant et ont rendu possible leur exploitation à grande échelle.

On dispose de plus en plus d'informations précises sur le milieu physique, sur les mécanismes d'écoulement en surface et en profondeur et on comprend mieux les principes de mécanique des fluides qui conditionnent l'alimentation naturelle en surface, l'acheminement et l'accumulation d'eau en profondeur.

Parallèlement à cette percée technologique, il s'en est suivi le prélèvement des eaux mobilisés dans les nappes d'une manière spectaculaire.

En effet, l'évolution rapide des besoins en eau à différents usages, les nécessités créées par le défi alimentaire face à une démographie galopante imposent une bonne gestion de l'eau mobilisée dans les nappes pour une exploitation optimale de l'aquifère.

A cet effet, il est nécessaire d'étudier les caractéristiques spatio-temporales de l'aquifère et l'évolution en temps du débit et des niveaux piézométriques.

Il existe plusieurs méthodes d'analyse et d'évaluation des paramètres hydrogéologiques ainsi que leur variation en temps.

Parmi ces méthodes, on citera les méthodes numériques qui sont plus facilement adaptables pour les diverses conditions hydrodynamiques.

.../...

1.2. Objectif du travail:

Cette présente étude est proposée à l'ANRH, elle s'appuie sur les données et les prévisions d'exploitation de la nappe de In-Anguel .

A cet effet une phase bibliographique concernant l'étude du milieu physique ainsi que les données de l'étude hydrogéologique existante, nous ont permis de connaître les différentes caractéristiques telles que: le système hydraulique, la dynamique de la nappe, le stockage, la structure et l'état des forages.

Compte-tenu de la complexité du système hydraulique à savoir: étendue, la géométrie, les conditions superficielles du réseau hydrographique.

On a procédé dans une deuxième phase à la prévision d'exploitation de la nappe par modèle mathématique.

Une tentative de calage de ce modèle a été faite par ajustement de la transmissivité pour savoir l'état permanent (naturel) de la nappe.

.../...

CHAPITRE: DEUXIEME

II - SITUATION DU SITE:

2.1. Situation géographique :

La zone d'étude est située à 120 Km au Nord de Tamanrasset.

Elle fait partie du Hoggar Central.

Au sein de la feuille NF 31XXIV "Assekrem" (carte du Sahara au 1/200.000), la zone est localisée entre 5°8' et 5°13' de Longitude Est et 23°40' et 23°47' de latitude Nord (figure N°1).

2.2. Caractéristiques générales :

La superficie couverte par le site d'étude est de l'ordre de 4 Km².

Elle s'étend le long de l'Oued In-Anguel depuis les confluent des Oueds Tineleft au Nord et Hirhafok au Sud jusqu'à la route transaharienne Tamanrasset-In-Salah.

Le relief est loin d'être monotone, mais perturbé et l'altitude oscille entre 965 m et 1003 m.

En partant de l'amont vers l'aval de la zone dans le sens de l'écoulement de l'oued In-Anguel, la pente connaît un gradient décroissant allant de 13‰ à l'amont pour tomber à 3,5‰ à l'aval.

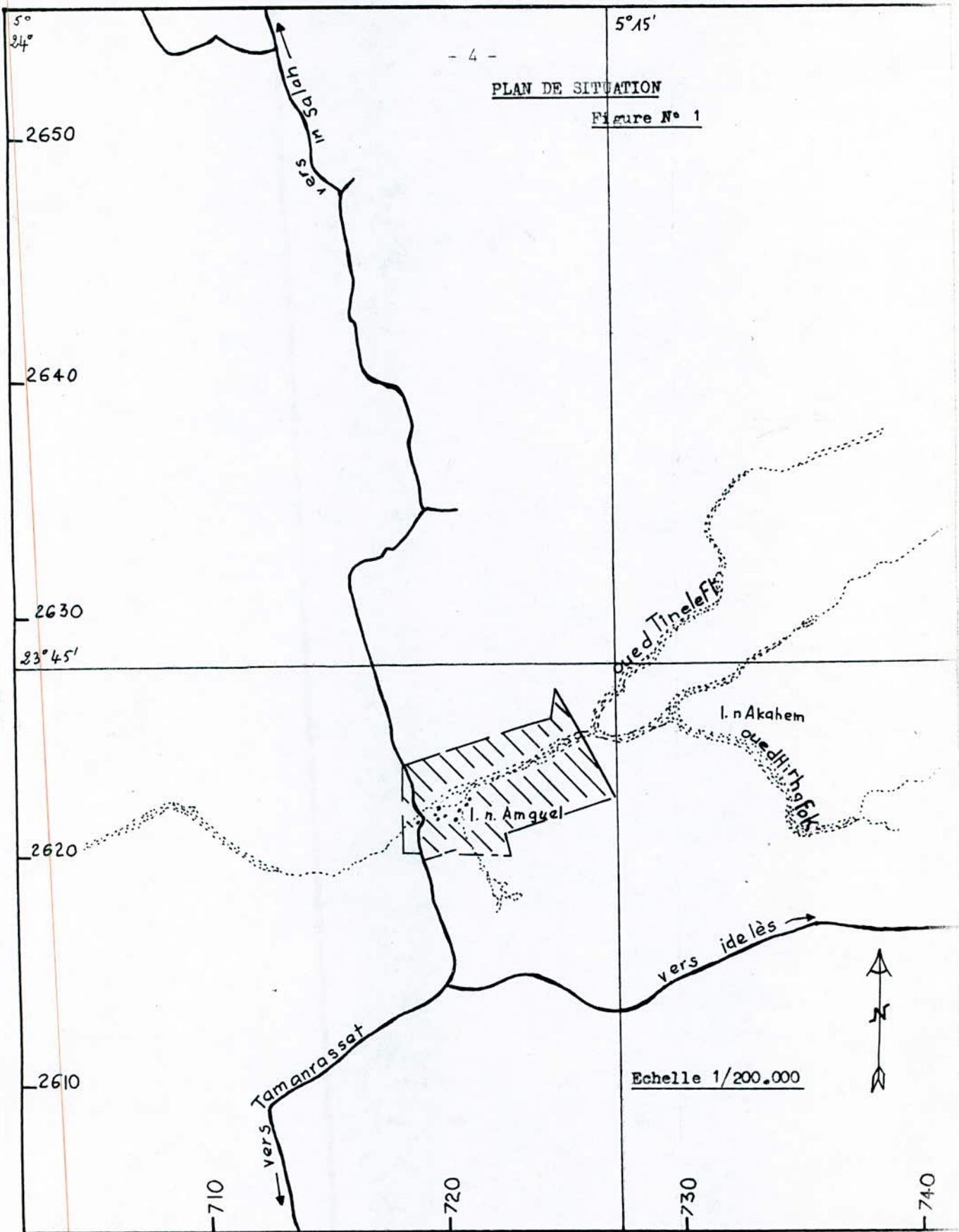
2.3. Caractéristiques climatiques :

2.3.1. Introduction et climat régional:

Le climat avec ses deux composantes principales: précipitations et températures conditionne l'intensité du processus d'altération des roches affluentes et le ruissellement des eaux zenithales et par conséquent l'alimentation de la nappe ainsi que la nature de faciés géo-chimiques.

De part sa situation dans la zone tropicale, le Hoggar est sous l'alés des hautes pressions et de faibles précipitations.

.../...



Compte-tenu de sa morphologie, le Hoggar est sous l'influence de 3 types de climat (4).

- Une zone centrale à climat relativement doux et arrosé grace aux effets de l'altitude (2916 m au Mont TAHAT).

- Une zone des reliefs de bordure à climat chaud et précipitations faibles.

- Une zone de basse plaines périphériques où les précipitations sont très rares.

En ce qui concerne les températures, les écarts diurnes et nocturnes sont spectaculaires.

2.3.2. Climat de la zone d'étude:

D'emblée, nous attirons l'attention du lecteur que le site d'étude est dépourvu de station météorologique .

Compte-tenu de ce fait nous eûmes recours aux données de la station de Tamanrasset.

Cette dernière est située à une centaine de kilomètres à vol d'oiseau de In-Arguel.

Coordonnées de la station :

Latitude: 22°47' Nord.

Longitude: 5°31' Est.

Altitude: 1377 m.

De part la situation de cette station au point de vue altitude (1377 m), et l'altitude du site d'étude (entre 965 et 1003 m), les données concernant la pluviométrie et les températures sont à prendre avec des réserves du fait que l'on sait que les précipitations reçues sont plus importantes en altitude et d'autre part les températures sont inversement proportionnelles à l'altitude.

.../...

D'une manière générale, la région est caractérisée par un contraste saisonnier spectaculaire et du type continental à savoir: De grandes chaleurs en été et un froid sec en hiver.

L'examen des relevés (températures et précipitations) à la station de Tamanrasset sur une période de 20 ans de (1967-1986) fait ressortir les données suivantes :

2.3.2.1. Températures :

La fluctuation brusque des températures diurnes et nocturnes est un paramètre essentiel qui influe sur l'altération des roches afférentes par diastylase.

Le tableau suivant résume, la moyenne des températures annuelles et mensuelles pour la période précitée :

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Moyen Annu.
T(°C) Moy de l'air	26,8	22,6	17,4	13,0	12,4	15,2	18,6	22,8	26,7	29,4	29,1	28,5	21,9

A noter que dans la région d'In-Anguel, les températures de l'air sont de 3 à 4°C plus élevées qu'à Tamanrasset.

L'amplitude annuelle moyenne: Ecart entre la température moyenne du mois le plus chaud (Juin) et celle du mois le plus froid (Janvier) est de 17°.

2.3.2.2. Evaporation :

L'évaporation mesurée à Tamanrasset (1377 m) est de 3,76 m en moyenne par an (13).

Sur le Mont Assekrem situé à 100 km de la zone d'étude et à une altitude d'environ 2716 m l'évaporation mesurée est de 3,2m/an (15).

De même pour les précipitations et les températures, il existe un gradient altitudinal en ce qui concerne l'évaporation.

.../...

2.3.2.3. Les vents :

Les vents dominants sont ceux qui soufflent au printemps et en été.

Les vents occidentaux apportent des pluies printanières en (Avril-Mai).

Les vents du Sud-Est coïncident avec la période pluvieuse (Juin-Septembre).

Les vents soufflant en hiver sont d'intensités faibles et de direction variable.

En plus il y a des vents qui soufflent durant la période Février-Mars avec une forte intensité (tourbillons de sables).

2.3.2.4. Précipitations :

L'examen de la série (1967-1986) nous renseigne sur le fait que le climat de la région est du type aride avec une pluie moyenne inférieure à 50 mm, ce qui est confirmé par le tracé des ISOHYETES moyennes (41) (figure n°2)

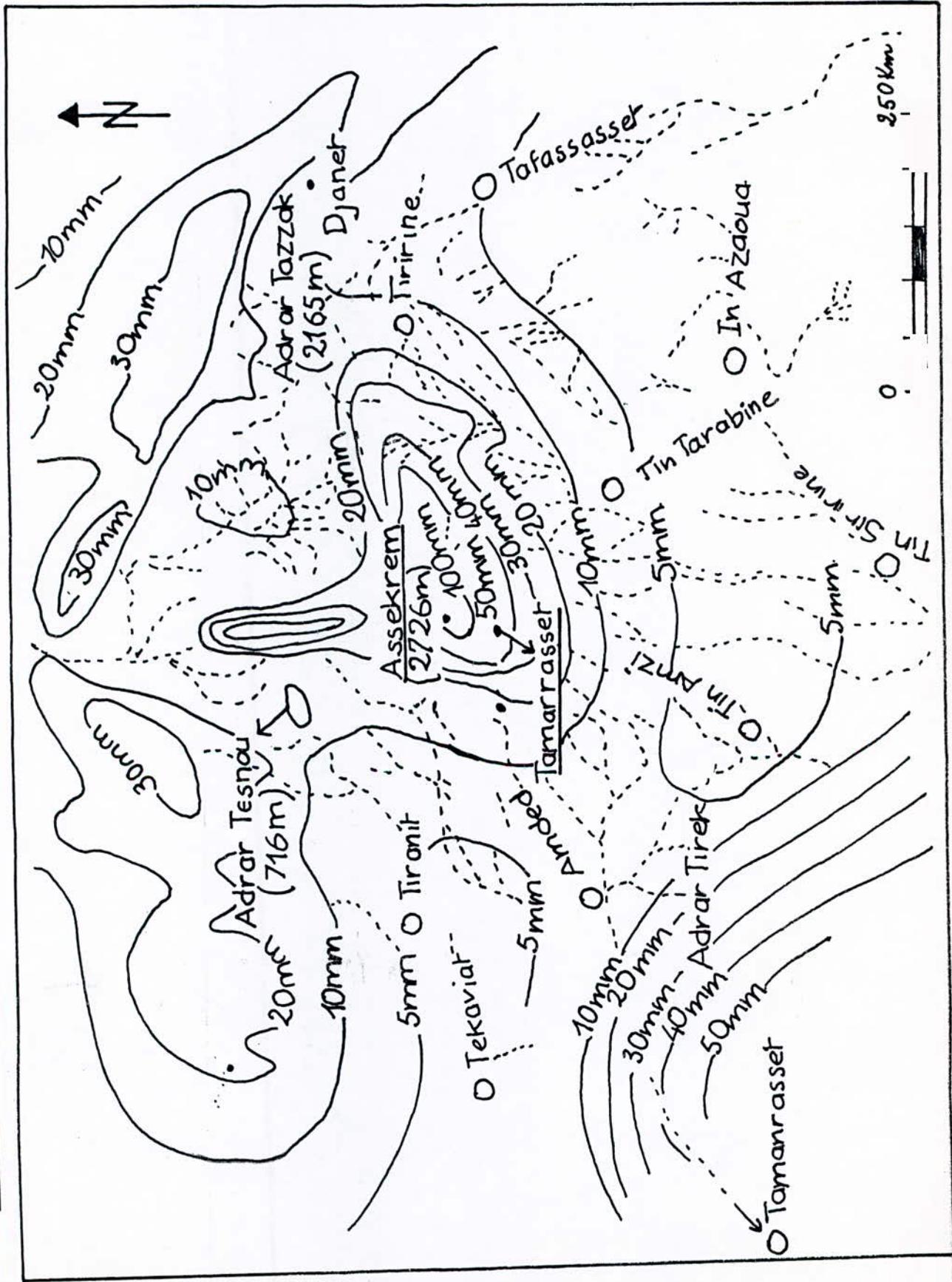
La répartition, mensuelle sur la période de 20 ans figure dans le tableau ci-dessous :

ANNEE	S	O.	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	TOTAL
1967	10	0	0	10	0	0	0	20	0	30	275	0	345
1968	230	42	0	0	0	134	0	3	173	208	5	40	835
1969	7	112	321	0	0	0	0	6	2	1	4	331	784
1970	7	2	0	40	0	0	0	0	29	84	35	0	197
1971	31	0	0	0	0	0	2	0	26	0	4	30	93
1972	5	29	0	1	0	0	0	39	133	22	0	23	252
1973	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	9
1974	187	2	0	0	0	0	0	0	13	0	90	20	312
1975	0	0	46	0	0	0	0	0	0	281	24	5	366
1976	225	26	0	17	355	72	7	58	65	11	0	5	841
1977	19	0	0	0	0	0	0	0	18	0	0	5	42
1978	247	92	0	0	0	9	0	175	0	0	27	4	554
1979	511	5	0	53	0	0	59	0	772	41	0	116	1557
1980	37	9	0	0	19	0	0	0	0	19	19	75	178
1981	0	0	0	0	0	6	0	0	11	261	185	18	481
1982	0	43	6	313	0	0	67	131	44	42	1	4	651
1983	3	0	0	0	0	169	24	0	0	93	6	128	423
1984	280	108	9	0	0	0	4	0	3	0	15	0	419
1985	1	6	0	0	0	0	27	0	4	5	94	0	137
1986	215	0	0	0	0	0	4	0	33	43	15	10	320
TOTAL	2015	476	382	443	374	390	194	432	1607	884	780	819	8796

N.B.: Les données sont exprimées en 1/10 mm.

.../...

(J.DUBIEF) ISOHYETES MOYENNES ANNUELLES



Il est regrettable que nous ne disposions pas d'une série de données plus longue sur 100 ans au moins afin d'avoir une représentativité moyenne des précipitations.

Toutefois à la lumière des données dont on dispose on peut en déduire qu'il existe une très grande variabilité mensuelle et annuelle.

La pluviométrie annuelle passe de 0,9 mm à 84,1 mm durant la première décennie (1967-1976).

Il est à noter que durant cette première décennie une grande sécheresse a régné et a affecté tout le Sahel (13) .

Durant la deuxième décennie (1976-1986), elle est de 4,2 mm à 155,7 mm.

Le mois de Septembre est le mois le plus arrosé avec une contribution de l'ordre de 23% de l'apport annuel.

D'une manière générale, l'apport estival est significatif par rapport à l'apport des autres saisons qui est partagé entre les apports de l'automne et ceux du printemps, alors que la contribution de l'hiver est insignifiante.

La pluviométrie moyenne annuelle est de 44 mm ce qui caractérise bien le climat aride en Algérie.

Conclusion sur le climat :

Compte-tenu du fait que nous ne disposions pas d'une série de donnée sur une longue période et du manque de station météorologique sur le site d'étude, les données disponibles sont loin de refléter la climatologie locale du fait d'une part qu'il existe de nombreuses "barrières climatiques" et d'autre part la variabilité annuelle est très accentuée.

A titre justificatif, au Centre Hoggar "Assekrem" 2716 m d'altitude la pluviométrie, moyenne annuelle de (1955-1982) a atteint 117 mm (13).

.../...

2.4. Géologie - géomorphologie :

2.4.1. Géologie :

Le site d'étude fait partie du Hoggar Central qui est la résultante d'un soulèvement du socle. Ce soulèvement a commencé au mésoïque, se stabilisant au miocène et se poursuivant durant le quaternaire.

In-Anguel est drainée par l'oued du même nom, sur la rive gauche le faciés est granitique tandis que le faciés de la rive droite est gneissique ces deux derniers substrats plongent en profondeur pour se joindre et former le substratum de la nappe dont la profondeur se trouve entre 10 à 40 m le long de l'oued (1) (planche n°1).

Sur la base de huit forages réalisés par l'A.N.R.H. (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques) en 1982, nous avons essayé d'esquisser un profil géologique sur une longueur de 8 km. Ces derniers forages, nous font ressortir la rareté des argiles et galets et une prédominance d'une texture grossière (figure n°3).

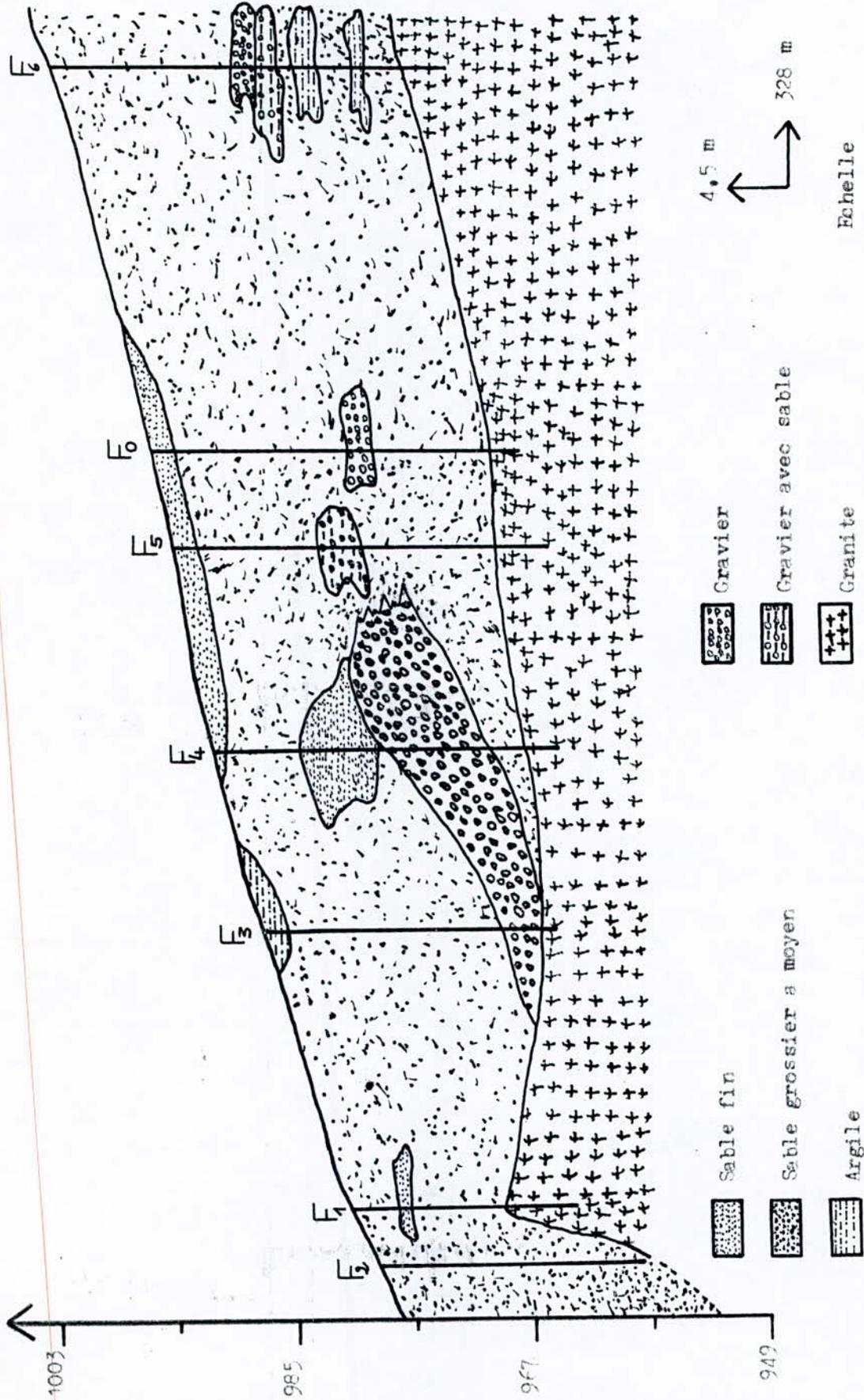
Les coordonnées les situants sur la carte d'Assekhem au 1/200.000 sont les suivants :

N° Ouvrage	Coordonnées		Altitude Z/sol (m)
	X	Y	
Fo	722,750	2623,600	980
F1	719,100	2621,650	965,3
F2	718,800	2621,750	963
F3	720,425	2622,425	971,66
F4	721,275	2622,250	975,39
F5	722,250	2623,460	978,1
F6	724,630	2624,500	987,776
F7	725,700	2624,900	1003

2.4.2. Géomorphologie :

On peut diviser le Hoggar en trois compartiments morphologiques qui correspondent sensiblement aux trois zones climatiques (15).

.../...



COUPE GEOLOGIQUE DE L'OUED IN AMGUEL

Figure N°3

- Les chaines de montagnes discontinues avec des altitudes allant de 500 à 2000 m qui forment le Tassili.
- Les plaines granitiques entourant le noyau et servant de glacis avec des points côtés variant de 500 à 1200 m.
- Le noyau Central qui forme le massif du Hoggar.

2.5. Hydrologie - Hydrographie :

2.5.1. Hydrologie:

Compte-tenu du régime pluvial qui est du type orageux et de sa répartition, les pluies sont de fortes intensités .

En fonction de leur période de retour et de la nature des bassins versants qui ont une perméabilité insignifiante, des phénomènes de crue peuvent se manifester à la faveur des ruissellementset ceci en fonction des pentes des bassins versants environnants .

2.5.2. Hydrographie :

Le réseau hydrographique a été esquissé à la faveur de la tectonique du Hoggar, du faciés géologique des bassins versants et de la pente de ces derniers.

Le réseau hydrographique actuel est formé de l'oued principal qui draine la plaine alluviale de In-Anguel ainsi de deux confluent de part et d'autre. (Hirhafok et Tineleft).

.../...

CHAPITRE: TROISIEME

III - ETUDE HYDROGEOLOGIQUE :

3.1. Généralités :

La région d'In-Anguel est drainée par l'oued principal du même nom qui prend naissance au niveau des confluent de Tineleft et Hirhafok .

Cette région est constituée par une seule nappe phréatique de type "INFEROFLUX", elle est comprise dans un aquifère alluvial de fond de vallée et en liaison hydraulique avec l'oued In-Anguel et dont l'écoulement à une composante principale.

3.2. Caractéristiques générales:

Cette nappe est constituée de terrain mixte formé par des alluvions de l'oued In-Anguel reposant sur des altérites issues du socle fissuré.

Elle est limitée par les affleurements de granite aux deux extrémités des rives et par le substratum granitique à des profondeurs variables.

La puissance de l'aquifère est variable de l'amont à l'aval, elle est de 17,14 m au forage Fo et 5,81 m au forage F1.

De même que le niveau statique oscille entre 3,45 et 14,38 m.

3.3. Evaluation des caractéristiques hydrodynamiques :

Les caractéristiques hydrodynamiques sont évaluées par des essais de pompage, effectués sur un ensemble de 7 forages.

Ces caractéristiques sont déterminées par deux types d'essai (par palier -et- définitif).

3.3.1. Essai par palier :

L'essai par palier permet de dresser la courbe caractéristique (débit-rabattement) pour chaque forage et adapter les débits définitifs "critiques" ainsi que la détermination des pertes de charges dans les forages pour évaluer l'état de ces derniers.

Un essai de trois paliers enchainés a été réalisé sur chaque forage comme suit :

- Premier palier - pompage 4 heures débit minimum 9 à 12l/s.
- Deuxième palier - pompage 4 heures débit moyen 14 à 16l/s.
- Troisième palier - pompage 4 heures débit maximum 18 à 20l/s.

Théoriquement la courbe caractéristique permet de distinguer deux segments distincts. 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, ce point permet de déterminer graphiquement le débit critique, cette donnée est importante car elle représente le débit maximum qui ne saurait en aucun cas être dépassé afin préserver le bon état de l'ouvrage et des équipements.

Le débit critique permet ainsi déterminer le débit d'exploitation maximum, celui-ci représente 60 à 75% du débit critique.

3.3.1.1. Résultats et Interprétation :

Les résultats de ces essais sont présentés dans le tableau ci-dessous:

N° OUVRAGE	PALIER	TEMPS DE POMP. PALIER EN H.	RABATTEMENT S (m)	DEBIT Q (l/s)
Fo	1er palier	4	4,924	10,87
	2 ^e palier	4	8,985	14,49
	3 ^e palier	4	11,06	15,67
F1	1er palier	4	1,725	12,17
	2 ^e palier	4	1,85	12,76
	3 ^e palier	4	1,865	13,70
F2	1er palier	4	0,54	10,29
	2 ^e palier	4	0,80	14,58
	3 ^e palier	4	1,095	19,84
F3	1er palier	4	1,54	11,74
	2 ^e palier	4	2,055	15,02
	3 ^e palier	4	2,825	19,23
F4	1er palier	4	0,815	10,64
	2 ^e palier	4	1,158	14,08
	3 ^e palier	4	1,725	19,61
F5	1er palier	4	6,16	12,66
	2 ^e palier	4	8,35	16,23
	3 ^e palier	4	9,08	19,90
F6	1er palier	4	0,42	8,20
	2 ^e palier	4	0,835	15,02
	3 ^e palier	4	1,128	19,84

Les courbes caractéristiques (débit - rabattement) sont représentés dans les graphes (figure n°4,5,6,7) ci-après.

.../...

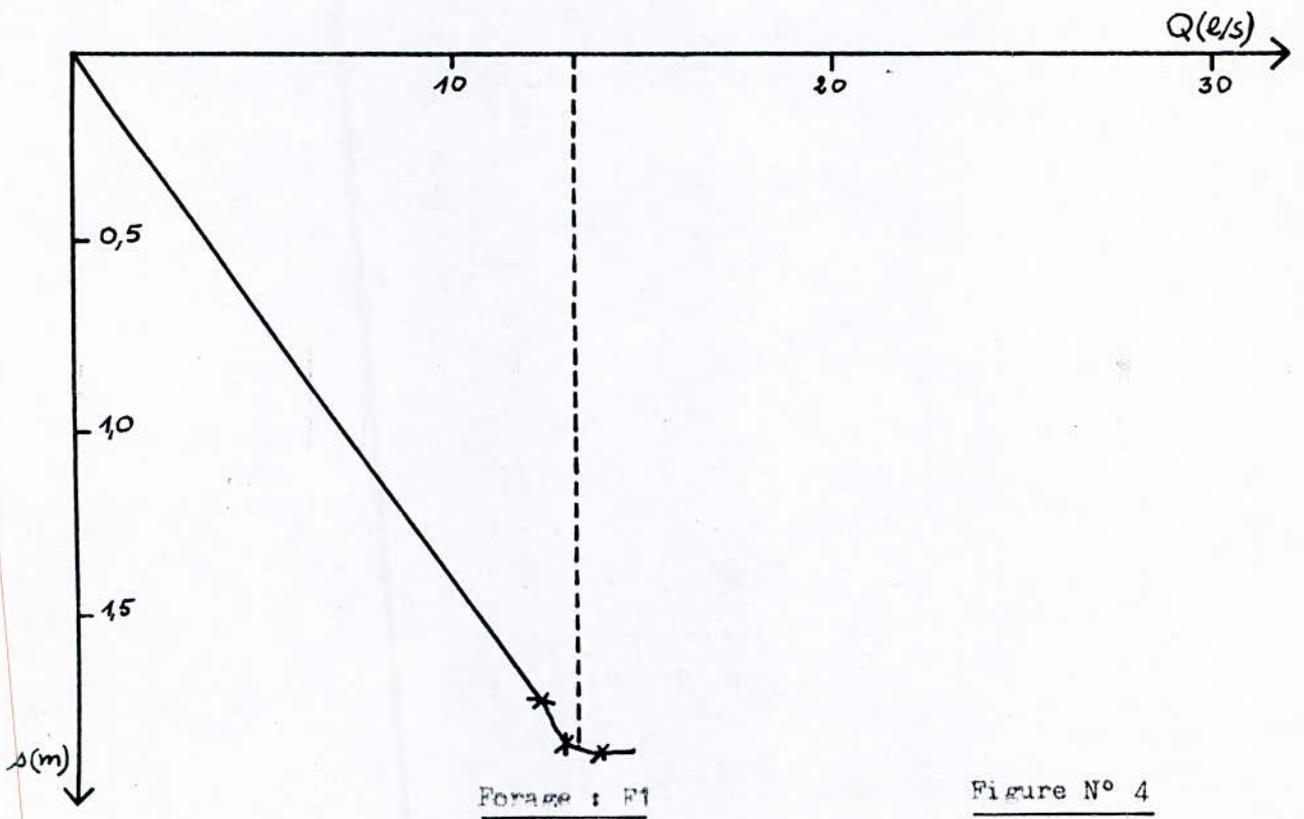
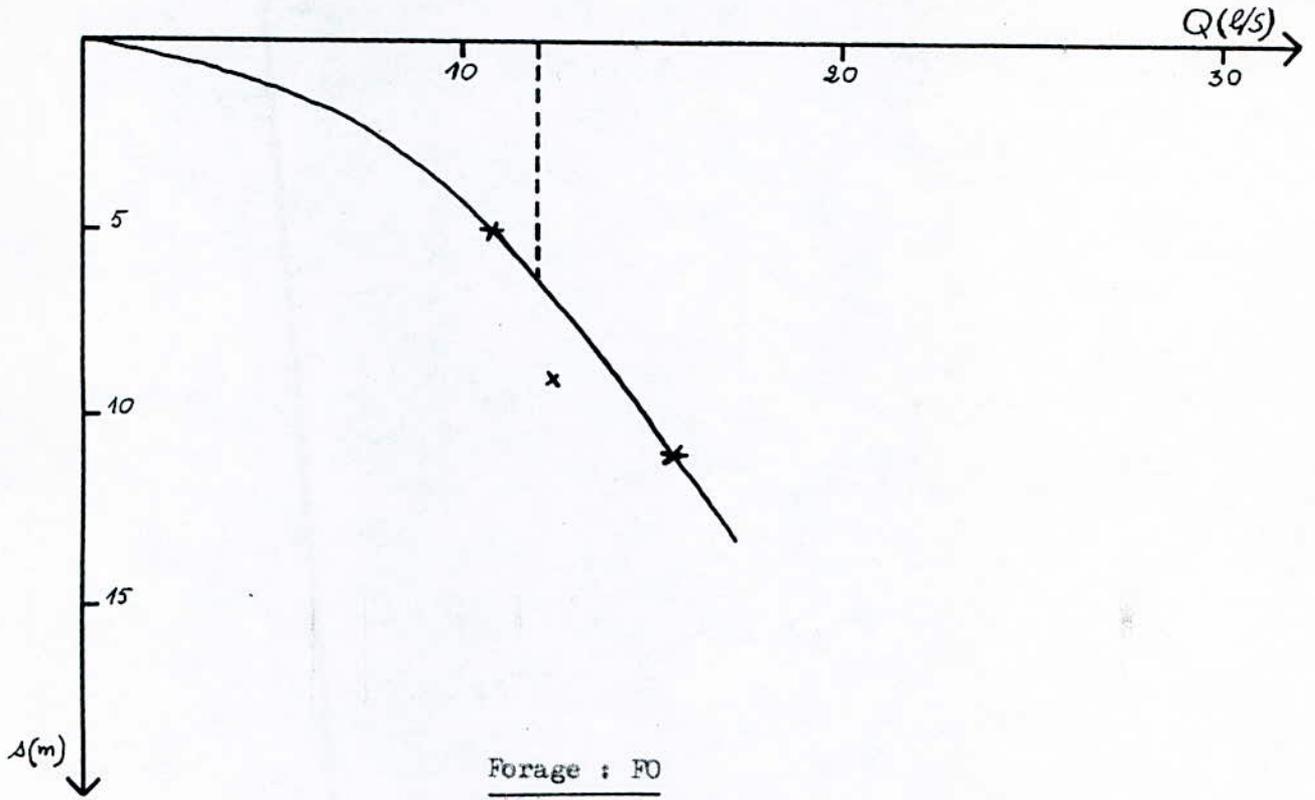


Figure N° 4

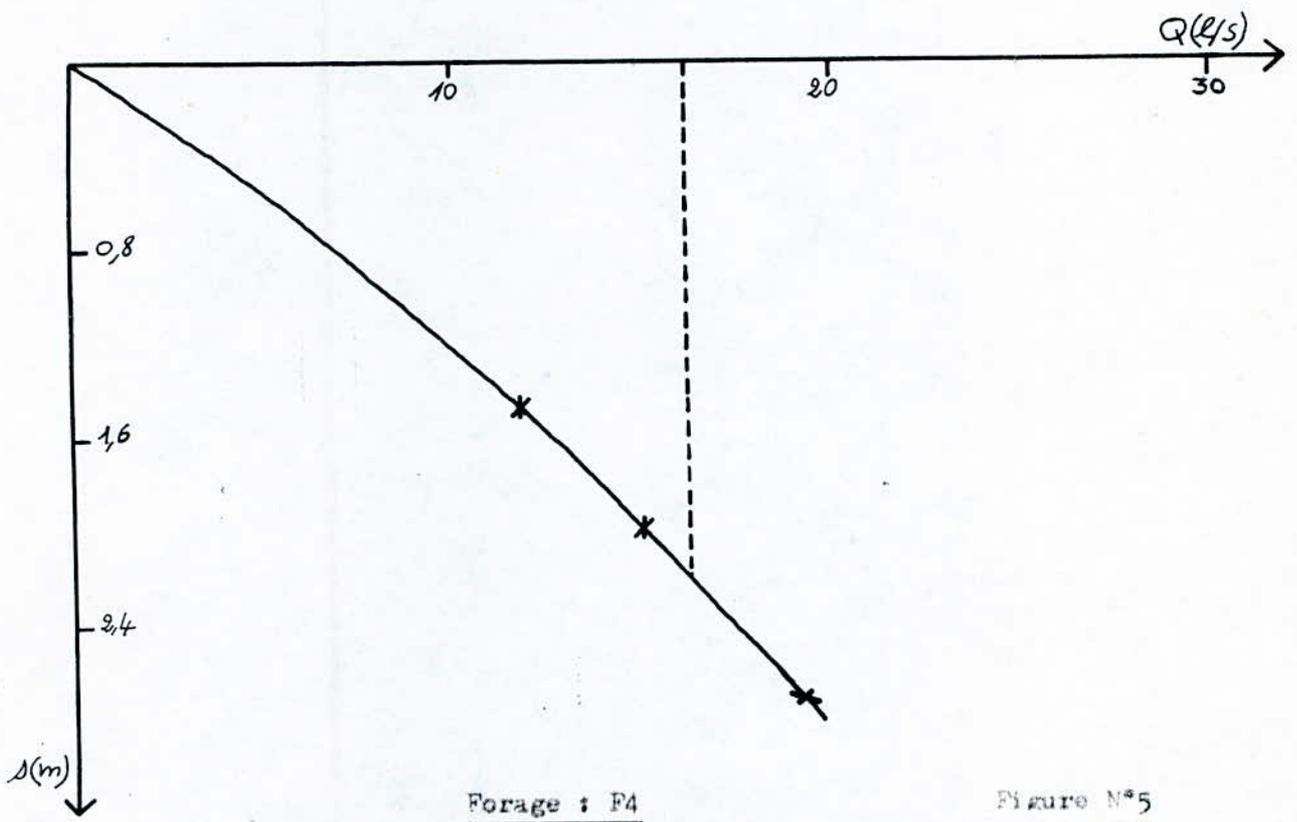
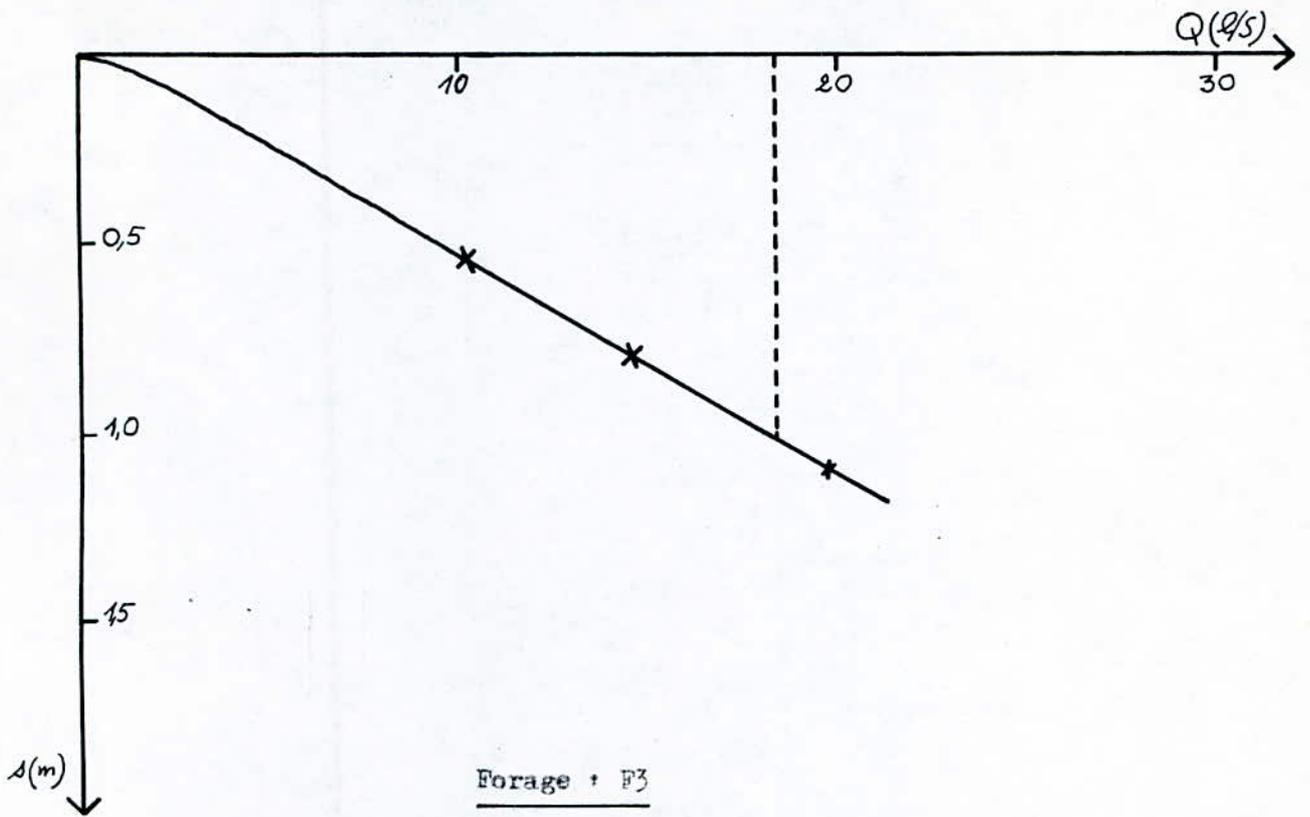


Figure N°5

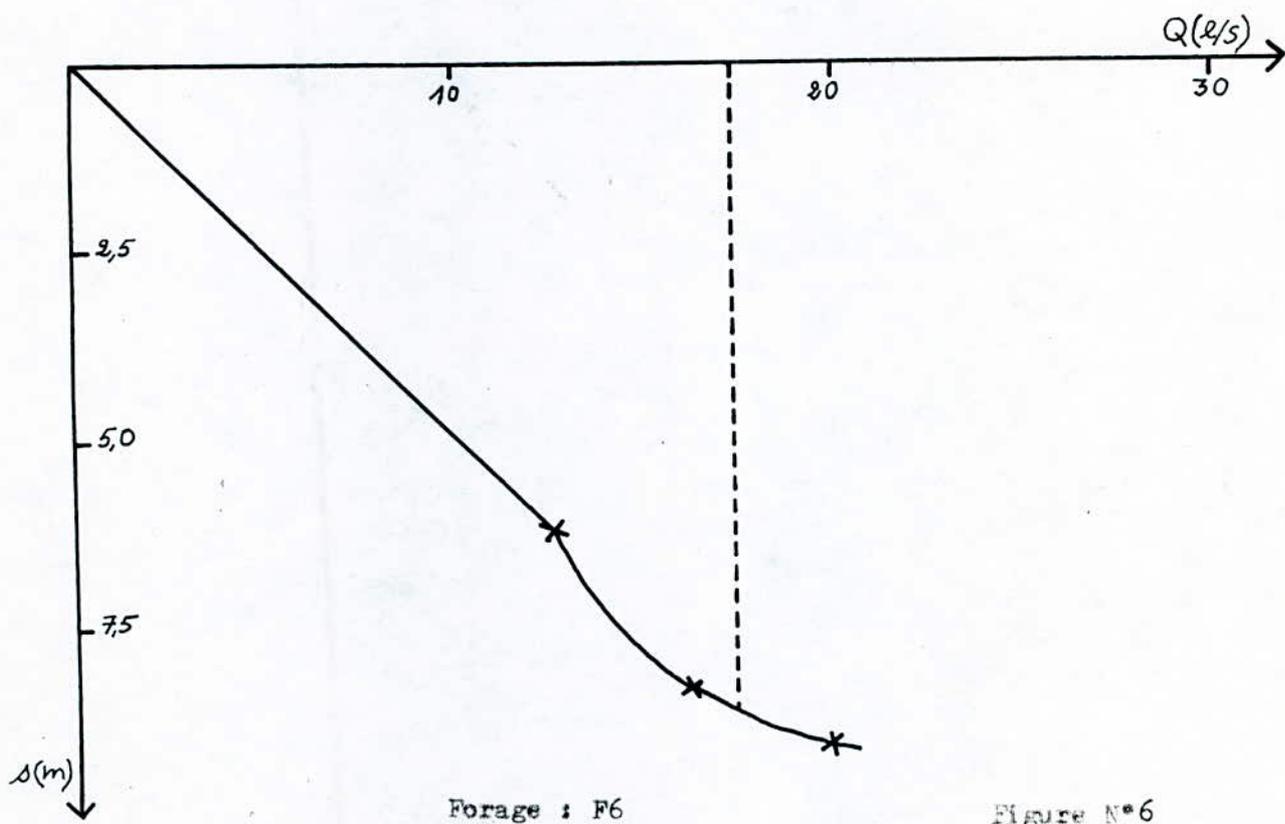
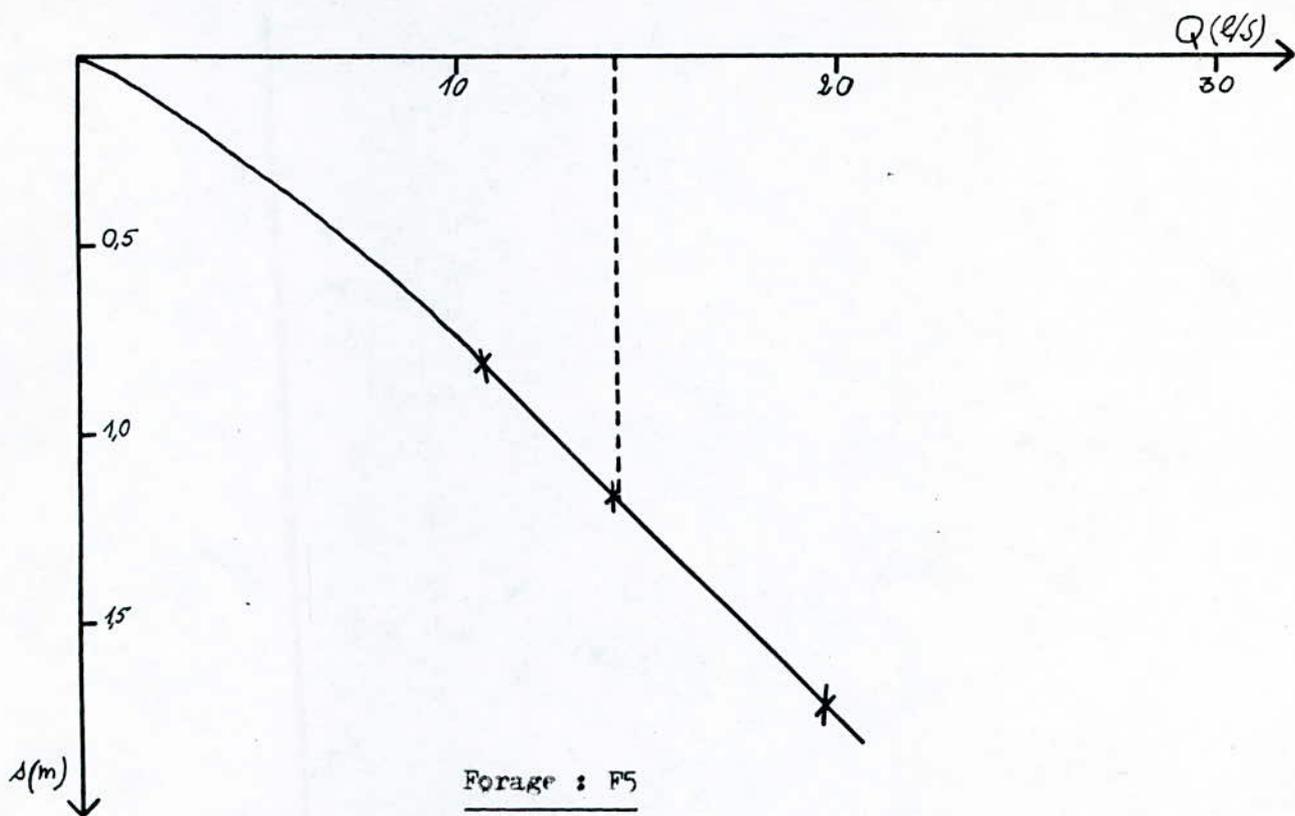
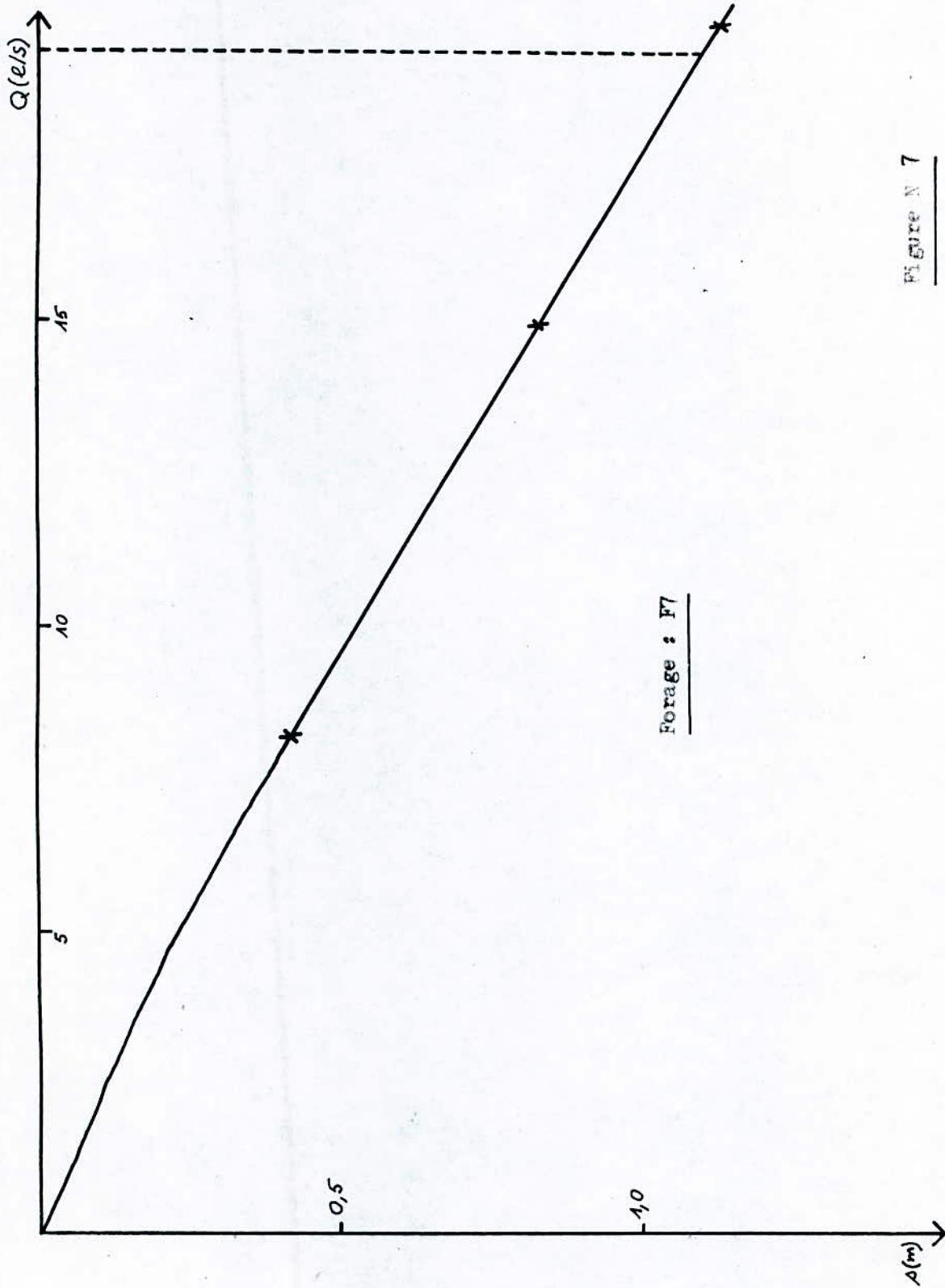


Figure N°6



Forage : F7

Figure N 7

.Interprétation des courbes caractéristiques :

D'après les courbes caractéristiques $s=f(Q)$, on remarque que dans presque tous les cas, les courbes sont des droites (sauf forage Fo) indiquant que le débit critique est toujours supérieur au débit maximum choisi. Ceci s'explique par l'absence de pompes assez puissantes qui puissent fournir des débits supérieurs.

Les débits définitifs adoptés sont :

N° OUVRAGE	Fo	F1	F3	F4	F5	F6	F7
Débit définitif (l/s)	11,96	13,27	18,43	16,16	14,11	17,44	19,42

3.3.1.2. Calcul des pertes de charges dans les forages :

Les pertes de charges sont exprimées par la relation suivante :

$$S = BQ + CQ^2 \quad (3.1.).$$

Où: S: Rabattement dans le forage à l'instant t en mètres.

BQ: Pertes de charges linéaire provoquées par l'écoulement laminaire dans l'aquifère au voisinage du forage.

CQ^2 : Pertes de charges quadratique, non linéaire provoquées par l'écoulement turbulent dans l'ouvrage.

Pratiquement, on reporte sur papier millimétré :

- en ordonnée le rabattement spécifique S/Q.
- en abscisse le débit Q.

La droite de rabattement spécifique - débit :

$$S/Q = f(Q) \quad (3.2.).$$

Nous permet de déterminer les coefficients B et C.

- le coefficient B est connu par l'intersection de la droite $S/Q=f(Q)$ avec l'axe des rabattements spécifiques.

- le coefficient C est égal à la pente de cette droite

.../...

Les pertes de charges nous permettent d'évaluer l'état de l'ouvrage d'après les critères (14) définis ci-dessous

$C < 1900$	Le forage est très bon
$1900 < C < 3800$	Le forage est modéré.
$3800 < C < 15000$	Le forage est mauvais.
$C > 15000$	Le forage est très mauvais.

Dans les figures (N°8 et 9) on a tracé les droites $S/Q = f(Q)$ pour les 7 forages étudiés.

Les résultats des calculs des coefficients B et C sont présentés dans le tableau récapitulatif des résultats ci-après.

On remarque pour le forage Fo (figure n°8) le coefficient B déterminé par la méthode graphique est négatif. Ce résultat indique que les pertes de charges linéaires sont nulles c'est à dire $BQ = 0$.

Donc le rabattement est égal seulement aux pertes de charge quadratiques, il est exprimé par la relation suivante : $S = CQ^2$.

Tableau récapitulatif des résultats :

N° OUVRAGE	Q(1/s)	C (s ² /m ³)	B (s/m ²)	S (m)	ETAT
Fo	11,96	48871,00	-	6,99	Très mauvais
F1	13,27	5593,20	84,00	2,10	Mauvais
F3	18,43	354,71	48,75	1,02	Très bon
F4	16,16	1677,76	106,00	2,15	Bon
F5	14,11	1325,20	62,50	1,15	Bon
F6	17,44	7815,13	378,00	8,97	Mauvais
F7	19,42	612,40	46,35	1,13	Très bon

3.3.2. Essais définitifs :

Un essai de pompage à débit constant d'une durée d'au moins 48 heures a été réalisé sur chaque forage pour permettre la détermination des paramètres de l'aquifère. Seul les forages Fo et F3 furent suivis avec des piézomètres et nous ont permis de calculer le coefficient d'emmagasinement.

Les résultats sont interprétés en appliquant la méthode de Jacob.

.../...

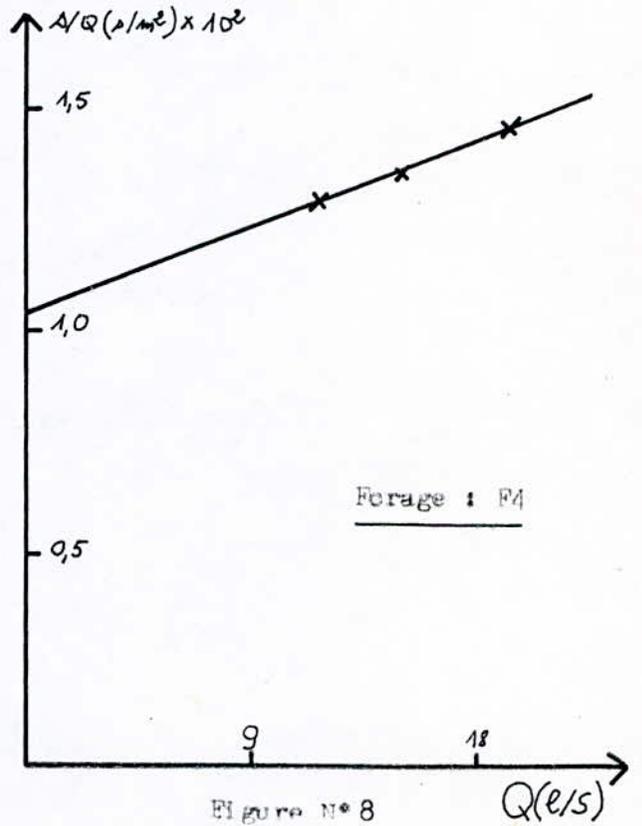
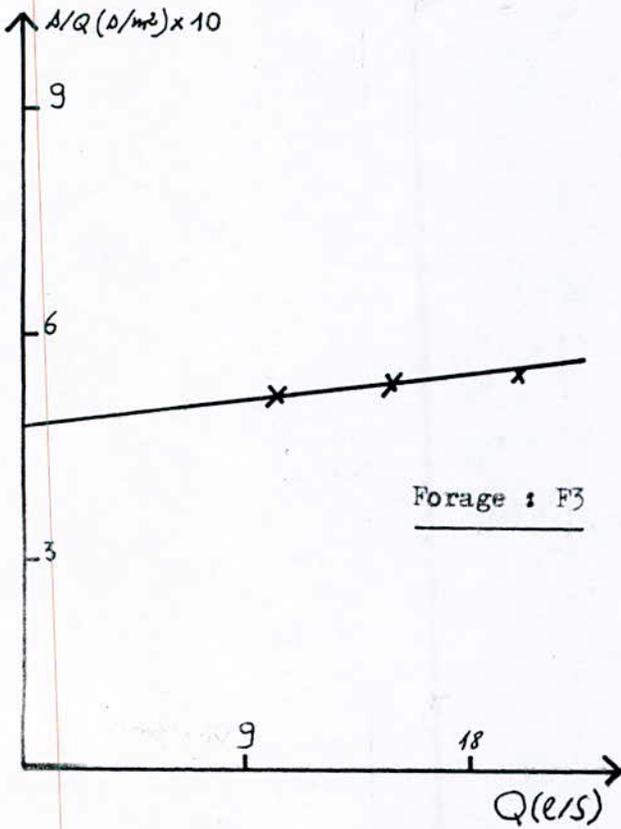
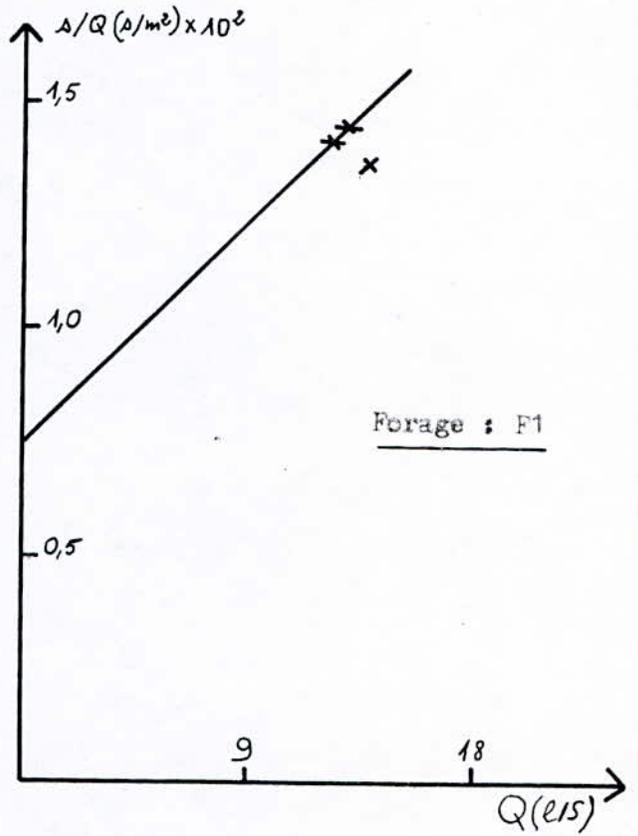
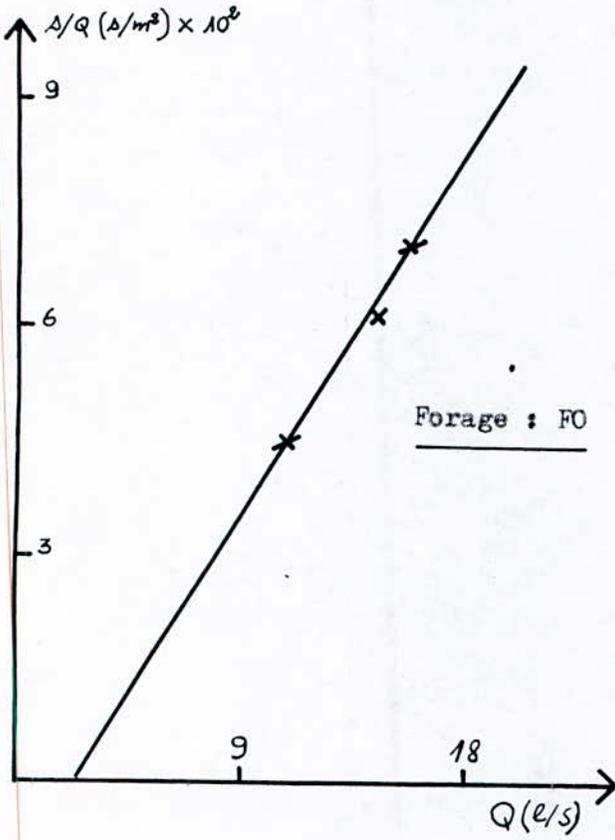


Figure N° 8

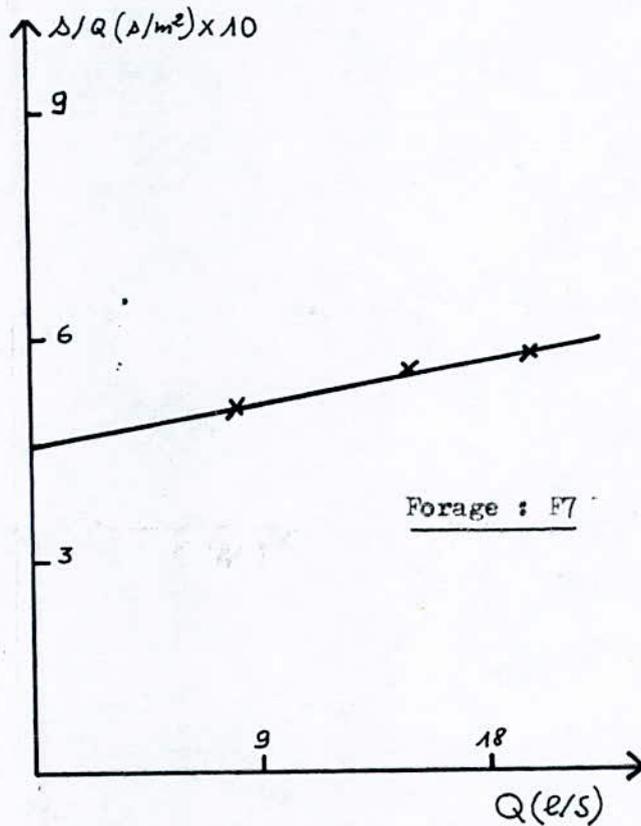
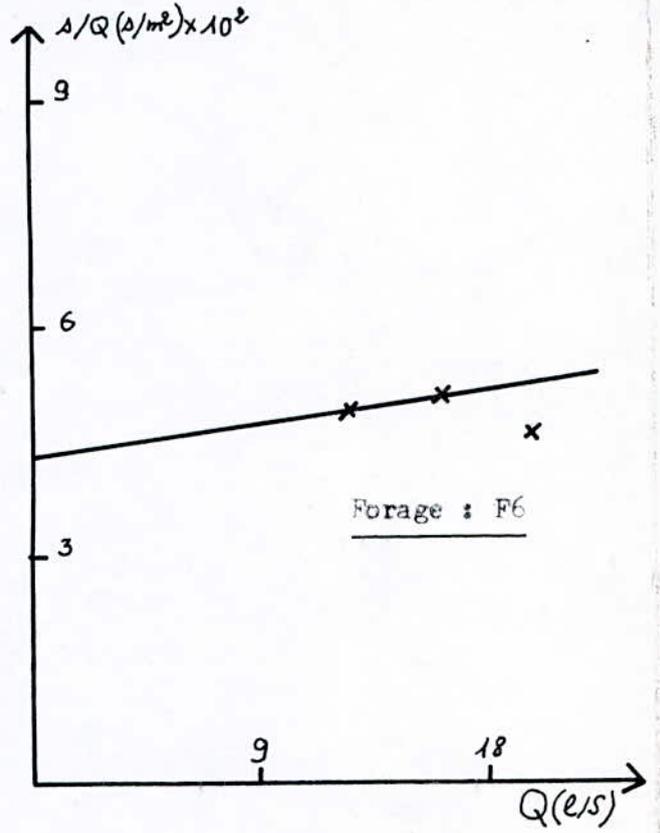
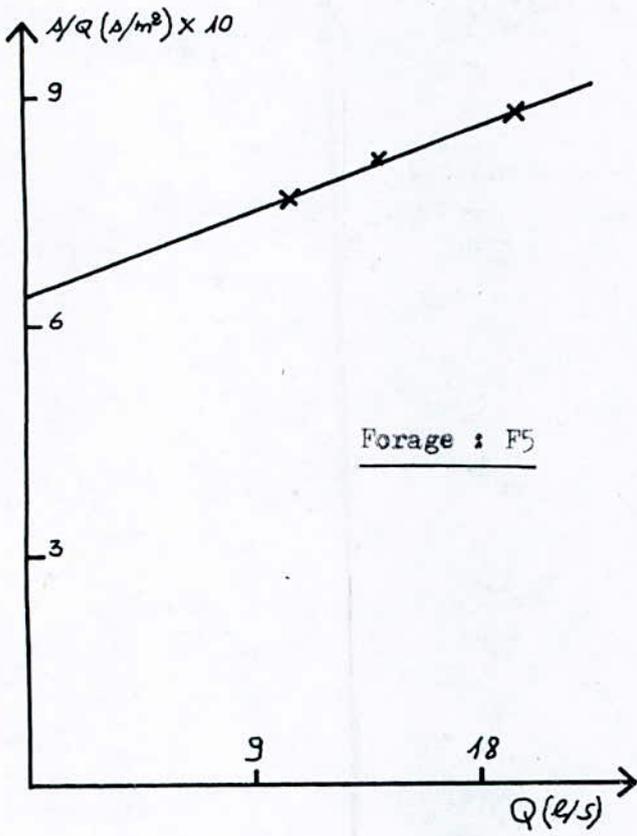


Figure N° 9

3.3.2.1. Méthode de Jacob :

Pour le calcul de la transmissivité (T) et le coefficient d'emmagasinement (§), nous utiliserons la formule d'approximation logarithmique dite "méthode de Jacob" appliquée aux écoulements radiaux souterrains en régime transitoire dont l'équation est donnée par :

$$S = 0,183 \frac{Q}{T} \log 2,25 \frac{Tt}{\$r^2} \quad (III.3).$$

Où: S: Rabattement (m).

T: Transmissivité (m²/s).

t: Temps correspondant au rabattement (s).

r: Distance entre le puit et le piezomètre (m).

§: Coefficient d'emmagasinement (sans dimension).

Q: Débit en (m³/s)

La méthode est basé sur l'interprétation des graphes :

S = f (logt) dans le cas de la "Descente" et

S = f (log t/t') dans le cas de la "Remontée", pour lequel l'équation (III.3) est réduite à :

$$S = 0,183 \frac{Q}{T} \log \left(\frac{t}{t'} \right) \quad (III.4)$$

Où: t': désigne le temps écoulé depuis l'arrêt de pompage.

La transmissivité (T) sera donnée par la formule :

$$T = 0,183 \frac{Q}{C} \quad (III.5).$$

Où: C: Pente de la droite du graphe de S= f (logt).

et S= f (logt t/t') calculée pour un cycle logarithmique de temps.

Le coefficient d'emmagasinement (§) s'obtient à l'aide du temps fictif to pour lequel S= 0.

$$\text{soit: } \$ = 2,25 \frac{Tt_0}{r^2} \quad (III.6).$$

Remarque:

La méthode est applicable quand le paramètre U est inférieur à 10⁻² où $U = \frac{\$ r^2}{4T t}$, sinon on applique la formule de THEIS.

.../...

Dans notre cas cette condition est vérifiée.

La représentation de ces essais est donnée dans les graphes (figure n°10 à 18).

3.3.2.2. Résultats :

*Forage Fo :

Descente :

La variation et le fort rabattement du niveau de l'eau du début de l'essai jusqu'à la minute 40 sont dus au réglage du débit (vannage) et aux pertes de charges de l'ouvrage, du tubage, et de la pompe.

Les points expérimentaux (après 40 mn s'alignent et tracent la réaction du pompage au cours de cette descente et par laquelle nous avons pu dresser le segment de droite. Ensuite les points se décrochent vers le bas (sur 1m) de la minute 900 à la fin du pompage.

Les paramètres calculés à partir du segment de droite sont :

$$T = \frac{0,183 Q}{C} = \frac{0,183 \times 11,9610^{-3}}{30.10^{-2}} = 7,310^{-3} \text{ m}^2/\text{s}.$$

$$K = \frac{T}{H} = \frac{7,3.10^{-3}}{17,145} = 4,26.10^{-4} \text{ m/s}.$$

Remontée :

On peut observer au début une forte remontée après l'arrêt du pompage, ensuite la véritable réaction de la nappe apparaît et remonte progressivement pour atteindre son niveau initial.

En fonction des points représentatifs sur papier semi-log, deux droites ont pu être tracées et nous donnent les résultats suivants :

$$T_1 = \frac{0,183 Q}{C} = \frac{0,183 \times 11,96.10^{-3}}{16.10^{-3}} = 13,7.10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}.$$

$$T_2 = \frac{0,183 Q}{C} = \frac{0,183 \times 11,96.10^{-3}}{44.10^{-3}} = 4,97.10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}.$$

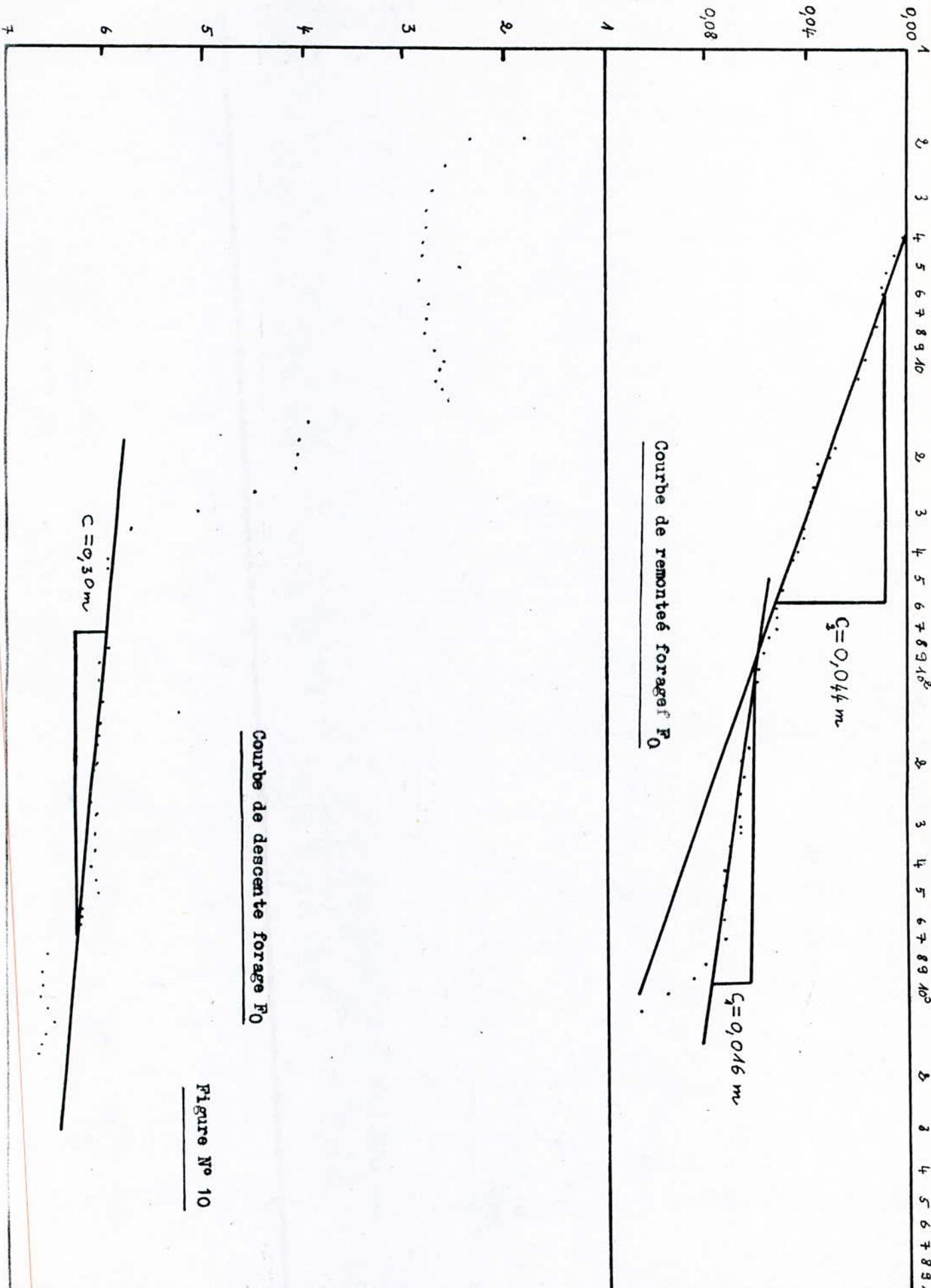
$$K_1 = \frac{T_1}{H} = \frac{13,7.10^{-2}}{17,145} = 8.10^{-3} \text{ m/s}.$$

$$K_2 = \frac{T_2}{H} = \frac{4,97.10^{-2}}{17,145} = 2,9.10^{-3} \text{ m/s}.$$

.../...

Rabattements en

(m)



Courbe de descente forage F0

Courbe de remontée forager F0

Figure N° 10

Rabattements en (m)

0,12
0,10
0,08
0,06
0,04
0,02
0,00
0,12
0,10
0,08
0,06
0,04
0,02
0,00

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 2 3 4 5 6 7 8 9 10² 2 3 4 5 6 7 8 9 10³ 2 3 4 5 6 7 8 9 10⁴

Temps en minutes

Courbe de descente piezometre près de P₀

$C = 0,03 m$

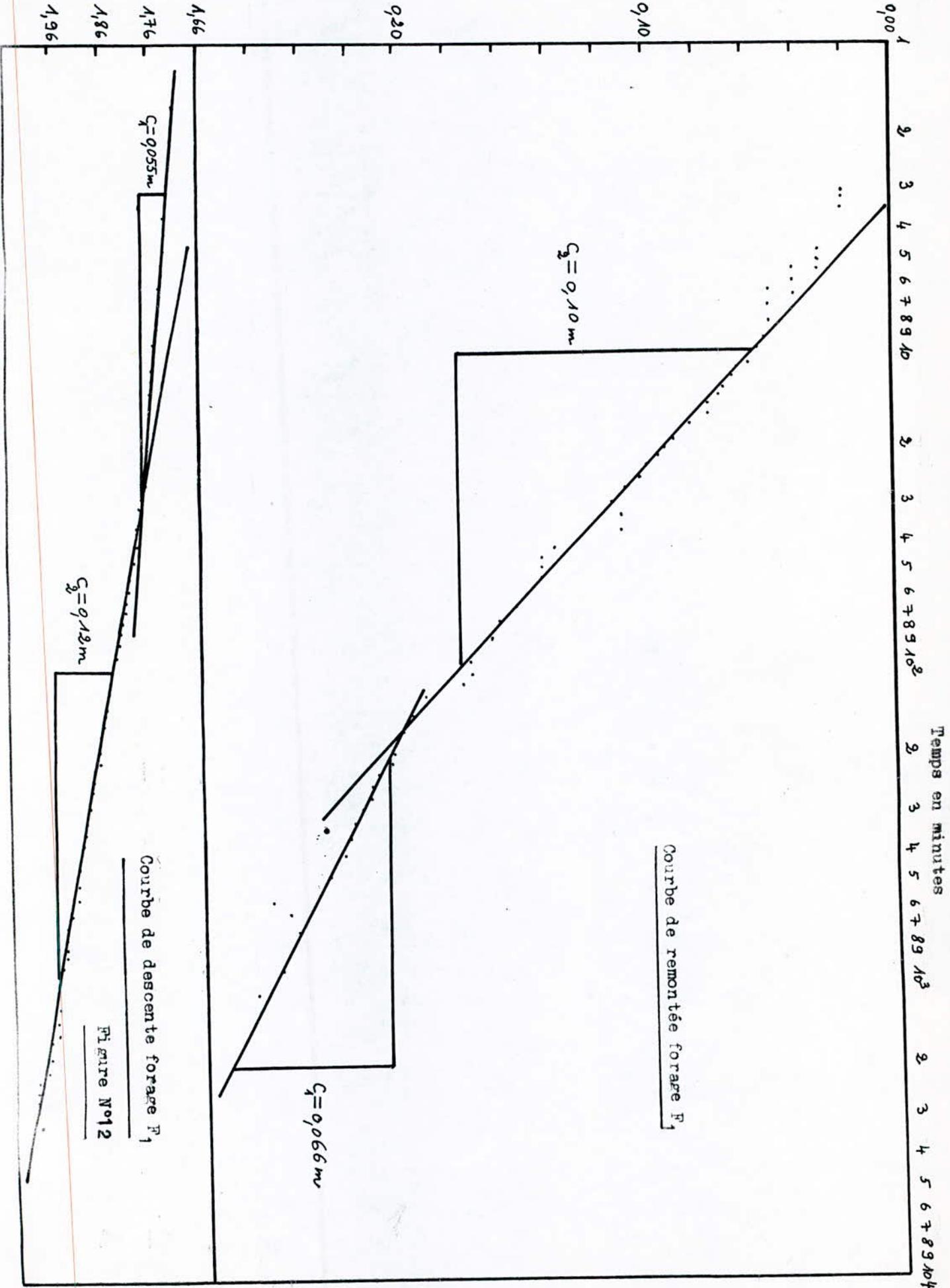
Courbe de remontée piezometre près de P₀

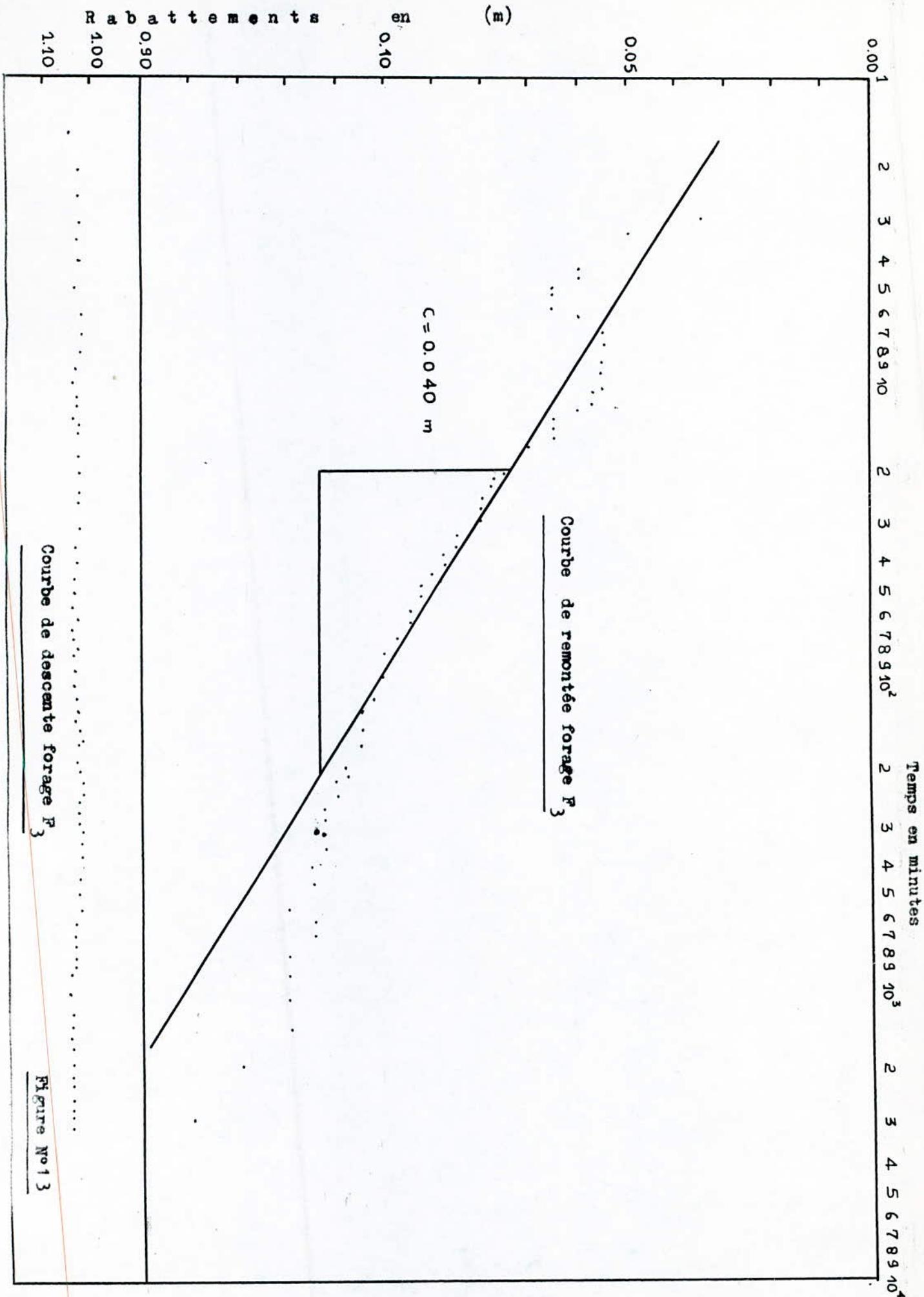
$C_3 = 0,05 m$

$C_4 = 0,018 m$

Figure N° 11

Rabattements en (m)





Courbe de descente forage P3

Courbe de remontée forage P3

Figure No 13

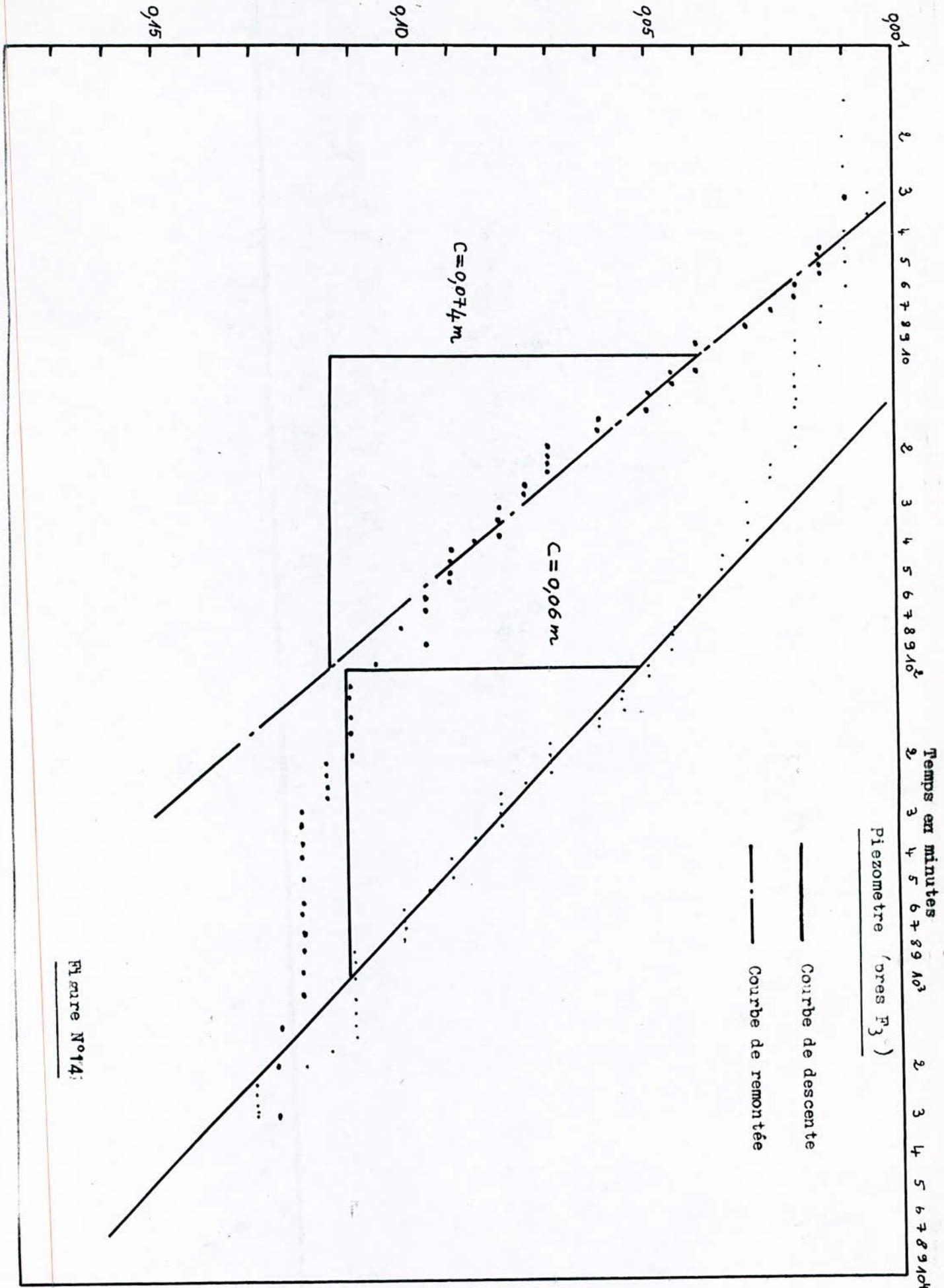


Figure No 14:

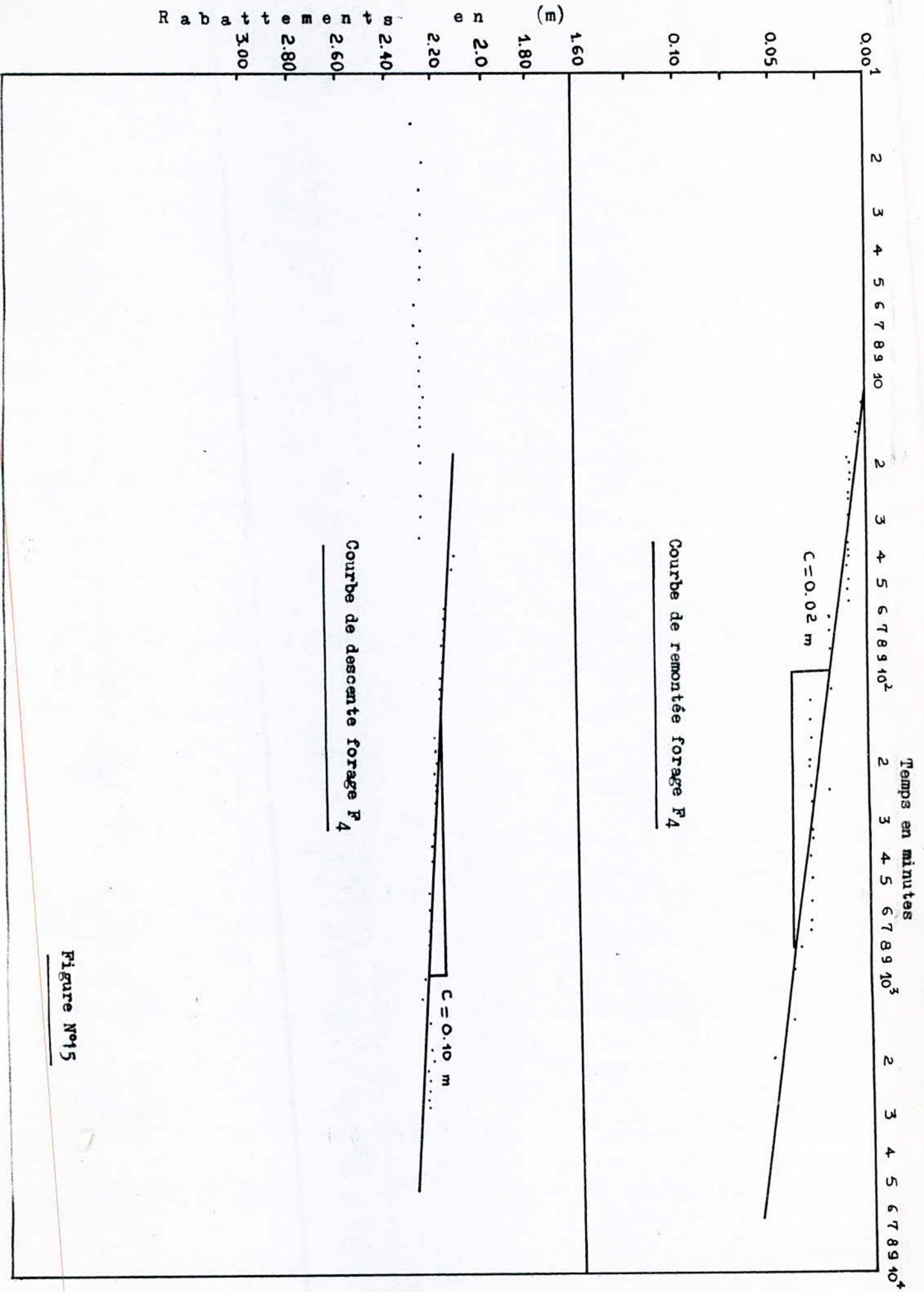
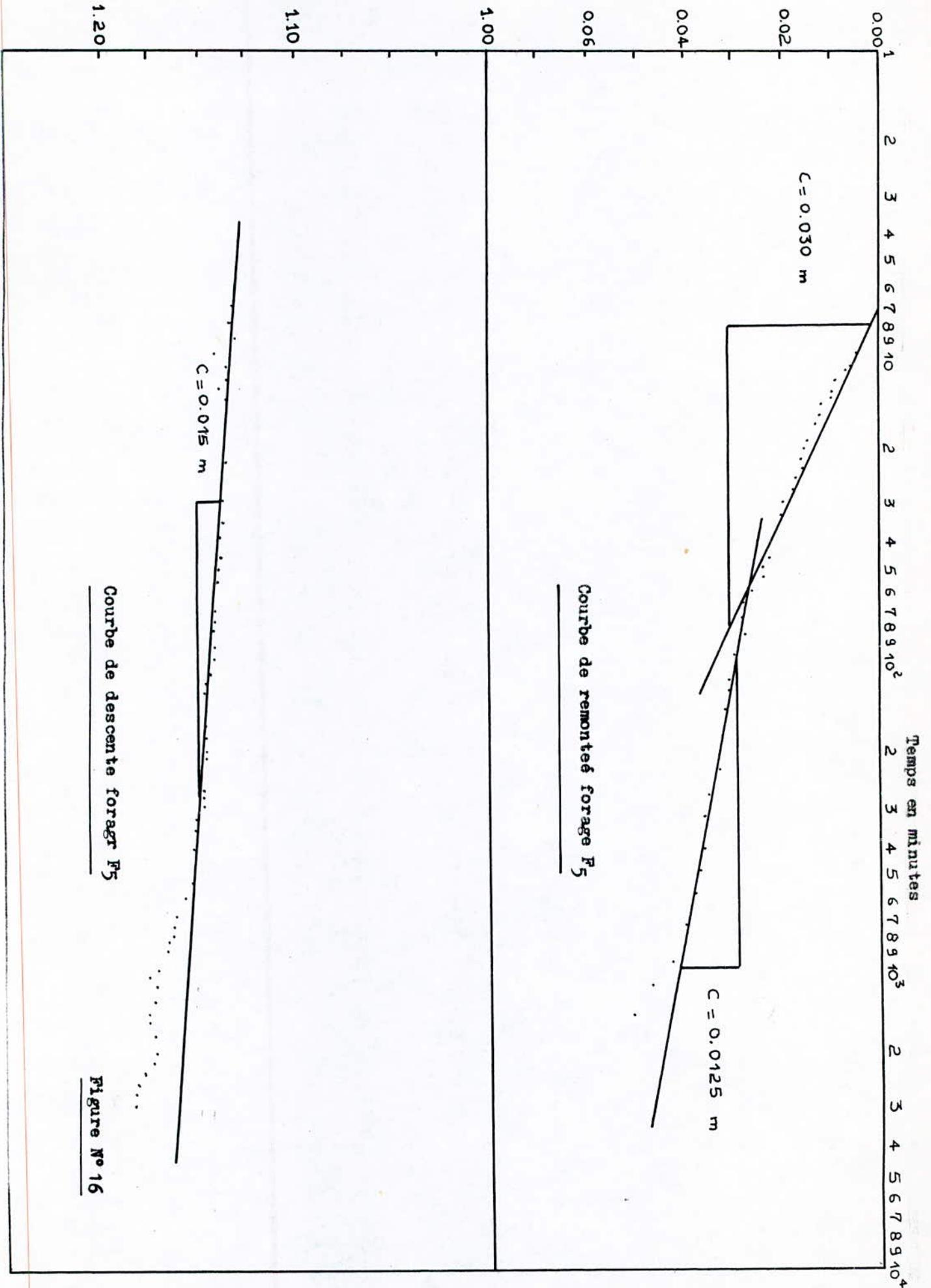


Figure N°15

Rabattements en (m)



Courbe de descente forage F₅

Figure No 16

Rabattements en (m)

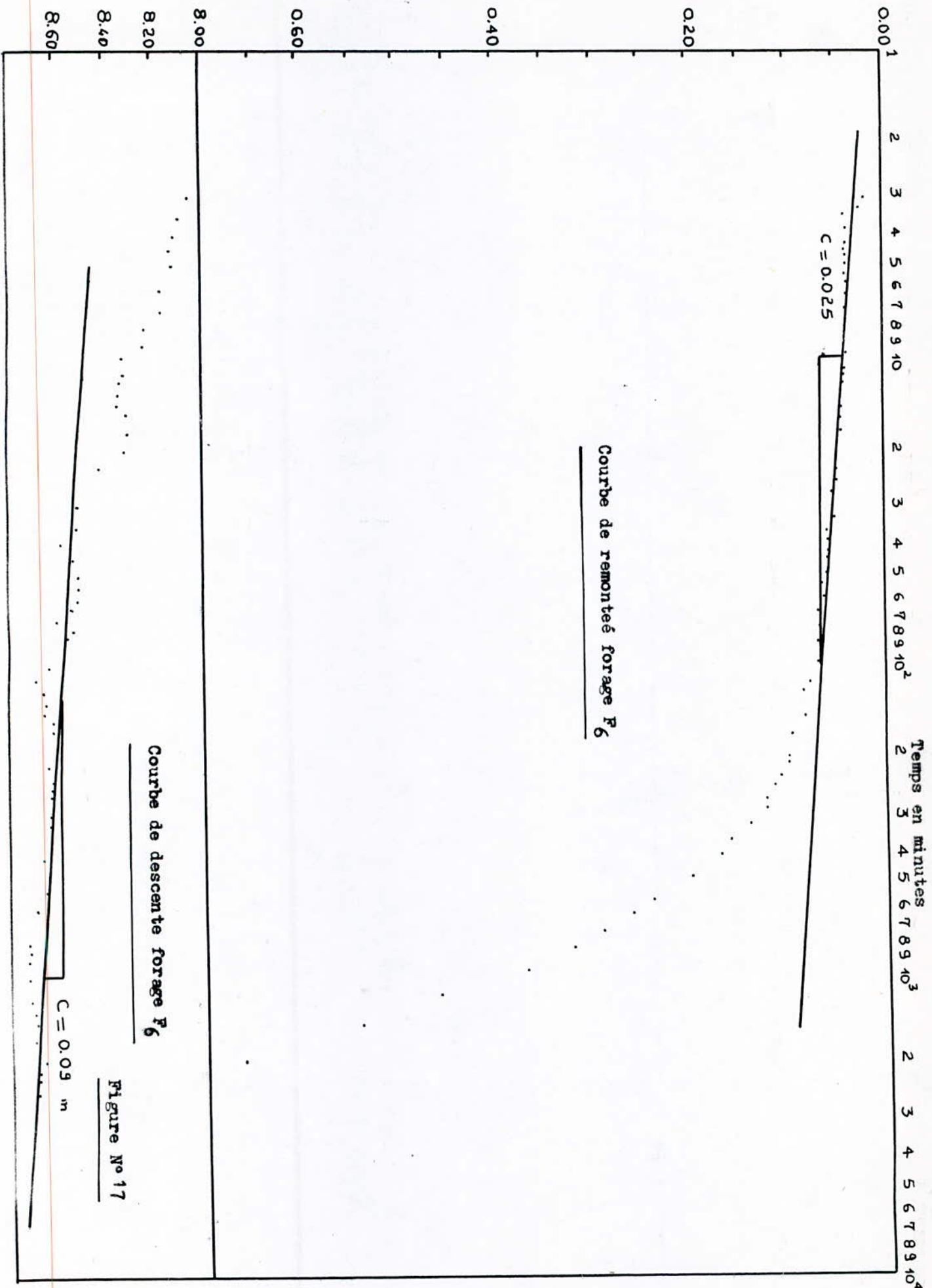


Figure No 17

Un piézomètre situé à 16,25 m du forage Fo a servi à déterminer le coefficient d'emmagasinement de la nappe.

*Piézomètre (prés de Fo)

Descente :

Après une descente dans le piézomètre de 2 m due certainement à la fluctuation du démarrage de l'essai sur le forage Fo le niveau se stabilise sur 10 minutes, puis descend de 10 cm jusqu'à la fin du pompage.

Les paramètres calculés à partir du segment de droite sont les suivants :

$$T = \frac{0,183 Q}{C} = \frac{0,183 \times 11,96 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 10^{-3}} = 7,3 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}.$$

$$S = 2,25 \frac{T \cdot t_0}{r^2} = 2,25 \frac{7,3 \cdot 10^{-2} \cdot 78}{16,25^2} = 4,85 \cdot 10^{-2} = 4,85\%.$$

Remontée :

Les points expérimentaux à la remontée s'alignent et rejoignent le niveau statique de la nappe .

A partir de cette courbe, nous avons tracé deux droites et calculé les paramètres suivantes :

$$T_1 = \frac{0,183 Q}{C} = \frac{0,183 \times 11,96 \cdot 10^{-3}}{18 \cdot 10^{-3}} = 12,2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}.$$

$$T_2 = \frac{0,183 Q}{C} = \frac{0,183 \times 11,96 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-2}} = 4,4 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}.$$

N.B. : Il ne s'agit donc pas d'une descente régulière de la nappe. Etant donné que la remontée du forage *.

*Ainsi que la descente et la remontée du piézomètre donnent des valeurs dix fois plus élevées.

*Forage F1 :

Descente :

Les points du niveau dynamique sur papier semi-log commencent à s'aligner de la première minute à la trentième minute et forme le premier segment de droite qui permet de calculer les paramètres dans une zone proche du forage.

.../...

$$T_1 = \frac{0,183 Q}{C} = \frac{0,183 \cdot 13,27 \cdot 10^{-2}}{55 \cdot 10^{-3}} = 4,4 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}.$$

$$K_1 = \frac{T}{H} = \frac{4,4 \cdot 10^{-2}}{8,545} = 5,15 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}.$$

Ensuite, le niveau d'eau descend et une grande partie des points viennent se ranger sur une nouvelle droite de la 25ème minute à la fin du pompage et par laquelle nous avons pu calculer la transmissivité et la perméabilité dans une zone lointaine du forage.

$$T_2 = \frac{0,183 Q}{C} = \frac{0,183 \cdot 13,27}{12 \cdot 10^{-2}} = 2,02 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}.$$

$$K_2 = \frac{T}{H} = \frac{2,02 \cdot 10^{-2}}{8,545} = 2,36 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}.$$

Remontée :

Durant la remontée, à la descente on observe au bout de 20 à 30 m une droite de pente double de celle du début: ceci est la manifestation d'une limite imperméable dans un milieu dont la transmissivité réelle est le double de la deuxième transmissivité apparente.

A partir des points expérimentaux reportés sur papier semi-log, nous avons dressé deux droites et déterminé les paramètres suivantes :

$$T_1 = \frac{0,183 Q}{G} = \frac{0,183 \times 13,27 \cdot 10^{-3}}{66 \cdot 10^{-3}} = 3,62 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}.$$

$$T_2 = \frac{0,183 Q}{C} = \frac{0,183 \times 13,27 \cdot 10^{-3}}{0,12} = 2,02 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}.$$

$$K_1 = \frac{T}{H} = \frac{3,62 \cdot 10^{-2}}{8,545} = 4,24 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}.$$

$$K_2 = \frac{T}{H} = \frac{2,02 \cdot 10^{-2}}{8,545} = 2,36 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}.$$

*Forage F3 :

Descente :

Ce forage nécessite pour son essai une pompe plus puissante afin de rabattre le niveau d'eau et faire apparaître les paramètres de l'aquifère.

.../...

En effet, au cours de l'essai de pompage exécuté avec une pompe ayant un débit maximum de 18,43 l/s et après un rabattement de un mètre en une minute, le niveau stabilisé jusqu'à l'arrêt du pompage, ce qui ne permet de connaître les paramètres de l'aquifère à la descente.

Remontée :

A la remontée les points ne s'alignent pas correctement, néanmoins, nous avons pu tracer une droite qui nous a permis de calculer T et K suivants :

$$T = \frac{0,183 Q}{C} = \frac{0,183 \cdot 18,43 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 10^{-2}} = 8,4 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}.$$

$$K = \frac{T}{K} = \frac{8,4 \cdot 10^{-2}}{14,50} = 5,8 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}.$$

Un puit situé à 30,5 m du forage F3 a servi comme piézomètre et nous a permis de calculer le coefficient d'emmagasinement \mathcal{S} .

*Piézomètre (prés de F3)

Descente :

Après une descente de 1 cm due à la fluctuation du démarrage de l'essai sur le forage F3, les points expérimentaux s'alignent de 20 m à 2100 m avec un rabattement total de 13 cm. Ensuite le niveau dynamique se stabilise jusqu'à la fin du pompage.

A partir des points représentatifs sur papier semi-log, nous avons tracé la droite et calculé les paramètres suivantes :

$$T = \frac{0,183 Q}{C} = \frac{0,183 \cdot 18,43 \cdot 10^{-3}}{6 \cdot 10^{-2}} = 5,62 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}.$$

$$\mathcal{S} = 2,25 \frac{T \cdot t_0}{r^2} = 2,25 \frac{5,62 \cdot 10^{-2} \cdot 840}{30,5^2} = 11,4 \cdot 10^{-2} = 11,4\%.$$

Remontée :

On peut observer la même allure de courbe qui représente presque la symétrie inverse de la descente avec :

$$T = \frac{0,183 Q}{C} = \frac{0,183 \cdot 18,43 \cdot 10^{-3}}{7,4 \cdot 10^{-2}} = 4,56 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}.$$

$$K = \frac{T}{H} = \frac{4,56 \cdot 10^{-2}}{14,50} = 3,14 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}.$$

.../...

*Forage F4 :

Descente :

Après un rabattement de 2,20 m en une minute de pompage le niveau d'eau se stabilise durant 20 minutes. On observe alors une remontée (due certainement à la baisse du régime de la pompe) de 15 cm, puis les points expérimentaux viennent s'aligner suivant une droite jusqu'à la fin du pompage. Les paramètres calculés à partir du segment de droite sont les suivants:

$$T = \frac{0,183 Q}{C} = \frac{0,183}{10 \cdot 10^{-2}} \frac{16,16 \cdot 10^{-3}}{10 \cdot 10^{-2}} = 2,96 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}.$$

$$K = \frac{T}{H} = \frac{2,96 \cdot 10^{-2}}{17,12} = 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}.$$

Remontée :

On peut observer qu'après une remontée rapide les points expérimentaux atteignant progressivement le niveau initial. La droite tracée sur papier semi-log, nous a permis de calculer T et K suivants :

$$T = \frac{0,183 Q}{C} = \frac{0,183}{2 \cdot 10^{-2}} \frac{16,16 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-2}} = 14,8 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}.$$

$$K_2 = \frac{T}{H} = \frac{14,8 \cdot 10^{-2}}{17,12} = 8,6 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}.$$

*Forage F5 :

Descente :

Les points représentant le rabattement sur papier semi-log, s'alignent à la descente à partir de la dixième minute jusqu'à la fin du pompage, les paramètres de l'aquifère aux alentours du forage calculés à partir du segment de droite sont les suivants:

$$T = \frac{0,183 Q}{C} = \frac{0,183}{15 \cdot 10^{-3}} \frac{14,11 \cdot 10^{-3}}{15 \cdot 10^{-3}} = 17,2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}.$$

$$K = \frac{T}{H} = \frac{17,2 \cdot 10^{-2}}{16,87} = 1,02 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}.$$

...../.....

Remontée :

A la remontée, le niveau dynamique atteint le niveau initial de la nappe après 8 heures de repos, à partir des mesures reportées sur papier semi-log, deux droites ont été tracées et nous donnant les paramètres suivants :

$$T_1 = \frac{0,183 Q}{C} = \frac{0,183 \cdot 17,44 \cdot 10^{-3}}{1,25 \cdot 10^{-4}} = 20,66 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}.$$

$$T_2 = \frac{0,183 Q}{C} = \frac{0,183 \cdot 14,11 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 10^{-2}} = 8,6 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}.$$

$$K_1 = \frac{T}{K_1} = \frac{20,66 \cdot 10^{-2}}{16,87} = 1,22 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}.$$

$$K_2 = \frac{T}{K_2} = \frac{8,6 \cdot 10^{-2}}{16,87} = 5,10 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}.$$

*Forage F6 :

Descente :

La descente accuse un fort rabattement dès les premières minutes de pompage, ensuite on assiste à une descente caractérisée par des fluctuations du niveau d'eau et ce jusqu'à la fin du pompage.

La transmissivité et la perméabilité calculés à partir du segment de droite sont les suivants :

$$T = \frac{0,183 Q}{C} = \frac{0,183 \cdot 17,44 \cdot 10^{-3}}{9 \cdot 10^{-2}} = 3,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}.$$

$$K = \frac{T}{H} = \frac{3,5 \cdot 10^{-2}}{15,305} = 2,3 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}.$$

Remontée :

On peut observer comme à la descente, une rapide remontée de l'eau après l'arrêt du pompage, puis les points expérimentaux s'alignent jusqu'à la fin de la remontée.

.../...

Les paramètres calculés à partir de la courbe caractéristique obtenue sont les suivants :

$$T = \frac{0,183 Q}{C} = \frac{0,183 \cdot 17,44 \cdot 10^{-3}}{25 \cdot 10^{-3}} = 12,8 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}.$$

$$K = \frac{T}{H} = \frac{12,8 \cdot 10^{-2}}{15,305} = 8,4 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}.$$

*Forage F7:

Descente:

Après une descente caractérisée par un mètre de rabattement en une minute, les points expérimentaux s'alignent jusqu'à 15 mn de pompage. Après ce temps le niveau dynamique remonte puis se stabilise jusqu'à un temps égale à 250 minute.

Ensuite nous observons un décrochement (du certainement à une limite étanche située loin du forage) du niveau vers le bas et d'autres points viennent s'aligner jusqu'à la fin de l'essai.

$$T_1 = \frac{0,183 Q}{C} = \frac{0,183 \cdot 19,42 \cdot 10^{-3}}{8 \cdot 10^{-3}} = 44 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}.$$

$$T_2 = \frac{0,183 Q}{C} = \frac{0,183 \cdot 19,42 \cdot 10^{-3}}{68 \cdot 10^{-3}} = 5,2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}.$$

$$K_1 = \frac{T}{H} = \frac{44 \cdot 10^{-2}}{15,617} = 2,8 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}.$$

$$K_2 = \frac{T}{H} = \frac{5,2 \cdot 10^{-2}}{15,617} = 3,3 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}.$$

Remontée :

Les points représentatifs traduisent l'évolution de la nappe sur papier semi-log. On observe une remontée progressive en fonction du temps, les points s'alignent suivant une droite nous permettant de calculer les paramètres suivants :

$$T = \frac{0,183 Q}{C} = \frac{0,183 \cdot 19,42 \cdot 10^{-3}}{18 \cdot 10^{-3}} = 19,7 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}.$$

$$K = \frac{T}{H} = \frac{19,7 \cdot 10^{-2}}{15,62} = 1,3 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}.$$

.../...

.Un tableau récapitulatif regroupant les résultats est donné ci-après avec :

NS/Sol: Niveau statique para rapport au sol.

PR/Sol: Profondeur du forage par rapport au sol.

PR/Substratum: Profondeur du substratum par rapport au sol.

T_D , T_R : Transmissivité de descente et remontée.

K_D , K_R : Perméabilité de descente et remontée.

Les transmissivités (T_2) sont plus représentative car les pentes (C_2) sont prisent vers la fin de la remontée.

.../...

Tableau récapitulatif des résultats des essais de pompage (Février 1985)

N° DE L'OUVRAGE	NS/SOL (m)	PR/SOL (m)	PR/SUBSTRAT (m)	RABATTEMENT (m)	DÉBIT Q (l/s)	DEFI		%
						TR	KD	
FO	7,855	26	25	6,99	11,96	7,3.10 ⁻³	4,26.10 ⁻⁴	
						13,7.10 ⁻²	8.10 ⁻³	
						4,97.10 ⁻²	2,9.10 ⁻³	
Piézo (Fo)	7,675	26,20	-	0,104		7,3.10 ⁻²		4,85
						12,2.10 ⁻²		
						4,4.10 ⁻²		
F ₁	3,455	16,50	12	2,10	13,27	4,4.10 ⁻²	5,15.10 ⁻³	
						2,02.10 ⁻²	2,36.10 ⁻³	
						3,62.10 ⁻²	4,24.10 ⁻³	
F ₃	6,50	22	21	1,02	18,43	2,02.10 ⁻²	2,36.10 ⁻³	
						5,62.10 ⁻²	5,8.10 ⁻³	
						4,56.10 ⁻²	3,14.10 ⁻³	
Piézo (F3)	6,17	8,70	-	0,13	-	5,62.10 ⁻²		11,4
						2,96.10 ⁻²	1,7.10 ⁻³	
						14,8.10 ⁻²	8,6.10 ⁻³	
F ₄	6,88	26	24	2,15	16,16	17,2.10 ⁻²	1,02.10 ⁻²	
						20,66.10 ⁻²	1,22.10 ⁻²	
						8,6.10 ⁻²	5,10.10 ⁻³	
F ₅	7,13	28	24	1,15	14,11	3,5.10 ⁻²	2,3.10 ⁻³	
						12,8.10 ⁻²	8,4.10 ⁻³	
						11,695	27	
F ₆	11,695	30	27	8,97	17,44	44.10 ⁻²	2,8.10 ⁻²	
						5,2.10 ⁻²	3,3.10 ⁻³	
						14,383	30	
F ₇	14,383	30	30	1,13	19,42	19,7.10 ⁻²	1,3.10 ⁻²	

3.4. Evaluation du débit de la nappe:

Afin d'estimer le débit de la nappe. La formule de DARCY sera utilisée.

Elle est de la forme : $Q = KIA$

Où: Q: débit (m^3/s).

K: Perméabilité du milieu poreux (m/s).

I: Gradient hydraulique (sans dimensions).

A: Section de la couche aquifère perpendiculaire à l'écoulement (m^2).

a/ - Gradient hydraulique: I

Afin de connaître le gradient hydraulique nous avons en recours aux données des relevés piézométriques effectués en Février 1985.

Dans le choix des piézomètres, nous nous sommes référés aux forages F₆ et F₃ qui sont distants entre eux de 4,69 km, et où le gradient est approximativement constant, il est de l'ordre de 2,3‰.

Entre les deux forages cités, il a été constaté un abaissement du niveau piézométrique de 10,921 m.

b/ - Perméabilité K (m/s):

Afin d'estimer la perméabilité, nous avons sélectionné trois sondages qui existaient avant l'année 1985 et réalisés par ALGEO (Société Algérienne de Géophysique).

Ces sondages portent les numéros F₁₈, F₂₉, F₃₂ (voir planche n°1).

La sélection de ces derniers est motivée par le fait qu'ils sont situés à proximité des forages de référence F₃ et F₅ (forages bien développés (voir chapitre 3.3.1.1.) sur lesquels porte l'objet de notre étude.

La perméabilité pour chacun des trois sondages sélectionnés est la suivante.

$K (F_{18}) = 3,14‰ \text{ m/s}$ (F₁₈ proche de F₃).

$K (F_{29}) = K (F_{32}) = 5,10‰ \text{ m/s}$ (F₂₉; F₃₂ proche de F₅).

...../....

c/ - Section: S (m²):

Pour la connaissance de ce paramètre, nous avons établi 3 coupes transversales à travers les sondages précités et dont le planimétrage de la section mouillée a donné les valeurs suivantes :

$$A (F_{18}) = 6875 \text{ m}^2.$$

$$A (F_{29}) = 4062,5 \text{ m}^2.$$

$$A (F_{32}) = 4375 \text{ m}^2.$$

Une fois, les paramètres connus, et par application de la formule de DARCY, le débit traversant les dites sections est:

$$Q (F_{18}) = 49,65 \text{ l/s.}$$

$$Q (F_{29}) = 47,65 \text{ l/s.}$$

$$Q (F_{32}) = 51,32 \text{ l/s.}$$

Le débit de la nappe sera estimé par la moyenne de ces trois valeurs.

$$\text{Soit } Q (\text{Nappe}) = 49,54 \text{ l/s.}$$

3.5. Qualités des eaux :

L'analyse des eaux effectuées au niveau des forages F1 et F2 en date du 30/03/1985 fait ressortir les charges suivantes :

Ions (mg/l)	F1	F2
Ca ²⁺	45	45
Mg ²⁺	22	22
Na+	35	38
K+	5	6
Cl-	30	30
SO ₄ ²⁻	30	28
CO ₃ ²⁻	0	0
HCO ₃ ⁻	246	248
NO ₃ ⁻	0	0
Residu sec	392	412
PH	7.1	7.5

- Conductivité électrique 0,6 0,7
- (mmhos/cm).

La qualité chimique des eaux est très bonne, néanmoins la nappe étant limitée par des alluvions très perméables de l'oued, il faut éviter toute décharge, déversement des eaux usées pour éviter une pollution éventuelle de la nappe.

.../...

CHAPITRE: QUATRIEME

4 - MODELISATION :

4.1. Généralités sur les modèles :

Le modèle est un concept de raisonnement d'un phénomène naturel régis par différents paramètres.

Il est aussi un outil de prédiction après explication des phénomènes observés. C'est aussi un outil de gestion.

L'application des modèles de simulation en hydrogéologie ont rendu des services spectaculaires aux praticiens.

Dans la gestion des eaux souterraines, il identifie, vérifie, et exécute l'ensemble des opérations qui permettent d'organiser l'exploitation de l'aquifère (alimentation et importance des prélèvements) de telle sorte que les effets induits sur la nappe soient acceptables tant du point de vue économique, tarissement des sources, approfondissement des puits de surface que du point de vue qualitatif (déterioration de la qualité chimique des eaux).

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

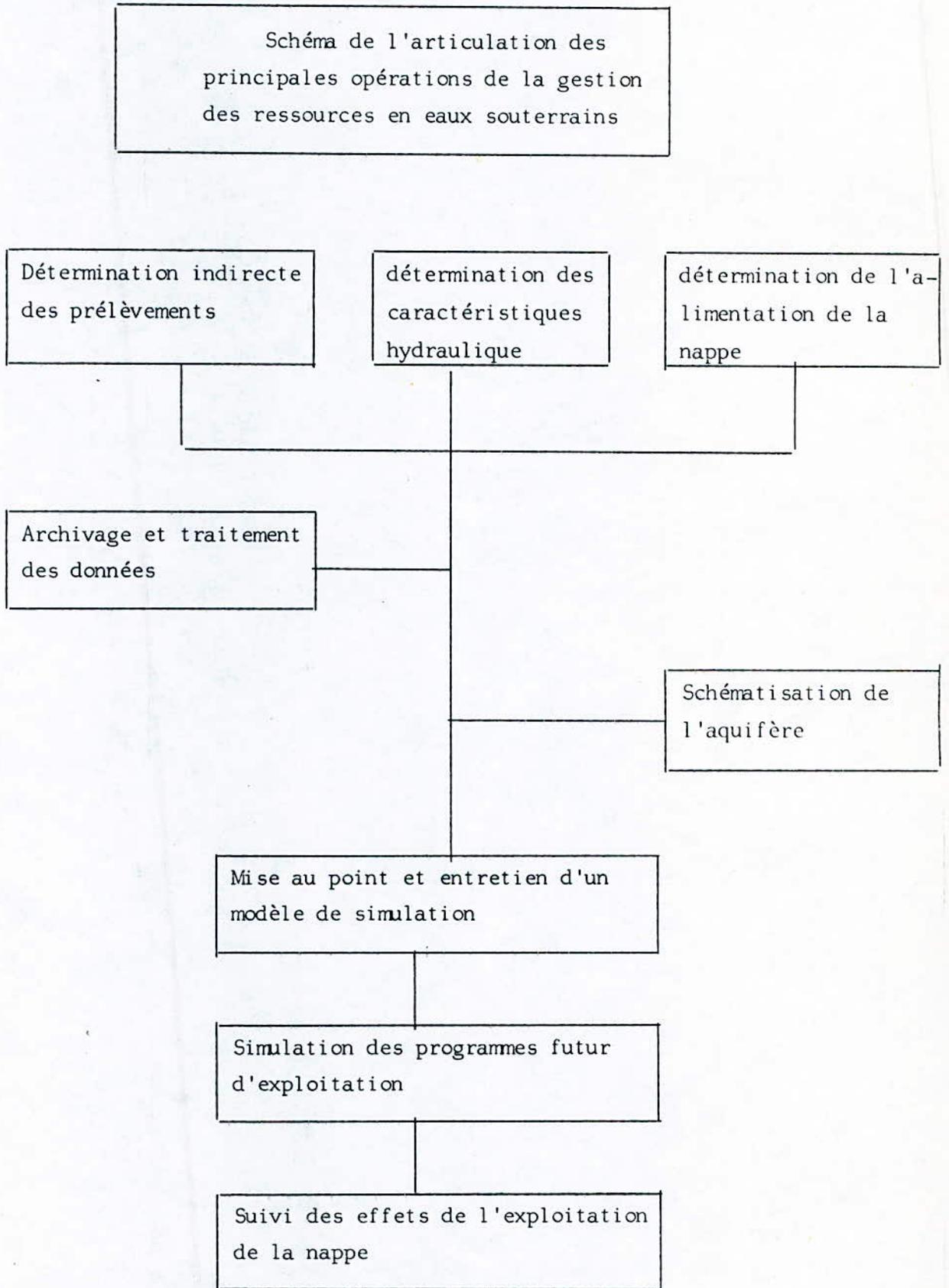
Il assure aux hydrogéologues (rapidité et fiabilité) dans toutes les opérations liées à la gestion de l'aquifère notamment dans :

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

La figure suivante montre le schéma de l'articulation des principales opérations de la gestion des ressources de l'aquifère

.../...

Figure :



Il est certain que quelques unes de ces opérations, comme celles des prélèvements, l'alimentation, les caractéristiques hydrauliques de l'aquifère faisaient déjà partie des activités normales de l'hydrogéologue mais les outils dont il disposait étaient peu opérationnels.

Cependant la tâche comme la simulation sur modèle était dans un passé récent une affaire de spécialistes.

L'hydrogéologue ne participait pas directement, il y avait en quelque sorte une division de travail .

L'hydrogéologue avait pour tâche la collecte des données, tandis que la simulation était du domaine de l'hydraulicien - informaticien.

De nos jours la modélisation informatique se banalise de plus en plus pour l'hydrogéologue pour peu que les données soient disponibles.

4.1.1. Etapes d'élaboration d'un modèle :

Pour l'élaboration d'un modèle le choix des algorithmes se fait en fonction des critères de finalités et de connaissances de la représentation, du déterminisme et la nature des variables.

Les étapes suivantes sont nécessaires pour l'élaboration d'un modèle par ordre de priorité.

- Caractérisation :

Dans cette étape il s'agira de systématiser l'objet du modèle et d'étudier les relations capables de représenter son comportement en déterminant des systèmes équivalents ayant des comportements identiques.

Bien évidemment chaque modèle a son objectif et de ce fait leur comportement diffère d'un objet à un autre ce qui rend très difficile leur équivalence.

Par conséquent il est impératif de cerner les limites de comportement de chaque objet dans les études comparatives.

.../...

- Identification :

Selon le cas réel envisagé, il s'agira d'attribuer à ces paramètres structuraux des valeurs numériques particulières de manière à ce que les écarts entre les valeurs calculées par la simulation et les valeurs obtenus sur le terrain soit minimales.

Ce processus de calage est une étape impérative pour que le modèle soit fonctionnel.

Par exemple dans notre cas on a supposé que la charge et la perméabilité sont linéaires alors qu'en réalité elles ne le sont pas.

- Vérifications :

Dans cette étape, il s'agira de s'assurer de la cohérence des résultats entre l'hypothèse de départ et les résultats obtenus.

- Exploitation :

Au terme des étapes précédentes, le modèle libérera toute sa capacité dans la simulation de l'objet retenu.

4.2. Modèle hydrogéologique :

4.2.1. Introduction :

Lors de la résolution d'une équation aux dérivées partielles (E.D.P.) il est nécessaire d'utiliser une solution numérique au lieu d'une solution analytique pour plusieurs raisons, parmi lesquelles on peut citer :

- Les frontières (limites) du domaine considéré ont une forme complexe.
- Les propriétés hydrogéologiques du milieu sont variables et la géométrie des hétérogénéités est complexe.
- Le problème est non-linéaire et une solution analytique est impossible à trouver.
- La géométrie et l'amplitude des termes sources sont compliquées.

.../...

- La solution analytique existe, mais son expression est si complexe que l'utilisation d'une solution numérique devient plus intéressante du point de vue programmation et temps de calcul. Dans le cas où une solution numérique devient impérative, il y a lieu de décider de la méthode à utiliser. Bien qu'il existe un grand nombre de méthodes numériques ayant chacune des particularités différentes, on peut classer la majorité d'entre elles en deux catégories principales, à savoir:

- Méthode des différences finies (M.D.F.).
- Méthode des éléments finis (M.E.F.).

4.2.1.1. Différences finies :

La méthode des différences finies est facile à comprendre et à programmer. Elle est bien recommandée pour modéliser des aquifères à l'échelle régionale et pour les systèmes multicouches, cependant, elle est limitée à l'utilisation des maillages simples: (carrés réguliers, carrés imbriqués ou rectangles).

La M.D.F. peut représenter les hétérogénéités pourvu que la forme du maillage s'y adapte d'une manière adéquate, aussi, les directions d'anisotropie sont limitées aux directions parallèles aux côtes des mailles.

4.2.1.2. Éléments finis :

La méthode des éléments finis est moins facile à comprendre et beaucoup moins facile à programmer. Elle est plus flexible que la M.D.F. et de ce fait un programme en éléments finis est plus complexe à utiliser. En particulier le nombre de données à introduire est plus important ce qui veut dire qu'il y a plus de possibilités d'erreur.

Les programmes en E.F nécessitent plus de temps de calcul et plus de mémoire - ordinateur qu'un programme en DF pour le même nombre d'inconnues.

Cependant, en général, un problème réel nécessite moins de noeuds en EF que de mailles en DF.

.../...

La forme des éléments est moins limitée. En pratique ce sont les triangles et les quadrilatères qui sont les plus employés.

La M.E.F. peut être utilisée pour des études régionales, néanmoins, elle est plus recommandée et même parfois nécessaire pour des études à l'échelle locale, tels que les problèmes de Génie-civil où les limites et les hétérogénéités doivent être représentées avec précision .

4.2.2. Présentation générale de la méthode des différences finis:

La résolution d'une équation aux dérivées partielles consiste à rechercher la fonction H_s dite "solution" qui vérifie en tout point d'un domaine d'espace et en tout instant (transitoire) la relation entre les dérivées de H imposée par l'équation.

Cette solution est unique si en tout point des limites du domaine sont données les valeurs de H ou de ses dérivés: les conditions aux limites. La méthode des différences finies consiste à déterminer de manière à discrétiser les valeurs numériques prises par H_s en chaque point d'un réseau maillé appliqué sur le domaine (et par intervalles de temps pour le cas transitoire).

Ces valeurs numériques H_n sont calculés en remplaçant dans l'équation aux dérivées partielles, les dérivées par leurs approximations exprimées en terme de différence finies entre la valeur de H_n en un point et celle en des points voisins .

Si cette approximation est possible en chacun des NI points intérieurs du domaine il est clair que l'on obtiendra un système de NI équations reliant entre elles les NI valeurs inconnues de H_n et comportant les NL valeurs imposées de H sur les limites.

La M.D.F. est donc très générale et permet le plus souvent d'aboutir à une solution satisfaisante des E.D.P.

4.2.3. L'équation hydrodynamique :

L'équation aux dérivées partielles de l'écoulement souterrain dans une nappe aquifère (équation de diffusivité) ramenée à deux dimensions s'écrit:

$$\frac{a}{ax} \left(T_x \frac{ah}{ax} \right) + \frac{a}{ay} \left(T_y \frac{ah}{ay} \right) = S \frac{ah}{at} + q(x,y,t.)$$

.../...

$$\text{ou div (T grad h)} = S \frac{ah}{at} + q(x,y,t.)$$

avec:

T_x, T_y : composantes de la transmissivité dans les directions X et Y

h : charge hydraulique.

S : coefficient d'emmagasinement.

$q(x,y,t.)$: débit volumique (pompage ou injection) par unité de surface.

4.2.4. Application aux différences finies :

La méthode est basée sur l'application du théorème de TAYLOR. En se limitant à un espace à deux dimensions, pour une fonction $H(x,y)$, s'écrit :

$$H(x_1, y_1) = H(x_0, y_0) + (x_1 - x_0) \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right)_{x_0, y_0} + (y_1 - y_0) \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right)_{x_0, y_0} + \frac{(x_1 - x_0)^2}{2!} \left(\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} \right)_{x_0, y_0} + \frac{(y_1 - y_0)^2}{2!} \left(\frac{\partial^2 H}{\partial y^2} \right)_{x_0, y_0} + \frac{(x_1 - x_0)^3}{3!} \left(\frac{\partial^3 H}{\partial x^3} \right)_{x_0, y_0} \quad (IV.2)$$

où: (x_0, y_0) et (x_1, y_1) sont les coordonnées de deux points M_0 et M_1 du domaine \mathcal{D} .

Il en résulte de ce théorème que l'on peut toujours pour de telles fonctions exprimer les dérivées d'ordre n en un point en fonction des accroissements de la fonction et des accroissements des variables d'espace (ou différences finies) entre ce point et n points voisins.

Pour ce qui concerne les E.D.P constituant les modèles d'écoulement à deux dimensions et qui font intervenir les dérivées d'un ordre au plus égal à deux, il suffira sur tel maillage de prendre en compte les quatre points en croix immédiatement voisins du point où on veut établir l'approximation par différence finies.

4.2.5. Application à un maillage régulier orthogonal :

En désignant par H_0, H_e, H_w, H_n, H_s , les valeurs aux cinq points en croix du maillage régulier de pas D_x selon X et D_y , selon Y centrée sur O (x_0, y_0) l'application du théorème de Taylor aux quatre couples possibles (H_0, H_1) donne :

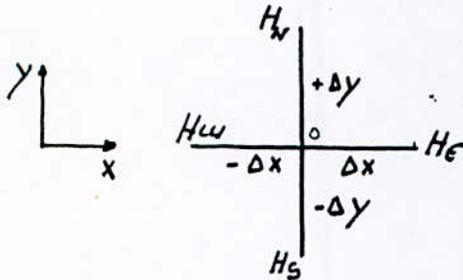
.../...

$$H_i = H_0 + Dxi \left(\frac{ah}{axi} \right) + \frac{Dxi^2}{2!} \left(\frac{a^2h}{axi^2} \right) + \frac{Dxi^3}{3!} \left(\frac{a^3h}{axi^3} \right) + \frac{Dxi^4}{4!} \left(\frac{a^4h}{axi^4} \right) \quad (IV.3)$$

Avec:

$$.Xi - Xo = Dxi \begin{cases} = Dx & \text{pour } i = E \\ = -Dx & \text{pour } i = W \end{cases}$$

$$.Yi - Yo = Dyi \begin{cases} = Dy & \text{pour } i = N \\ = -Dy & \text{pour } i = S \end{cases}$$



- N = Nord
- E = Est
- W = Ouest
- S = Sud
- O = Centre

D'après cette formule il est clair que:

- Les dérivées du premier ordre $\frac{ah}{axi}$ peuvent être exprimées en fonction des valeurs de H en un couple de points axi orienté selon Xi :

$$\text{ou } \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right)_0 = \frac{H_E - H_0}{\Delta x} - \frac{\Delta x}{2} \left(\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} \right)_0 - \frac{\Delta x^2}{3!} \left(\frac{\partial^3 H}{\partial x^3} \right)_0 - \dots$$

$$\left(\frac{\partial H}{\partial x} \right)_0 = \frac{H_0 - H_W}{\Delta x} + \frac{\Delta x}{2} \left(\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} \right)_0 - \frac{\Delta x^2}{3!} \left(\frac{\partial^3 H}{\partial x^3} \right)_0 + \dots$$

en faisant la somme on à:

$$\left(\frac{\partial H}{\partial x} \right)_0 = \frac{H_E - H_W}{2 \Delta x} - \frac{\Delta x^2}{3!} \left(\frac{\partial^3 H}{\partial x^3} \right)_0 - \dots \quad (IV.4)$$

Pour les dérivées du second ordre $\frac{a^2h}{axi^2}$ il faut prendre en compte deux couples de points orientés selon Xi et éliminer le terme $\frac{ah}{axi}$ entre les deux développements possibles.

Selon la direction X :

$$\left[\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} \right]_0 = \frac{H_E + H_W - 2H_0}{\Delta x^2} - \frac{\Delta x^2}{12} \left[\frac{\partial^4 H}{\partial x^4} \right] - \dots \quad (IV.5)$$

et selon la direction Y :

$$\left[\frac{\partial^2 H}{\partial y^2} \right]_0 = \frac{H_N + H_S - 2H_0}{\Delta y^2} - \frac{\Delta y^2}{12} \left[\frac{\partial^4 H}{\partial y^4} \right] - \dots \quad (IV.6)$$

La relation que doit vérifier H en chaque point s'obtient en sommant les approximations de tous les éléments différentiels intervenant dans l'E.D.P. dont est la solution recherchée.

...../....

4.2.5.1. Approximation de l'équation d'écoulement :

En développant l'équation d'écoulement en régime permanent on obtient :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[T_x \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[T_y \frac{\partial H}{\partial y} \right] = 0 \quad (\text{IV.7})$$

$$\frac{\partial T_x}{\partial x} \frac{\partial H}{\partial x} + T_x \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial T_y}{\partial y} \frac{\partial H}{\partial y} + T_y \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = 0$$

Puis en discrétisant chaque élément différentiel selon les formules proposées ci-dessus et en négligeant les termes résiduels de chaque approximation :

$$\begin{cases} \frac{\partial T_x}{\partial x} = \frac{T_E - T_0}{\Delta x} - \frac{\Delta x}{2} \left[\frac{\partial^2 T_x}{\partial x^2} \right]_0 \\ \frac{\partial H}{\partial x} = \frac{H_E - H_0}{\Delta x} - \frac{\Delta x}{2} \left[\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} \right]_0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{\partial T_x}{\partial x} = \frac{T_0 - T_{\omega}}{\Delta x} - \frac{\Delta x}{2} \left[\frac{\partial^2 T_x}{\partial x^2} \right]_0 \\ \frac{\partial H}{\partial x} = \frac{H_0 - H_{\omega}}{\Delta x} - \frac{\Delta x}{2} \left[\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} \right]_0 \end{cases}$$

En effectuant les deux produits possible $\left(\frac{\partial T_x}{\partial x} \frac{\partial H}{\partial x} \right)$ selon les deux schémas de discrétisation puis en sommant on trouve :

$$2 \left[\frac{\partial T_x}{\partial x} \frac{\partial H}{\partial x} \right]_0 = \frac{H_E T_E - H_0 T_E + H_0 T_0 - H_E T_0 + H_0 T_0 - H_0 T_{\omega} - H_{\omega} T_0 + H_{\omega} T_{\omega}}{\Delta x^2}$$

soit

$$\left[\frac{\partial T_x}{\partial x} \frac{\partial H}{\partial x} \right]_0 = \frac{H_E (T_E - T_0) + H_{\omega} (T_{\omega} - T_0) + H_0 (2T_0 - T_E - T_{\omega})}{2 \Delta x^2}$$

et de même

$$T_0 \left[\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} \right]_0 = T_0 \frac{H_E + H_{\omega} - 2H_0}{\Delta x^2} \quad (\text{IV.8})$$

En sommant et en regroupant il vient pour les termes en X

$$\left[\frac{\partial T_x}{\partial x} \frac{\partial H}{\partial x} \right]_0 + T_0 \left[\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} \right]_0 = \left[\frac{T_E + T_0}{2 \Delta x^2} \right] H_E + \left[\frac{T_{\omega} + T_0}{2 \Delta x^2} \right] H_{\omega} - \left[\frac{T_E + T_{\omega} + 2T_0}{2 \Delta x^2} \right] H_0$$

ou encore

$$\left[\frac{\partial T_x}{\partial x} \frac{\partial H}{\partial x} \right]_0 + T_0 \left[\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} \right]_0 = T_{E0} \frac{H_E}{\Delta x^2} + T_{\omega 0} \frac{H_{\omega}}{\Delta x^2} - [T_{E0} + T_{\omega 0}] \frac{H_0}{\Delta x^2} \quad (\text{IV.9})$$

Forme contractée dans laquelle :

$$T_{E0} = \frac{T_E + T_0}{2} \quad \text{Transmissivité moyenne entre } 0 \text{ et } E$$

$$T_{\omega 0} = \frac{T_{\omega} + T_0}{2} \quad \text{Transmissivité moyenne entre } 0 \text{ et } \omega \dots / \dots$$

Soit en faisant intervenir les termes en Y et les différences finies de H entre les Hi et Ho, l'approximation complète:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) = T_{Eo} \left(\frac{H_E - H_o}{\Delta x^2} \right) + T_{Wo} \left(\frac{H_W - H_o}{\Delta x^2} \right) + T_{No} \left(\frac{H_N - H_o}{\Delta y^2} \right) + T_{So} \left(\frac{H_s - H_o}{\Delta y^2} \right)$$

Où

$$\text{div}(T \text{ grad } H) = T_{Eo} \left(\frac{H_E - H_o}{\Delta x^2} \right) + T_{Wo} \left(\frac{H_W - H_o}{\Delta x^2} \right) + T_{No} \left(\frac{H_N - H_o}{\Delta y^2} \right) + T_{So} \left(\frac{H_s - H_o}{\Delta y^2} \right) \quad (IV.1)$$

TEo, TWo, TNo et TSo sont les transmissivités moyenne entre les mailles (E,W,N et S) et

Ho : Charge Hydraulique dans la maille O

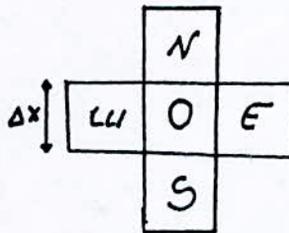
DX : est le côté de la maille.

4.2.6. Bilan des flux :

Le principe de base est le suivant: considérons un bloc de terrain. Il y entre, par certaines de ses faces, de l'eau, il en sort par d'autres, il se stocke de l'eau dans ses pores. Nous allons effectuer le bilan

$$\text{Eau stockée} = \text{eau reçue} - \text{eau cédée}$$

Analysons les différents termes du bilan à travers un bloc élémentaire entre deux époques .



a/ - Eau stockée :

Lorsque, entre l'instant t1 et instant t2 le niveau piézométrique est passé de Ho à Ho*, le volume d'eau stockée est:

$$\text{eau stockée} \Big|_{t_1}^{t_2} = S (H_o^* - H_o) D_x^2$$

S = coefficient d'emmagasinement.
Dx = Côté de la maille.

.../...

- Si le niveau a monté, on a stockage positif.
- Si le niveau est descendu, on a stockage négatif (de stockage).

b/ - Eau reçue:

Le débit transitant du bloc W vers le bloc O vaut:

$$Q_{Wo} = T_{Wo} \Delta x \frac{H_w - H_o}{\Delta x} \quad (\text{IV.1.1.})$$

Dans ces conditions :

$$Q_{Wo} = \frac{1}{2} (T_w + T_o) \frac{(H_w - H_o)}{\Delta x} \Delta x$$

$$Q_{Wo} = \frac{1}{2} (T_w + T_o) (H_w - H_o)$$

De même, le débit pénétrant dans le bloc O en provenance de E vaut

$$Q_{Eo} = \frac{1}{2} (T_E + T_o) (H_E - H_o).$$

et le flux total Q_{tot} entrant dans la maille O à partir des blocs adjacents N, S, E, W vaut :

$$\begin{aligned} Q_{tot} &= \frac{1}{2} (T_N + T_o) (H_n - H_o) \\ &+ \frac{1}{2} (T_s + T_o) (H_s - H_o) \quad (\text{IV.1.2.}) \\ &+ \frac{1}{2} (T_E + T_o) (H_E - H_o) \\ &+ \frac{1}{2} (T_w + T_o) (H_w - H_o). \end{aligned}$$

c/ - Eau cédée :

Tout simplement, nous noterons Q_o qui sera :

- $Q_o = -$ Somme des débits des puits d'injection.
- + Somme des débits des puits en pompage.
- Infiltration.
- + Evaporation.

d/ - Bilan :

Au total: nous avons donc :

$$\mathcal{S} \left(\frac{H^* - H_o}{\Delta \ell} \right) = \frac{1}{\Delta x^2} \left[\begin{aligned} &\frac{1}{2} (T_N + T_o) (H_N - H_o) \\ &+ \frac{1}{2} (T_S + T_o) (H_S - H_o) \\ &+ \frac{1}{2} (T_E + T_o) (H_E - H_o) \\ &+ \frac{1}{2} (T_W + T_o) (H_W - H_o) \end{aligned} \right] - \frac{Q_o}{\Delta x^2} \quad (\text{IV.13})$$

.../...

4.2.7. Calcul des transmissivités de passage :

Etant donné deux transmissivités T_1 et T_2 dans deux mailles voisines, il existe trois possibilités de calcul de la transmissivité de passage T .

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

Elles vérifient toutes que :

- 1) - Si $T_1 = T_2$ $T = T_1 = T_2$.
- 2) - Si on permute T_1 et T_2 , T ne change pas (réciprocité des flux).

En définitive l'imposition des transmissivités par bloc $T = \frac{2 T_1 T_2}{T_1 + T_2}$

est beaucoup plus préférable pour plusieurs raisons :

- Représentation aisée de certaines conditions ou singularités (voir ci-après).

- La discrétisation du milieu en blocs homogènes peut souvent être considérée comme un modèle plus proche de la réalité que ceux établis sur une hypothèse de continuité .

4.2.8. Les conditions aux limites :

Une nappe à une extension limitée, et sur ses frontières, les échanges d'eau avec l'extérieur sont régis par les conditions aux limites. Celles-ci sont de trois types :

- Limites étanches :

Ce sont les contacts entre corps aquifères et corps impérimables.

Par définition une limite de maille est étanche si aucun débit ne la traverse. Dans la formule du bilan discrétisé, le terme de débit $Q_{oi} = T_{oi} (H_i - H_o)$ à travers cette facette est nul.

..../...

Avec la formule adoptée pour définir la transmissivité de passage T_{oi} , il suffit donc d'imposer $T_i = 0$, ce qui entraîne $T_{oi} = \frac{2 T_o T_i}{T_i + T_o} = 0$ soit $Q_{oi} = 0$.

- Limite à flux imposé :

Ce sont principalement les lignes de contact entre domaines aquifères de perméabilités différentes.

Dans tous les cas de limites à flux imposé, il est toujours très difficile, voire impossible, de fixer la valeur du débit échangé. on compte plutôt sur l'étude par modèle pour le préciser.

On remplace souvent alors, dans la représentation, la condition de débit par une condition de potentiel le débit affiché est modulé en faisant varier la conductivité hydraulique sur la limite. Ce qui se révèle souvent plus aisé que de faire varier le débit et de se caler sur le niveau.

- Limites à niveau imposé :

Les plus caractéristiques correspondent à des plans d'eau libres rivières, lacs ou étangs .

Les sources peuvent également être considérées comme des points limités à niveau imposé.

4.2.9. Représentation d'un système aquifère:

En écrivant successivement pour chaque maille du domaine d'écoulement l'équation en différences finies on obtient pour un écoulement bidimensionnel permanent ($\text{div} (T \vec{\text{grad}} H) = 0$) un système de la forme.

$$TH = A$$

T : Matrice des transmissivités de passage.

H : Vecteur contenant les charges inconnues.

A : Vecteur contenant les valeurs imposées aux limites en charges et débits ainsi à la résolution d'une équation aux dérivées partielles à été substitué la résolution d'une équation matricielle.

.../...

CHAPITRE: CINQUIEME

V - METHODES DE RESOLUTION DU SYSTEME ISSU DE LA DISCRETISATION DE
L'EQUATION DE DIFFUSIVITE :

Pour résoudre le système numérique on peut employer deux types de méthodes :

- Méthodes directes.
- Méthodes itératives.

5.1. Méthodes directes:

Elles consistent à inverser la matrice T de telle sorte que l'on ait :

$$H = AT^{-1} \quad (IV.1).$$

Ces méthodes sont intéressantes quand la matrice T n'est pas trop importante. Lorsqu'un système linéaire dépasse 100 équations à 100 inconnus (cas de système provenant de la discrétisation d'un problème différentiel) il devient difficile de résoudre ce système par la méthode directe, car, d'une part le nombre d'opérations (donc d'erreurs possibles) devient considérable, d'autre part le nombre de mémoire (10) nécessaires devient rapidement très grand et risque de dépasser celui dont peut disposer le calculateur électronique.

5.2. Méthodes itératives:

Elles consistent 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 tend vers H_n quand n (numéro de l'itération) croît. La vitesse de convergence dépend: de la formule d'itération des coefficients de H dans la formule du choix de l'approximation initiale.

Parmi les méthodes nous citerons la méthode JACOBI, la méthode Gauss-Seidel, la méthode de relaxation etc.

.../...

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

- Méthode de Gauss-Seidel :

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

La matrice des transmissivités T est décomposée en :

$$T = (D-L).U = M-N \quad (V.2.)$$

D : Matrice diagonale.

L : Matrice triangulaire inférieure.

U : Matrice supérieure.

Dans la méthode itérative, le système s'écrit comme

$$[T_i][H_i] = [A_i] \rightarrow T_i H_i = A_i$$

$$[(D-L).U]H_i = A_i$$

$$(D-L) H_i^{(k+1)} = U H_i^{(k)} + A_i$$

Soit

$$D H_i^{(k+1)} - L H_i^{(k+1)} = U H_i^{(k)} + A_i$$

$$D H_i^{(k+1)} = L H_i^{(k+1)} + U H_i^{(k)} + A_i$$

$$H_i^{(k+1)} = D^{-1} L H_i^{(k+1)} + D^{-1} U H_i^{(k)} + D^{-1} A_i$$

qui peut s'écrire sous forme développée :

$$\left. \begin{aligned} H_1^{(k+1)} &= \left[A_1 + T_{12} H_2^{(k)} - T_{13} H_3^{(k)} - \dots - T_{1n} H_n^{(k)} \right] / T_{11} \\ H_2^{(k+1)} &= \left[A_2 + T_{21} H_1^{(k+1)} - T_{23} H_3^{(k)} - \dots - T_{2n} H_n^{(k)} \right] / T_{22} \\ &\vdots \\ H_n^{(k+1)} &= \left[A_n - T_{n1} H_1^{(k+1)} - T_{n2} H_2^{(k+1)} - \dots - T_{n,n-1} H_{n-1}^{(k+1)} \right] / T_{nn} \end{aligned} \right\} (V.3)$$

.../...

En résumé, l'algorithme de Gauss-Seidel :

$$H_i^{(k+1)} = \left[A_i - \sum_{j=1}^{i-1} T_{ij} H_j^{(k+1)} - \sum_{j=i+1}^n T_{ij} H_j^{(k)} \right] / T_{ii} \quad (V.4)$$

- 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 :

$$H^{(k+1)} = H^k + R(H^{(k+1)} - H^{(k)})$$

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

L'équation (V.4.) nous permet alors d'écrire

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

$i = 1, n$

Soit

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

$i = 1, n$

ou:

$$H_i^{(k+1)} = H_i^k + \frac{R}{T_{ii}} \left[A_i - \sum_{j=1}^{i-1} T_{ij} H_j^{(k+1)} - \sum_{j=i+1}^n T_{ij} H_j^k \right] \quad (V.5)$$

On arrête si la condition suivante est vérifiée $U < EPS$

ou :

U: Residu (somme du carré des écarts en H entre l'itération L et l'itération L-1)

$$U = \sum (H_i^L - H_i^{L-1})^2$$

EPS: Tolérance sur le residu

(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 ($1 < R < 2$).

- Régime permanent :

Dans ce cas, le terme $\frac{dh}{dt}$ est nul, et l'on passe d'un système différentiel à un système d'équations linéaires de la forme $TH = Q$.

La condition d'existence d'un régime permanent est telle que:

$$Q \text{ entrant} = Q \text{ sortant (V.6.)}$$

Trois cas peuvent se présenter :

- La matrice de l'hydraulique d'un système ne comportent que des conditions aux limites de flux nul et pas de potentiel constant est singulière.

Il n'y a pas en général de régime permanent, sauf si la somme des débits pompés est égale à la somme des débits injectés: il y aura alors régime permanent indéterminé (infinité de solutions) car une translation d'ensemble quelconque vers le haut ou vers le bas de la nappe laisse intact les bilans des flux, et fournit un régime permanent possible.

- La matrice de l'hydraulique d'un système à condition aux limites comportant des potentiels constant (au moins un) est régulière (solution unique) cela veut dire qu'il existe toujours un régime permanent quelque soient les débits.

- La condition $Q \text{ (entrant)} = Q \text{ (sortant)}$ n'est pas réalisée et il n'existe pas de potentiel imposé: il n'existe pas de solution H en régime permanent car ce dernier ne peut s'établir.

5.4. Régime transitoire :

Connaissant la charge hydraulique initiale H_0 on s'intéresse à la détermination de la charge H à certaines dates données, on va donc procéder à une discrétisation non seulement de l'espace mais du temps, et définir ainsi des pas de temps.

.../...

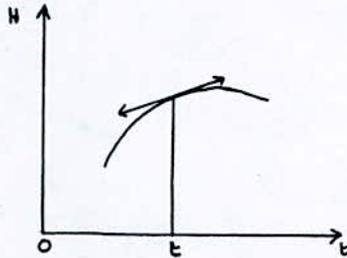
Sur un maillage carré régulier de côté a et dans le schéma à cinq points (une maille centrale entourée de ses quatre voisines N,S,E,W). L'équation de diffusivité s'écrit à une date t

$$T_N H_N^t + T_E H_E^t + T_S H_S^t + T_W H_W^t - H_0^t (T_N + T_E + T_S + T_W) = a^2 \mathcal{B} \frac{\partial H_0^t}{\partial t} + Q_0^t \quad (\text{V.7})$$

Soit

$$\frac{\partial H_0^t}{\partial t} = \frac{1}{a^2 \mathcal{B}} \left[T_N H_N^t + T_E H_E^t + T_S H_S^t + T_W H_W^t - H_0 (T_N + T_E + T_S + T_W) - Q_0^t \right] \quad (\text{V.8})$$

L'expression (V.8) représente la pente de la tangente à la courbe d'évaluation de H en O au cours du temps.



Or, on a décidé de ne calculer 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 $\frac{\partial H_t}{\partial t} = \frac{H_{t_1} - H_{t_0}}{t_1 - t_0}$ (V.9) on extrapole la charge T_0 à T_1 en construisant la corde $H_{t_0} H_{t_1}$ parallèle à la tangente. A partir de la valeur $\frac{dh}{dt}$, il en résulte trois méthodes pour calculer H_t . La méthode explicite, la méthode implicite et la méthode mixte.

Nous avons opté pour la méthode Implicite, car il existe toujours une solution, même si aucun potentiel est imposé.

L'approximation (V.9) nous donnant :

$$H_{t_1} = H_{t_0} + \Delta t \frac{\partial H_{t_1}}{\partial t} \quad (\text{V.10})$$

où $\frac{\partial H_{t_1}}{\partial t}$ est inconnu

.../...

A partir de l'équation (V.8) s'écrit :

$$\frac{dH_0^{t_1}}{dt} = \frac{1}{a^2 S} \left[T_N H_N^{t_1} + T_E H_E^{t_1} + T_S H_S^{t_1} + T_W H_W^{t_1} - H_0^{t_1} (T_N + T_E + T_S + T_W) - Q_0^{t_1} \right] \quad (V.11)$$

L'expression (V.9) permet d'écrire :

$$\frac{dH_0^{t_1}}{dt} = \frac{H_0^{t_1} - H_0^{t_0}}{\Delta t} \quad (V.12)$$

en substitution dans (V.10) on élimine $\frac{dH_0^{t_1}}{dt}$, soit :

$$(H_0^{t_1} - H_0^{t_0}) \frac{a^2 S}{\Delta t} + Q_0^{t_1} = T_N H_N^{t_1} + T_E H_E^{t_1} + T_S H_S^{t_1} + T_W H_W^{t_1} - H_0^{t_1} (T_N + T_E + T_S + T_W)$$

Et en regroupant les termes connus au second membre on obtient

$$T_N H_N^{t_1} + T_S H_S^{t_1} + T_E H_E^{t_1} + T_W H_W^{t_1} - H_0^{t_1} (T_N + T_S + T_E + T_W + \frac{dS}{dt}) = Q_0^{t_1} - \frac{a^2 S}{\Delta t} H_0^{t_0} \quad (V.13)$$

C'est une équation qui fait intervenir que l'inconnue H^{t_1} , on écrit une équation analogue pour chaque maille pour aboutir à un problème similaire à celui du régime permanent.

En écriture matricielle la méthode peut se formuler ainsi d'après les équations (V.10) et (V.11)

$$H^{t_1} = H^{t_0} + \Delta t (a^2 S)^{-1} (T H^{t_1} - Q)$$

soit :

$$\left[I - \frac{\Delta t}{a^2} S^{-1} T \right] H^{t_1} = H^{t_0} - \frac{\Delta t}{a^2} S^{-1} Q$$

Où I est la matrice identité.

CHAPITRE: SIXIEME

6 - ORGANISATION DU PROGRAMME ADAPTE :

6.1. Introduction :

L'aspect général de la méthode des différences finies permet de concevoir un programme informatique capable de simuler les transferts en régime permanent ou transitoire dans un aquifère mono-couche.

Pour la présente étude, on a adapté un programme "GEOHYD" élaboré par M. BESBES (3) et modifié par B. KHAMMARI (Enseignant à l'Institut National Agronomique - El-Harrach).

On peut décomposer la structure de ce programme en trois parties essentielles :

a/ - Entrée de données : (maillage du modèle)

a.1.) En régime permanent:

- La transmissivité en chaque maille .
- Emplacement et valeurs des charges imposées, les débits imposés (conditionnés aux limites).

a.2.) En régime transitoire:

- Les charges initiales pour chaque phase transitoire.
- Les coefficients d'emmagasinement.
- La dimension de la maille.
- Les charges et les débits imposés.
- Les paramètres numériques de simulation:
 - Nombre d'itération maximum.
 - Coefficient de surelaxation.
 - Seuil de convergence.
 - Pas de temps initial en jours.
 - Raison de la progression géométrique du pas de temps au cours de la période transitoire.

b/ - Résolution :

Construction et résolution du modèle mathématique représentant le système .

.../...

c/ - Résultats :

- c.1.) Présentation schématique du maillage et sa numérotation.
- c.2.) Présentation des charges calculées.
- c.3.) Bilan en eau du système.

6.2. Fonction du programme et construction du modèle :

a/ - Maillage du modèle :

Il est constitué d'une grille régulière de mailles carrées et se trouve défini lorsqu'on a précisé :

- 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.

L'espace est découpé selon le réseau le mieux adapté au problème.

Le choix de la dimension des mailles. dépend à la fois de la précision désirée sur les résultats et de la taille mémoire de l'ordinateur utilisé.

Une fois le domaine maillé, on numérote les mailles du modèle de gauche à droite et de haut en bas, de 1 jusqu'au nombre total des mailles (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 à celui des calculs, ou au niveau des sorties du programme .

Exemple :

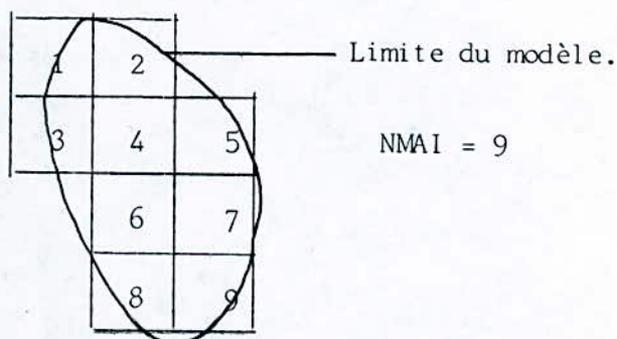


Schéma opérateur

Pour repérer la position relative des mailles les unes 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 voisines 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 modelisé d'au moins une rangée de mailles.

Exemple :

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

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 du schéma-type ILIN = 6

La correspondance numéro-opérateur/numéro schémat-type est réalisée par l'introduction, en données, d'un tableau de correspondance NUM dimensionné à NMAI.

Pour le schéma précédent :

NUM (1) = 7

NUM (2) = 8

:

:

NUM (9) = 24

.../...

b/ - Paramètres hydrauliques :

Six types de paramètres identifiés chacun à l'aide d'un code (IC Ø DE), peuvent être introduits

<u>ICODE</u>	<u>Paramètre</u>
1	Potentiels hydrauliques (H).
2	Transmissivités (T).
3	Débits (Q).
4	Niveaux de référence (HR).
5	Coefficients d'emménagement.
6	Indicateur de niveau imposé (XH).

Tous ces paramètres sont dimensionnés à NMAI, concernant le code 6, l'affectation d'une valeur positive à XH dans une maille donnée indique l'imposition du potentiel dans la maille.

En régime transitoire, deux types paramètres peuvent varier:

- Les débits qui prennent alors le code 8.
- Les niveau qui prennent alors le code 9.

c/ - Mode de lecture :

Chaque type de paramètre hydraulique est lu de manière différente selon la valeur affectée au paramètre de lecture "LEC".

LEC = 0 lecture par tableau: les paramètres sont lus successivement dans l'ordre des mesures-opérateurs de 1 à NMAI.

LEC = +1 lecture par séquence: on définit le début de la séquence par IDEB, la fin de la séquence par IFIN et la valeur unique à y affecter VAL.

LEC = -1 lecture par points: adaptée à la lecture de quelques valeurs isolées.

d/ - Edition des paramètres :

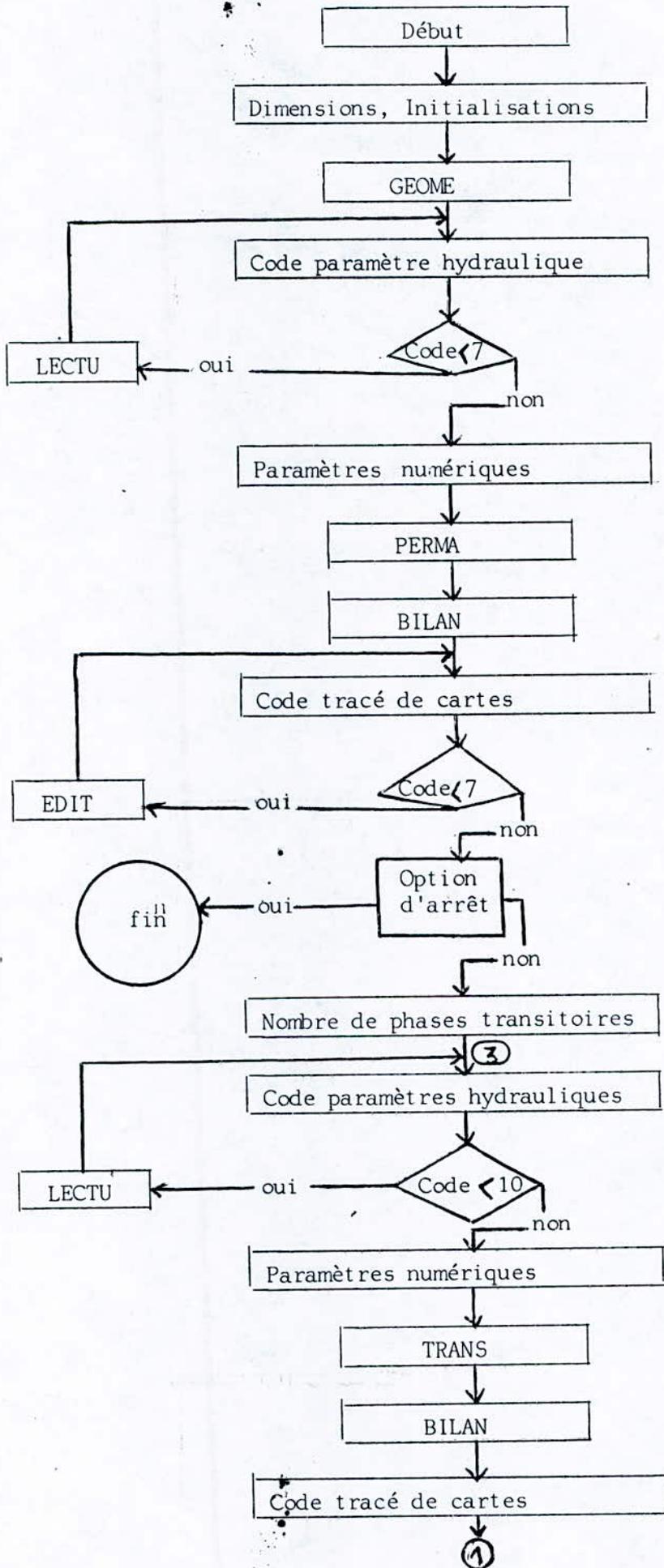
Sur option, les paramètres identifiés par leur code peuvent être édités sur imprimante.

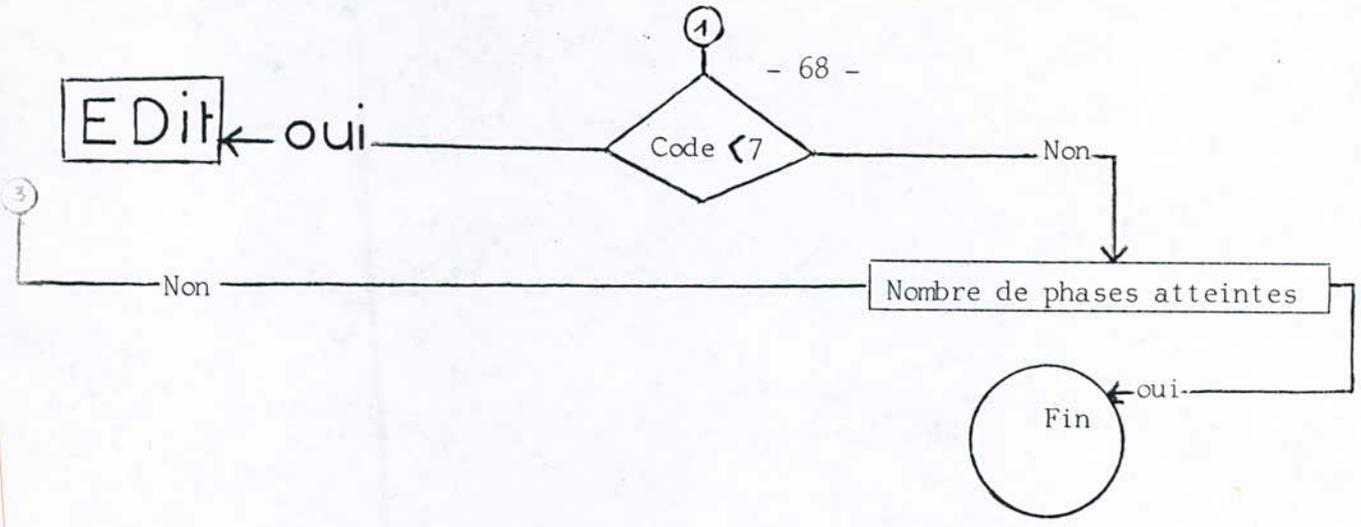
(ICODE/Paramètre, 1/H, 2/T, 3/Q, 4/(HR-H), 5/5).

e/ - Paramètres numériques de simulation (voir introduction)

.../...

6.3. Organigramme du Programme:





6.4. Présentation détaillée du programme :

Le programme "GEOHYD" comprend un programme principal dont la fonction est la déclaration d'un tableau, une subroutine GEOHYD sur laquelle sont articulées les six sous-routines suivantes : GEOME - LECTU - PERMA - BILAN - EDIT TRANS.

Les fonctions de la subroutine GEOHYD sont le dimensionnement, l'initialisation des variables indicées et l'articulation des sous-routines.

- Les variables indicées :

- H : Charge hydraulique.
- T : Transmissivité.
- Q : Débit.
- XH : Indicateur de niveau imposé.
- NN : Numéro Nord (numérotation opérateur).
- NS : Numéro Sud (numérotation opérateur).
- NE : Numéro Est (numérotation opérateur).
- NW : Numéro Ouest (numérotation opérateur).
- NUM: Numéro schéma-type.
correspondance modèle/schéma-type.
- IND: Correspondance schéma-type/modèle.
- X : Tableau de manoeuvre
(impression des cartes et lecture des paramètres).
- \$: Coefficient d'emmagasinement.
- HA : Charge hydraulique initiale (définie en transitoire).
- HR : Charge hydraulique de référence.

a/ - Subroutine GEOME :

Elle remplit les tableaux NN, NS, NE, NW à partir du tableau de correspondance NUM introduits en donnée.

Elle édite aussi la grille des numéros-opérateurs.

b/ - Subroutine LECTU:

La subroutine LECTU réalise l'introduction des paramètres hydrauliques définis par leur code ICODE, selon le mode de lecture défini par LEC.

.../...

c/ - Subroutine PERMA:

Elle fait le calcul des charges hydrauliques dans les mailles de travail ($XH \leq 0$) en régime permanent.

La résolution du système linéaire est faite par la méthode de Gauss-Seidel avec surrelaxation par points.

d/ - Subroutine BILAN:

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

e/ - Subroutine EDIT:

Elle imprime des cartes des paramètres hydrauliques définis par leur code.

L'impression s'effectue selon la grille schéma-type.

f/ - Subroutine TRANS:

Elle calcule les charges hydrauliques en transitoire par la méthode implicite pure, la résolution du système linéaire se fait par la méthode de Gauss-Seidel avec surrelaxation par points.

CHAPITRE: SEPTIEME

VII - APPLICATION DU MODELE:

Dans cette étape de la modélisation, en supposant que le régime est permanent, on procède au calage du modèle par simulation de l'état piézométrique, en jouant sur la transmissivité.

La simulation de l'état piézométrique a nécessité de considérer les paramètres tels que la transmissivité et les côtes piézométriques des forages captant la nappe d'In-Anguel.

Le tableau suivant donne les valeurs pour chaque paramètre fixé au niveau des huit forages existant :

N° OUVRAGE	COTE PIEZOMETRIQUE EN (m)	TRANSMISSIVITE EN (m ² /s)	DISTANCE EN m
F ₇	988,617	19,7	1140
F ₆	976,081	12,80	2090
F ₀	972,145	4,97	515
F ₅	970,970	8,60	1107,5
F ₄	968,510	14,8	1000
F ₃	965,160	8,40	1537,5
F ₁	961,845	2,02	312,5
F ₂	959,700	2,02	

N.B. : Les forages représentés dans ce tableau sont placés de l'amont à l'aval du site.

Pour l'élaboration du modèle, on procède à la discrétisation du site en mailles égales et carrées par pas de 100 m.

Il en résulte de cette discrétisation 452 mailles (planche n°2).

...../....

On commence à déterminer les valeurs de la transmissivité dans chaque maille en se basant sur les valeurs mesurées aux forages et sur la répartition des épaisseurs de la nappe.

Dans le cas du régime permanent supposé, où le débit calculé est égal à 49,54 l/s et dont les conditions aux limites imposées à savoir :

- Flux nul aux alentours du réservoir ($T = 0$).
- Débit entrant égal débit sortant.
- Charges imposées aux forages.

En plus de la transmissivité considérée pour chaque maille, l'application du modèle de simulation déterminera la charge en dehors des points de mesure.

Les résultats des charges données par la première simulation figurent dans la page suivante.

Compte-tenu du fait que le vecteur charge obtenu par la première simulation est loin de refléter la réalité dans le respect de la décroissance du gradient de la charge dans le sens de l'écoulement.

.../...

RESULTATS DES CHARGES DONNEES PAR LA PREMIERE SIMULATION

960.352	960.220	959.981	959.698	959.665	960.868	960.603	960.280
959.700	959.972	961.845	961.845	961.089	960.802	960.560	960.630
960.869	961.626	961.387	961.245	961.145	961.137	961.192	961.670
961.644	961.620	961.615	961.562	961.551	961.736	961.826	961.883
961.929	961.912	961.857	961.962	962.071	962.152	962.227	962.189
962.246	962.398	962.496	962.596	962.807	962.651	962.715	962.841
962.948	962.816	962.882	962.999	963.095	962.943	963.090	963.211
963.269	963.387	963.411	963.468	963.504	963.586	963.676	963.700
963.753	963.816	963.901	963.905	963.937	963.959	963.982	964.129
964.073	964.071	964.037	964.015	964.731	964.501	964.381	964.268
964.148	965.209	965.270	965.109	964.962	964.876	964.737	965.301
965.160	965.385	965.160	965.338	965.225	965.122	965.600	965.632
965.671	965.692	965.616	965.503	965.375	966.039	966.053	966.080
966.131	966.060	965.898	965.654	966.419	966.423	966.445	966.486
966.504	966.446	966.672	966.749	966.764	966.771	966.805	966.880
967.093	967.072	967.071	967.055	967.066	967.122	967.543	967.407
967.376	967.339	967.302	967.276	967.793	967.716	967.672	967.634
967.587	967.464	967.981	967.956	967.944	967.923	967.904	967.826
968.144	968.164	968.207	968.191	968.160	968.169	968.279	968.279
968.363	968.510	968.412	968.510	968.327	968.451	968.520	968.601
968.585	968.551	968.438	968.615	968.732	968.774	968.777	968.763
969.015	968.968	968.938	968.910	969.220	969.175	969.112	969.044
969.073	969.434	969.410	969.314	969.175	969.124	969.744	969.721
969.716	969.658	970.052	970.035	970.091	970.087	970.443	970.322
970.291	970.300	970.589	970.541	970.522	970.529	970.617	970.858
970.782	970.747	970.740	970.739	970.755	970.937	970.922	970.923
970.970	970.929	970.970	971.025	971.045	971.072	971.101	971.097
971.111	971.106	971.106	971.182	971.234	971.273	971.289	971.334
969.713	971.443	971.470	971.486	971.504	971.547	971.745	971.729
971.719	971.720	971.756	971.992	971.952	971.963	971.959	971.984
971.985	972.227	972.145	972.212	972.145	972.235	972.632	972.523
972.510	972.516	972.520	972.505	972.771	972.787	972.829	972.834
972.826	972.810	972.930	973.086	973.143	973.146	973.132	973.127
973.481	973.475	973.473	973.463	973.463	973.849	973.807	973.799
973.812	973.785	974.270	974.152	974.100	974.095	974.116	974.079
974.434	974.373	974.340	974.338	974.335	974.299	974.608	974.567
974.541	974.530	974.520	974.490	974.529	974.755	974.746	974.722
974.696	974.677	974.660	974.609	974.919	974.919	974.903	974.878
974.853	974.826	975.100	975.088	975.086	975.085	975.049	974.970
974.971	975.301	975.282	975.295	975.299	975.269	975.123	975.529
975.511	975.507	975.501	975.495	975.723	975.709	975.681	975.665
975.666	975.873	975.863	975.844	975.820	975.820	975.821	976.013
976.013	976.005	976.002	976.018	976.176	976.163	976.157	976.174
976.217	976.311	976.353	976.483	976.385	976.322	976.281	976.324
976.359	976.381	976.388	976.591	976.577	976.480	976.321	976.466
976.530	976.469	976.427	976.725	976.840	976.714	976.081	976.650
976.813	976.652	977.805	977.710	977.499	977.540	977.708	979.056
978.858	978.691	978.791	978.956	979.863	979.686	979.610	979.716
979.772	979.943	980.342	980.339	980.339	980.307	980.278	980.186
980.171	980.902	980.993	980.975	980.872	980.696	980.636	981.689
981.709	981.700	981.658	981.613	981.514	982.425	982.418	982.421
982.441	982.511	982.218	983.051	983.048	983.087	983.095	983.114
983.105	983.666	983.755	983.750	983.714	983.715	984.231	984.456
984.465	984.448	984.407	984.466	984.801	985.355	985.167	985.116
985.096	985.125	985.242	985.399	986.365	986.330	988.617	985.680
985.526	985.498	985.499	985.553	986.481	986.309	986.205	985.823
985.676	985.615	985.601	985.602				

Afin de palier à cette divergence il est impératif de procéder au calage du modèle par la minimisation des écarts entre les valeurs calculées par la simulation et les valeurs observées sur le terrain.

Dans notre cas, il s'agira de faire varier les transmissivités jusqu'à ce que cet écart soit le minimum possible.

Les résultats finaux obtenus après calage figurent dans la page suivante:

- Pour illustrer la fiabilité du modèle, on a superposé les données des charges obtenues par la première simulation sans calage et les données des charges obtenues par le dernier calage par rapport aux données des charges réelles.

La figure n°19 montre bien que les valeurs des charges obtenues par calage sont intimement confondues avec les données des charges réelles.

Ceci est valable pour valeurs des charges représentant celles des deux tiers du compartiment amont de notre site.

Quant aux valeurs restantes et représentant le tier du compartiment aval du site, leur écart est minimisé au fur et à mesure qu'on augmente le nombre de simulation.

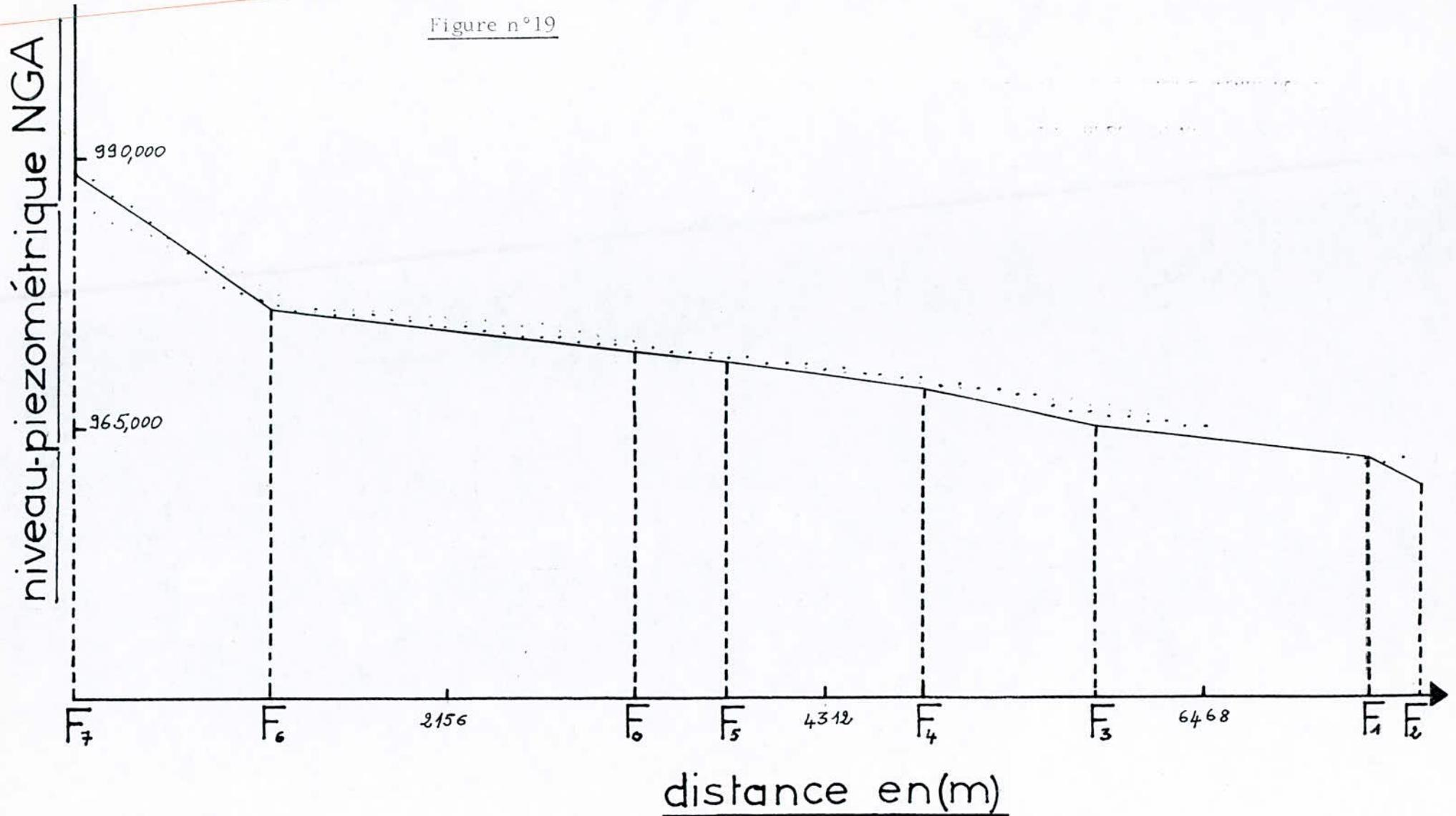
.../...

RESULTATS DES CHARGES APRES CALAGE DU MODELE

958.379	958.184	958.031	957.995	958.195	960.385	960.096	959.873
959.700	959.886	961.845	961.845	961.328	961.070	960.959	960.967
961.228	961.732	961.576	961.456	961.411	961.431	961.496	961.782
961.760	961.753	961.795	961.848	961.900	961.867	961.955	962.044
962.138	962.210	962.266	962.129	962.282	962.402	962.510	962.576
962.489	962.692	962.829	962.939	963.130	963.090	963.160	963.235
963.309	963.364	963.427	963.489	963.532	963.509	963.640	963.713
963.793	963.930	963.915	963.960	964.016	964.073	964.177	964.196
964.219	964.236	964.404	964.393	964.385	964.382	964.420	964.612
964.583	964.543	964.497	964.459	964.939	964.821	964.758	964.704
964.605	964.957	965.045	965.072	964.983	964.913	964.871	965.258
965.160	965.227	965.160	965.167	965.104	965.063	965.421	965.396
965.405	965.393	965.361	965.308	965.253	965.666	965.654	965.628
965.600	965.558	965.497	965.372	965.899	965.896	965.875	965.837
965.803	965.782	966.163	966.169	966.158	966.133	966.115	966.109
966.468	966.473	966.471	966.476	966.467	966.438	966.779	966.781
966.779	966.787	966.781	966.757	967.087	967.091	967.076	967.070
967.056	967.048	967.416	967.418	967.417	967.368	967.335	967.326
967.767	967.799	967.901	967.770	967.673	967.646	968.140	968.138
968.254	968.510	968.540	968.510	967.955	968.433	968.517	968.587
968.515	968.404	968.168	968.597	968.738	968.814	968.843	968.840
969.147	969.165	969.179	969.171	969.489	969.468	969.449	969.430
969.495	969.692	969.683	969.670	969.612	969.552	969.931	969.901
969.861	969.811	970.197	970.157	970.078	969.945	970.645	970.507
970.450	970.423	970.790	970.743	970.719	970.750	970.881	971.089
970.997	970.936	970.911	970.945	970.983	971.156	971.120	971.058
970.970	971.045	970.970	971.253	970.970	971.240	971.209	971.240
971.273	971.354	971.354	971.455	971.478	971.485	971.501	971.512
969.858	971.672	971.682	971.691	971.703	971.706	971.833	971.837
971.843	971.850	971.856	971.989	971.986	971.993	972.005	972.013
972.013	972.173	972.145	972.168	972.145	972.189	972.491	972.408
972.378	972.374	972.377	972.380	972.577	972.577	972.580	972.575
972.575	972.571	972.663	972.748	972.767	972.777	972.774	972.770
972.968	972.968	972.975	972.973	972.972	973.193	973.184	973.173
973.167	973.167	973.560	973.449	973.406	973.379	973.367	973.362
973.666	973.627	973.598	973.578	973.568	973.565	973.811	973.794
973.775	973.760	973.753	973.758	973.803	973.970	973.970	973.954
973.936	973.917	973.895	973.849	974.151	974.143	974.130	974.110
974.083	974.059	974.339	974.322	974.305	974.281	974.247	974.204
974.204	974.510	974.501	974.484	974.460	974.417	974.311	974.691
974.684	974.671	974.655	974.639	974.878	974.870	974.862	974.853
974.847	975.067	975.057	975.051	975.049	975.048	975.047	975.266
975.262	975.260	975.263	975.273	975.490	975.488	975.484	975.489
975.535	975.658	975.700	975.838	975.741	975.711	975.698	975.699
975.714	975.737	975.741	975.929	975.925	975.915	975.895	975.898
975.878	975.837	975.788	976.021	976.114	976.126	976.081	976.127
976.097	975.958	976.432	976.440	976.441	976.467	976.466	976.909
976.915	976.927	976.942	976.909	977.470	977.480	977.506	977.559
977.725	978.239	978.330	978.327	978.283	978.289	978.338	978.521
978.726	979.727	979.647	979.624	979.574	979.549	979.595	981.223
981.245	981.233	981.150	981.039	980.773	982.534	982.632	982.651
982.626	982.449	981.698	983.880	983.878	984.002	984.042	984.172
984.111	985.219	985.302	985.495	985.661	985.828	986.509	986.652
986.591	986.850	986.943	987.049	987.302	987.971	987.826	987.880
987.947	988.045	988.218	988.541	989.264	988.819	988.617	988.396
988.381	988.483	988.646	988.824	989.830	989.708	989.558	989.291
989.323	989.441	989.674	989.890				

Profil-Piezométrique

Figure n°19



En conclusion, nous pouvons affirmer que la méthode de simulation mathématique adoptée se révèle efficace, néanmoins compte-tenu du manque de temps nous sommes contraint d'accepter l'écart à ce degré de minimisation.

.../...

CONCLUSION G2NERALE:

Dans le cadre de notre étude, consacrée à l'hydrogéologie de la nappe d'In-Anguel, nous avons englobé tous les paramètres principaux touchant à l'hydroclimologie, géologie, piézométrie, hydrodynamique et hydrochimique d'une part.

D'autre part le projet a eu le mérite d'aborder le problème de l'adéquation de la transmissivité, sur cet aspect, il a été particulièrement satisfaisant de constater que le problème de simulation s'est banalisé pour nous.

La nappe inferoflux d'In-Anguel constitue des formations alluvions grossiers avec une transmissivité moyenne de l'ordre de $9,16 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$.

Le débit de la nappe estimé, est égal à 49,54 l/s.

L'épaisseur de la nappe varie entre 17,14 m et 5,81 m d'amont à l'aval du site.

Toutefois, nous informons le lecteur qu'il n'est pas possible de caler le modèle convenablement du fait du manque de temps et du manque de plusieurs séries de données et que nous nous sommes limités à l'étude de cas du régime permanent.

Toutefois, des résultats ont été acquis notamment dans l'amélioration de nos connaissances sur un phénomène essentiellement complexe dont l'impact socio-économique en Algérie est déterminant.

Nous recommandons que cette étude soit poursuivie à l'avenir du fait de son impact.

On peut affirmer que les modèles numériques sont relativement plus simple à réaliser et aussi adaptable facilement pour différentes conditions hydrogéologiques de la nappe.

.../...

Encore une fois, cette étude à permis également de confectionner un modèle mathématique et qui pour la première fois sera disponible au département.

Enfin espérons que ce mémoire trouvera une large audience auprès des futures promotions et qu'il soit un guide précieux pour eux.

.../...

"BIBLIOGRAPHIE"

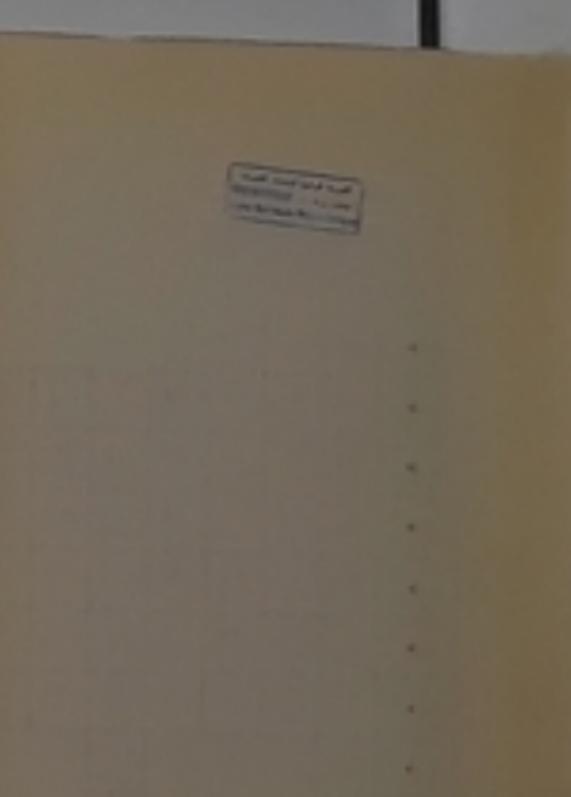
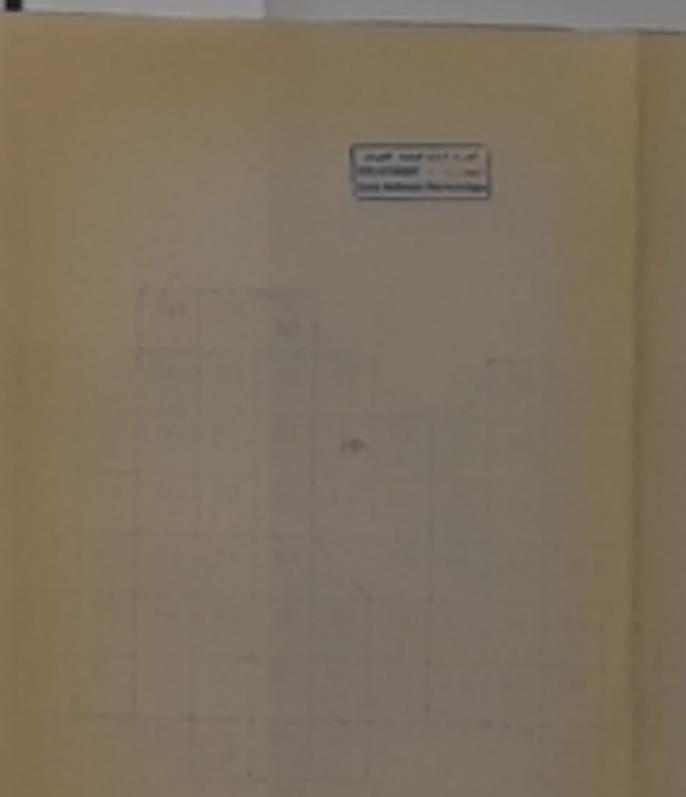
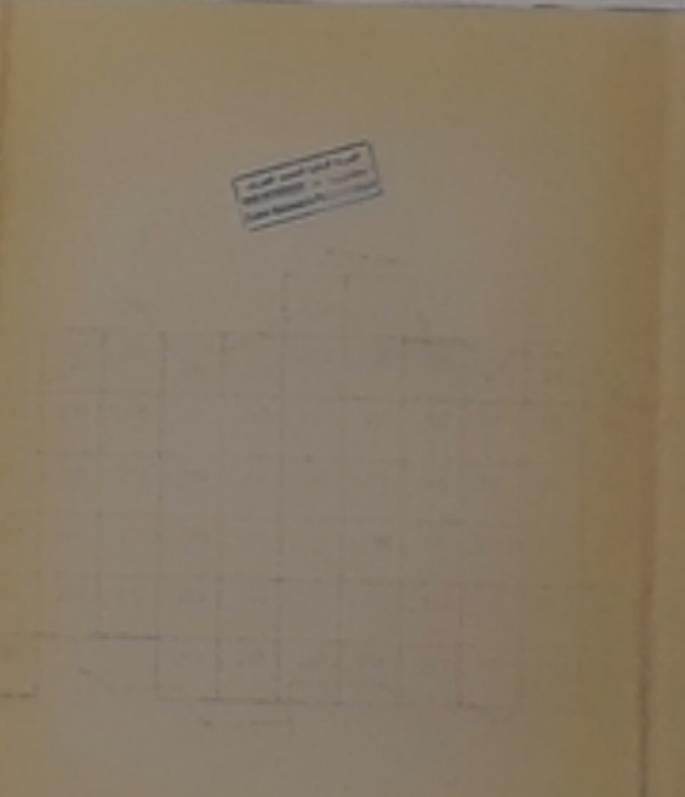
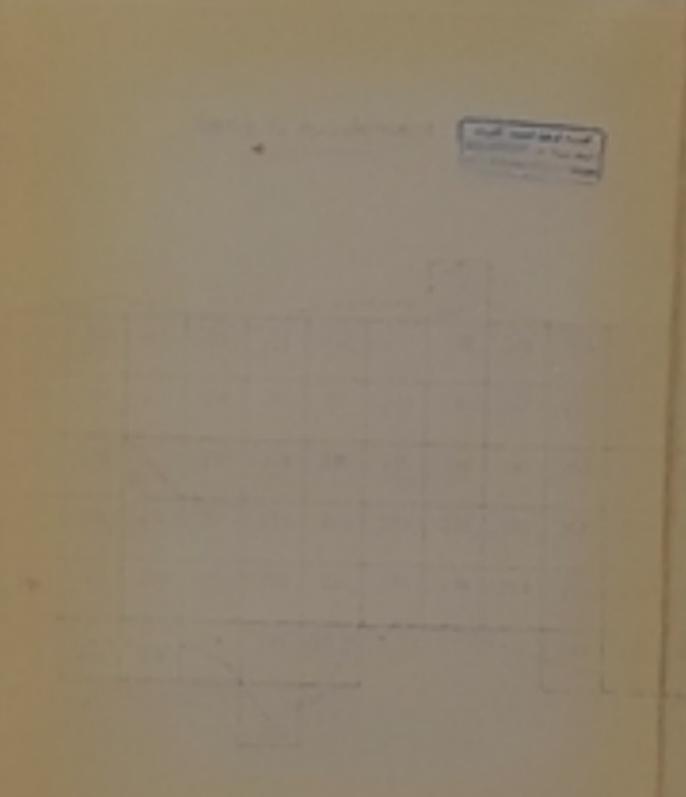
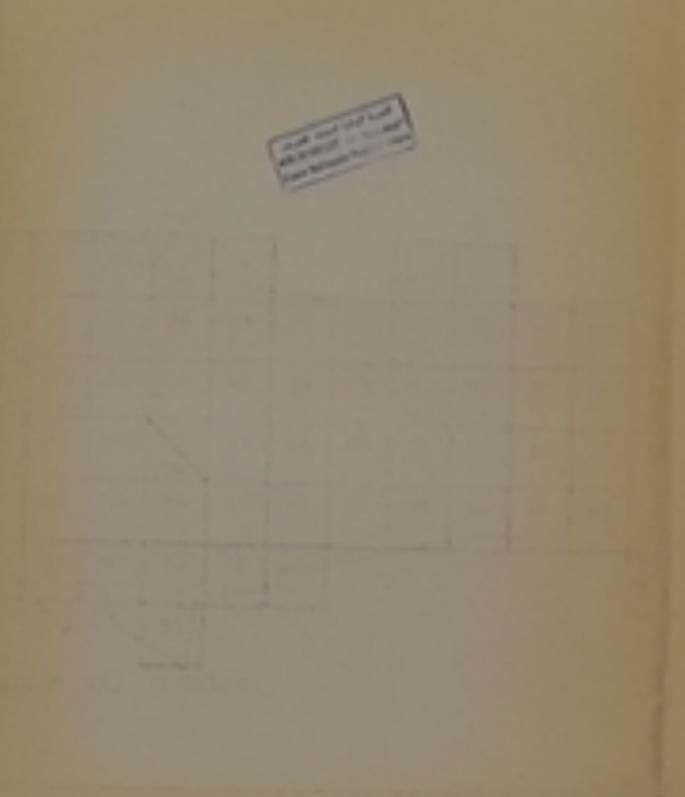
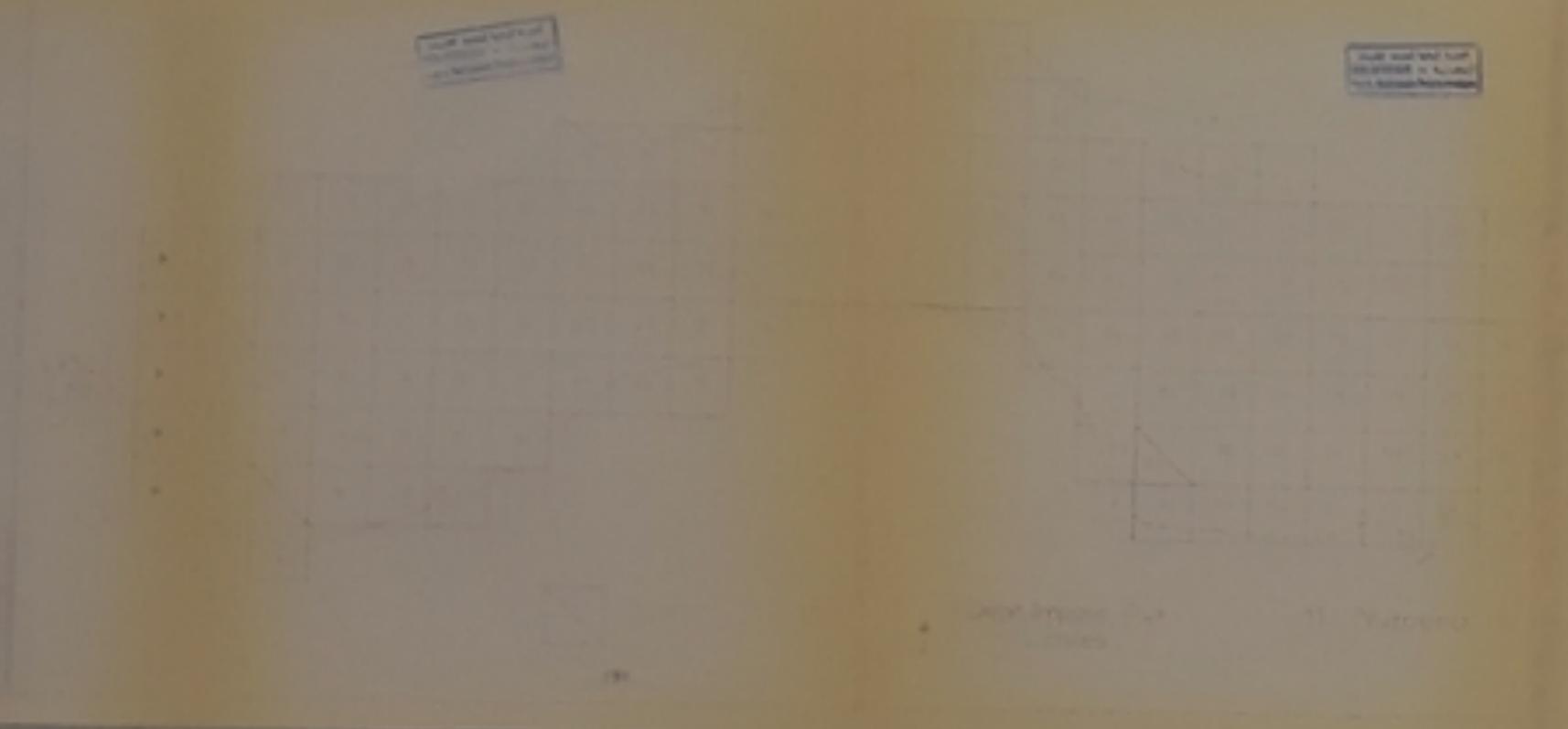
- 1) - A.N.R.H. (1979), "Etude hydrogéologique de la région d'In-Amguel par prospection électrique et sismique refraction".
- 2) - A.N.R.H. (1985), "Essais de pompage sur sept forages dans l'oued In-Amguel" n°85 DHYG D.12.
- 3) - BESBES M. (1987 -1989), "Simulation en hydrogéologie".
Cours organisé sous l'égide de l'UNESCO par l'ENIT, Tunis.
- 4) - BLANGUERNON C. (1976), "Le Hoggar" Arthand, Paris.
- 5) - BOUMAH RAT M. et GOURDIN A. (1983), "Méthodes numériques appliquées" OPU, Alger.
- 6) - CASTANY G. (1977), "Dictionnaire français d'hydrogéologie" BRGM, Paris.
- 7) - CASTANY G.(1982), "Principes et méthodes de l'hydrogéologie" Dunod Université BORDAS, Paris.
- 8) - CASTANY G. (1968), "Prospection et exploitation des eaux souterraines Dunod, Paris.
- 9) - CASTANY G. (1963), "Traite pratique des eaux souterraines Dunod, Paris.
- 10) - CARASSO C. (1970), "Analyse numériques" éléments de mathématiques modernes - CANADA.
- 11) - DUBIEF J. (1960-1963), "Le climat du Sahara" Tome 1,2 Université d'Alger - Inst. Rech. Sahar. - Publ. CNRS, Paris.
- 12) - EMSELLEM Y (1970), "Construction de modèles mathématiques en hydrogéologie - ENSMP - Paris.
- 13) - SAIGHI O. (1984), "Possibilités aquifères au Hoggar Central" Thèse 3ème cycle USTHB.

.../...

- 14) - SHARMA H.D et CHAWLA S. (1977), "Manuel of ground water and tube wells"
Publié par Central board of irrigation and power, INDE.
- 15) - YACONO D. (1968), "L'Ahaggar - Essai sur le climat de montagne au
Sahara - Traw - Inst. Rech. Sahar - T. XXVII - Alger.
- 16) - YAHI A. et SOLLAH M. (1983), "Etude hydrogéologique de l'oued Abalessa
(Hoggar Central) W.: Tamanrasset USTHB.
- 17) - BONNET - M (1978), " Méthodologie des modèles de simulation en
Hydrogéologie . BRGM NANCY 436 P
-----oO-----

9/30

Small rectangular stamp



1942

1942

1942

1942

1942

1942

1942

1942

1942

1942

1942

1942

1942

1942

1942

1942

1942

1942

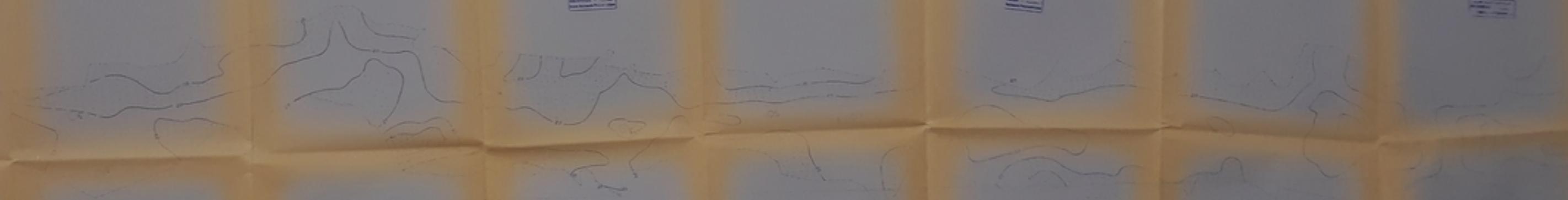
1942

1942

1942

1942

1942



1942

1942

1942

1942

1942

1942

1942

1942

1942

