



**HAL**  
open science

# Evolution et comportement d'un système aquifère hétérogène : géologie et hydrogéologie du delta du Nestos (Grèce) et de ses bordures

Georges Stournaras

► **To cite this version:**

Georges Stournaras. Evolution et comportement d'un système aquifère hétérogène : géologie et hydrogéologie du delta du Nestos (Grèce) et de ses bordures. Géologie appliquée. Université Scientifique et Médicale de Grenoble, 1984. Français. NNT: . tel-00756653

**HAL Id: tel-00756653**

**<https://theses.hal.science/tel-00756653>**

Submitted on 23 Nov 2012

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

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



STOURNARAS (G.)

EX. n° 1

## THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITÉ SCIENTIFIQUE ET MÉDICALE  
DE GRENOBLE

pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE SPÉCIALITÉ

Spécialité : Géologie appliquée

Option : Hydrogéologie

12 AVR. 1984

par

Georges STOURNARAS

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

L

**Evolution et comportement  
d'un système aquifère hétérogène.  
Géologie et hydrogéologie du delta  
du Nestos (Grèce) et de ses bordures.**

Soutenue le 10 Avril 1984 devant la Commission d'Examen

R. BARBIER	Professeur Emérite à l'USMG	Président
P. MARINOS	Professeur à l'Université de Xanthi	Examineur
R. MICHEL	Professeur à l'USMG	Examineur
J. SARROT-REYNAULD	Professeur à l'USMG	Rapporteur



THESE DE DOCTORAT DE SPECIALITE  
Spécialité : Géologie Appliquée - Option : Hydrogéologie

*Titre d'ouvrage :*

**EVOLUTION ET COMPORTEMENT D'UN SYSTEME  
AQUIFERE HETEROGENE. GEOLOGIE ET  
HYDROGEOLOGIE DU DELTA DU NESTOS (GRECE)  
ET DE SES BORDURES**

*Nom de l'auteur :* STOURNARAS Georges

*Etablissement :* Université Scientifique et Médicale de Grenoble.

**RESUME**

Cette étude concerne le delta du Nestos (Grèce du Nord) et les deltas dont la formation est plutôt influencée par l'action fluviale et l'action de la houle.

Les forages et les sondages électriques ont permis de constater, pendant le dernier stade de l'évolution du delta, une translation de l'écoulement du Nestos d'Ouest en Est.

Ceci est aussi vérifié par l'analyse des conditions géomorphologiques et fut déterminant pour le régime hydrogéologique des deux secteurs du delta.

Après l'aménagement de la rivière, commence la phase de destruction du delta. Les barrages naturels des îles de Thassopoula et Thassos n'ont pas permis la formation des profils sous-marins typiques, sauf dans le cas des côtes orientales. L'effet de la houle a donné trois types de côtes. Le transport des sédiments et la formation de la plate-forme sous-marine sont influencés par la présence des îles ci-dessus mentionnées. L'analyse morphométrique du delta exprime la distribution du volume des sédiments et indique que la convexité ou la concavité des côtes et des profils sous-marins résulte de cette distribution. Plus encore, cette analyse peut être utilisée pour la connaissance des conditions hydrogéologiques, avant la réalisation de recherches précises.

Les analyses minéralogiques des sédiments et la détermination des fossiles ont complété la connaissance sur la formation du delta, et les conditions paléocéologiques.

L'étude des conditions hydrogéologiques a été faite, pour les marbres, des bordures du delta, à l'aide de la géologie, des mesures du débit des sources et l'analyse des courbes, des analyses chimiques et isotopiques et de l'analyse tectonique des affleurements des marbres. Cette étude pour les systèmes aquifères de la plaine deltaïque, qui résultent par la formation du delta, est basée sur les essais de pompage, ainsi que sur les analyses chimiques et isotopiques. Dans ce domaine, on a essayé de critiquer les méthodes d'essais de pompage dans les conditions hétérogènes du delta et dans les conditions d'utilisation des forages qui exploitent toutes les couches aquifères traversées. En tenant compte des pertes de charge dans les forages, en essayant d'établir une corrélation entre le Débit Spécifiques des forages et la Transmissivité on est arrivé à établir un cadre d'application des méthodes des essais de pompage sous les conditions ci-dessus mentionnées. L'étude inclut encore la description des conditions hydrogéologiques et hydrochimiques de la nappe phréatique et du système des nappes profondes, leurs variations et leurs conditions d'alimentation.

**MOTS CLÉS**

Grèce, Nestos, Delta, Quaternaire, Massif du Rhodope, Hydrogéologie, Hydrochimie, Hydrodynamique, Géomorphologie, Aquifères hétérogènes, Essais de pompage et limites d'application, Composition isotopique des eaux, Corrélation Transmissivité - Débit Spécifique.

12 AVR. 1984

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



N° d'ordre

# THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITÉ SCIENTIFIQUE ET MÉDICALE  
DE GRENOBLE

pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE SPÉCIALITÉ

Spécialité : Géologie appliquée  
Option : Hydrogéologie

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

par

**Georges STOURNARAS**

12 AVR. 1984

## Evolution et comportement d'un système aquifère hétérogène. Géologie et hydrogéologie du delta du Nestos (Grèce) et de ses bordures.

2

Soutenue le 10 Avril 1984 devant la Commission d'Examen

R. BARBIER	Professeur Emérite à l'USMG	Président
P. MARINOS	Professeur à l'Université de Xanthi	Examineur
R. MICHEL	Professeur à l'USMG	Examineur
J. SARROT-REYNAULD	Professeur à l'USMG	Rapporteur

GRENOBLE

100 96806



DOCUMENTARY  
RECORDS  
OF THE  
UNITED STATES  
DEPARTMENT OF THE INTERIOR  
BUREAU OF LAND MANAGEMENT  
WASHINGTON, D. C. 20240

18 MAR 1964

*A mes parents  
et à ma femme,  
avec ma profonde gratitude  
et à l'enfant qui doit voir le jour*

## AVANT PROPOS

Au terme de cette étude, je voudrais exprimer ma profonde reconnaissance aux personnes qui m'ont apporté leur aide.

Je dois remercier tout d'abord M. le Professeur J. SARROT-REYNAULD, directeur du Service d'Hydrogéologie de l'Institut Dolomieu, sans lequel je n'aurais pas pu mener à bien cette étude. Je le remercie pour son aide scientifique et humaine pendant mes études à Grenoble, ainsi que pendant mon travail sur cette thèse. Il n'a ménagé ni son temps, ni ses conseils pour que ce travail puisse voir le jour.

Je remercie également M. le Professeur R. BARBIER qui me fait l'honneur de présider le jury, ainsi que pour ses conseils pendant mes études en D.E.A.

Mes remerciements vont également à M. le Professeur R. MICHEL qui a bien voulu accepter de participer à ce jury, avec ma gratitude pour son aide pendant mes études à Grenoble.

Je dois remercier M. le Professeur P. MARINOS, dont la contribution à la réalisation de cette thèse, ainsi qu'à ma formation dans le domaine de la Géologie Appliquée fut déterminante. Sa confiance, son amitié et sa collaboration scientifique furent pour moi de grands apports qui m'ont permis de bénéficier de sa grande expérience et de ses connaissances. Qu'il trouve ici le témoignage de mon affection et de ma profonde reconnaissance.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance aux gouvernements français et hellénique, qui ont bien voulu m'apporter une aide financière, au dernier stade de mes recherches, dans le cadre des accords de coopération francohellénique.

Mes remerciements vont aussi à toutes les autres personnes qui m'ont aidé, parmi lesquelles :

- Mme A. MARCOPOULOU-DJACANTONI pour la détermination des fossiles et sa collaboration sur l'expression des données paléocéologiques.

- Les géologues MM. TH. MARKOPOULOS et G. STAMATAKIS et le technicien M. Z. OURANOS pour la réalisation des analyses minéralogiques et les géologues Mmes P. CHORJANOPOULOU et H. PAPALETI pour leur collaboration dans l'interprétation de ces analyses.

- Les hydrogéologues MM. P. ZANNIS et CH. SMYRNIOU pour leur aide multiple, scientifique et amicale.

- La S.A. "HYDROEREVNA" et son personnel.

- Les chimistes Mme H. PETRI et M. J. MALEFAKIS et les géologues Mme E. TSALGATIDOU, M. A. BASDEKIS, et M. A. PANAGOPOULOS pour leur collaboration dans les divers domaines.



- Le géologue du C.N.R.S. M. G. BUFFET pour son aide scientifique, ainsi que pour son amitié, si précieuse pour moi, qui m'a familiarisé à l'esprit de la vie scientifique et quotidienne française.

D'une façon générale, je voudrais exprimer mes remerciements à mon ancien Professeur M. G. MARINOS, aux Professeurs de l'Institut Dolomieu, à mes collègues de l'Université d'Athènes et de Grenoble, au personnel de l'Institut Dolomieu (surtout à Melle C. LOUVAT) et du Laboratoire de Géologie Appliquée de l'Université de Xanthi, à Mme JOANNIDIS qui a tapé le texte et à Mme A. VOIRONIKOS qui a dessiné les schémas, aux paysans de la région du delta du Nestos et à tous mes amis et collègues. Qu'ils m'excusent si je ne peux pas les citer tous ici, de crainte d'en omettre, et qu'ils sachent que je ne les oublie pas.

Que mon frère Zacharie trouve ici le témoignage de mon affection et de ma profonde gratitude.

27 AOÛT 2003

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

PLAN GENERAL

	page
1.	INTRODUCTION 15
2.	LE CADRE GEOGRAPHIQUE ET HYDROLOGIQUE 16
2.1.	Le cadre géographique de la région 16
2.2.	Les données hydrologiques 16
3.	L' EVOLUTION GEOTECTONIQUE DE LA REGION MAJEURE DU DELTA 20
4.	LES CONDITIONS GEOLOGIQUES 33
4.1.	Généralités 33
4.2.	Les formations lithologiques et leur comportement hydrogéologique 35
4.2.1.	Les bordures de la plaine deltaïque 35
4.2.2.	Le delta 38
4.2.3.	Les recherches géophysiques 58
5.	LES CONDITIONS GEOMORPHOLOGIQUES ET LEUR EVOLUTION 71
5.1.	Généralités 71
5.2.	Les lignes des côtes 73
5.3.	Les profils sous-marins 74
5.4.	L' effet de la houle 77
5.5.	Le transport des sédiments 79
5.6.	L' analyse morphométrique du delta 84
5.7.	Quelques données sur la composition minéralogique des sédiments du delta 92
6.	LES CONDITIONS PALEOECOLOGIQUES 96
7.	LES NAPPES AQUIFERES 99
7.1.	La nappe karstique 99
7.1.1.	Description générale 99
7.1.2.	Les conditions hydrochimiques 101
7.1.3.	Les conditions hydrodynamiques 104
7.1.4.	Les conditions tectoniques 111
7.2.	Les nappes aquifères du delta 114
7.2.1.	Description générale 114
7.2.2.	Les données isotopiques 119



0.0.2.0  
 2007-01-01  
 10:00:00

7.2.3.	Les conditions piézométriques	page	125
7.2.4.	L' ensemble des écoulements souterrains		127
7.2.5.	Les conditions hydrochimiques		132
7.2.5.1.	La qualité de l' eau du Nestos		132
7.2.5.2.	La qualité des eaux de la nappe phréatique		134
7.2.5.3.	L' intrusion marine		136
7.2.5.4.	Le rapport Ca/Mg		137
7.2.5.5.	L' indice d' échange des bases		140
7.2.5.6.	La distribution de la résistivité électrique		143
7.2.5.7.	La qualité d' ensemble des eaux souterraines		143
8.	LES ESSAIS DE POMPAGE		158
8.1.	Caractérisation des systèmes de nappes-courbe caractéristique		158
8.2.	Le comportement des nappes aquifères pendant le pompage		161
8.3.	Caractérisation des systèmes de nappes pompées		162
8.4.	Les caractéristiques techniques des forages		164
8.5.	Analyse et élaboration des mesures de pompage		168
8.5.1.	Equation de Theis-simplification de Cooper-Jacob		168
8.5.2.	Méthode de Hantush-Jacob		192
8.5.3.	Méthode de Boulton		197
8.6.	Quelques notes sur l' application des méthodes des essais de pompage		214
8.7.	Les pertes de charge dans les forages		219
8.8.	Corrélation q-T, représentation cartographique des T		224
8.8.1.	Généralités		224
8.8.2.	La corrélation pour le delta du Nestos		226
9.	CONCLUSION GENERALE-FAITS NOUVEAUX		235
	BIBLIOGRAPHIE		243
	APPENDICE		251
I.	Analyses chimiques des eaux souterraines		253
II.	Les mesures des essais de pompage		259
III.	Liste de fossiles déterminés dans les sédiments du delta.		271

### LISTE DES FIGURES

figure	
2-1	Le cadre géographique de la région d' étude
3-1	Cadre général géotectonique de la Grèce
3-2	Les affleurements du massif du Rhodope
3-3	La tectonique des bassins Nestos-Prinos
3-4	Variations d' épaisseur et des faciès du Néogène
3-5	Coupe sismique longitudinale dans le bassin de Prinos
3-6	Carte isopaque d' après les données sismiques
3-7	Carte d' anomalie de Bouguer
3-8	Carte structurale souterraine
3-9	Corrélation des variations relatives du niveau de la mer
3-10	Carte bathymétrique de la région Nord de la mer Egée
4-1	Carte hydrogéologique. Légende
4-2	" " Feuille 1
4-3	" " " 2
4-4	" " " 3
4-5	" " " 4
4-6	" " " 5
4-7	Localisation des forages considérés
4-8	Déplacements des lits de la rivière
4-9	Légende des colonnes lithologiques des forages
4-10	Colonnes lithologiques des forages 1-10
4-11	" " " " 11-20
4-12	Coupe du remplissage du delta
4-13	Variations granulométriques des sédiments du delta
4-14	Distribution verticale des sédiments du delta-partie Ouest
4-15	Distribution verticale des sédiments du delta-partie Est
4-16	Carte sédimentologique du delta
4-17	Carte de localisation des sondages électriques-partie Ouest
4-18	Carte de localisation des sondages électriques-partie Est



## figure

- 4-19 Carte de conductance longitudinale  
-partie Ouest
- 4-20 Carte de conductance longitudinale  
-partie Est
- 4-21 Coupes géophysiques 1-2
- 4-22 " " 3-4
- 4-23 " " 5-6
- 4-24 " " 7-8
- 4-25 " " 9-10
- 4-26 " " 11-12
- 4-27 Tableau de Résistivité des couches et des  
aquifères
- 5-1 Classification générale des deltas
- 5-2 Comparaison des cartes topographiques anciennes
- 5-3 La topographie de la région avant l' aménagement  
du Nestos
- 5-4 La topographie de la région après l' aménagement  
du Nestos
- 5-5 Les talus sous-marins
- 5-6 Les côtes centrales du delta
- 5-7 " " occidentales "
- 5-8 " " orientales "
- 5-9 Type d' embouchure d' un delta à plate-forme importante
- 5-10 Le dernier système d' embouchures du Nestos
- 5-11 Action de dépôts des sédiments à l' embouchure de  
la rivière
- 5-12 Les parties diverses du delta
- 5-13 Coupe idéale longitudinale d' un delta
- 5-14 " " verticale " "
- 5-15 Cycle de développement et d' abandon d' une barre  
de chenal
- 5-16 Morphologie schématique des accumulations sableuses  
-Repartition des sédiments dans les distributaires
- 5-17 Analyse morphométrique du delta
- 5-18 Distribution du volume des sédiments pour une série de deltas
- 5-19 " " " " " " pour le delta du Nestos
- 5-20 Côtes occidentales-convexité
- 5-21 " centrales - "
- 5-22 " orientales -concavité
- 5-23 Carte d' épaisseurs cumulatives des formations  
aquifères dans le bassin de Xanthi

## figure

- 7-1 Hypothèses pour l' apparition des sources  
karstiques
- 7-2 Les analyses chimiques des eaux karstiques
- 7-3 Fluctuation du débit des sources et du débit du Nestos
- 7-4 " " " " " des précipi-  
tations générales
- 7-5 Fluctuation du débit des sources et des préci-  
pitations en Toxotes
- 7-6 Les courbes de tarissement des sources
- 7-7 Carte de la fracturation des marbres
- 7-8 Rose de la fracturation des marbres
- 7-9 L' artésianisme phréatique
- 7-10 Corrélation altitude surface - altitude nappe  
partie Ouest
- 7-11 Corrélation altitude surface - altitude nappe  
partie Est
- 7-12 Carte piézométrique de la nappe phréatique
- 7-13 L' ensemble des écoulements souterrains (0-100 m)
- 7-14 " " " " (0-125 m)
- 7-15 " " " " (0-150 m)
- 7-16 Analyses chimiques des eaux profondes du delta
- 7-17 Variations de la composition chimique de l' eau du Nestos
- 7-18 Variations de concentration en  $Cl^-$  des eaux de  
la nappe phréatique
- 7-19 Le rapport Ca/Mg (n.superf.)
- 7-20 " " " (n.profond.)
- 7-21 La distribution des valeurs d' I.e.b.
- 7-22 Composition chimique des eaux des forages
- 7-23 " " " " " "
- 7-24 Carte de S.A.R. pour l' ensemble des eaux souterraines
- 7-25 Classification C-S " " " "
- 7-26 " WILCOX " " " "
- 7-27 " REVELLE " " " "
- 7-28 Analyses chimiques des eaux du delta-partie Ouest-Fevrier
- 7-29 " " " " " " - " Est - "
- 7-30 " " " " " " - " Ouest-Octobre
- 7-31 " " " " " " - " Est - "
- 7-32 Carte de la distribution de la Resistivité des eaux  
phréatiques (Fevrier)
- 7-33 Carte de la distribution de la Resistivité des eaux  
phréatiques (Octobre)

## figure

8-1	Schématisation des nappes aquifères, basée sur les variations de K	
8-2	Courbes caractéristiques des nappes aquifères	
8-3	Courbes $\log \Delta - \log t$ des forages considérés	
8-4	" " " " " "	
8-5	" " " " " "	
8-6	" " " " " "	
8-7	" " " " " "	
8-8	Courbes $\Delta - \log t$ des forages et des piézomètres F, P 4, 9	
8-9	" " " " " " " "	19
8-10	" " " " " " " "	5, 10
8-11	" " " " " " " "	20
8-12	" " " " " " " "	16
8-13	" " " " " " " "	17
8-14	" " " " " " " "	11
8-15	" " " " " " " "	18
8-16	" " " " " " " "	16
8-17	" " " " " " " "	13
8-18	" " " " " " " "	1
8-19	" " " " " " " "	8, 2
8-20	" " " " " " " "	7
8-21	" " " " " " " "	3
8-22	" " " " " " " "	14
8-23	" " " " " " " "	6, 15
8-24	Courbe $(\Delta - \frac{\Delta^2}{2H}) - \log t$ pour les forages F <sub>13</sub> et F <sub>16</sub>	
8-25	Courbes supplémentaires pour l'estimation de $t_0$	
8-26	Méthode de Hantush-Jacob. La solution graphique	
8-27	Méthode de Boulton. Solution graphique pour le piézomètre 1	
8-28	" " " " " " " "	2
8-29	" " " " " " " "	3
8-30	" " " " " " " "	4
8-31	" " " " " " " "	5
8-32	" " " " " " " "	6
8-33	" " " " " " " "	7
8-34	" " " " " " " "	8
8-35	" " " " " " " "	9
8-36	" " " " " " " "	10

## figure

8-37	Méthode de Boulton. Solution graphique pour le piézomètre 11	
8-38	" " " " " " " "	12
8-39	" " " " " " " "	13
8-40	" " " " " " " "	14
8-41	" " " " " " " "	15
8-42	" " " " " " " "	16
8-43	" " " " " " " "	17
8-44	" " " " " " " "	18
8-45	" " " " " " " "	19
8-46	" " " " " " " "	20
8-47	Lignes de courant à l'intérieur d'une crépine à persiennes	
8-48	" " " " " " " "	
8-49	Représentation cartographique des T déduites des q	
8-50	Relation entre T et q	
8-51	Diagramme de corrélation T-q	
8-52	" " " " " " " "	
8-53	" " " " " " " "	
8-54	" " " " " " " "	
8-55	" " " " " " " "	
8-56	" " " " " " " "	
8-57	" " " " " " " "	
8-58	" " " " " " " "	





Fig. 2-1 - Le cadre géographique de la région d'étude.

## I. INTRODUCTION

La bibliographie sur les deltas s'est largement développée au cours des dernières années. Pour la plupart des publications, il s'agit d'études de classification qualitative ou quantitative des deltas, de leur évolution morphologique ou de leur structure tectonique et sédimentologique dans les régions deltaïques d'intérêt économique (ex. pétrole). Par contre, les études sur le régime hydrogéologique des deltas liées au régime de leur évolution finale, sont très limitées.

Pour la région hellénique il manque des études complètes des deltas sauf quelques études préliminaires ou dirigées vers un certain domaine. Cependant, certains projets sur les deltas ont commencé à être élaborés par quelques Services Publics ou par quelques Centres de Recherche. Le delta du Nestos est la plus grande région côtière, ayant la forme typique de delta, en Grèce. Notre intérêt pour le delta du Nestos est apparu à l'époque de notre participation à la société "HYDROEREVNA" S.A., qui avait réalisé, en deux stades, une étude préliminaire sur cette région.

Le but principal de cette étude est la définition du régime de l'évolution finale du delta et par conséquent la formation de son régime hydrogéologique, hydrodynamique et hydrochimique, et l'extrapolation des résultats obtenus pour les deltas de ce type, dans la mesure du possible. Ensuite, nous avons essayé de contribuer à la critique des méthodes des essais de pompage, dans les conditions d'un delta et dans les conditions ordinaires (souvent mauvaises), d'exécution des forages d'exploitation. Enfin, nous avons essayé de mener plus avant un projet sur la corrélation entre la Transmissivité et le Débit Spécifique des forages et par conséquent une représentation cartographique des Transmissivités déduites des Débits Spécifiques.



## 2. LE CADRE GEOGRAPHIQUE ET HYDROLOGIQUE DE LA REGION D'ETUDE

### 2.1. LE CADRE GEOGRAPHIQUE

La rivière Nestos s'écoule dans la région Nord-Est de la Grèce, formant la limite naturelle entre le département de la Macédoine et celui de Thrace. Le Nestos entre dans le territoire hellénique de la Bulgarie, traverse le massif cristallin et cristallophyllien du Rhodope et aboutit dans la région du delta, qui se trouve à mi-distance des villes de Kavala et Xanthi.

La superficie totale du bassin versant du Nestos est de 6130 km<sup>2</sup>, dont 2720 km<sup>2</sup> constituent le secteur hellénique, dont la région du delta a une surface de 440 km<sup>2</sup>. L'axe de la plaine deltaïque est presque, de 17 km.

Les centres des diverses activités dans la partie Ouest du delta sont les villes de Kavala et de Chryssoupoli, tandis que dans la partie Est toutes les activités sont dirigées vers la ville de Xanthi. Dans la région du delta se trouve la ville de Keramoti qui sert avec son port entre autres, à la communication avec l'île de Thassos.

Dans la plaine deltaïque, en dehors des activités agricoles qui se développent chaque année, on a actuellement des activités industrielles et touristiques (Usine d'engrais phosphoriques, installations du Pétrole de Thassos, aéroport de Chryssoupoli etc.).

### 2.2. DONNEES HYDROLOGIQUES

La région du delta est une partie (sousbassin) du bassin versant du Nestos, qui se prolonge jusqu'en Bulgarie. Il faut ajouter à la superficie du delta, une surface de 100 km<sup>2</sup> du massif de Rhodope, dont les eaux superficielles ne s'écoulent pas vers la rivière,

mais s'écoulent directement vers le delta par les torrents.

#### Précipitation

Parmi les nombreuses stations pluviométriques qui se trouvent dans le bassin versant du Nestos, les mesures de deux stations sont les plus utiles pour le but de cette étude. Il s'agit de la station de Chryssoupolis, au centre du delta, et de la station de Toxotes, au point d'entrée de la rivière dans la région du delta. D'après les mesures correspondantes, les précipitations annuelles moyennes sont les suivantes (en mm):

Années	69-70	70-71	71-72	72-73	73-74	74-75	75-76	76-77	77-78	$\bar{P}$
Chryssoupolis	670.7	765.0	635.5	454.4	590.1	334.8	628.0	420.3	562.5	632.0
Toxotes	1084.5	757.5	760.2	-	-	-	-	564.2	791.6	

On peut distinguer, entre les mesures des deux stations, des différences, parfois importantes, malgré leur proximité. Ceci est dû à la localisation de la station de Toxotes sur le versant de la montagne, à la bordure du delta, orientée vers la mer, recevant, donc, des vents humides. Pour choisir une valeur, représentative de toute la région du delta, il faut donc en considérer une, qui soit plus élevée que celle, donnée par la station de Chryssoupolis. Nous acceptons, comme valeur représentative, celle de 650 mm.

#### Températures

Les données de la station de Chryssoupolis sont les suivantes (température annuelle moyenne en °C):

Années	66-67	67-68	68-69	69-70	70-71	71-72	72-73	73-74	74-75	75-76	76-77	77-78	78-79	$\bar{T}$
Chryssoupolis	15.0	14.8	13.9	14.9	13.7	14.2	13.7	14.0	14.6	13.0	14.7	14.1	14.7	14.3



### Evapotranspiration réelle

Pour les valeurs  $P = 650$  mm et  $T^{\circ} = 14.3^{\circ}\text{C}$ , on a :

- Selon la formule de Turc  $E_{TR} = \frac{P(\text{mm})}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}$  et  $L = 300 + 25T + 0.05T^3$

$$E_{TR} = 521.27 \text{ mm (80.2\%)}$$

- Selon la formule de Coutagne  $E_{TR} = P(m) - \lambda P^2$ ,  $\lambda = \frac{1}{0.8 + 0.14T}$

(Si  $\frac{1}{8\lambda} < P < \frac{1}{2\lambda}$ ), on a  $E_{TR} = 0.499m$  (76.9%)

L'expérience dans les régions helléniques montre, sauf quelques exceptions, que les deux formules fournissent des valeurs plus ou moins exagérées. D'après la comparaison avec les résultats des régions analogues, nous considérons, comme plus réelle, la valeur de 455 mm (70%).

### Ruissellement

Le ruissellement dans la région du delta est très petit, sauf quelques cas temporaires exceptionnels vers les côtes. On estime, donc, le maximum de ruissellement à 5% (32,5mm). Dans la plaine deltaïque arrive aussi un volume d'eau par ruissellement direct sur les bordures. Une étude pour la construction d'un petit barrage dans cette région a permis d'estimer ce ruissellement à 25% des précipitations sur les bordures. Il faut y ajouter un volume d'eau ( $100 \text{ km}^2 \times 650 \text{ mm} \times 25\%$ ) qui s'écoule vers le delta ( $65 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ ).

### Bilan hydrologique

Selon les estimations précédentes, on peut établir un premier bilan hydrologique. Pour un bilan définitif, surtout hydrogéologique, il faut que l'on exprime d'une façon quantitative les arrivées du bassin de Xanthi, la participation de la rivière et du massif karstique à l'alimentation des nappes profondes et les pertes dues à l'évaporation secondaire (capillaire), lorsque la nappe phréatique n'est pas profonde. Une partie de l'infiltration s'arrête à la

nappe phréatique, sans pénétration plus profonde, sauf quelques zones favorables, dont l'existence est due à la structure sédimentaire irrégulière du delta. D'ailleurs il y a certaines zones, bien connues, où la nappe phréatique est très élevée, posant des problèmes à l'agriculture. Ces problèmes sont déjà partiellement résolus par la réalisation de tranchées de drainage.

On peut, donc, exprimer le bilan hydrologique

Précipitations	: 650mm/an x 440km <sup>2</sup>	= 286.000.000 m <sup>3</sup> /an
Ruissellement	: 32,5mm (5%)	= 14.300.000 "
Evapotranspiration	: 455mm (70%)	= 200.200.000 "
Infiltration	: 162,5mm (25%)	= 71.500.000 "

Il faut encore tenir compte de :

- L'alimentation de la plaine deltaïque par les bordures (ruissellement)  $100 \text{ km}^2 \times 0.65 \text{ m} \times 25\% = 16.250.000 \text{ m}^3/\text{an}$
- L'alimentation des nappes par la rivière qui se compose d'une part du débit même de la rivière et d'autre part du débit des sources "Paradissos", "Camp Militaire", "Toxotes", etc., sauf le pourcentage consommé par les communes de la région.
- Les arrivées des eaux superficielles et profondes par la "fenêtre" de Mélissa.
- L'évaporation capillaire, qui est élevée dans les régions où la surface de la nappe phréatique est très proche de la surface du delta qui réduit le taux d'infiltration estimé plus haut.



### 3. EVOLUTION GEOTECTONIQUE DE LA REGION

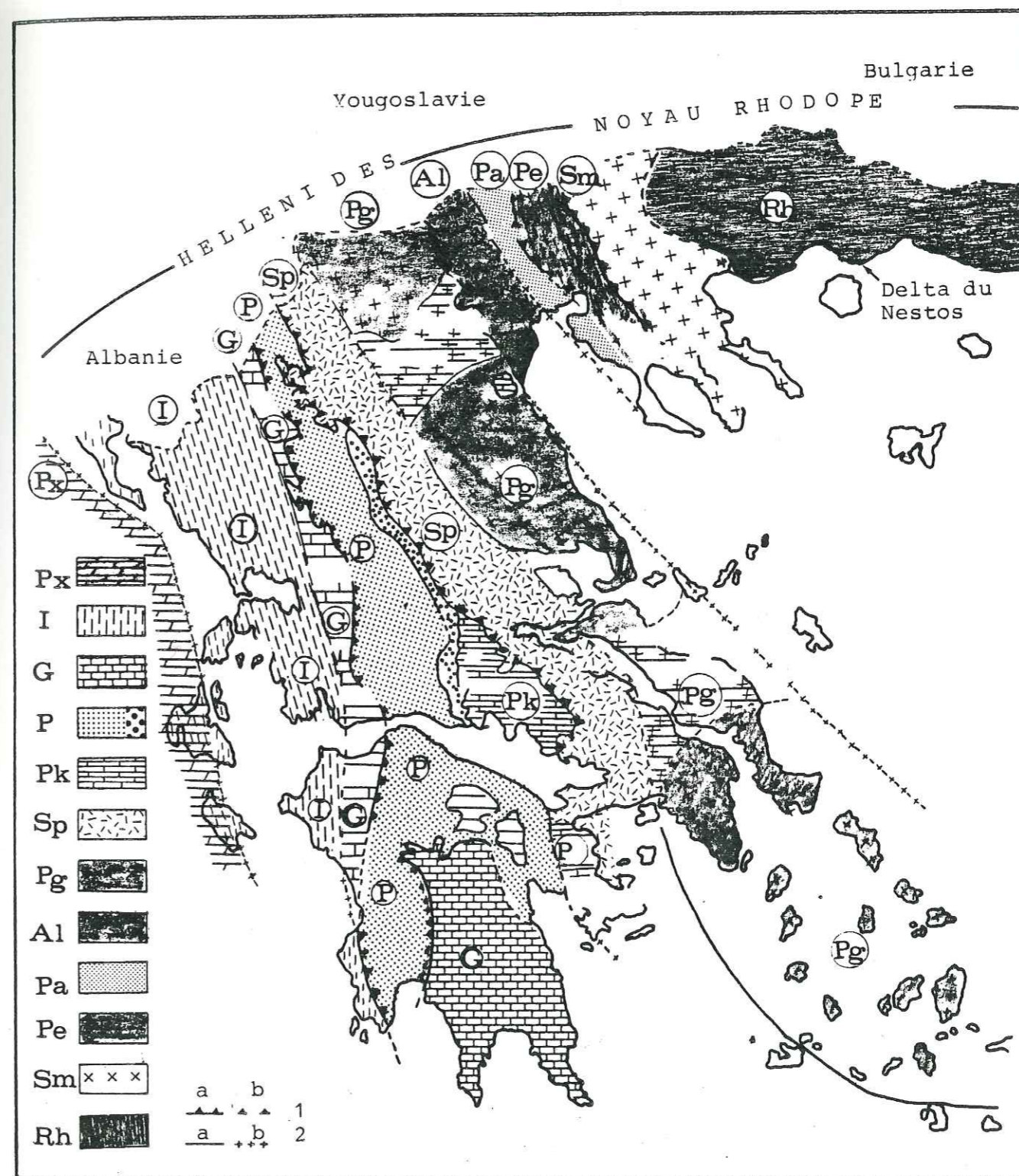
Récemment et surtout après les recherches pétrolières, dans la région de Macédoine et de Thrace, le processus d'évolution, tectonique et sédimentologique, de la région majeure du delta du Nestos, est mieux connu. Les résultats obtenus par les recherches pétrolières ont complété les données précédentes, fournies par des recherches géologiques classiques.

La région du delta du Nestos se localise dans la zone géotectonique du Rhodope (f. 3-1), donc, une des zones isopiques-tectoniques internes. Dans la Grèce orientale, une phase tectonique est marquée, avec son paroxysme pendant l'Eocène inférieur. Cette phase est suivie par une transgression générale de la mer, principalement au Lutétien supérieur. Cette transgression générale est bien connue depuis le sillon mesohellénique (Macédoine occidentale) jusqu'en Thrace. Ce sont des calcaires récifaux qui caractérisent la base de la transgression. Ces calcaires sont suivis par une série de sédiments flyschoides en Grèce orientale. La sédimentation par la suite (Eocène-Oligocène) a donné une épaisseur de sédiments qui, au niveau local, dépasse les 2.000 m et qui présente une homogénéité relative dans l'espace et dans le temps.

A la limite Oligocène-Miocène se produit une phase de compression et de compaction, accompagnée par des intrusions granitiques et granodioritiques. La phase suivante (décompression) provoque la formation d'un système compliqué de failles, d'orientation générale N 50° et N 160°. Ce système de failles a modelé les divers bassins de la région sous forme de grabens et de horsts successifs. La datation des intrusions magmatiques (méthode K/Ar) a donné un âge de 27 MA (Lalechos, Savoyat, 1977). Pendant cette phase de fracturation, se forment aussi les bassins du Nestos et du Prinos, qui étaient les premiers récepteurs des sédiments de la région environnante. L'évolution de ces bassins a créé les conditions pour la formation du delta du Nestos.

#### CADRE GENERAL GEOTECTONIQUE DE LA GRECE

#### ESQUISSE DES ZONES ISOPIQUES-TECTONIQUES DES HELLENIDES ET DE LEUR RAPPORTS STRUCTURAUX



D'après J. AUBOUIN, H. BRUNN, P. CELET, J. DERCOURT, I. GODFRIAUX, J. MERCIER, F. KOCKEL, H. WALTHER et al.

fig. 3-1



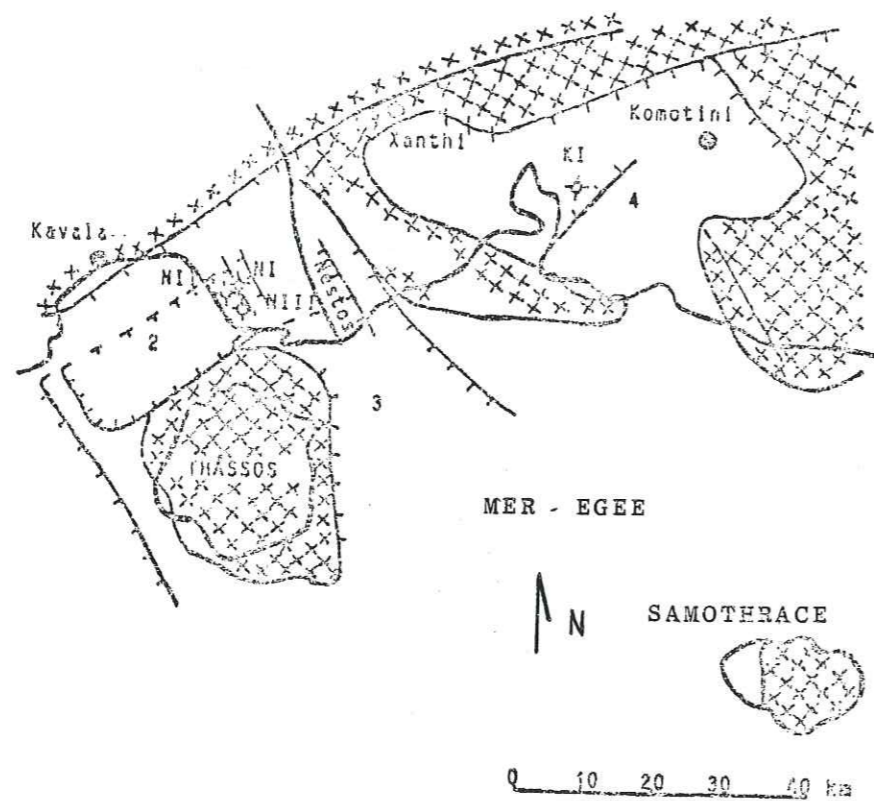


fig. 3-2 Les affleurements du massif du Rhodope.  
La tectonique du socle des bassins Nestos-Prinos et Xanthi-Komotini. xxx Massif du Rhodope 1.B. occidental de Thassos 2.B. Nestos-Prinos, 3.B. oriental de Thassos, 4.B de Xanthi-Komotini, NI, NII, NIII KI forages (Proedrou, 1979)

Du point de vue de la sédimentologie, cette région est caractérisée par une grande variété de structures. Souvent, les faciès de transition ne sont pas représentés, les phases de dépôts changent rapidement et on a encore la présence des évaporites.

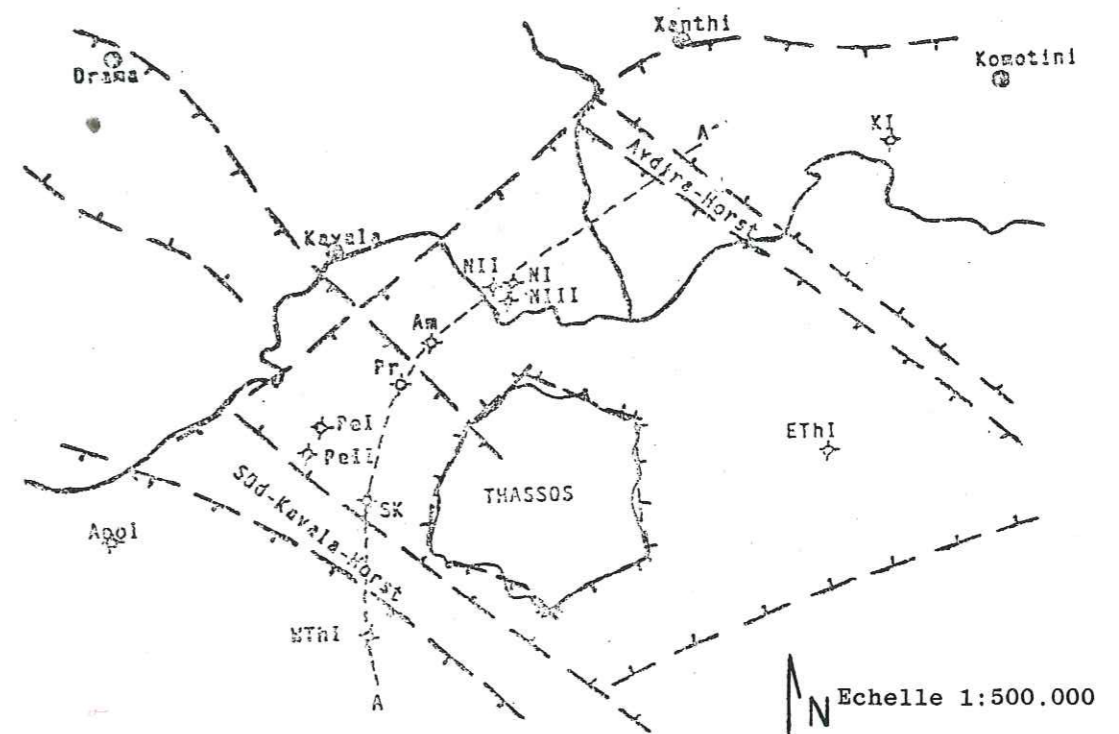
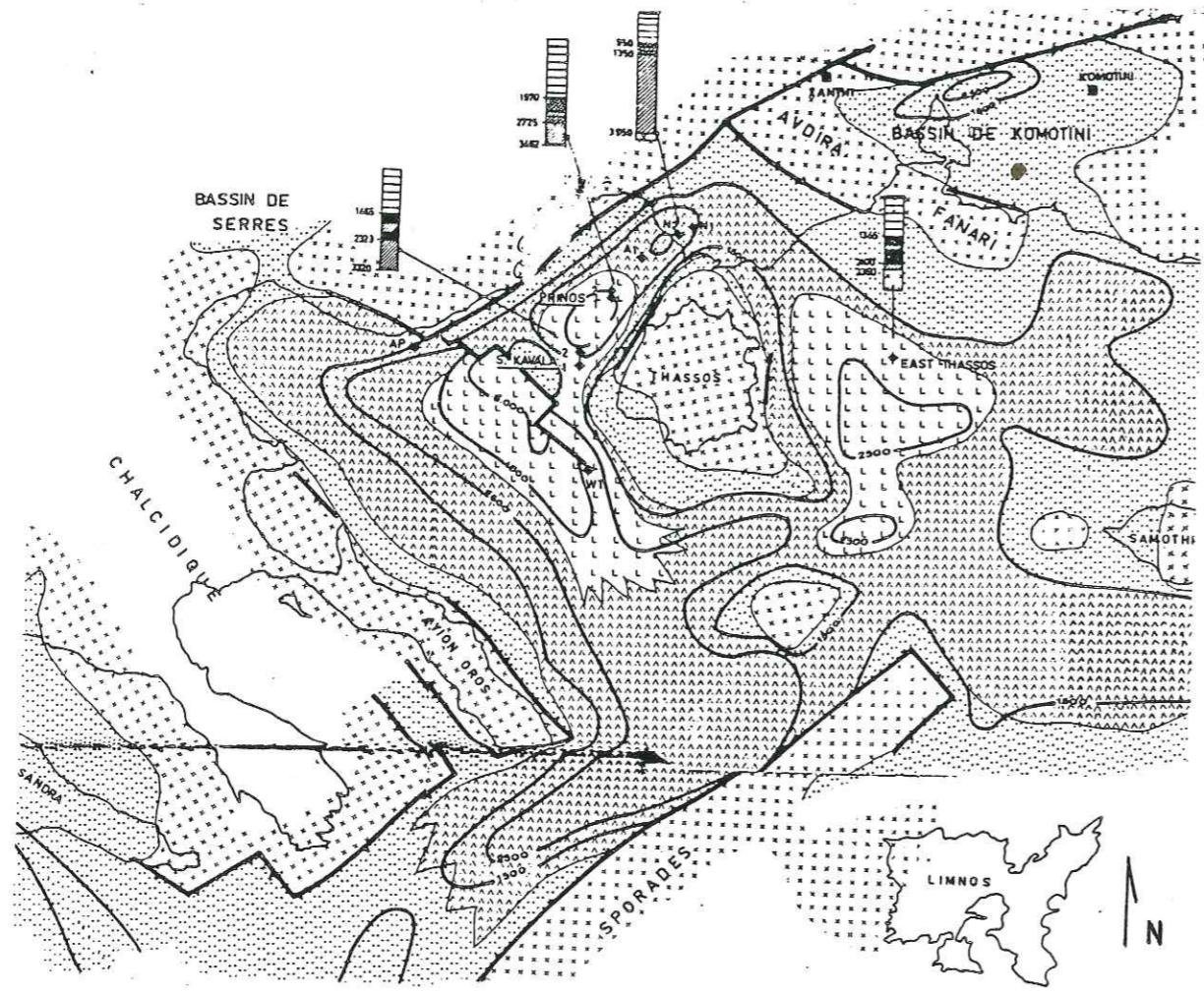


fig. 3-3 La tectonique des bassins Nestos - Prinos (Pollak, 1979)

Les données sismiques et les forages réalisés permettent la différenciation des sédiments en trois types, qui, avant tout, sont liés aux modifications des phases de dépôts dans le Miocène supérieur:

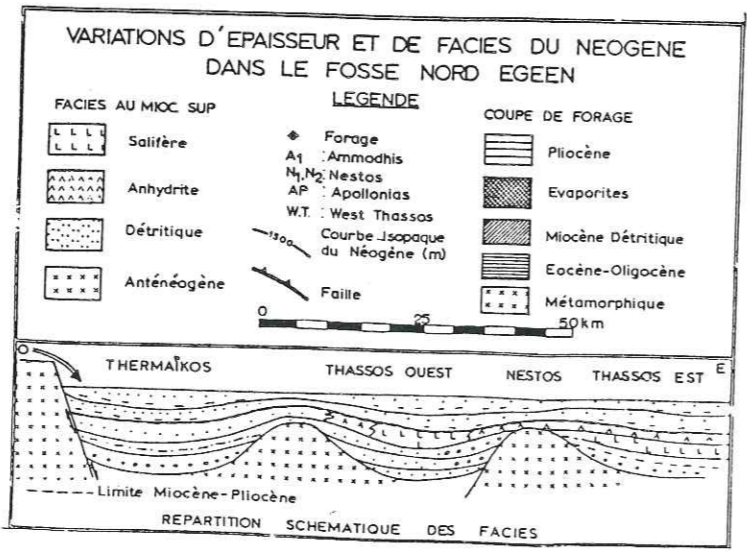
- phase saline, au centre du bassin
- phase anhydritique et dolomitique, autour de la zone centrale
- phase détritique, à la périphérie.



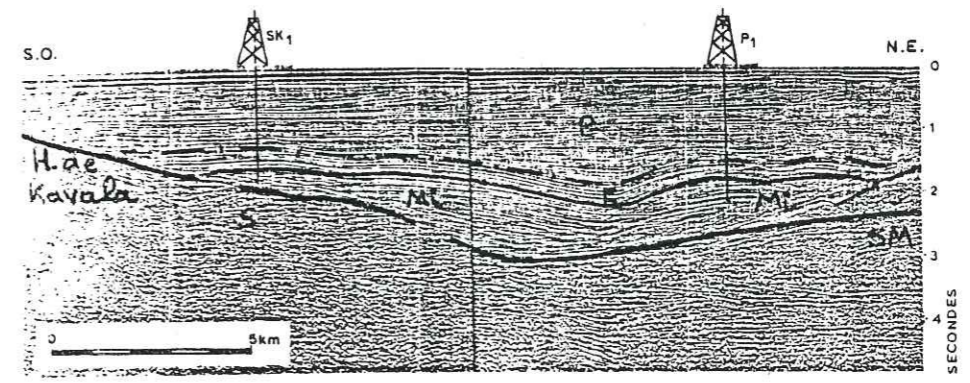


(Lalechos, Savoyat, 1977)

fig. 3-4



Le Pliocène et le Quaternaire sont représentés par des séries détritiques, avec des alternances de sables non consolidés, qui sont accompagnés par des conglomérats. On trouve aussi des alternances de marnes et d'argiles plastiques sableuses avec les matériaux précédents. Les conditions de la sédimentation sont, en général, deltaïques continentales (fluviatiles, fluviomarines), avec des intercalations néritiques. Les niveaux de la progradation des sédiments se montrent clairement dans les enregistrements sismiques. L'âge Pliocène, supérieur et inférieur, est confirmé par les concentrations de *Globorotalia* et de nanofossiles.



Coupe sismique longitudinale dans le bassin de Prinos. La coupe montre le caractère transgressif des séries miocènes et pliocènes sur les bordures. Un système sédimentaire progradant vers le SO est net dans les horizons supérieurs (ce caractère disparaît sur les profils transverses).

fig. 3-5

(Lalechos, Savoyat, 1977)

Après la phase de compression, à la limite Oligocène-Miocène, le morcellement, créé par l'extension de la plaque égéenne vers diverses directions, provoque la subsidence des bassins et des autres régions. Cette subsidence paraît être importante et entraîne, entre autres, le changement rapide des phases de la sédimentation. Le morcellement te-



tonique forme les bassins, plus ou moins indépendants et, finalement fait apparaître un relief différent de celui de l'Eocène, préfigurant la forme finale.

En ce qui concerne la région qui, en surface, représente aujourd'hui le delta du Nestos et ses bordures, les données sismiques montrent que les sédiments du secteur occidental sont plus épais que ceux du secteur oriental.

Les recherches sismiques et les forages pétroliers ont permis la construction de cartes, qui montrent que la région du delta du Nestos se compose de deux grabens, séparés, l'un de l'autre, par un horst.

Pendant le Miocène moyen, le bassin du delta s'est formé, finalement, sous l'effet de failles normales et se caractérise comme "Rifted Infracratonic Basin" (Dickinson, Yarborough, 1977). On trouve les mêmes conditions en ce qui concerne la continuité de la formation du delta. Le résultat de tous ces faits et de la différence altimétrique des deux grabens est, que les lits de la rivière ont subi une série de déplacements successifs de l'ouest vers l'est. Ceci est bien confirmé, au moins, pour le stade final de la formation du delta (v.ch. 5).

Au début du Pliocène, commence l'émersion de la région et le bassin se stabilise, après la régression progressive de la mer. Les sédiments, qui remplissent le bassin, sont d'âge Pliocène-Pléistocène. Pendant ces périodes, la sédimentation est caractérisée par le dépôt des sédiments dans un environnement très influencé par la houle de la mer et peu influencé par l'action de la marée (classification par Galloway, 1975). Selon Scott et Fisher (1969), le delta du Nestos (plus précisément, les deltas de cette catégorie) se caractérisent comme "Moderately constructive delta".

Du fait du calme tectonique, pour la partie continentale le réseau hydrographique arrive au niveau de base, entraînant donc une réduction maximale des apports détritiques. Les bassins passent à

un stade de "deshydratation", par arrêt de l'intrusion de la mer dans le continent. Localement on peut avoir des conditions contraires, en raison des niveaux relatifs du continent et de la mer.

Parallèlement, une action volcanique importante caractérise cette région, après les plissements alpins. Les centres volcaniques de Thrace constituent des manifestations de cette action. Les laves sont, en général, andésitiques, comme p.e. les andésites de Kossos dans la région d'étude. On a observé que l'apparition des andésites est liée à la tectonique, puisque ces andésites se localisent dans les zones de failles de grande longueur. Au contraire, selon Kiskyras (1964), l'action volcanique est liée au caractère géosynclinal et, plus précisément, aux régions où l'épaisseur des sédiments est si limitée qu'elle ne peut pas supporter les sous-pressions de laves. Pour la région de la mer Egée, on pense que les centres volcaniques se localisent entre les roches métamorphiques et plissées (massif cristallin et cristallophyllien du Rhodope-zone d'Axios). En Thrace occidentale, au contraire, on a presque toujours une différenciation typique du magma, c'est-à-dire que les andésites sont suivies par des dacites et des thuyolithes (Rentzeperis, 1955).



Fig. 3-6 Carte isopaque provenant de données sismiques. Equidistance de courbes 100m. (Sédiments du delta du Nestos). (Kousparis, 1979)

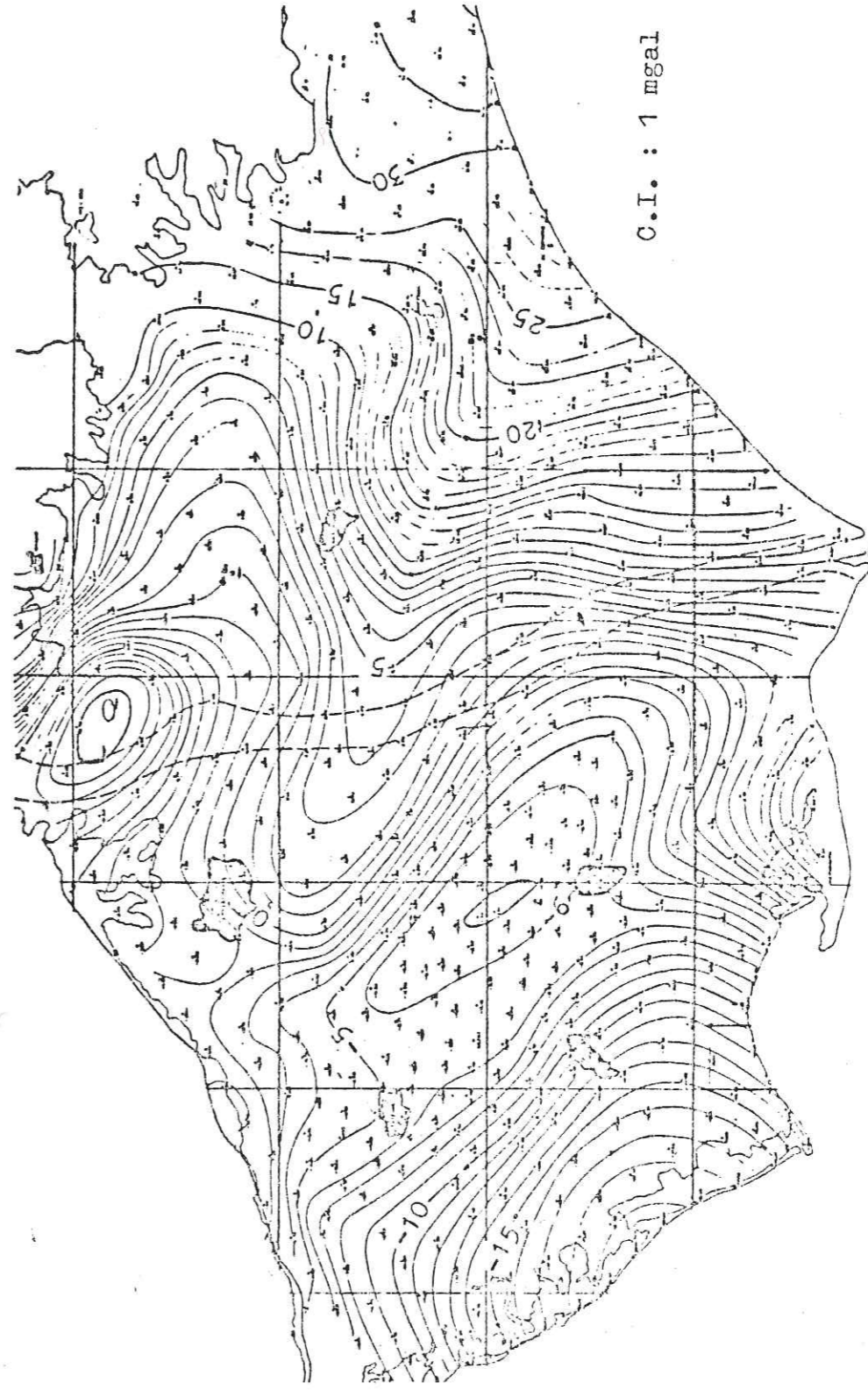
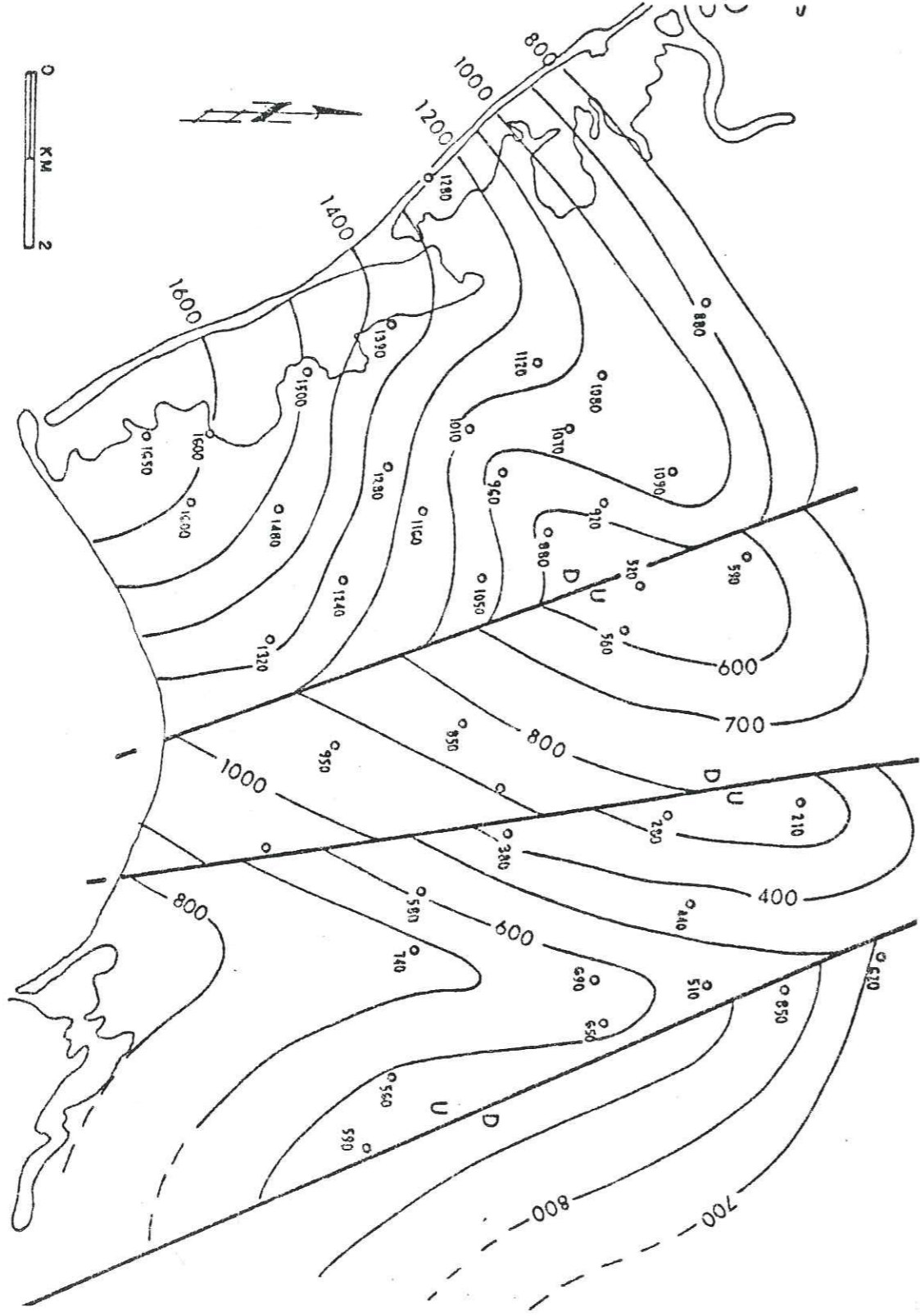
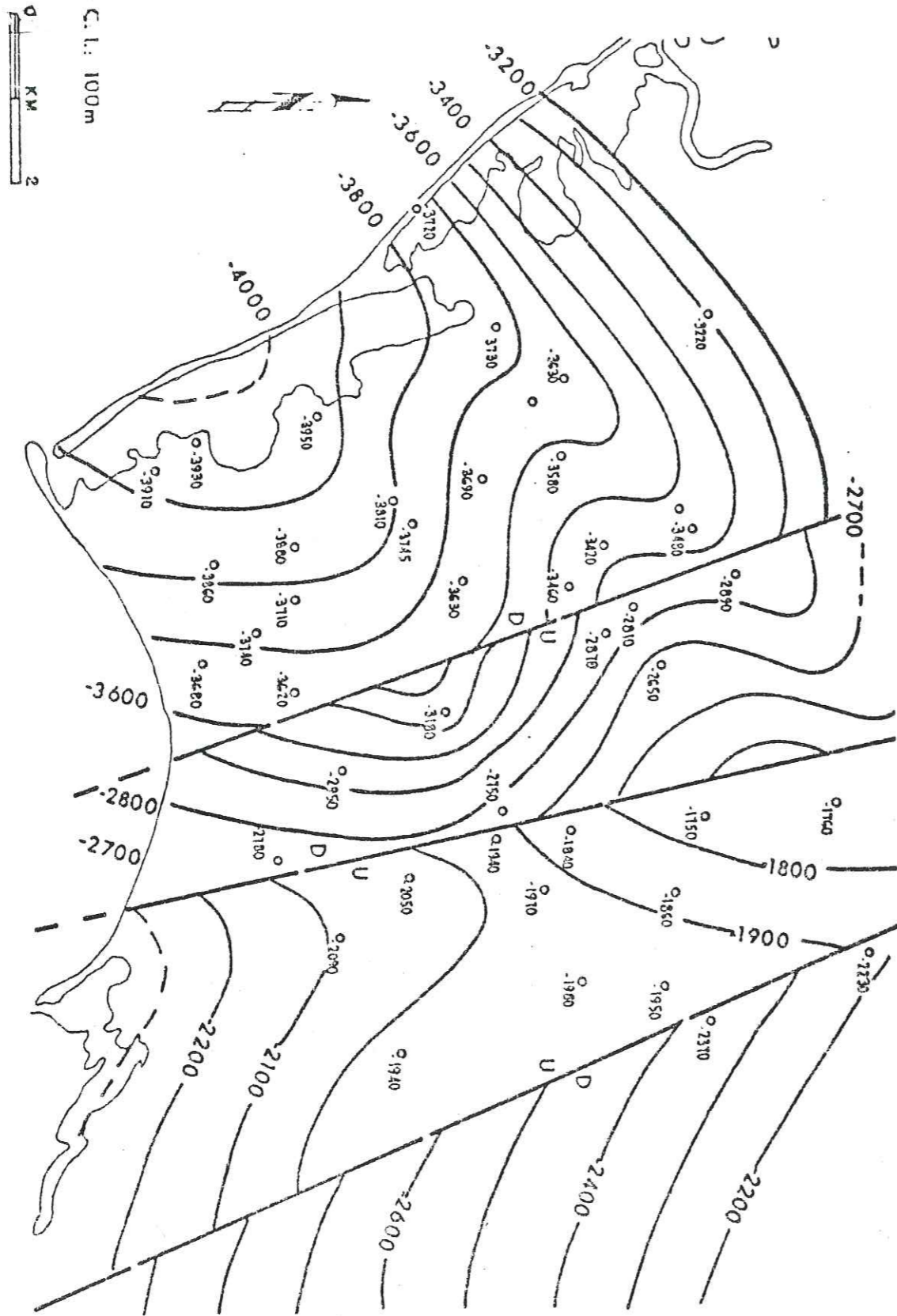


fig. 3-7 Carte de l'anomalie de Bouguer - Région du delta du Nestos - I.R.G.M. (Kousparis, 1979)



fig. 3-8 Carte structurale du toit du substratum (Kousparis, 1979)



GEOCHRONO-METRIC SCALE IN MA	EPOCHS	STANDARD AGES	RELATIVE CHANGES OF SEA LEVEL (After Vail, Mitchum and Thompson; 1977)		RELATIVE CHANGES OF SEA LEVEL-NESTOS DELTA ARFA, GREECE		GEOCHRONO-METRIC SCALE IN MA
			RISING 1.0 ←	FALLING → 0	RISING 1.0 ←	FALLING → 0	
0	PLEISTOCENE						0
		CALABRIAN					
		PLACENZIAN					
5		TRAIANIAN					5
		MESSINIAN					
10		LATE TORTONIAN					10
		PRESENT SEA LEVEL					
15		MIDDLE SERRAVALIAN					15
		LANGHIAN					
		EARLY BURDIGALIAN					

fig. 3-9 Corrélation des variations relatives du niveau de la mer (variations globales et de la région du Nestos) Kousparis, 1979

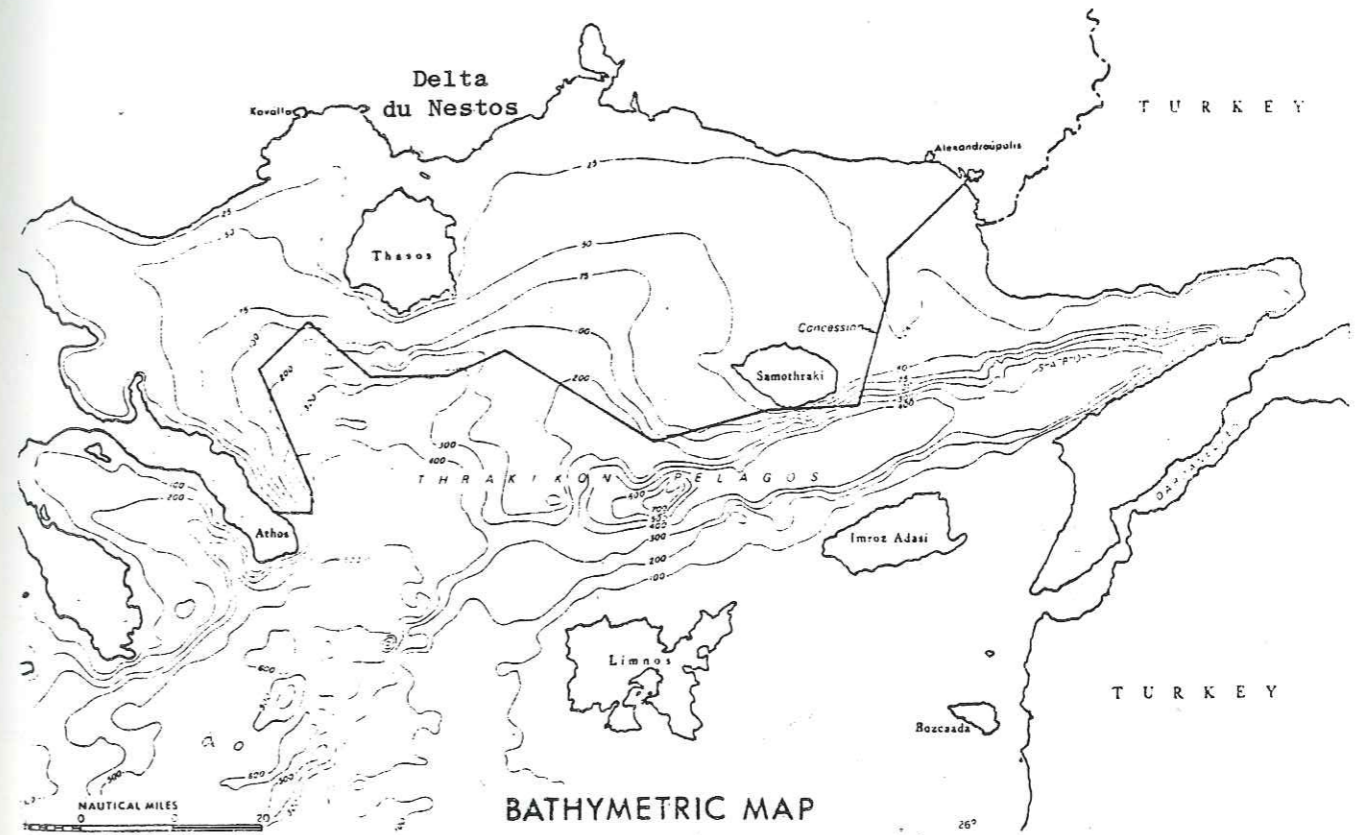


fig. 3-10 Carte bathymétrique du secteur nord de la mer Egée



#### 4. LES CONDITIONS GEOLOGIQUES

##### 4.1. GENERALITES

Le secteur du delta du Nestos et la région environnante sont situés dans la zone géotectonique-isopique du Rhodope (v.f. 3-1). Cette zone, caractérisée essentiellement par un socle cristallin, a subi l'influence de plissements hercyniens et probablement aussi l'influence des plissements calédoniens. La zone du Rhodope, durant le cycle d'orogénèse alpine, opérait comme un noyau. Des formations sédimentaires, d'âge mésozoïque, vérifient la participation de la zone au moins à la périphérie des plissements alpins. D'ailleurs au SE de cette zone, on trouve les indications d'une transgression de l'Eocène, avec des sédiments molassiques post-alpins.

L'épaisseur totale des formations cristallines et cristallophylliennes de la zone du Rhodope dépasse les 2.000 m, avec la participation des batholithes granitiques, alpins ou préalpins et des effusions de matériaux basiques ou ultrabasiques, métamorphisés à leur périphérie. Le massif du Rhodope présente une forme générale anticlinale, avec des failles de directions E-O ou N-S et d'âge Tertiaire.

L'absence de fossiles fait que la datation des roches cristallines et cristallophylliennes devient très difficile. Cependant, Kronberg (1970), Jacobshagen et al. (1978), se basant sur les traces de coraux, pour la région de Falakron, proposent un âge paléozoïque ou mésozoïque. Trikalinos (1955), Kopp (1964), Maratos et Andronopoulos (1965) et Braun (1968), d'après des fossiles trouvés dans les phyllites, proposent un âge allant du Trias au Crétacé Inférieur.

Les séries plissées sont couvertes transgressivement par des sédiments d'âge Eocène moyen à Oligocène. Une grande partie des sédiments, marins ou non, d'après la terminologie alpine, sont de type molassique puisqu'ils se sont déposés immédiatement après la phase de paroxysme des plissements. Il s'agit de formations détritiques et en partie carbonatées, accompagnées par des roches volcaniques de di-



verses périodes. Ici, on ne voit pas de phénomènes de métamorphisme.

Les roches volcaniques (surtout des andésites) représentent une activité d'âge Eocène moyen à Oligocène. Les roches plutoniques (granite de Xanthi) correspondent aux intrusions post-tectoniques. On observe encore des intrusions d'âge différent, de type granitique ou granodioritique, qui participent à la formation du massif sous la forme d'aplites ou de pegmatites.

Du point de vue tectonique, la région est caractérisée par une faille majeure de direction ENE-OSO. Cette faille a un rôle prédominant et son rejet vertical vers le sud a marqué le début de la formation des bassins sédimentaires du Tertiaire.

Le delta du Nestos fait partie d'un bassin sédimentaire majeur, qui se prolonge de la Yougoslavie jusqu'à la Mer Noire, en englobant le golfe Thermaïkos, l'île de Limnos, et les régions de Trace et de Mycie. Sa position géographique coïncide avec la zone de compression maximale. La continuité de ce bassin sédimentaire est bien confirmée, après les recherches géologiques et surtout après les recherches pétrolières. La rivière Nestos se localise aujourd'hui entre deux sous-bassins, celui de Khalkidiki-Thassos et celui de Xanthi-Komotini (v. aussi ch.2, évolution géotectonique de la région d'étude).

Le socle de la région du delta est le massif du Rhodope qui affleure autour de la plaine deltaïque et qui se compose de gneiss, schistes, amphibolites et marbres. La profondeur du socle au dessous du remplissage du delta est de 1.200 m environ, d'après les résultats des recherches pétrolières. Ceci est dû à l'apparition de la faille majeure, de direction générale E-O, déterminante pour la formation des bassins de cette région. Un affleurement du socle séparé du massif du Rhodope de direction NO-SE fait la limite entre le bassin du delta et le bassin voisin de Xanthi. Malgré tout les deux bassins communiquent entre eux par la "fenêtre" qui se trouve entre les villages de Melissa et Kypseli.

Au dessus du socle, les formations du Paléocène qui donnent une topographie caractéristique de collines, se composent de grès, de conglomérats et d'argiles. La série se poursuit par les sédiments du Plio-Pléistocène qui sont représentés par des argiles, des sables et des galets. Finalement, les régions à morphologie basse et la région du delta sont couvertes par les sédiments récents du Quaternaire.

L'ensemble des sédiments a subi l'action d'un système de failles qui participent à la distribution discontinue des sédiments aux bordures de la plaine deltaïque ainsi que dans le delta lui-même, où la discontinuité des sédiments est due davantage aux conditions sédimentologiques du delta actif. Les sédiments du Tertiaire ont subi un plissement léger de direction générale NE-SO (direction des axes du plissement).

Les affleurements des formations géologiques, dans la région d'étude, sont visibles sur les cartes hydrogéologiques des figures 4-1 à 4-6. Les travaux sur le terrain pour l'établissement de ces cartes ont été faits sur des cartes topographiques d'échelle 1:20.000.

## 4.2. LES FORMATIONS LITHOLOGIQUES ET LEUR COMPORTEMENT

HYDROGEOLOGIQUE (v. cart. géol. - fig. 4.1 à 4.6).

### 4.2.1. LES BORDURES DE LA PLAINE DELTAÏQUE

**G r a n i t e s.** Ils représentent la phase, la plus récente des intrusions granitiques de la région (granites, granodiorites), qui sont mieux connues sous le nom de "granite de Xanthi". En ce qui concerne leur composition minéralogique, ils contiennent des feldspathes alcalins, plagioclases, quartz, biotite et d'autres minéraux secondaires. La structure est, en général, largement grenue ou à grain régulier. Ils se trouvent toujours en contact anormal avec le système des gneiss, amphibolites et marbres, avec une grande variété de minéraux de contact. L'âge radiométrique est de 27.9 MA,



selon les mesures K/Ar du Service Géologique de Hanovre. Ils sont donc oligocènes.

Le seul affleurement dans la région d'étude est celui du village Myrodhato. L'altération de ce granite n'est pas typique, c'est-à-dire n'est pas en fonction de diaclases progénétiques. Au contraire une telle altération typique est bien caractéristique pour les affleurements de granite au nord de Xanthi. Pour le granite de Myrodhato, l'altération présente une épaisseur plus ou moins uniforme et les diaclases de la partie non altérée se ferment très vite en profondeur. Les pentes fortes de la région de Myrodhato ne permettent pas la concentration des produits de l'érosion et de l'altération, on n'observe donc pas la présence d'arénites aquifères. Ainsi, le granite de Myrodhato correspond à un barrage naturel entre les nappes aquifères de la plaine deltaïque du Nestos et les nappes aquifères du bassin de Xanthi.

**A n d é s i t e s.** On les trouve sous la forme de coulées et de pipes, ainsi que localement stratifiées avec des tuffs et des tuffites. Elles présentent une perméabilité secondaire remarquable, résultat de diaclases primaires (refroidissement de magma) et secondaires (action tectonique). Malgré tout l'importance hydrogéologique des andésites est limitée à cause de leurs affleurements réduits et de leur position aux sommets des collines. Ainsi ils jouent le rôle d'une formation de transit temporaire pour les précipitations. Les affleurements des andésites dans la région d'étude se localisent aux villages de Kosos et Avdhira.

**R o c h e s m é t a m o r p h i q u e s** (gneiss, schistes gneissiques, micaschistes, amphibolites et marbres sous forme d'intercalations). Elles se présentent comme un système où les formations prédominantes sont les gneiss. La structure est largement grenue à grain fin. La composition minéralogique ainsi que le pourcentage des minéraux qui participent à la structure de la roche sont variables. Les minéraux principaux sont les quartz, plagioclases, bi-

otite, hornblende, feldspaths potassiques et grenats. Le métamorphisme général a eu lieu pendant les plissements du massif. Les schistes, les amphibolites et les marbres (sauf les marbres massifs) se trouvent sous forme d'intercalations et de formations de transition dans la masse gneissique.

L'ensemble de ces formations est, pratiquement imperméable sauf la zone de la surface, où l'altération et le diaclasage forment une zone relativement perméable. Cette zone perméable est sans importance hydrogéologique, en ce qui concerne l'ensemble de la région d'étude, mais peut avoir une certaine importance au niveau local (p.e. les petites sources issues des gneiss superficiels altérés au village Kypseli). Par contre, les intercalations de marbres peuvent jouer un rôle important ou même déterminant. Il s'agit du cas où ces intercalations communiquent entre elles et affleurent dans les bassins voisins et à des altitudes plus faibles que celles des affleurements dans le bassin, où s'effectue l'infiltration. Dans la région d'étude, l'apparition de telles intercalations est très limitée et n'influence pas le régime hydrogéologique, tandis qu'au N. de Xanthi, elles sont nombreuses et modifient les lignes de partage des eaux souterraines (entre autres, ces intercalations furent le facteur déterminant pour le site et la hauteur du projet du barrage de Xanthi).

**M a r b r e s.** C'est la formation qui prédomine sur les versants NO de la plaine deltaïque, et c'est encore la formation essentielle aquifère de la région bordant le delta, avec les sédiments détritiques du delta et les formations du Tertiaire. La couleur des marbres est blanche ou grise. Ils présentent des colorations différentes dans les zones de contact avec le système de gneiss et les schistes. Dans ces zones de contact, les marbres sont parfois stratifiés, tandis qu'en général ils sont légèrement ou pas stratifiés.

La circulation des eaux souterraines dans la masse des marbres est confirmée par l'apparition de sources, surtout au contact des marbres avec les sédiments les plus récents.



Les marbres sont très karstifiés selon les indices de la surface (formes karstiques, ruissellement limité, apparition de sources dans toutes les directions etc.).

Calcaires et conglomérats d'âge Eocène inférieur à Oligocène supérieur. La série commence en haut avec des arkoses et des grès altérés et souvent des tuffites. C'est le calcaire nummulitique qui rend efficace la distinction stratigraphique de la série. Le plus souvent ces calcaires se trouvent en alternance avec les conglomérats et les sables provenant de l'altération de grès. Les calcaires d'Eocène très souvent se poursuivent en marnes sableuses ou en sables. L'affleurement de cette série est relativement limité, surtout l'affleurement des calcaires. Ainsi son importance hydrogéologique est aussi limitée, malgré sa porosité, primaire ou secondaire, assez élevée.

Sables et graviers d'âge Plio-Pléistocène. Ils se sont accompagnés par des argiles, souvent sous la forme d'intercalations, ou des argiles rouges dans les régions d'altération latéritique. Souvent (p.e. au NO de la plaine deltaïque) ils se mélangent avec d'anciens éboulis. La présence de nappes aquifères, toujours d'extension limitée, dépend du pourcentage d'argile contenue.

#### 4.2.2. LE DELTA

La plaine deltaïque se compose de matériaux détritiques, transportés et déposés par les nombreuses branches du lit actif de la rivière, à chaque stade de l'évolution du delta (v. aussi ch.5, conditions géomorphologiques du delta). La plaine deltaïque est constituée essentiellement, d'une part de sédiments transportés par la rivière et par les torrents et d'autre part du delta typique, dans la région de l'estuaire. La différenciation des sédiments, leur épaisseur et leur évolution latérale et verticale sont liées au régime hydrologique de la rivière et à l'évolution de la paléotopographie de la région. D'autre part les paléoclimats et les relations avec la mer (transgres-

### CARTE HYDROGEOLOGIQUE DES BORDURES DU DELTA

#### DU NESTOS

(ECHELLE D'ETABLISSEMENT 1:20.000)

#### LEGENDE



SABLES ET GRAVIERS avec apparition importante d'argiles rouges, surtout aux régions d'érosion latéritique. Souvent mélangés avec d'anciens éboulis (Pliocène-Pléistocène). PERMEABLES.



CONGLOMERATS durs avec une porosité secondaire de diaclases (Oligocène) PERMEABLES.



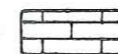
ARKOSES OU GRES ALTERES en affleurements distingués du système des calcaires et des conglomérats. PERMEABLES.



CONGLOMERATS ET CALCAIRES non distingués (Eocène inf.-Oligocène sup.) PERMEABLES.



CONGLOMERATS de diagenèse variable, souvent sous forme de sables et de galets détachés (Eocène inf.-Oligocène sup.). PERMEABLES



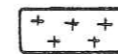
CALCAIRES (Eocène inf.-Oligocène sup.). Très souvent avec des arkoses ou des grès altérés, en alternance avec les conglomérats de même âge. PERMEABILITE VARIABLE.



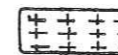
GNEISS, SCHISTES GNEISSIQUES ET A MICA, AMPHIBOLITES. Altération superficielle variable. IMPERMEABLES.



MARBRES peu ou non stratifiés, diaclasés et karstifiés. Sauf les affleurements qui prédominent, souvent sous la forme d'intercalations dans la masse gneissique. TRES PERMEABLES.



ANDESITES très altérées parfois avec des tuffs andésitiques. PERMEABLES A LA SURFACE.



GRANITES, altérés et tectonisés avec des traces de métamorphisme. IMPERMEABLES.



Direction d'écoulement souterrain.



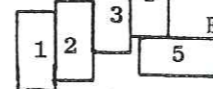
Source karstique.



Ligne de partage des eaux superficielles et souterraines.



Direction et pentage des couches



Emplacement des feuilles de la carte hydrogéologique.

fig. 4-1



fig. 4-2

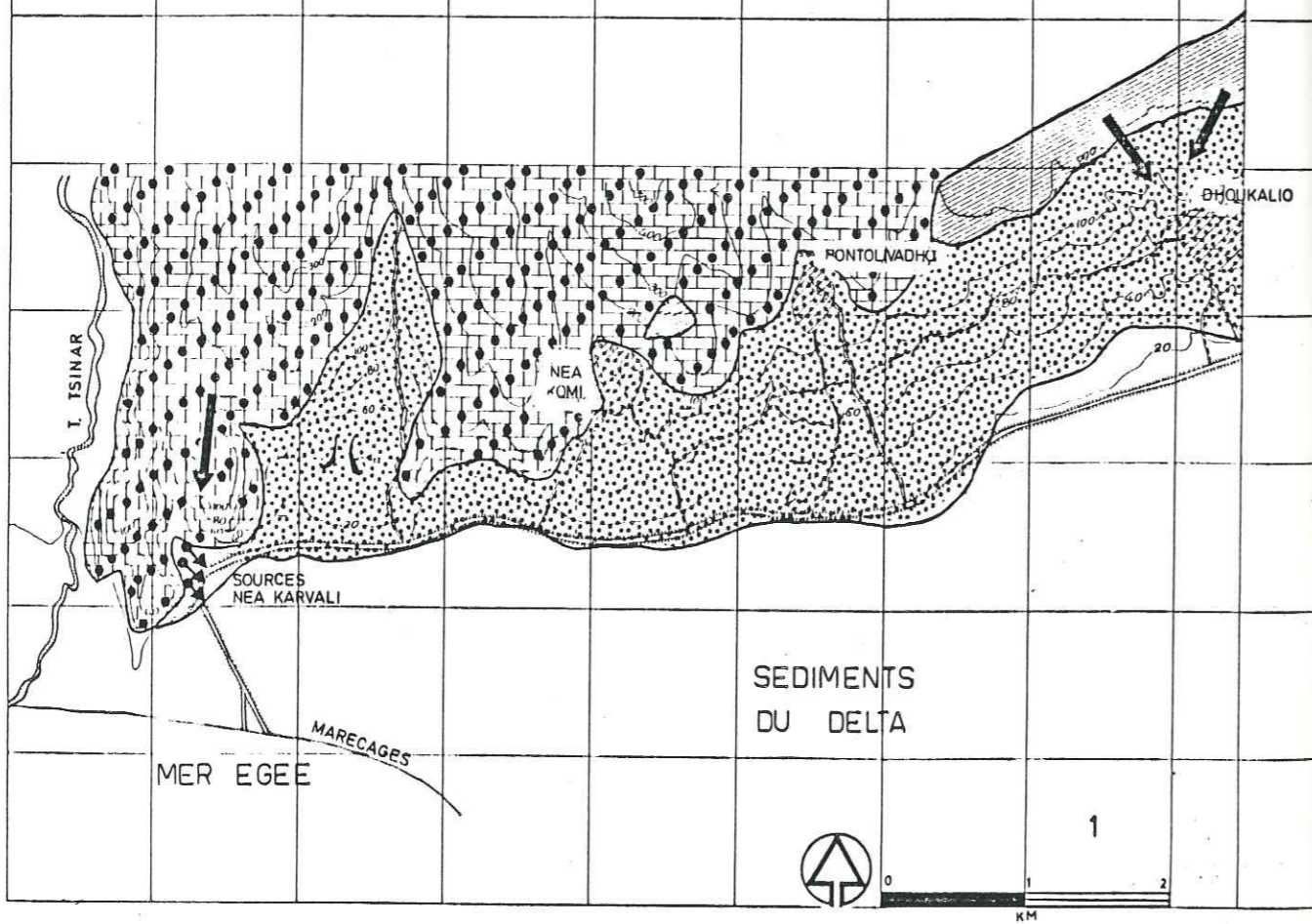


fig. 4-3

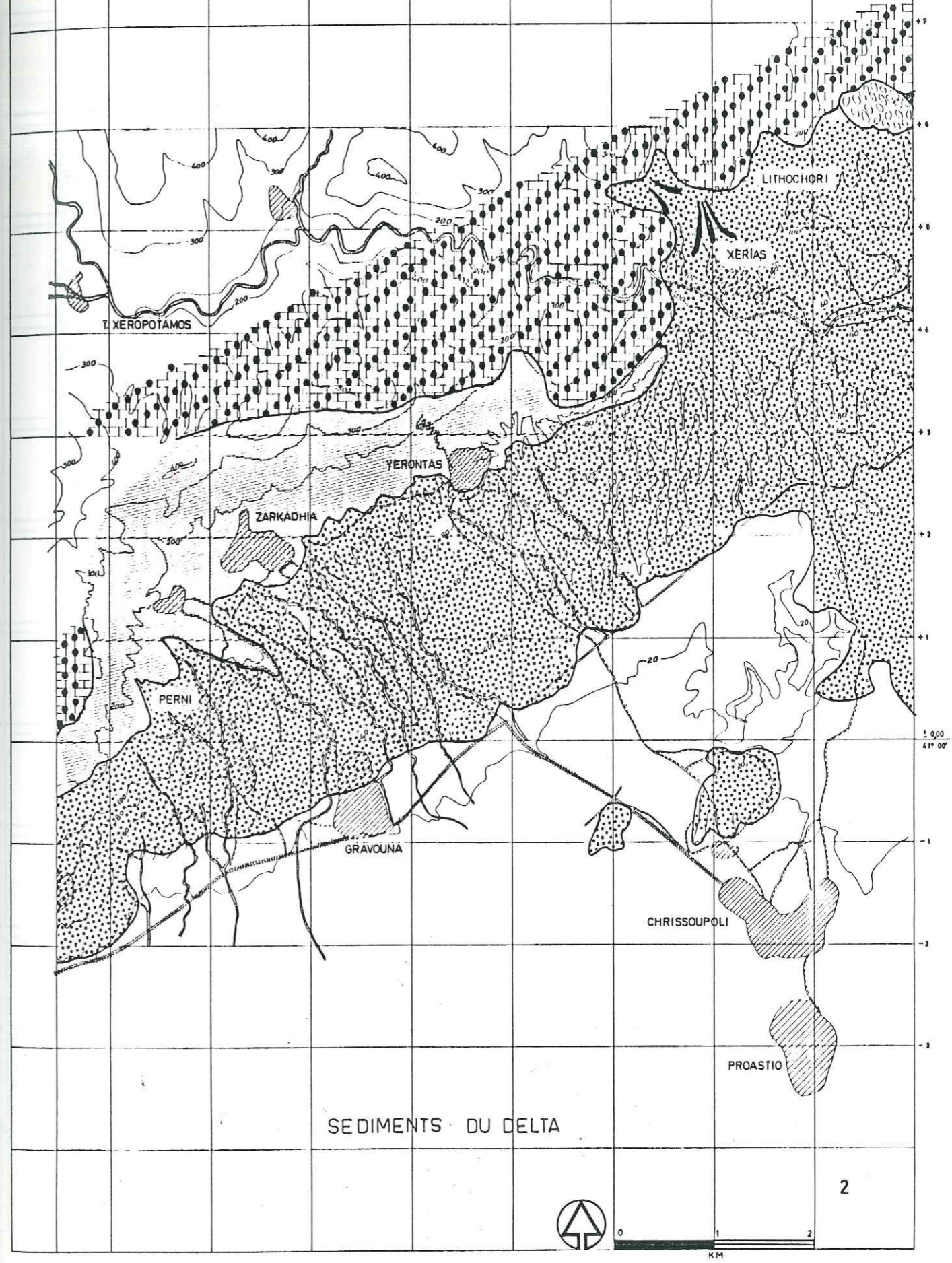




fig. 4-4

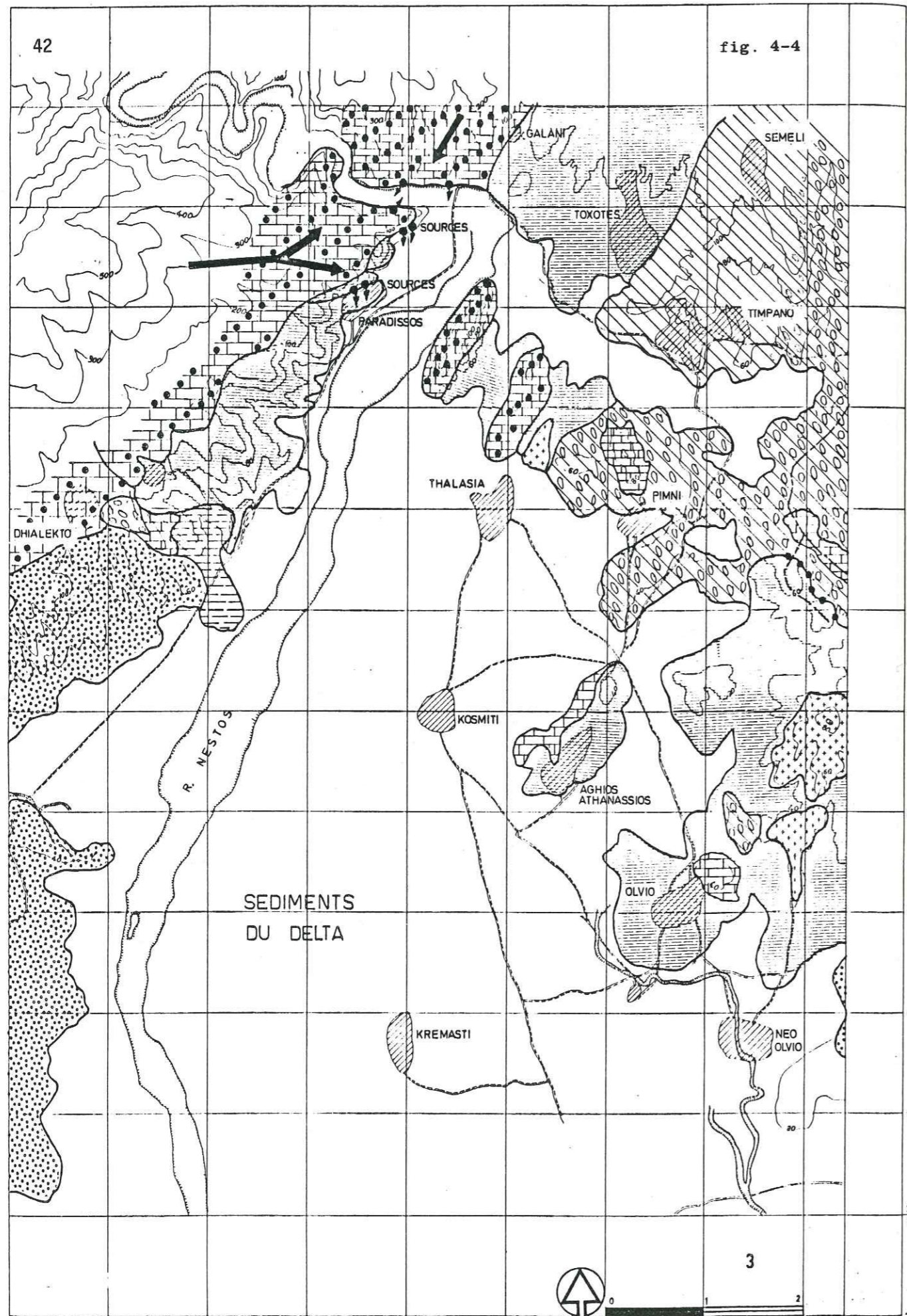
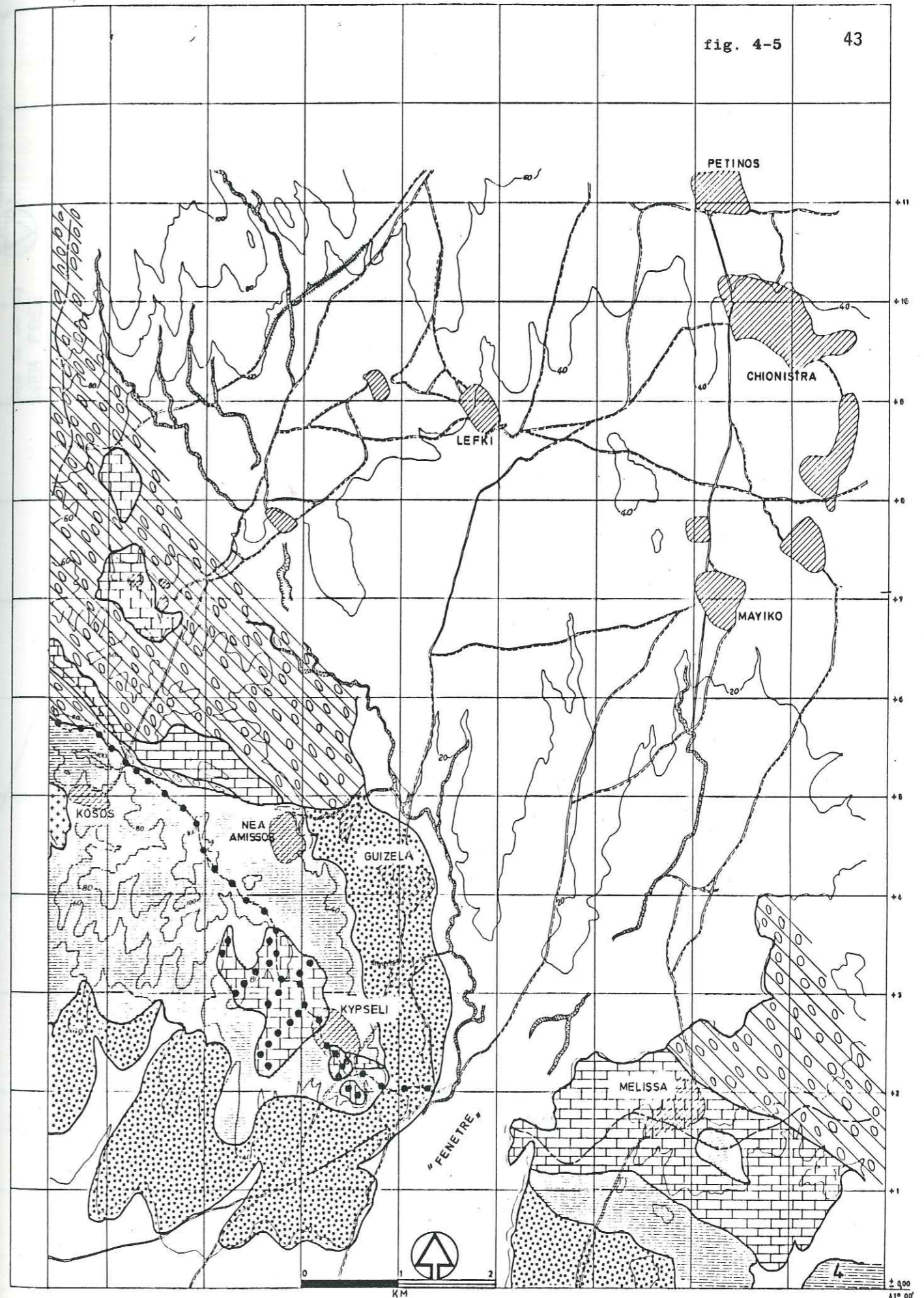


fig. 4-5





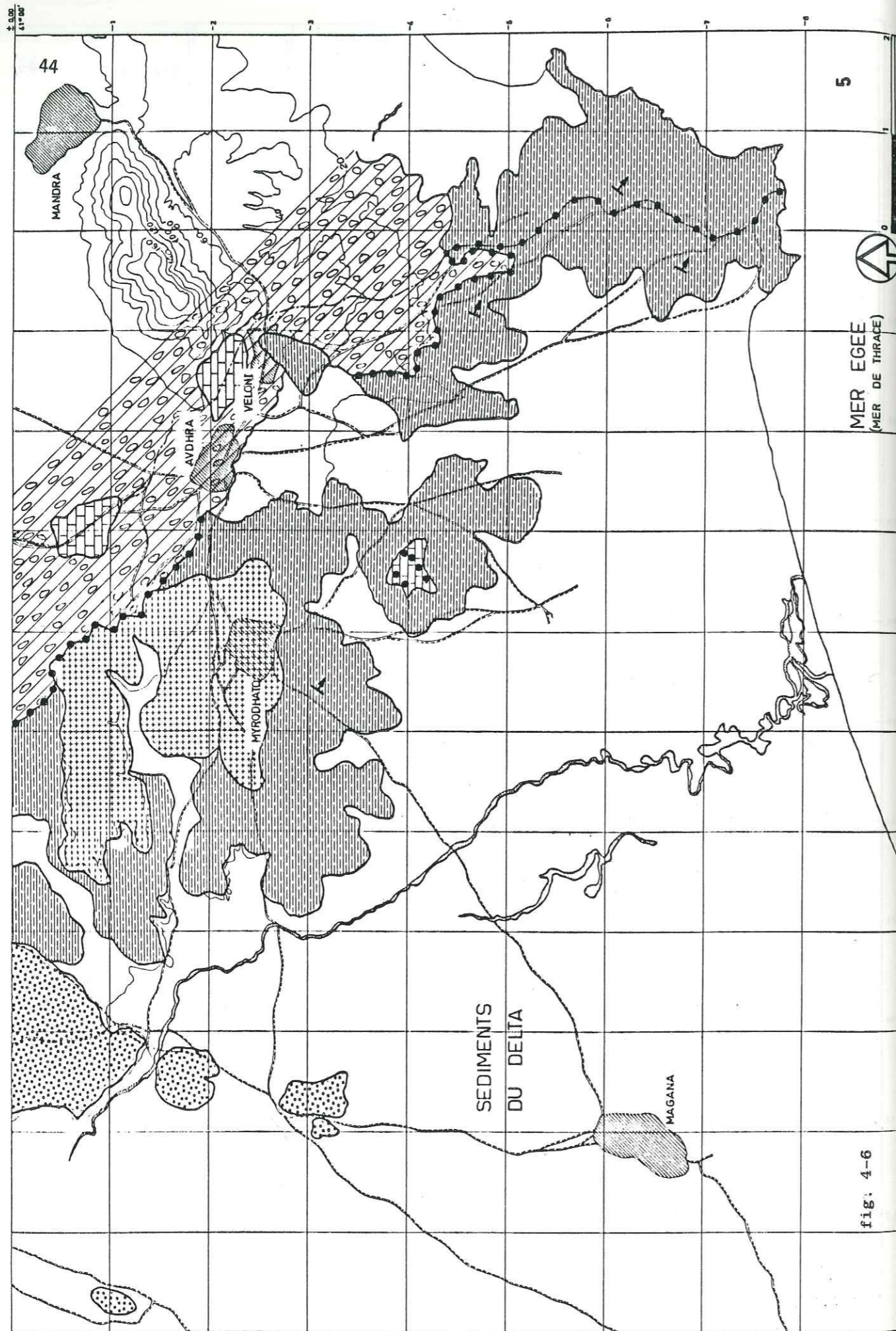


fig. 4-6

sions, régressions) furent des facteurs importants pour la formation du delta (v.ch. 6).

Les forages réalisés nous ont permis de connaître la lithologie des sédiments du delta, pour une profondeur moyenne de 150 m. Il y a une différenciation des sédiments entre la partie Est et la partie Ouest de delta. Les différences principales sont les suivantes:

- Les changements de la lithologie sont plus nombreux et plus rapides dans la partie ouest que dans la partie est.
- Les cailloux et les galets, matériaux du lit actif de la rivière ne se trouvent que dans la partie occidentale, au moins pour la profondeur moyenne considérée.

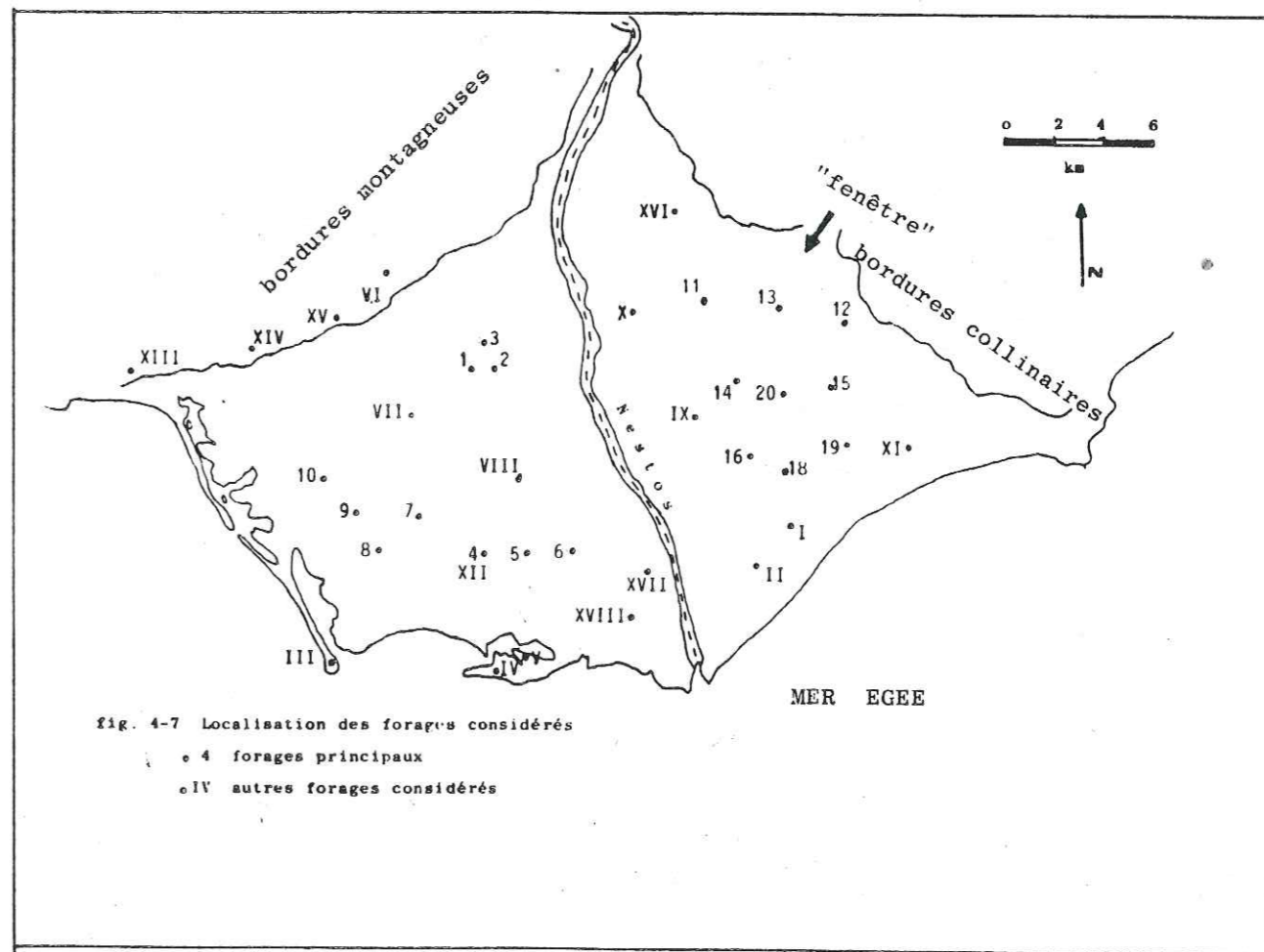


fig. 4-7 Localisation des forages considérés  
 • 4 forages principaux  
 • IV autres forages considérés



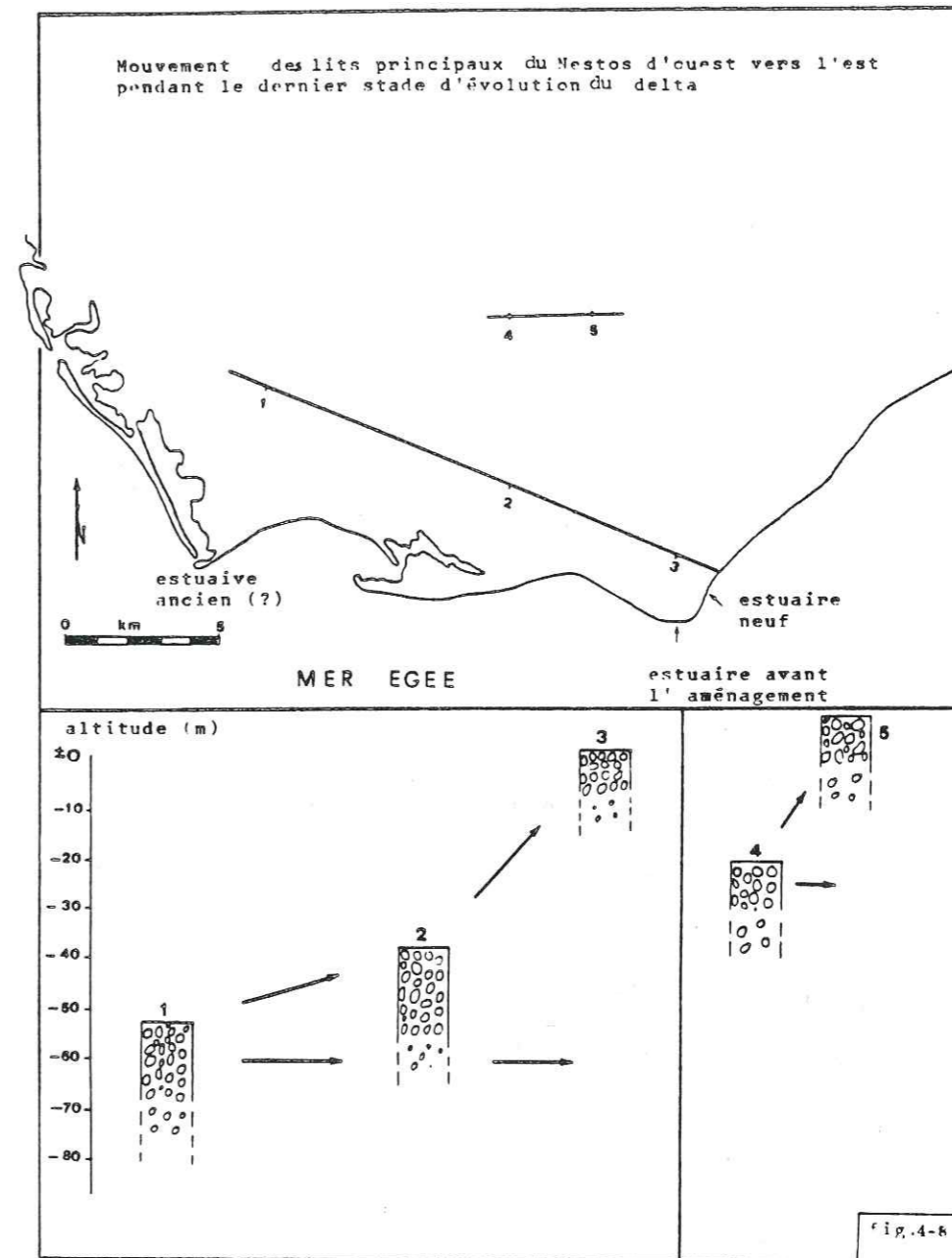
- Les argiles pures manquent dans la partie occidentale, tandis qu'elles sont nombreuses et bien distinguées dans la partie orientale.

On peut donc considérer que, pendant le dernier stade de l'évolution du delta, l'écoulement du Nestos s'effectuait plus à l'Ouest qu'aujourd'hui (v.ch. 5). Si on compare les résultats des forages avec les anciennes cartes topographiques (avant l'aménagement de la rivière), on peut poursuivre le déplacement de lits principaux de l'Ouest vers l'Est (fig.4-8).

Par contre, dans la partie orientale, la plupart des sédiments détritiques représentent les dépôts de crues de la rivière ainsi que les matériaux provenant de l'érosion et de l'altération de roches cristallines et cristallophylliennes, transportés par le ruissellement par la "fenêtre", qui se trouve au NE de la plaine deltaïque.

On constate que, selon le processus adopté pour le transport et la distribution des matériaux, par le ruissellement superficiel, le pourcentage des gros matériaux diminue vers la côte, tandis que le pourcentage des matériaux fins augmente dans la même direction. Dans le cas du delta du Nestos, en dehors des argiles pures et des sables de la côte, on n'a pas de sédiments de granulométrie régulière. Pour la profondeur moyenne considérée (150 m), on voit un processus régulier typique dans la partie orientale. Quelques anomalies sont dues à l'intervention des matériaux transportés par la "fenêtre", c'est-à-dire aux apports depuis le bassin voisin de Xanthi. Les mêmes conditions apparaissent dans la direction des forages F 12-F III. Dans les secteurs central et occidental du delta, on ne voit pas ce processus typique à cause des nombreux lits actifs de la rivière. Chacun de ces lits a subi l'influence des autres (fig.4-13).

La distribution granulométrique en profondeur présente une grande variabilité, caractéristique pour chaque partie de la plaine deltaïque. La formation des systèmes de nappes aquifères est le résultat de cette distribution. La simplification des colonnes lithologiques des forages conduit à la connaissance de la structure sédimentologique générale du remplissage du delta (fig. 4-14, 4-15).



Légende des colonnes lithologiques des forages.

● Profondeur d'installation de la pompe.

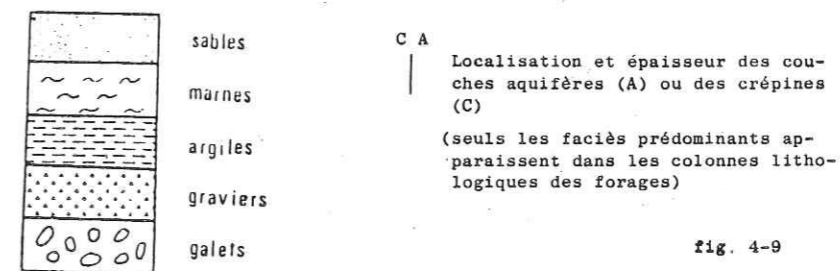


fig. 4-9



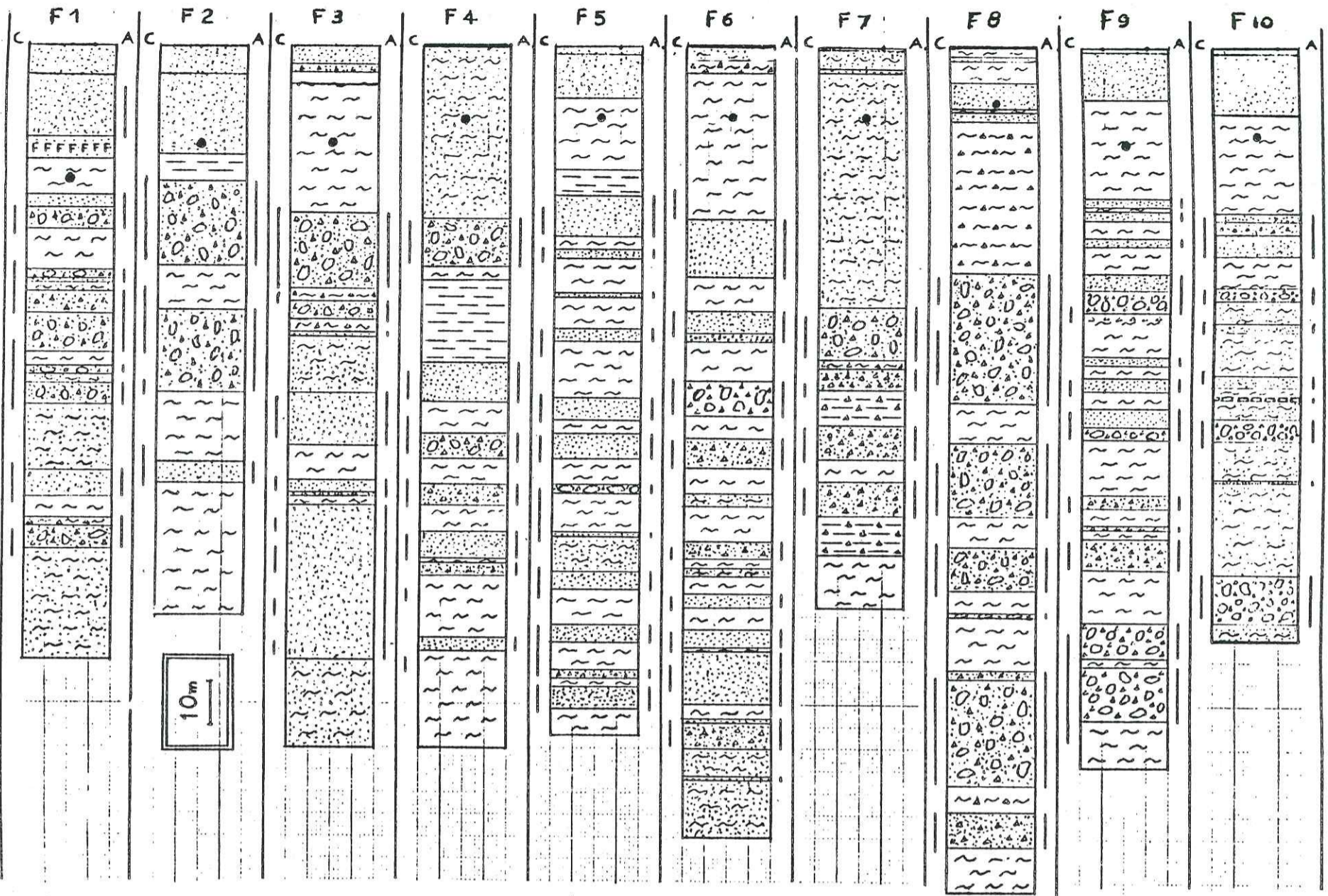


fig. 4-10

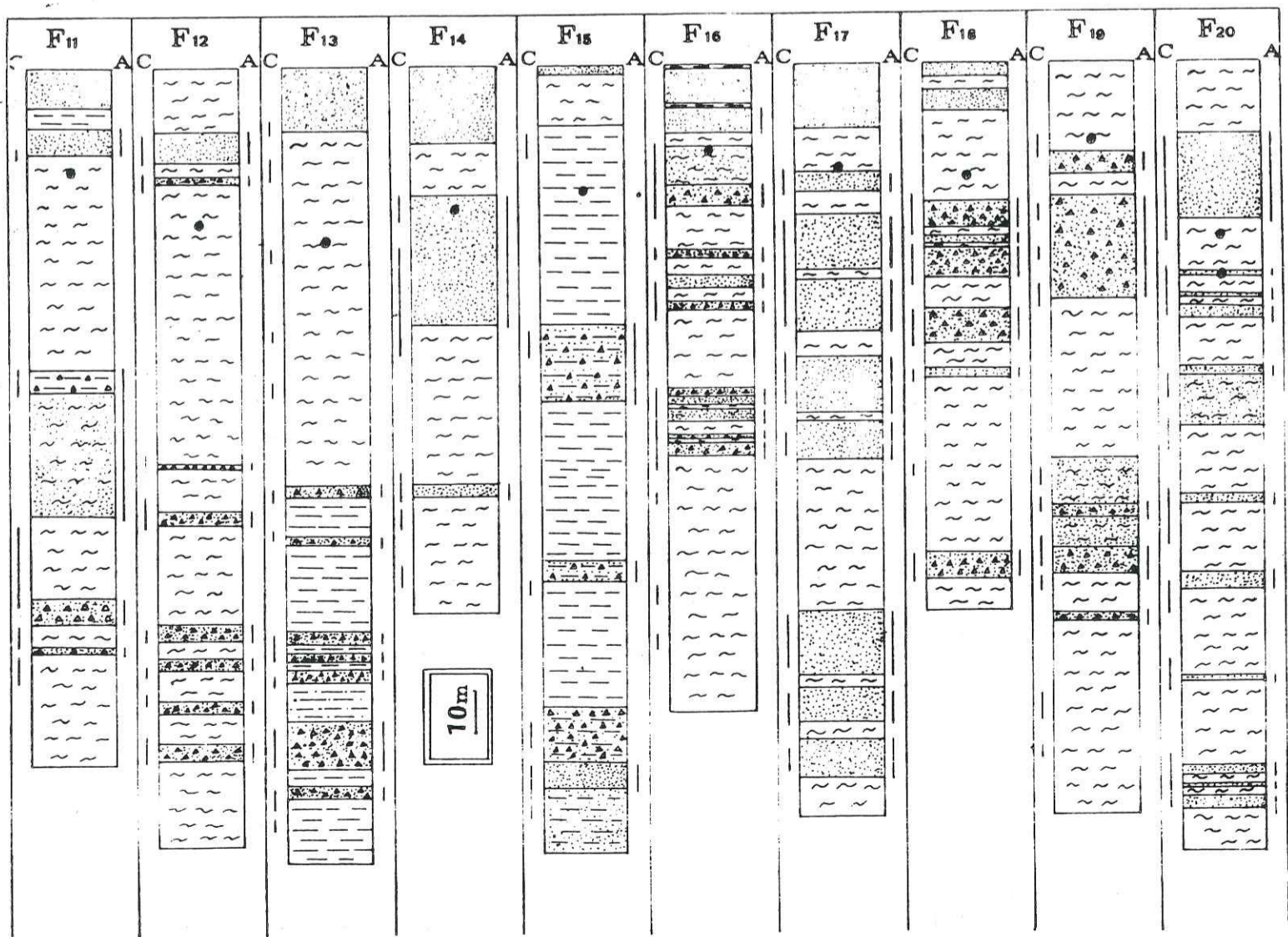


fig. 4-11



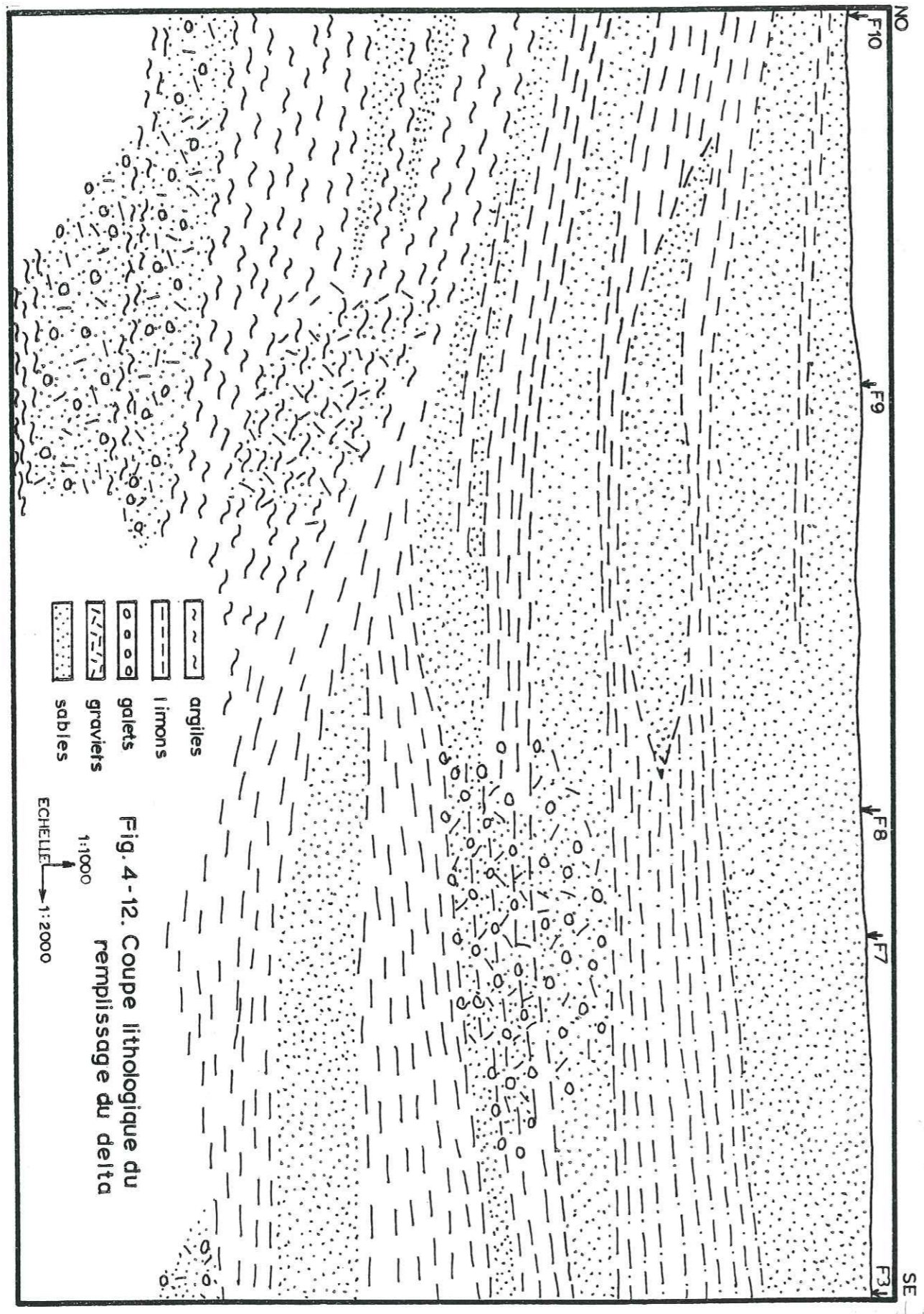


Fig. 4-12. Coupe lithologique du remplissage du delta

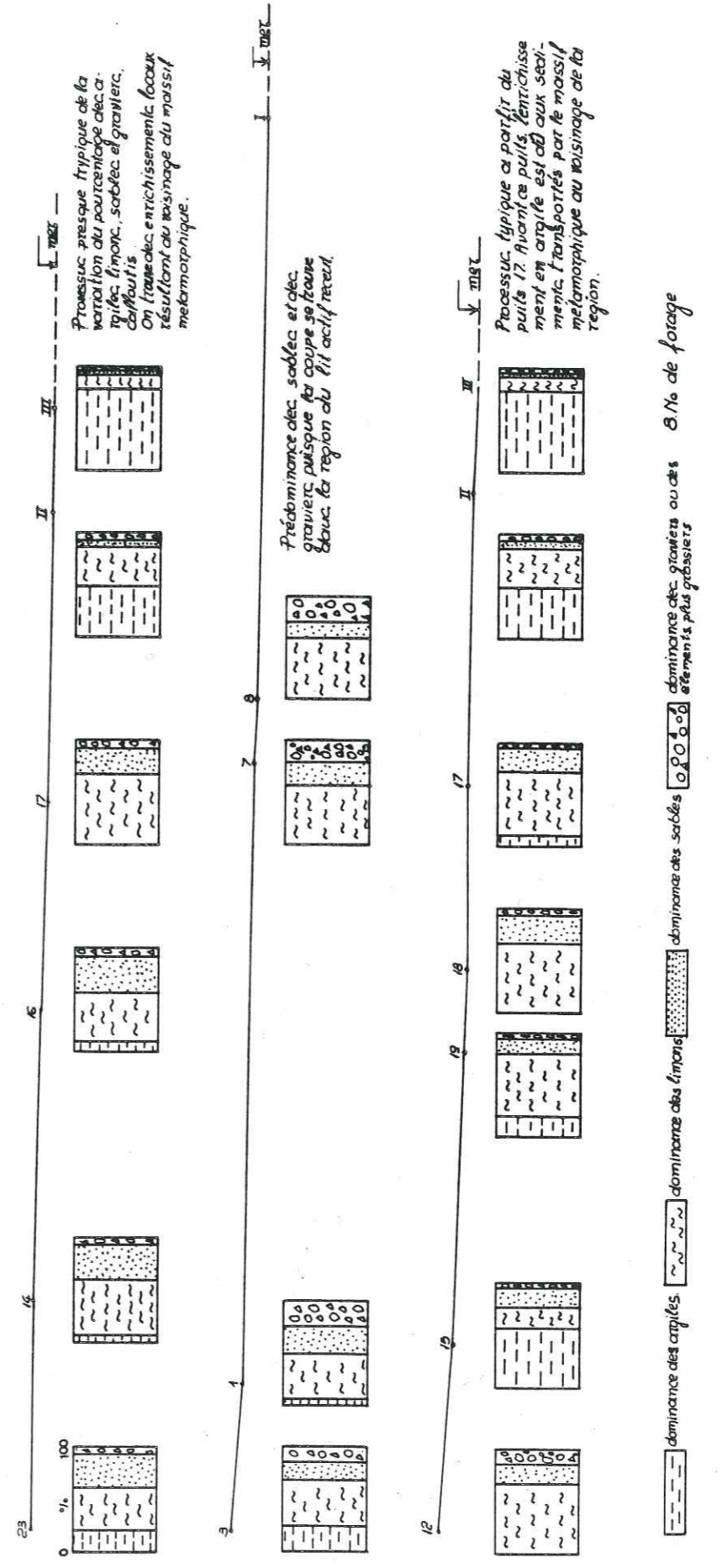


Fig. 4-13. Variations granulométriques des sédiments recents du delta vers la mer.



Pour la partie occidentale du delta, on distingue deux secteurs majeurs de sédiments avec une zone de transition entre eux. Le secteur I se compose d'une répétition successive des couches, bien distinctes de limons sableux, de sables, de graviers et d'argiles, sans aucune dominance remarquable. Ceci est dû aux déplacements des lits récents de la rivière, au cours du temps, de l'Ouest vers l'Est et du bas vers le haut. Dans le secteur II, les couches sont moins nombreuses et mieux distinguées entre elles. Entre les deux secteurs il y a une zone de transition. En même temps, la sédimentation dans la partie orientale présente trois secteurs aussi, mais cette fois il s'agit de secteurs horizontaux. A la base de la séquence moyenne considérée, entre les altitudes -60 et -200 il y a une dominante importante de limons sableux, avec des intercalations sableuses, qui constituent des nappes aquifères captives communicant entre elles. Plus haut, entre les altitudes -60 et -10, on trouve un mélange de limons sableux, de sables, de graviers et galets et, parfois, des argiles pures, sableuses ou graveleuses. Pratiquement, tout ce système se comporte comme une nappe unique, partiellement captive, semi-captive ou libre. Au dessus de ce système, on trouve les formations superficielles de sables, qui se transforment en sables argileux vers l'Ouest et le Nord-Ouest. La nappe ici est libre et très souvent il ne s'agit que de la continuité directe de la nappe précédente. La concentration de sables devient plus épaisse dans la région du forage F 14 et s'amincit vers la périphérie.

A l'aval d'un profil donné, la sédimentation montre des caractères de plus en plus fluviaux. Ce processus est bien caractéristique pour la plupart des deltas de type Rhône. Les forages exécutés, à l'aval de la limite entre la région haute du delta et la proéminence deltaïque, montrent une sédimentation fluviale et, très souvent, une imbrication de ces dépôts avec d'autres qui présentent des caractères marécageux de fond de golfe marin. Cette situation est bien décrite par Baetz et als. pour la vallée de la Môle (Var). Il y a lieu cependant de noter que, dans les dépressions côtières de ce type, la circulation des eaux le long des reliefs de bordure a permis le développement d'horizons plus perméables. Ainsi, pour le delta du Nestos, ces horizons sont constitués par des alluvions grossières

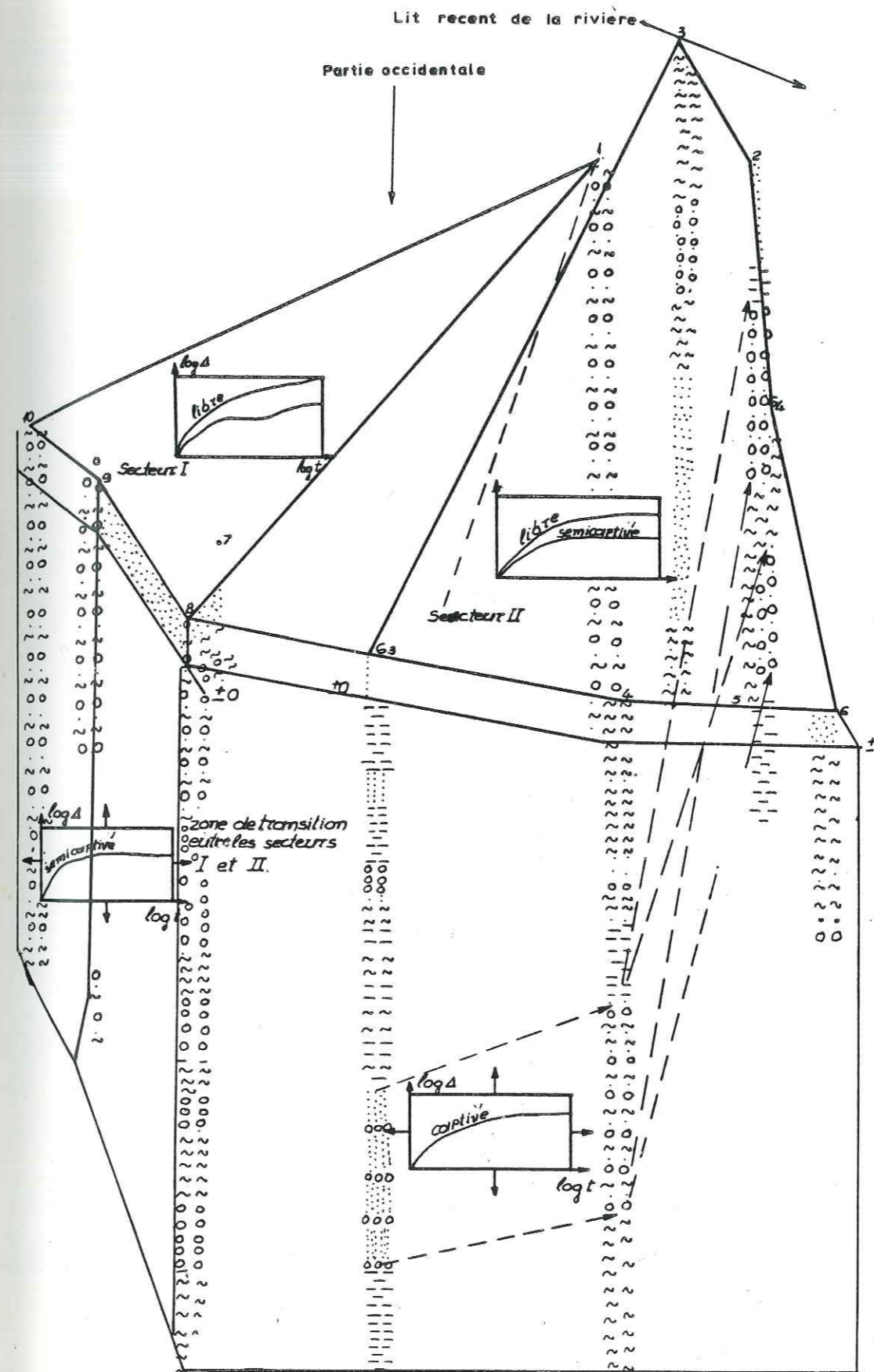


Fig. 4-14 Distribution des sédiments de la plaine deltaïque et formation des types divers de nappes aquifères



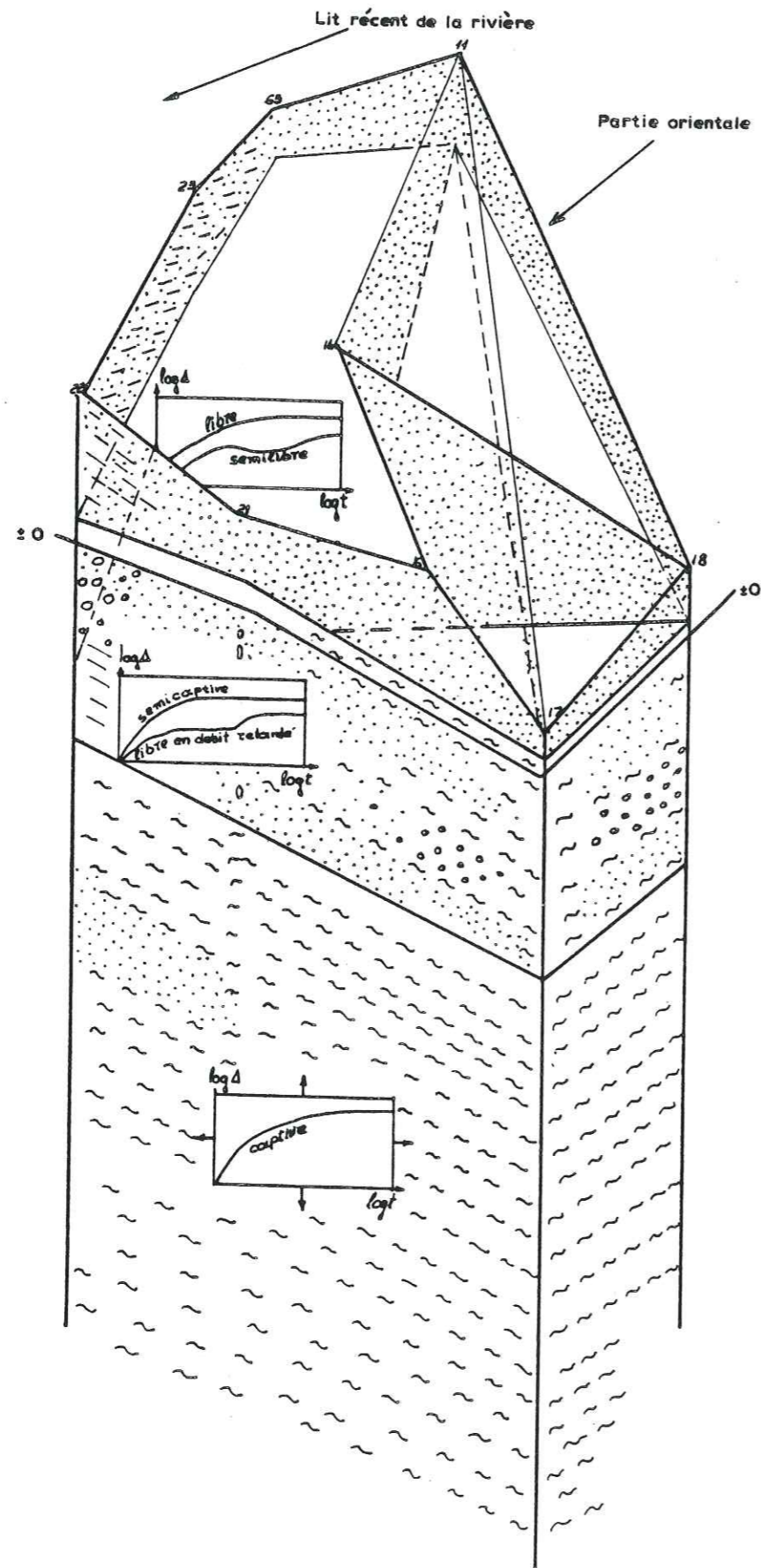


Fig. 4-15. Distribution des sédiments de la plaine deltaïque et formation des types divers de nappes aquifères

associées à des dépôts de versant à gros éléments détritiques. De tout ceci résulte la formation de niveaux perméables se prolongeant vers l'aval, dans un domaine envahi par des limons étanches.

Pour la connaissance de la distribution granulométrique des sédiments nous avons examiné 320 échantillons sur le terrain parmi lesquels 83 échantillons avaient subi une analyse granulométrique. L'échantillonnage était fait entre 0,5-1,0m de profondeur conformément à un cadrage adapté à la morphologie. Le résultat de l'élaboration de tous ces travaux est la carte de la fig. 4-16. Dans cette carte, les petites zones sont unifiées aux zones majeures.

La situation présentée dans cette carte s'accorde avec les cartes topographiques de la région, avant l'aménagement de la rivière. Dans l'axe du lit principal de la rivière, on ne peut pas distinguer les matériaux, au moins à l'échelle de cette carte. Des deux côtés de la rivière domine la phase limoneuse ou argileuse, presque toujours sableuse. La même phase domine aussi au voisinage de la "fenêtre" de Melissa et à la partie occidentale du delta, où la présence des anciens lits est assez remarquable. Dans la région côtière et dans l'axe de la rivière ancienne, on trouve des marécages. Une grande partie de la surface de la plaine deltaïque se compose de sables de granulométrie plutôt uniforme, quelquefois limoneux ou argileux. Dans cette phase, il y a des zones de sables de granulométrie irrégulière. La distribution granulométrique s'achève avec les dunes typiques à la zone côtière.

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

27 AOUT 2003



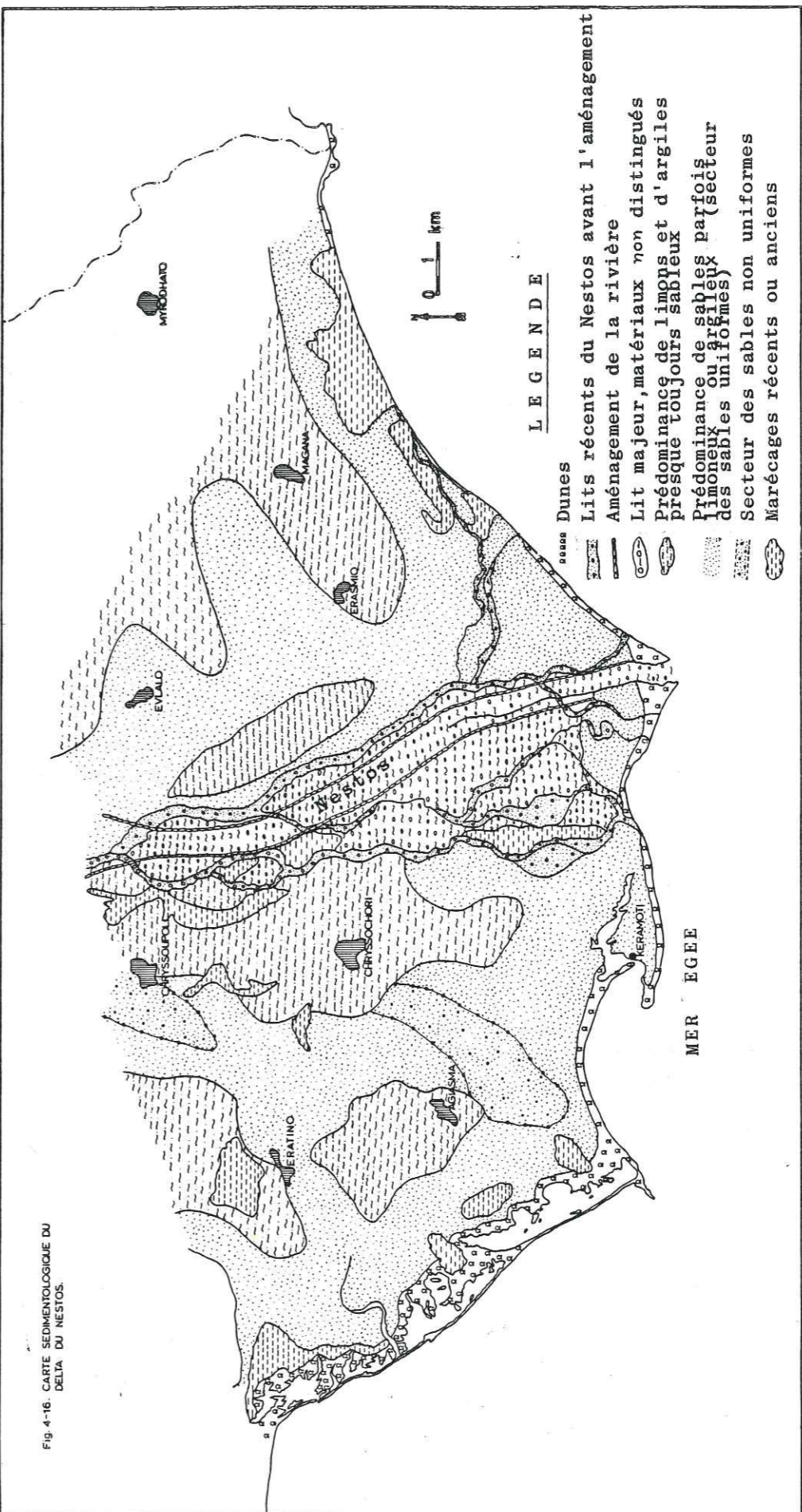


Fig. 16. CARTE SEDIMENTOLOGIQUE DU DELTA DU NISTOS

Résultats des analyses granulométriques des formations superficielles de la Plaine deltaïque

(pourcentages M.I.T.-tamis DIN 4188 - précision du pesage 0,1 g)

No preuv.	grav.	partie orient			limon. argille	3.0	24.0	30.0	25.5	17.5	partie est					277					
		sable gros.	sable moy.	sable fin							238	8.5	18.5	29.5	22.5		21.0	279	6.5	35.0	39.0
1		30.0	66.5	3.0	75	5.0	6.0	35.0	36.0	23.0	185	2.0	18.0	34.0	44.5	1.5	277	6.5	35.0	39.0	19.5
2		15.0	40.0	39.0	77	2.0	21.0	31.0	35.0	8.0	185	10.0	1.0	19.0	50.0	30.0	279	3.0	30.0	42.0	33.5
7		15.0	52.5	32.5	80	5.0	25.0	25.0	28.5	18.0	189	10.0	35.5	50.0	6.5	1.0	280	4.0	19.0	36.0	25.0
9	2.0	11.0	60.0	23.5	81	0.5	17.5	27.5	41.5	8.5	193	10.0	10.0	23.0	50.0	17.0	283	1.0	21.0	55.0	23.0
10		2.5	25.0	57.5	83	0.5	3.5	66.0	29.0	1.0	205	3.5	8.0	44.0	48.0	1.0	284	0.5	24.5	57.0	18.0
13		3.0	24.5	54.0	85	0.5	14.5	34.0	43.5	7.5	217	4.0	4.0	23.5	38.5	34.0	285	37.0	14.0	6.0	2.0
17		2.0	38.0	32.0	89	1.0	13.0	15.0	36.0	35.0	223	9.0	9.0	38.5	31.5	21.0	286	1.5	28.5	49.0	21.0
18	11.5	48.5	21.0	16.0	94	3.0	22.0	60.0	11.5	3.5	225	3.5	39.0	46.5	10.0	1.0	290	1.0	13.0	55.0	31.0
19	1.0	21.5	30.0	25.0	102	0.2	6.0	22.5	34.5	37.0	227	7.0	3.0	22.0	61.0	14.0	291	1.0	14.0	55.0	20.0
22		45.0	51.0	9.8	107	4.0	29.0	32.0	25.0	25.0	227	7.0	48.0	38.0	5.0	2.0					
23		2.0	10.0	41.0	111	2.0	4.0	24.0	60.0	12.0	227	8.5	3.0	17.0	46.5	33.5					
25		2.0	20.0	60.5	128	0.5	23.5	60.0	10.0	6.0	242	2.0	3.0	42.0	27.5	9.5					
29		10.0	42.5	27.5	133	3.0	15.0	60.0	22.0	6.0	245	1.5	19.0	42.0	27.5	9.5					
30		22.5	52.5	18.5	140	2.5	23.5	56.0	18.0	22.0	246	4.3	21.0	48.0	23.0	6.5					
33		7.5	49.5	38.5	144	1.0	3.5	50.5	45.0	4.0	249	4.3	13.0	17.5	35.0	30.0					
34	0.5	12.0	31.5	33.0	145	0.5	11.5	78.0	10.0	25.0	250	0.5	0.5	9.5	72.0	18.0					
40	7.0	10.5	37.5	36.0	145	0.5	22.0	55.0	22.5	252	4.0	4.0	43.5	46.5	6.0						
50	15.0	34.0	23.5	18.5	150	7.0	53.0	31.0	9.0	254	0.5	0.5	17.0	60.0	22.5						
54	18.0	20.0	24.0	27.0	152	2.0	23.0	44.0	31.0	268	8.0	8.0	48.0	32.0	11.0						
59		12.0	33.0	45.0	159	0.5	18.5	54.0	21.0	6.0	270	3.0	3.0	30.0	38.0	29.0					
64	7.0	30.5	32.5	22.0	165	1.0	33.0	44.0	22.0	273	1.0	1.0	17.0	38.0	44.0						
68	1.5	18.5	29.0	30.5	175	2.0	2.0	6.0	77.0	15.0	274	4.0	4.0	27.0	48.0	21.0					



#### 4.2.3. LES RECHERCHES GEOPHYSIQUES

En 1979 la Société "Hunting Surveys Limited" a réalisé, pour le compte de "Hydroerevna" S.A., 100 sondages électriques (méthode Schlumberger), en utilisant le "Hunting High Power Resistivity System MKZ. Les résultats de ces sondages n'ont fait l'objet que d'études conventionnelles.

Pour l'élaboration des données géoélectriques, les géophysiciens ont admis que:

- toutes les formations sont horizontales,
- toutes les formations présentent une homogénéité et une isotropie latérale.

Il faut encore ajouter un défaut de cette méthode, qui concerne son insuffisance pour distinguer des couches d'une épaisseur limitée et qui se trouvent fréquemment dans le remplissage détritique du delta. D'autre part l'interprétation des données géoélectriques était basée sur le tableau de la résistivité des roches et des nappes aquifères proposé par Flathe (1955) et Hunting. Manquaient, donc, les sondages expérimentaux dans des conditions lithologiques et hydrogéologiques bien connues, pour qu'on puisse caler les résultats des autres sondages électriques.

En ce qui concerne les paramètres géoélectriques, les limites entre des couches, qui se caractérisent par des résistivités différentes, peuvent, ou non, coïncider avec des limites entre des formations d'âge géologique ou du type lithologique différent. D'autre part, chaque couche de résistivité  $\rho_i$  et d'épaisseur  $h_i$  peut se distinguer par les paramètres géoélectriques "Unité de Conductance longitudinale  $S_i$ " et "Unité de Resistance transversale  $T_i$ ", où:

$$S_i = \frac{h_i}{\rho_i} \quad \text{et} \quad T_i = h_i \rho_i$$

et pour une série de couches.

$$S_i = \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\rho_i} = \frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2} + \dots + \frac{h_n}{\rho_n} \quad \text{et}$$

$$T_i = \sum_{i=1}^n h_i \rho_i = h_1 \rho_1 + h_2 \rho_2 + \dots + h_n \rho_n$$

Donc, si les valeurs de  $h_i$  et  $\rho_i$  varient, pour le cas de couches équivalentes, les valeurs de  $S_i$  et  $T_i$  restent constantes.

Les résultats de l'élaboration des données de terrain sont présentés sur la "Carte de localisation des sondages", la "Carte des unités de conductance longitudinale" et sur les coupes 1-12. L'échelle horizontale des coupes est de 1:25.000 et l'échelle verticale de 1:5.000, provoquant une exagération verticale de 5. Les couches dont l'épaisseur est inférieure à 10m ne sont pas visibles sur les coupes.

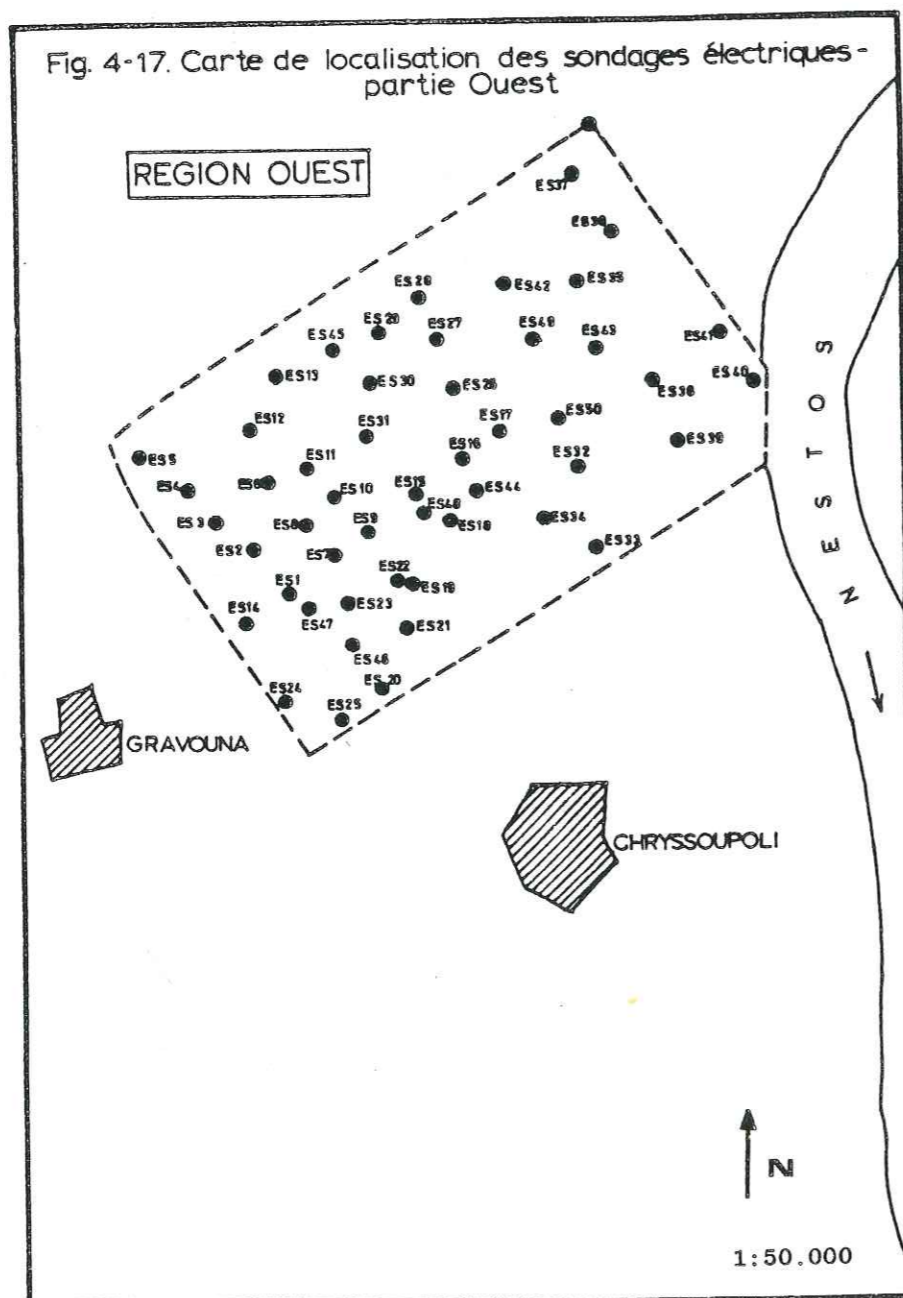
Pour la région Ouest, en ce qui concerne le socle cristallin, les résultats des sondages électriques obtenus sont proches de la réalité vérifiée par quelques forages exécutés dans cette région. La morphologie du socle est contrôlée par la faille prédominante de direction générale E-O. Cette morphologie s'abaisse par étapes au long des bordures du delta. La zone superficielle de résistivité élevée est due probablement à la présence de conglomérats peu cimentés ou de sables (50-250  $\Omega m$ ). Le bedrock de faible résistivité (35-350  $\Omega m$ ) est presque toujours présent. La valeur de 85  $\Omega m$  correspond probablement à la présence de schistes, tandis que la valeur de 450  $\Omega m$  correspond à la présence de gneiss. La réalisation des forages dans cette région a vérifié la présence du socle cristallin dans les mêmes conditions.

Pour la région Est, la règle générale est que la résistivité diminue en profondeur à cause de la participation accrue des argiles à la formation des sédiments, et de la salinité plus élevée de l'eau. Au dessous des formations superficielles, les sondages électriques montrent une série de sables et marnes en alternance. Les données lithologiques proviennent de l'exécution de deux forages à côté des sondages ES 52 et ES 57. Malgré la difficulté d'une expression quantita-



tive, on peut imaginer que les couches nombreuses de sables, qui communiquent entre elles deviennent moins importantes en profondeur.

Les valeurs des résistivités et des épaisseurs correspondantes se caractérisent par une variabilité rapide. Pour l'interprétation de ces résultats on peut utiliser la carte des Conductances longitudinales. Les valeurs de  $S$  sont exprimées en mhos et les résistivités équivalentes sont données par le quotient "épaisseur/ $S$ ". Pour la région Ouest cette carte ne montre pas la faille principale puisque le bedrock est partiellement conducteur ou non-conducteur. Le bedrock



intermédiaire (5-10 mhos) semble correspondre aux formations des anciens éboulis et des conglomérats. Pour la région Est, la conductivité augmente vers la mer et des valeurs  $> 50$  mhos ( $< 10$  m) indiquent probablement la présence d'eau salée. En général les zones aquifères correspondent aux zones à 5-10 mhos. Les valeurs élevées indiquent un pourcentage élevé de matériaux sableux, dans lesquels il y a de petites nappes aquifères, caractérisées par une discontinuité et une épaisseur limitée.

D'une façon générale les sondages électriques confirment les résultats des forages, déjà exécutés.

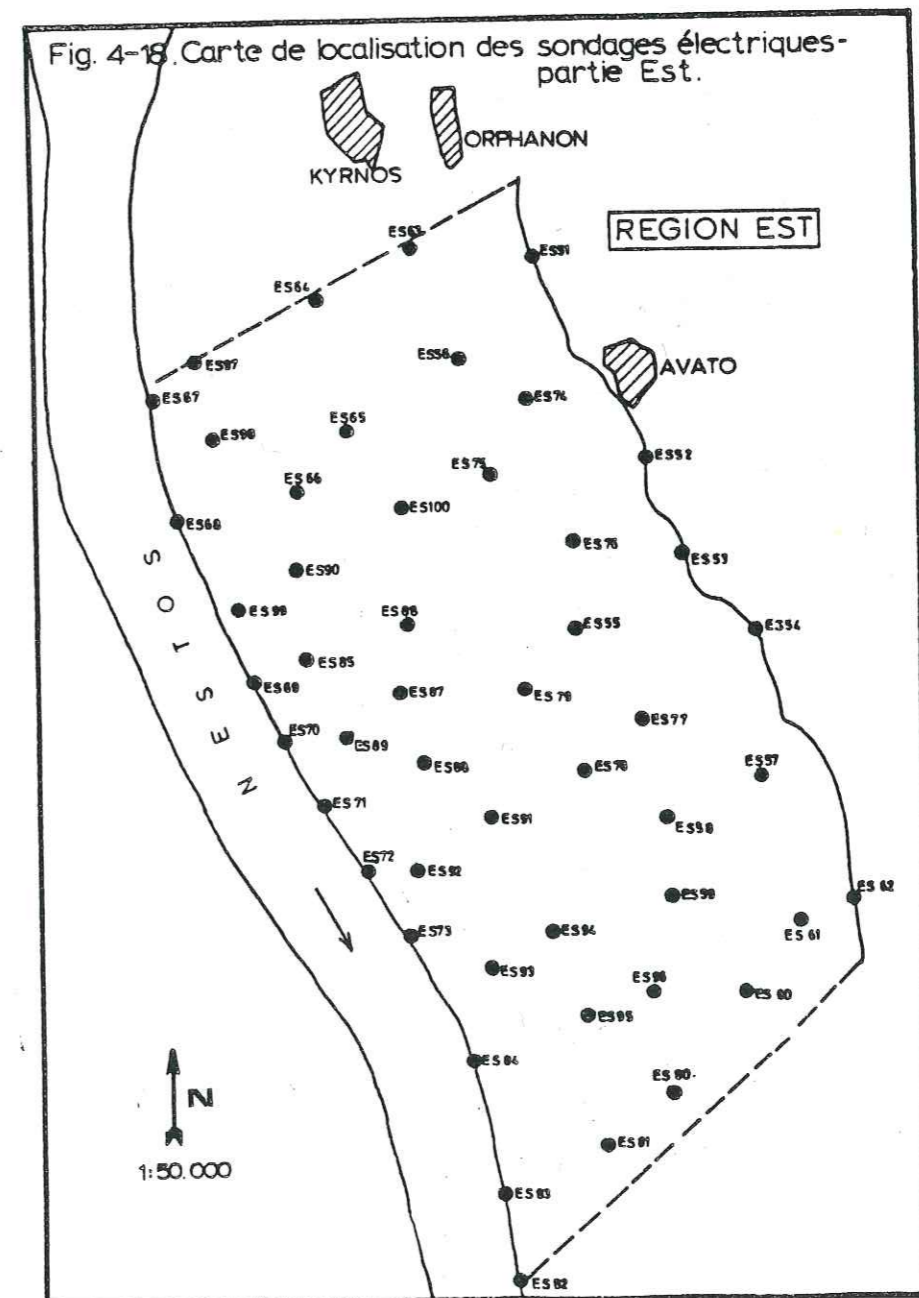
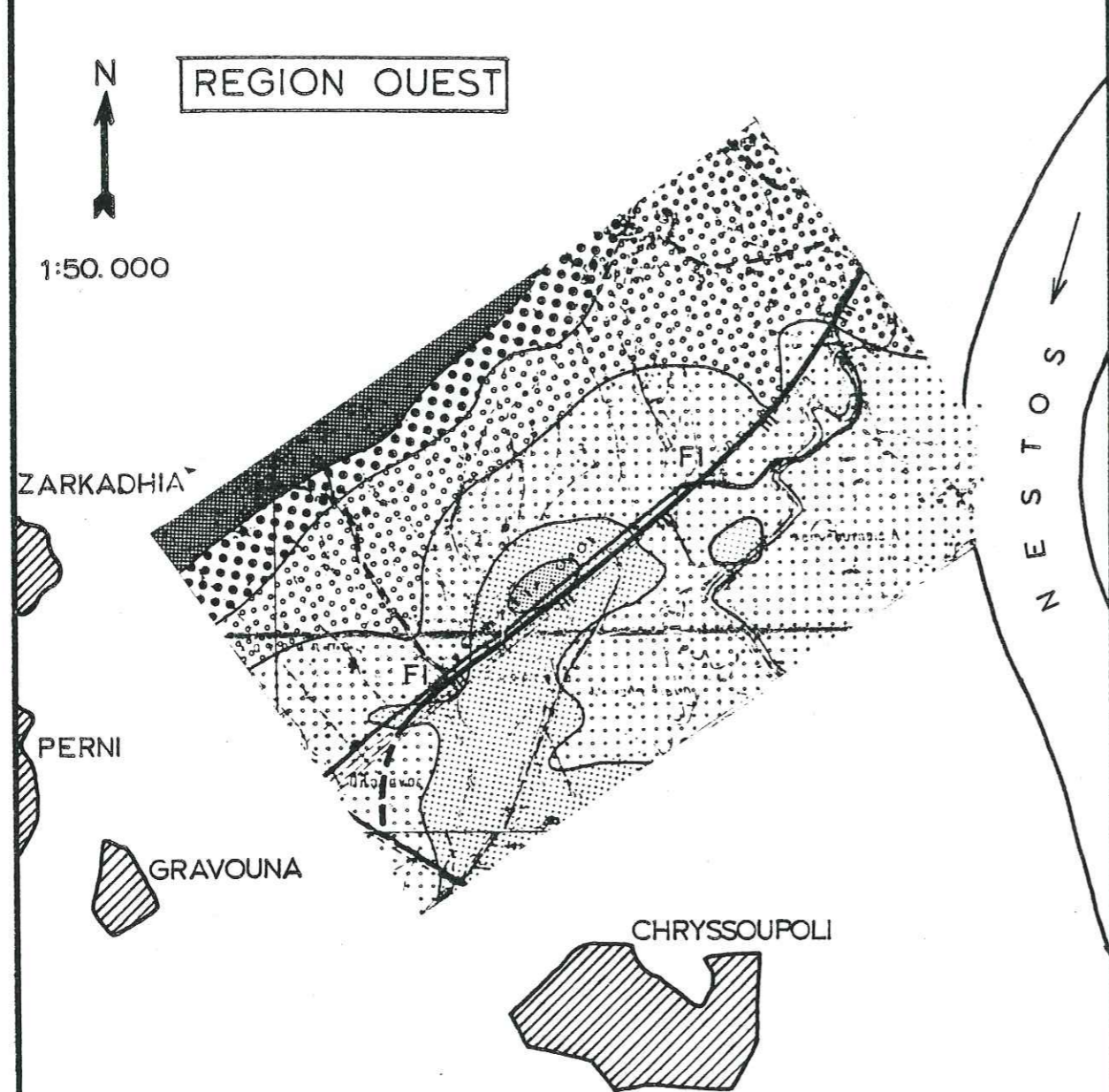




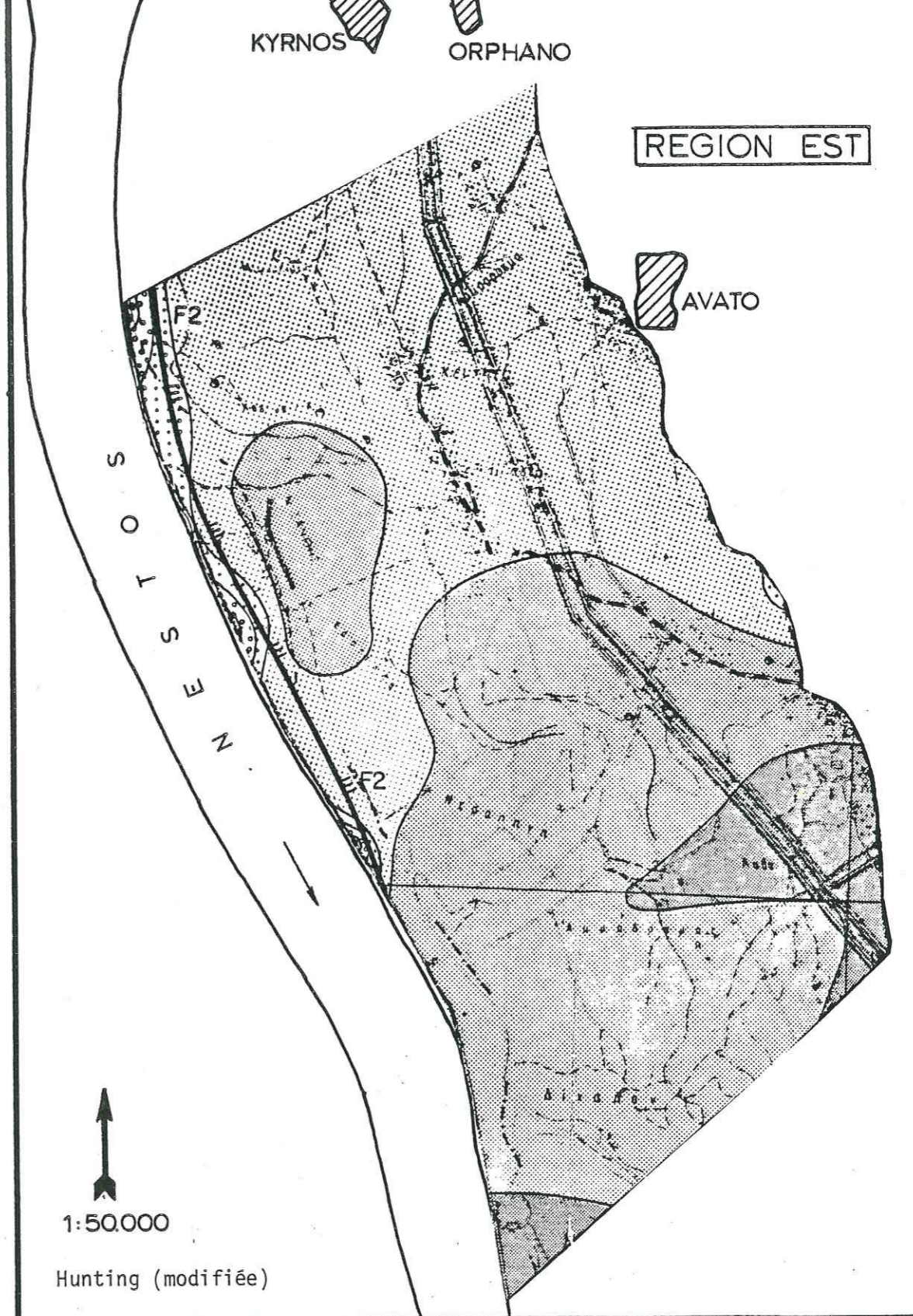
Fig. 4-19. CARTE DE CONDUCTANCE LONGITUDINALE  
Partie Ouest.



Longitudinal unit conductance zone (mhos)	Equivalent resistivity values (ohm-metres)	Symbol
< 2	> 250	[Dotted pattern]
2-5	100-250	[Dotted pattern]
5-10	50-100	[Dotted pattern]
10-20	25-50	[Dotted pattern]
20-30	16.7-25	[Dotted pattern]
30-50	10-16.7	[Dotted pattern]
> 50	< 10	[Dotted pattern]

Hunting (modifiée)

Fig. 4-20. CARTE DE CONDUCTANCE LONGITUDINALE  
Partie Est.



1:50.000

Hunting (modifiée)



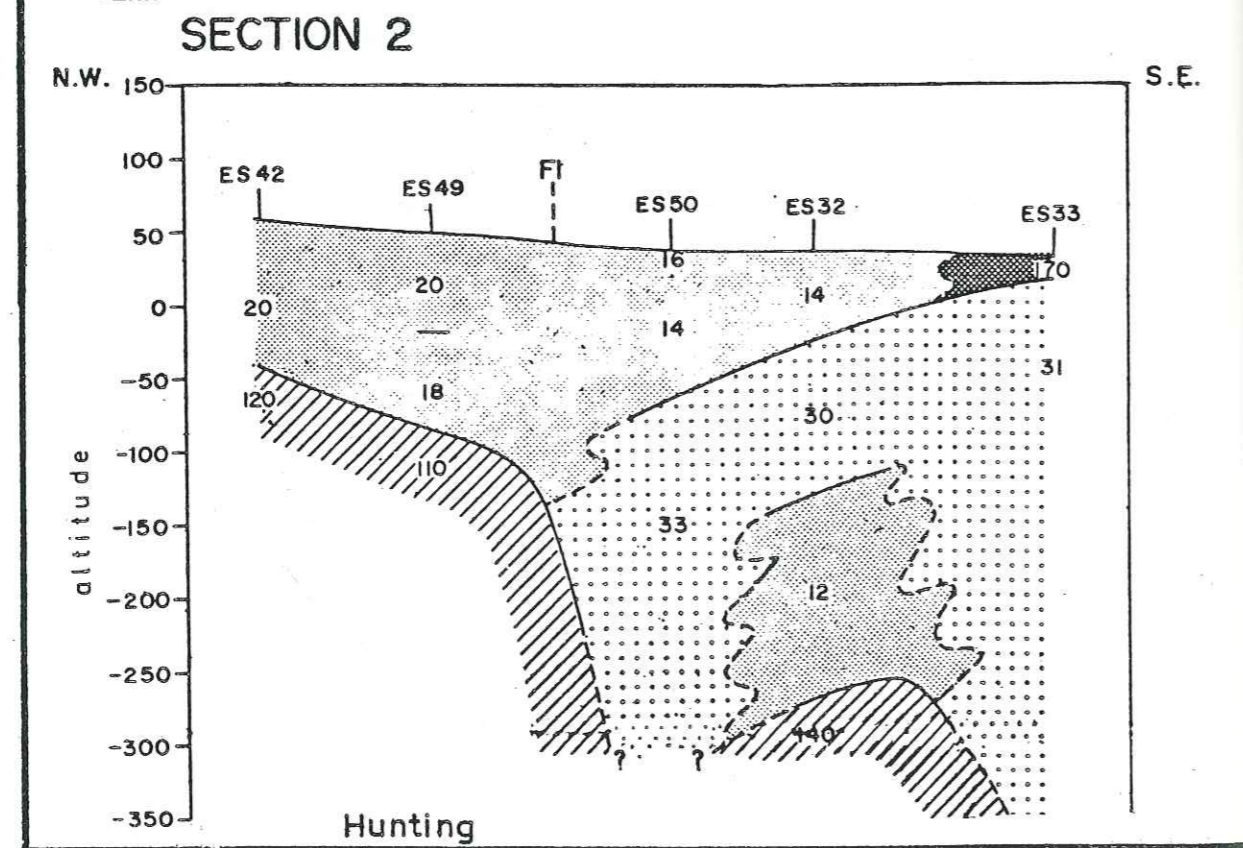
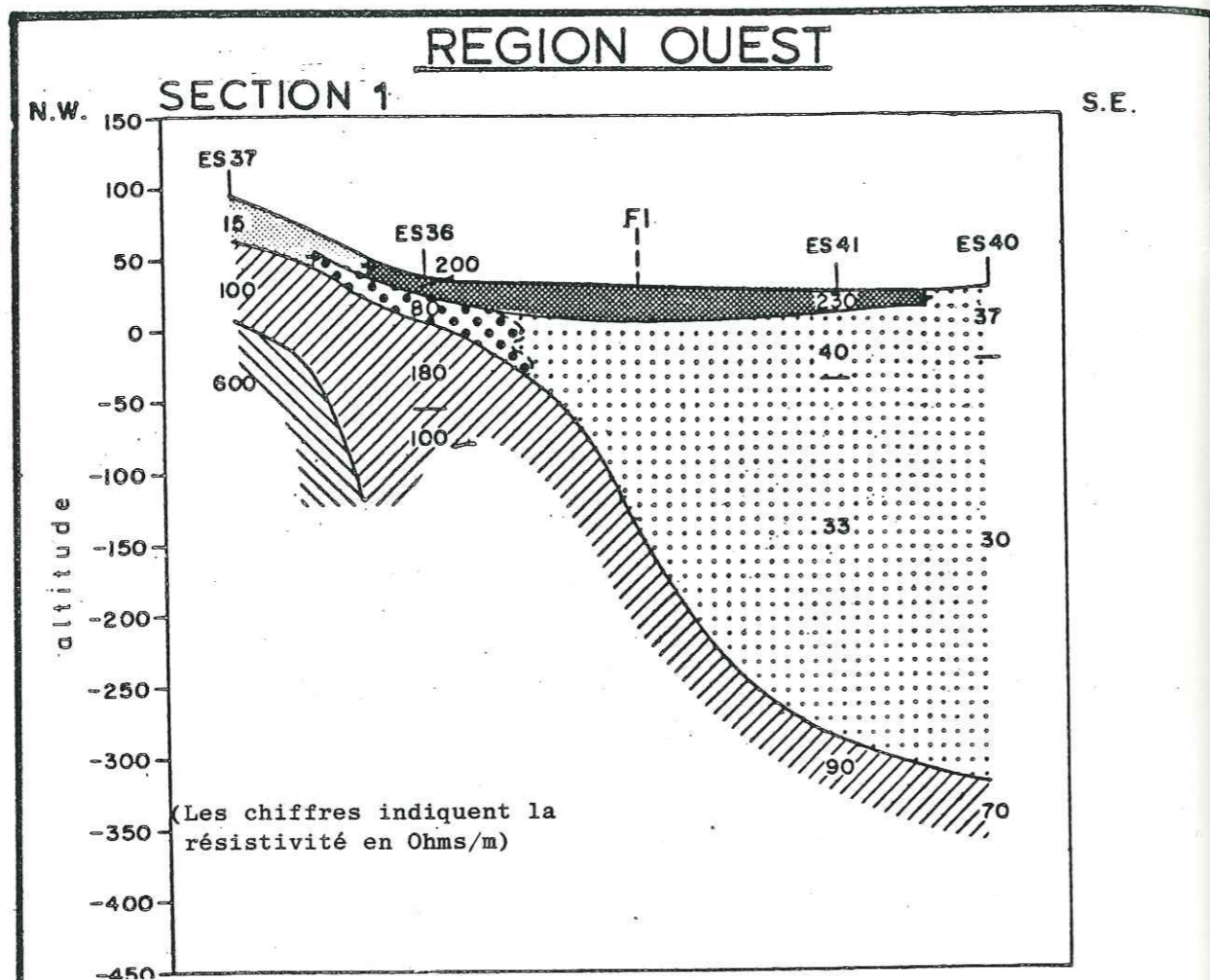


Fig. 4-21

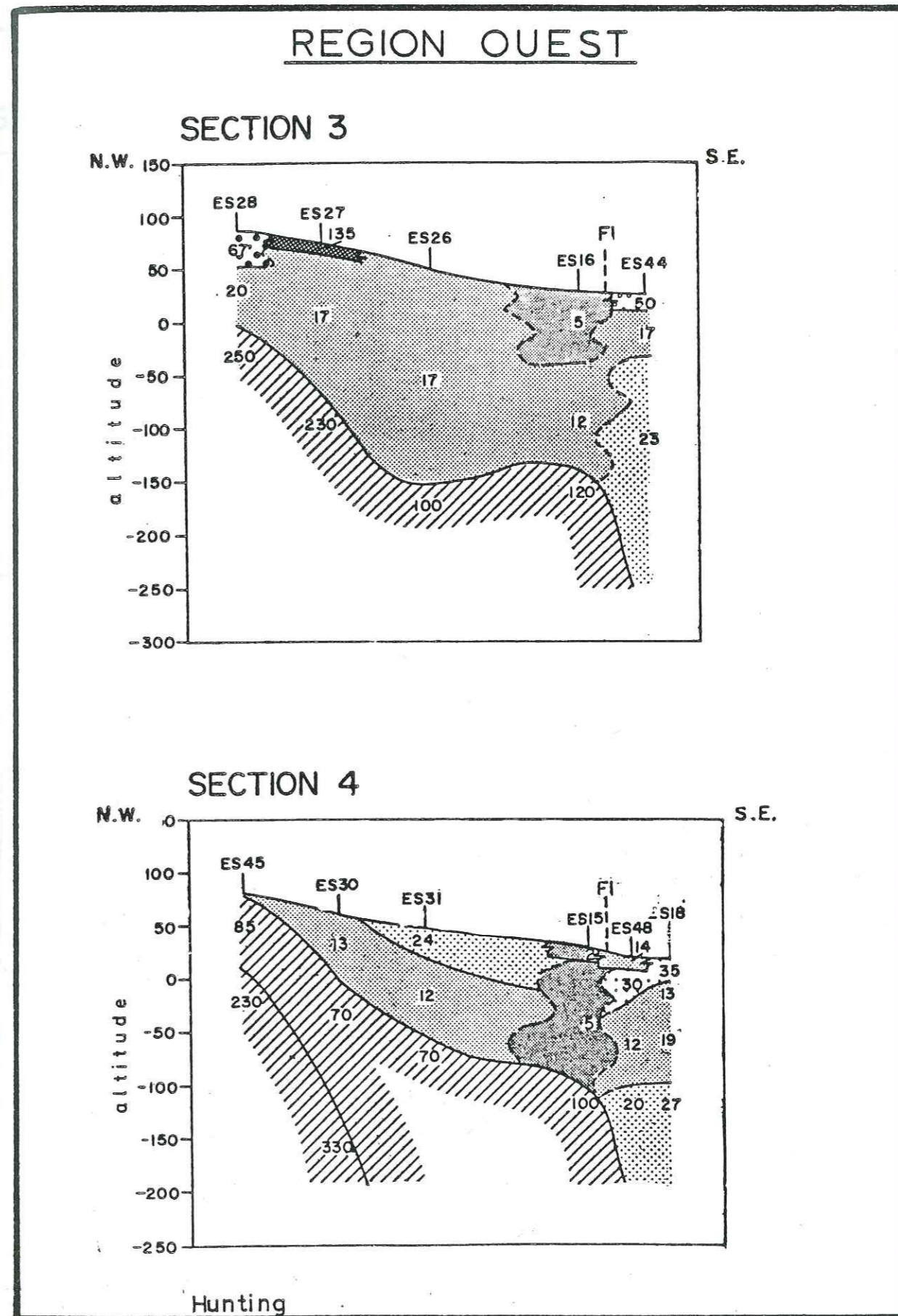
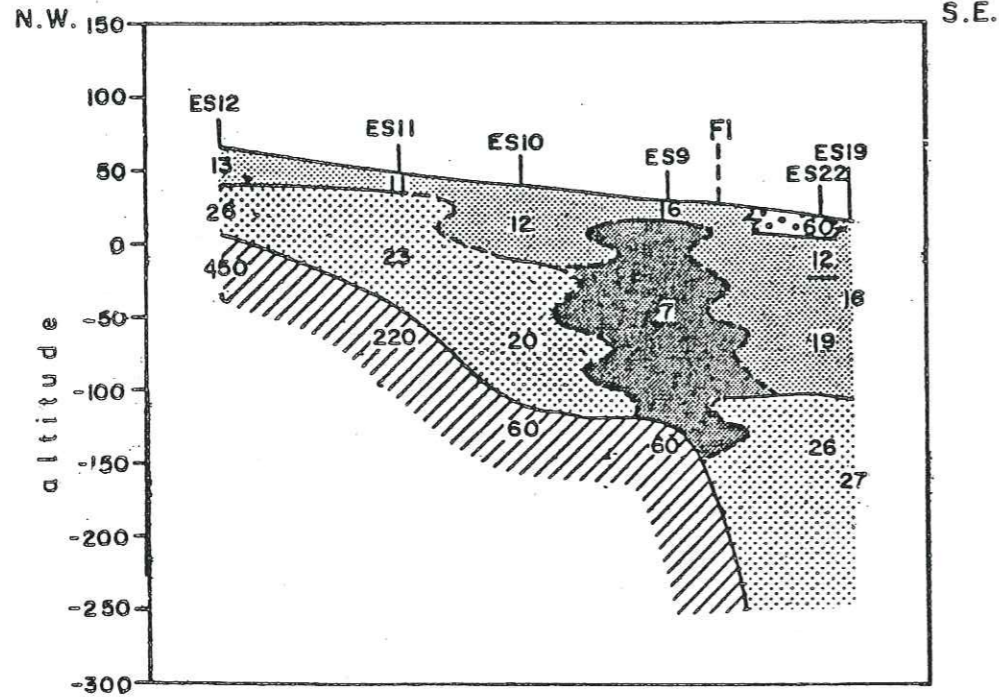


Fig. 4-22



# REGION OUEST

## SECTION 5



## SECTION 6

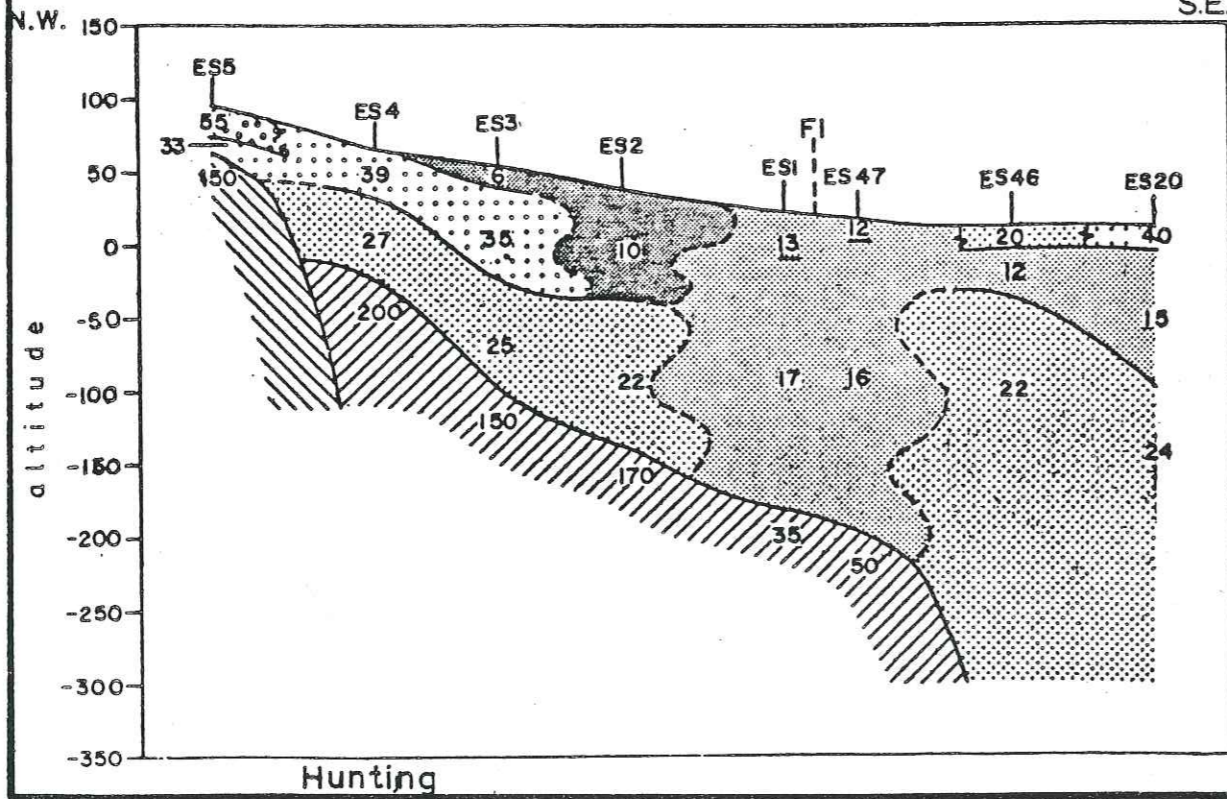
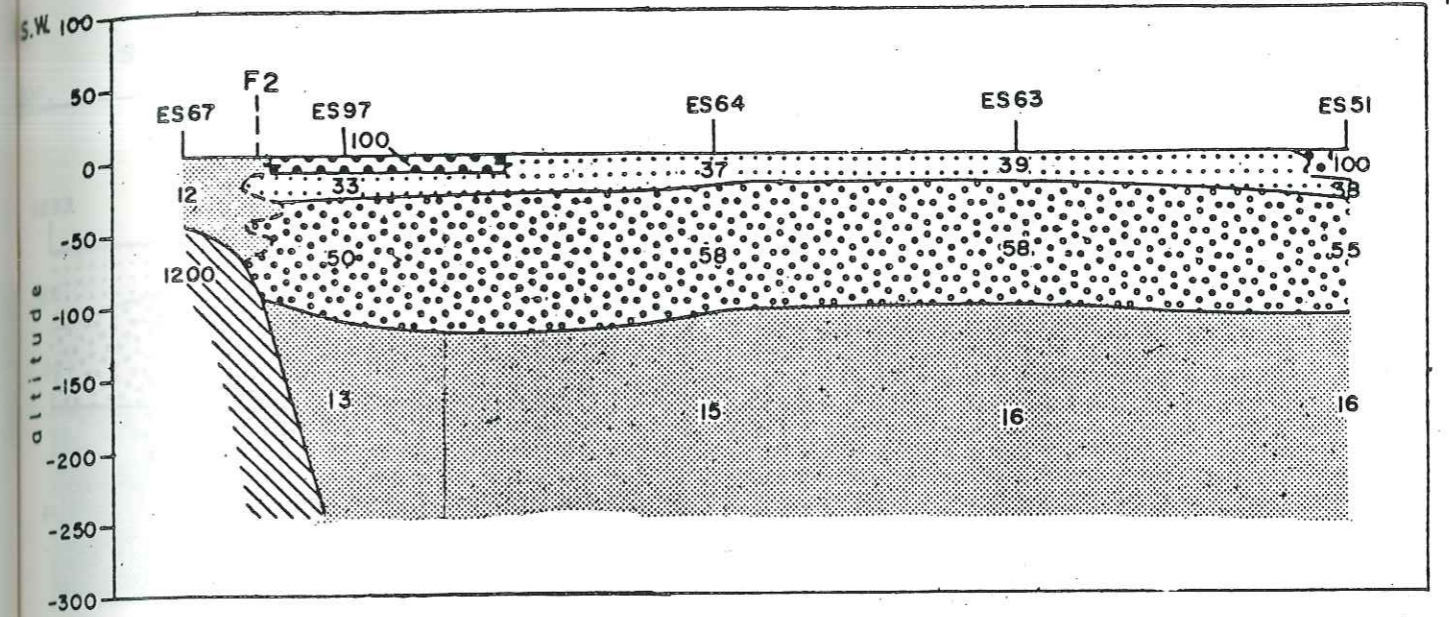


Fig. 4-23

# REGION EST

## SECTION 7



## SECTION 8

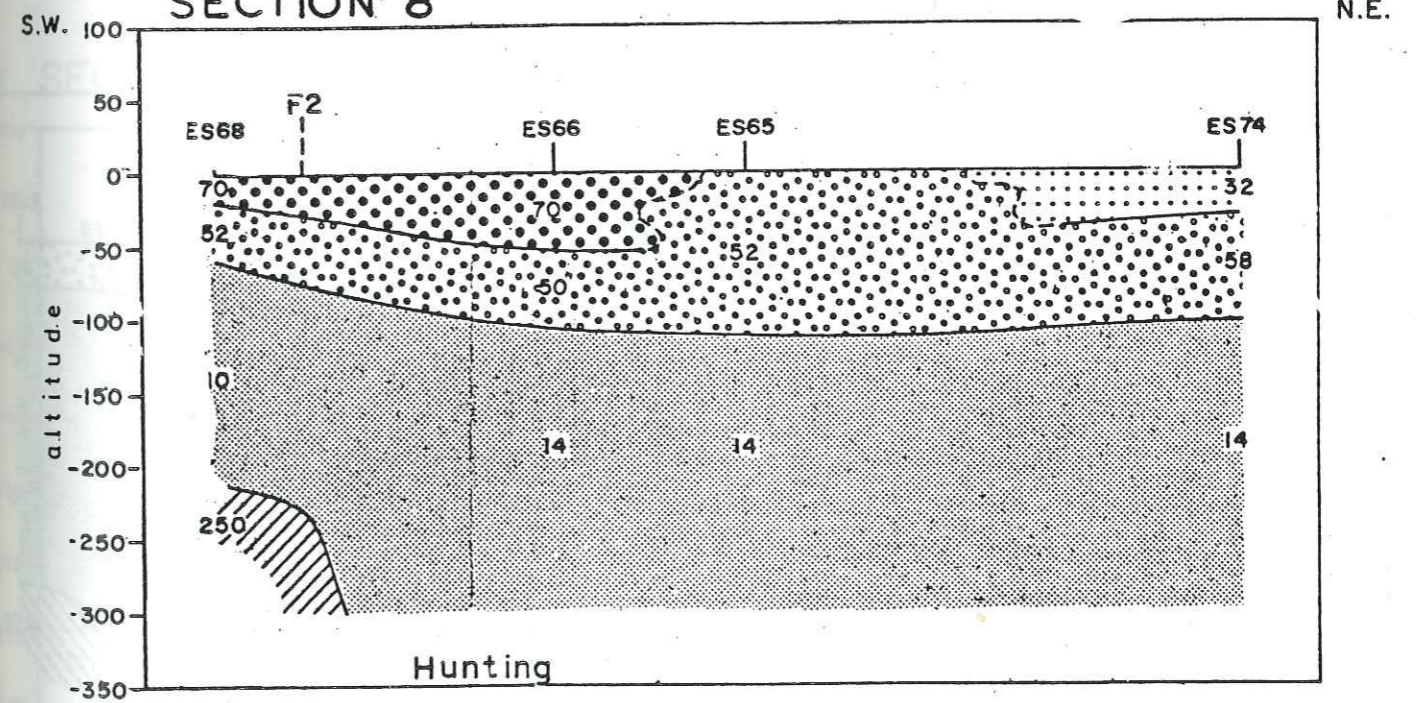
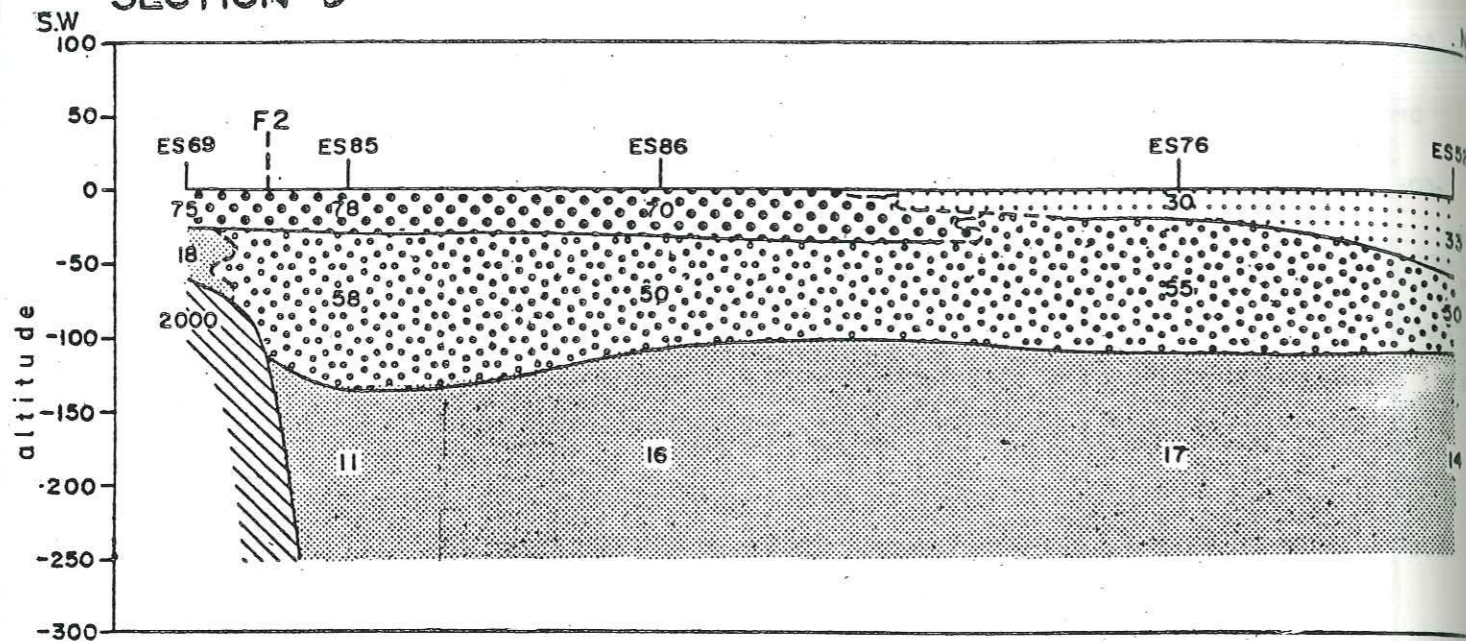


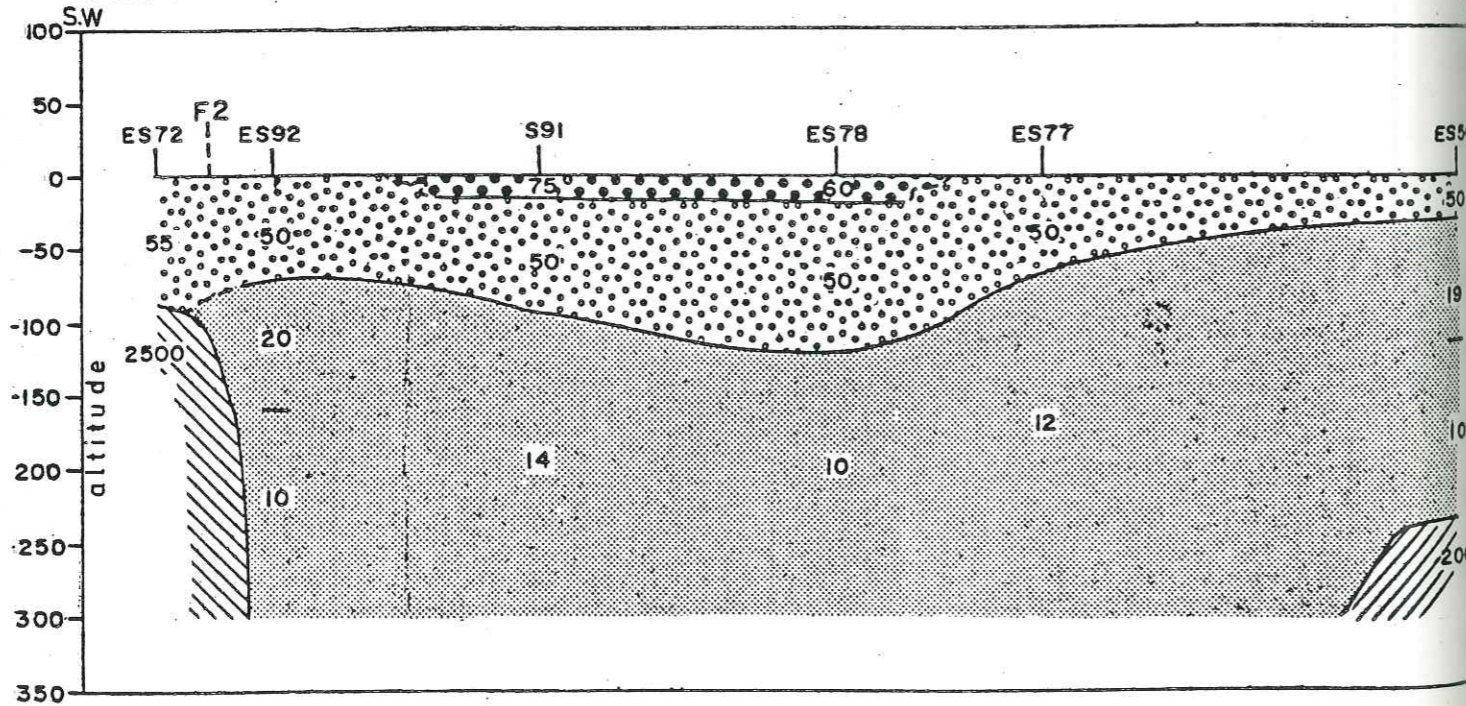
Fig. 4-24



SECTION 9



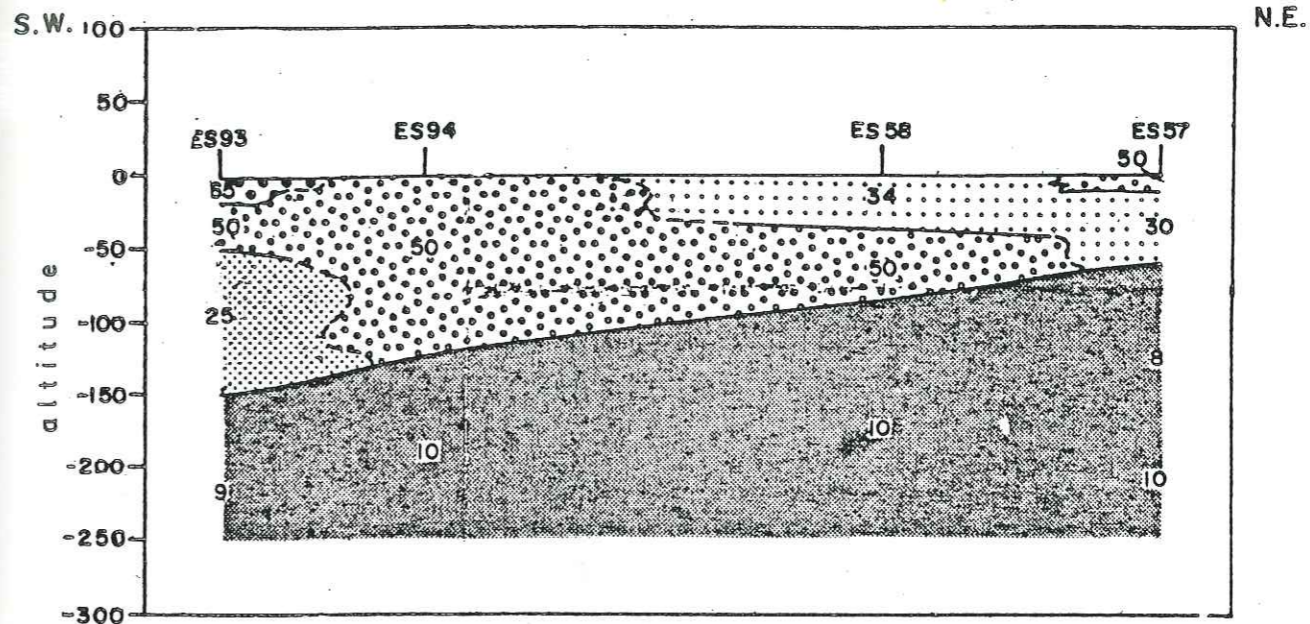
SECTION 10



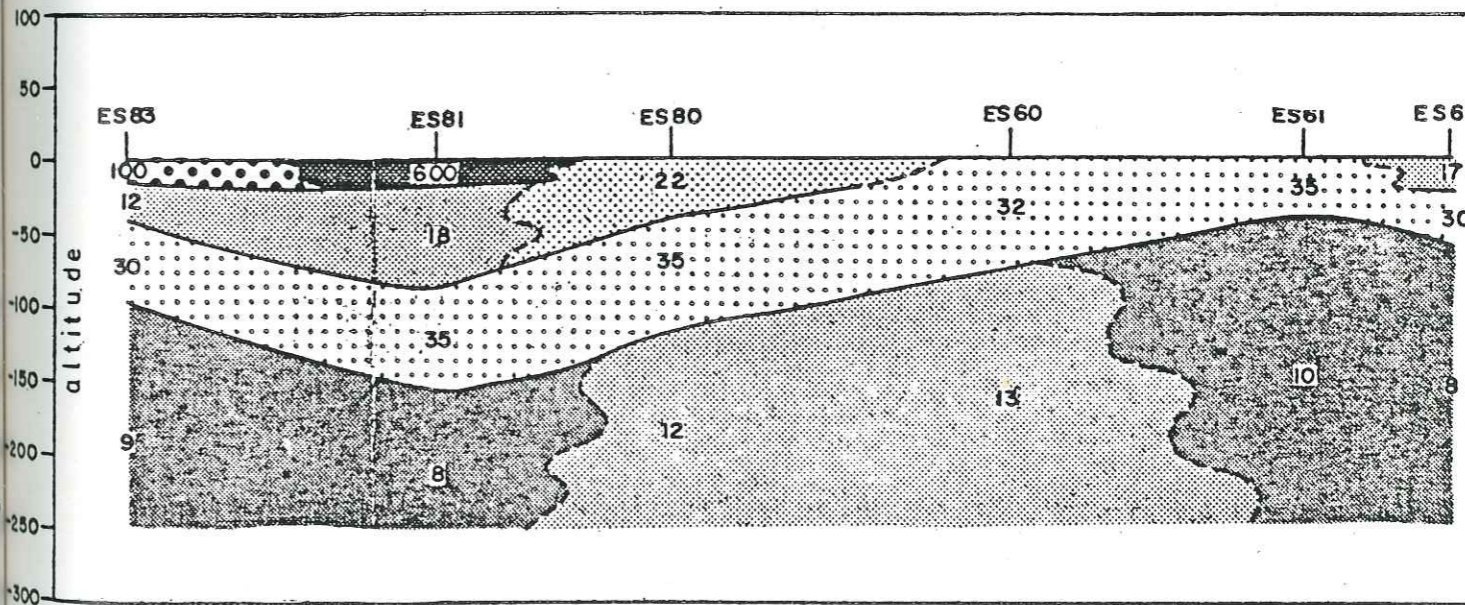
Hunting

Fig. 4-25

SECTION 11



SECTION 12



Hunting

Fig. 4-26



### 5. LES CONDITIONS GEOMORPHOLOGIQUES ET L' EVOLUTION FINALE DU DELTA

#### 5.1. GENERALITES

La bibliographie sur les deltas s'est beaucoup développée au cours des dernières 20 années. La plupart des publications concerne la classification des deltas en divers types, l'étude de leur structure sédimentologique et leur évolution morphologique. Parmi ces études, nous avons utilisé celles concernant des régions où règnent des conditions proches de celles du delta du Nestos et qui offrent un processus permettant la constitution de nappes aquifères dont on connaît le comportement hydrodynamique. Les mêmes critères ont été choisis pour l'utilisation des méthodes quantitatives, adaptées aux particularités du delta du Nestos et donc valables pour ce delta et pour tous les deltas de ce type.

La classification des deltas la plus simple et générale est celle proposée par Galloway (1975), basée sur les facteurs qui participent à la formation d'un delta (marée, houle, action fluviale). Selon cette classification (fig.5-1) le delta du Nestos paraît être un delta influencé plutôt par la houle, donc un delta de type Rhône. Les recherches réalisées vérifient ceci malgré quelques différences dues aux particularités qui existent toujours. La particularité la plus importante est que le delta du Nestos présente un ancien estuaire (système d'estuaires) à l'Ouest de l'estuaire actuel. Le résultat de ce déplacement est une structure plus complexe avec des exceptions quant à la régularité qui existe dans la sédimentation d'un delta, malgré l'image de mélange qu'il présente. Il s'agit donc d'un delta double de type Rhône.

Les deltas de ce type, en plus de leur schéma morphologique, présentent une série de caractéristiques plus détaillées. Les couches superficielles se composent d'une part d'une série de sédiments continentaux et d'autre part en dessous de ces couches, de sédiments marins de faible profondeur. Les formations continentales représen-

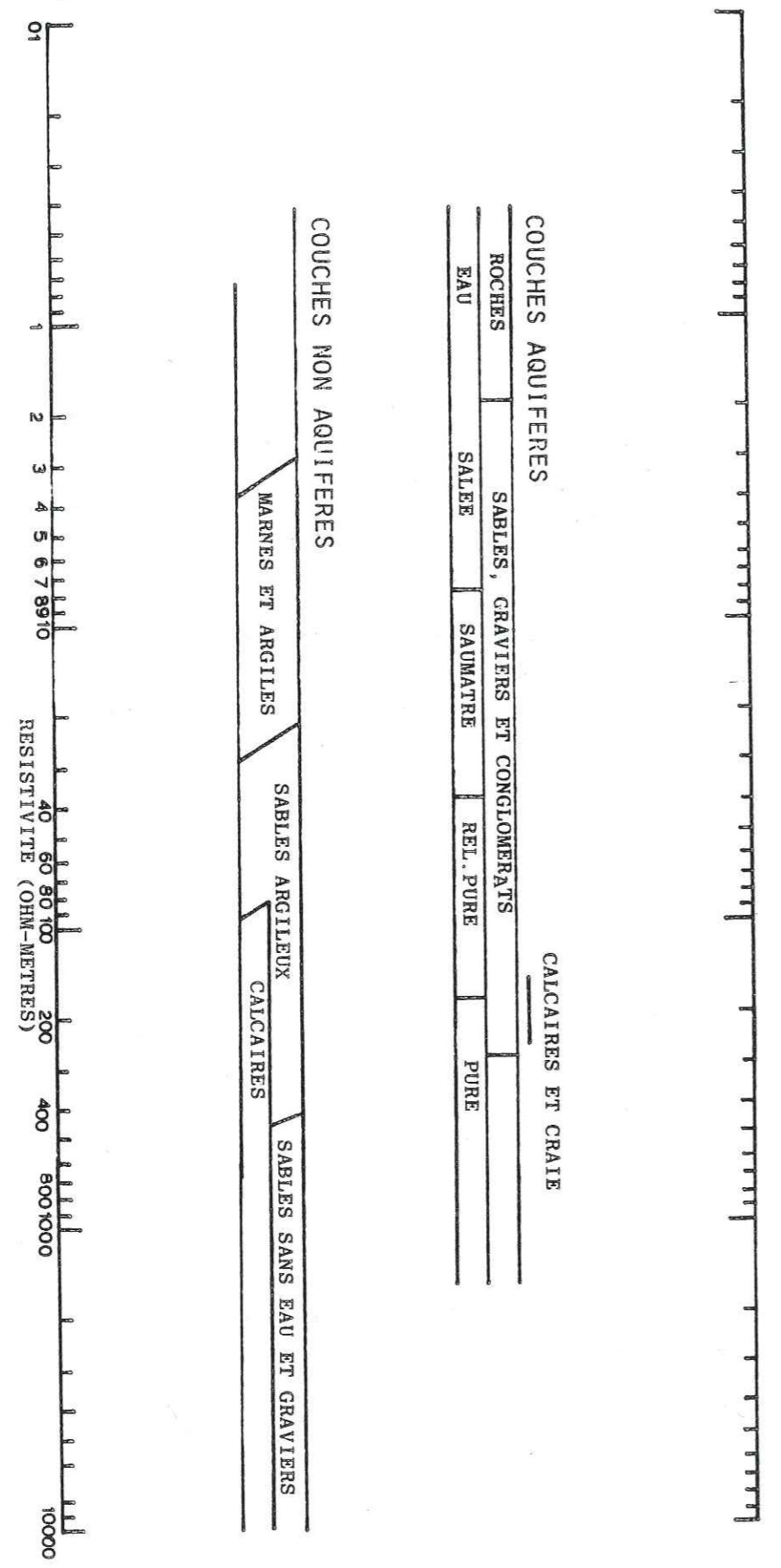
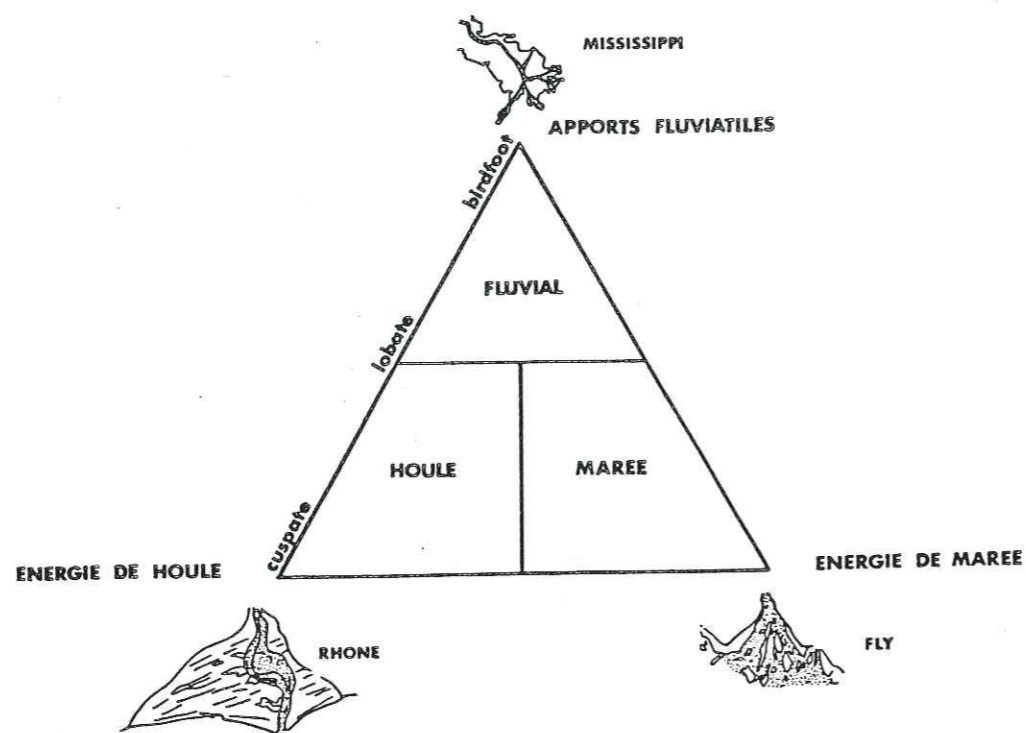


Fig. 4-27 Resistivité des roches et des aquifères (d'après Flathé, 1955 et Hunting)



## CLASSIFICATION DES DELTAS

(Galloway 1975)



### FACIES ET MORPHOLOGIE DES PRINCIPAUX TYPES DE DELTAS

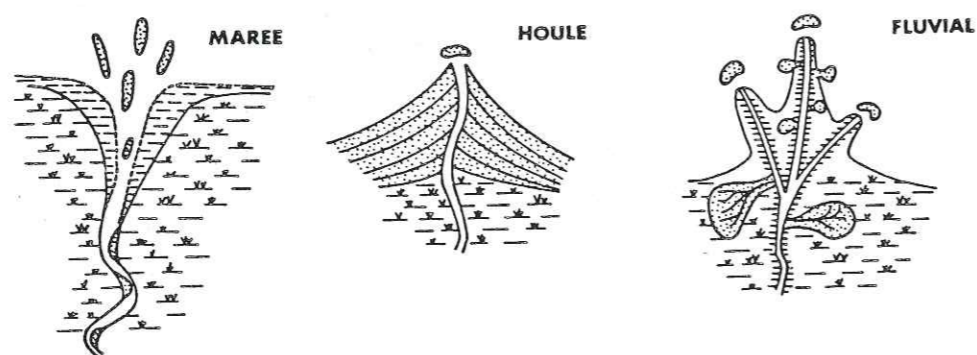


fig. 5-1 La classification générale des deltas

tent toute la gamme de la granulométrie (argiles, limons, sables, graviers, galets, très souvent mélangés). Les formations marines présentent un granoclassement inverse avec des sables au sommet de la série et des argiles à la base. Les déviations de cette classification sont dues aux particularités de chaque delta.

## 5.2. LES LIGNES DES COTES

La construction d'un delta traduit la capacité de la rivière de transporter et déposer les sédiments plus vite que la houle ne peut les redéplacer et les distribuer. La construction d'un delta, pendant une série de stades successifs, est responsable des caractéristiques sédimentologiques des dépôts et par suite de leur caractéristiques hydrogéologiques et hydrodynamiques. Le cycle d'un delta se termine par une phase de destruction qui arrive d'une façon naturelle ou artificielle. La destruction artificielle résulte de l'aménagement de la rivière. Pour le delta du Nestos, après l'aménagement de la rivière, les côtes occidentales sont restées sans alimentation en sédiments et tous les apports sont guidés vers l'estuaire unique actuel. Ces courants marins de la région comprise entre le delta et les îles de Thassos et Thassopoula font que les sédiments sont déplacés et distribués d'une façon différente qu'auparavant. D'autre part, les côtes occidentales subissent l'action destructrice de la houle, la marée étant de toute façon limitée (v.aussi fig. 3-10).

Selon les cartes topographiques des années successives, et selon les observations de gens qui habitent dans la région côtière (fig.5-2, 5-3, 5-4), le delta était dans une phase constructive active avant l'aménagement de la rivière.



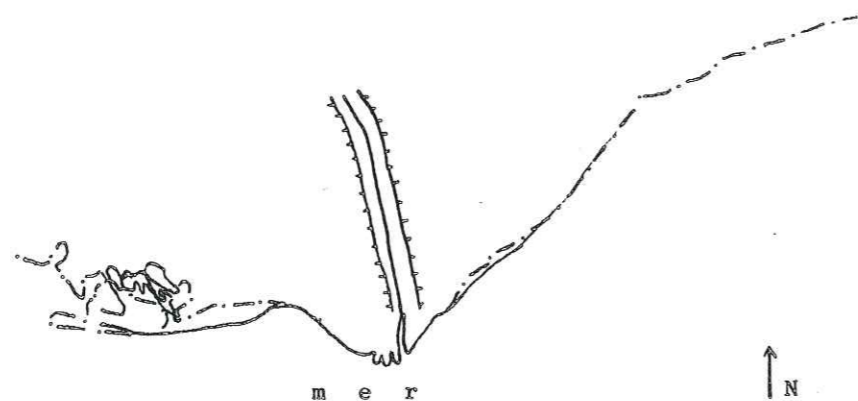


fig. 5-2 ——— ligne de côtes en 1954  
 ——— " " " 1966

On voit que les changements ne concernent que les côtes occidentales

### 5.3. PROFILS SOUS-MARINS

La formation du prodelta et du talus est, avant tout, influencée par la présence des îles Thassos et Thassopoula. Ces îles constituent les derniers points d'affleurement du massif du Rhodope. La présence de ces îles (Thassopoula à l'échelle locale et Thassos à l'échelle plus générale) a fonctionné comme un barrage naturel, pour les sédiments qui arrivaient à la mer transportés par la rivière. Ce barrage n'avait pas permis la formation d'un prodelta et d'un talus sous-marin typique, ni la distribution régulière des sédiments transportés aussi bien que des matériaux en suspension. La seule exception est la région orientale du delta, où la direction générale de transport des matériaux se trouve en dehors du rayon d'action de ces îles. Par contre, la région qui correspond aux embouchures occidentales est fortement influencée par la présence des îles et la plus influencée est encore la région qui correspond aux embouchures centrales du delta, qui se trouve juste en face de ces îles. Tout ceci n'avait pas un effet important sur la forme du delta, puisque la rivière et la houle étaient les facteurs principaux, mais ceci accélérât la formation du delta (fig. 5-5).

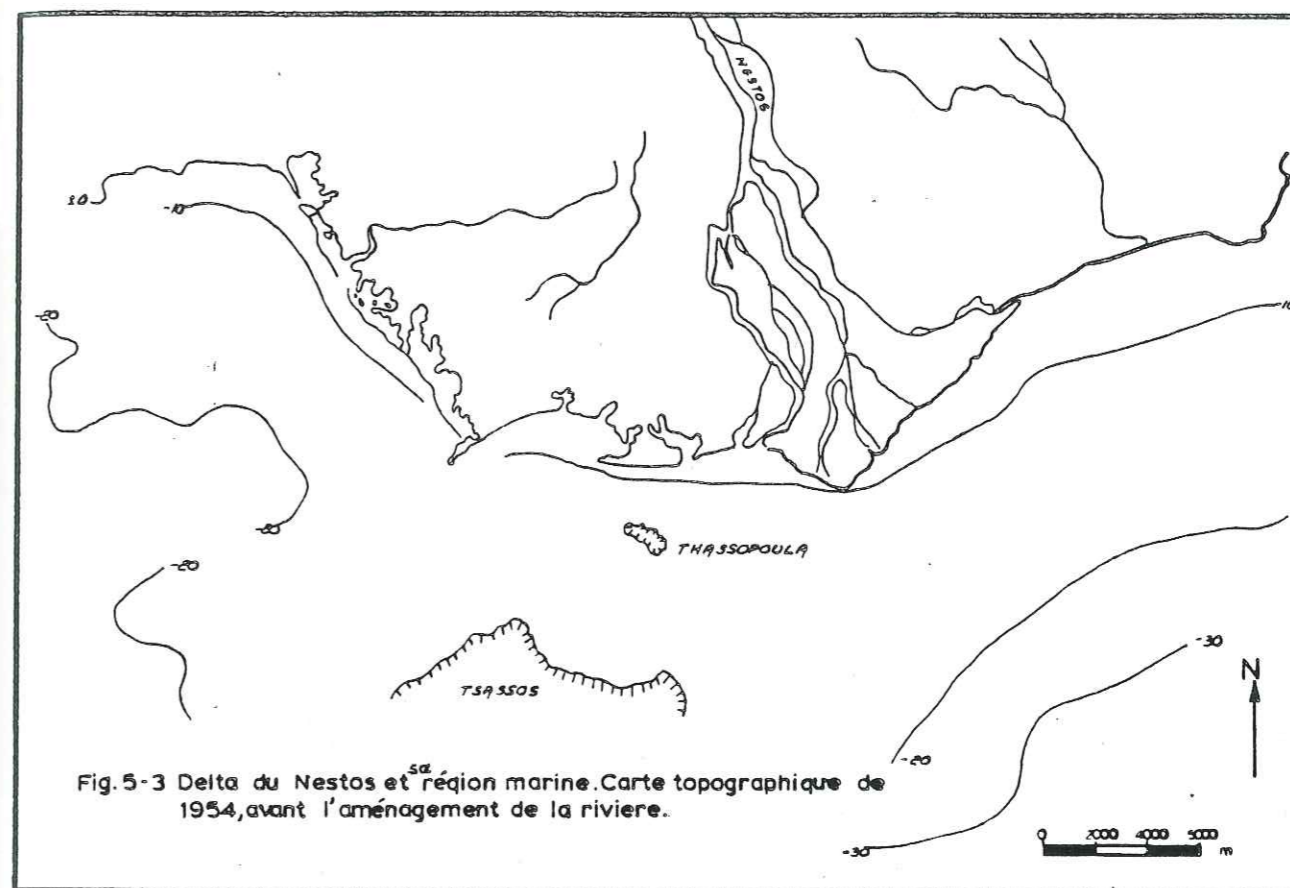


Fig. 5-3 Delta du Nestos et sa région marine. Carte topographique de 1954, avant l'aménagement de la rivière.

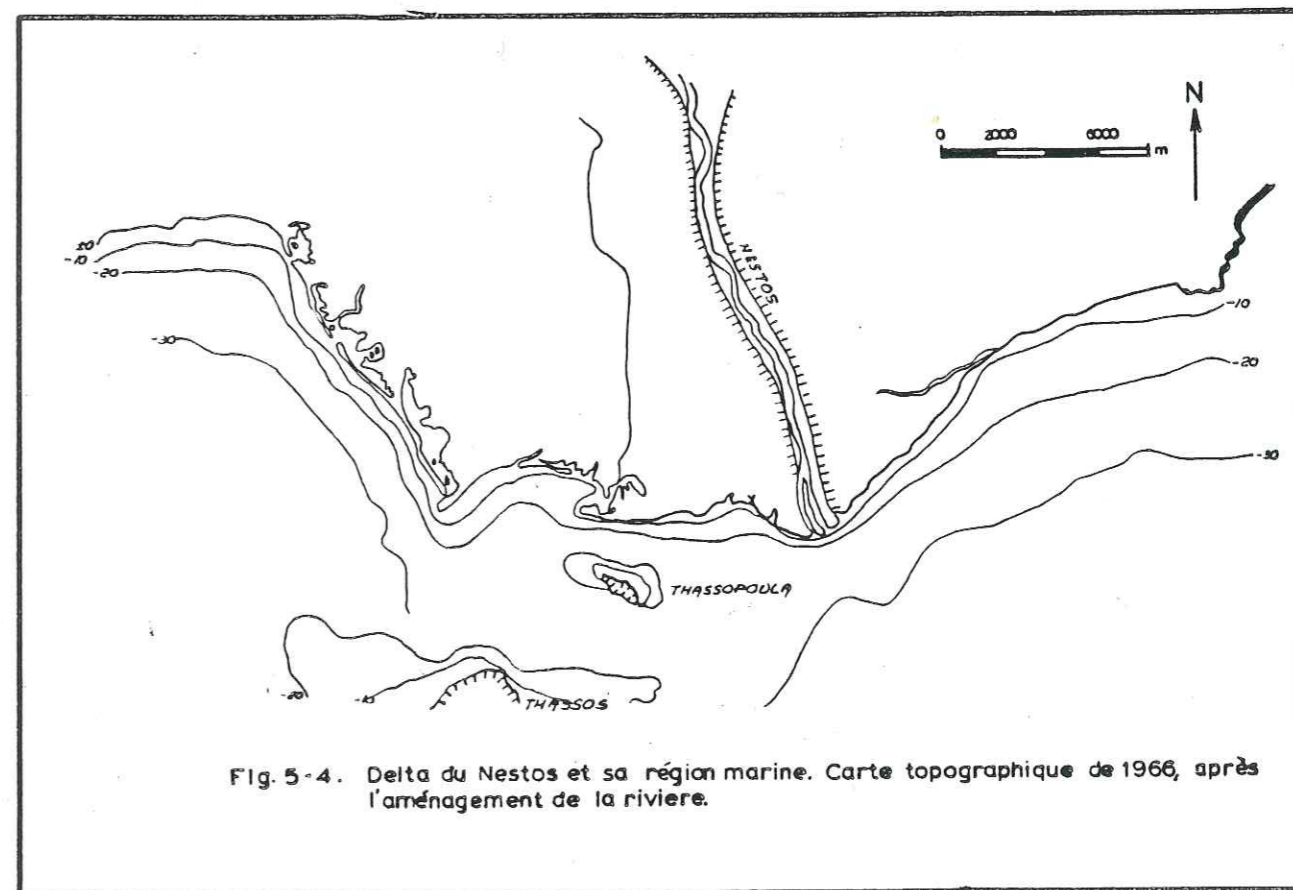


Fig. 5-4. Delta du Nestos et sa région marine. Carte topographique de 1966, après l'aménagement de la rivière.



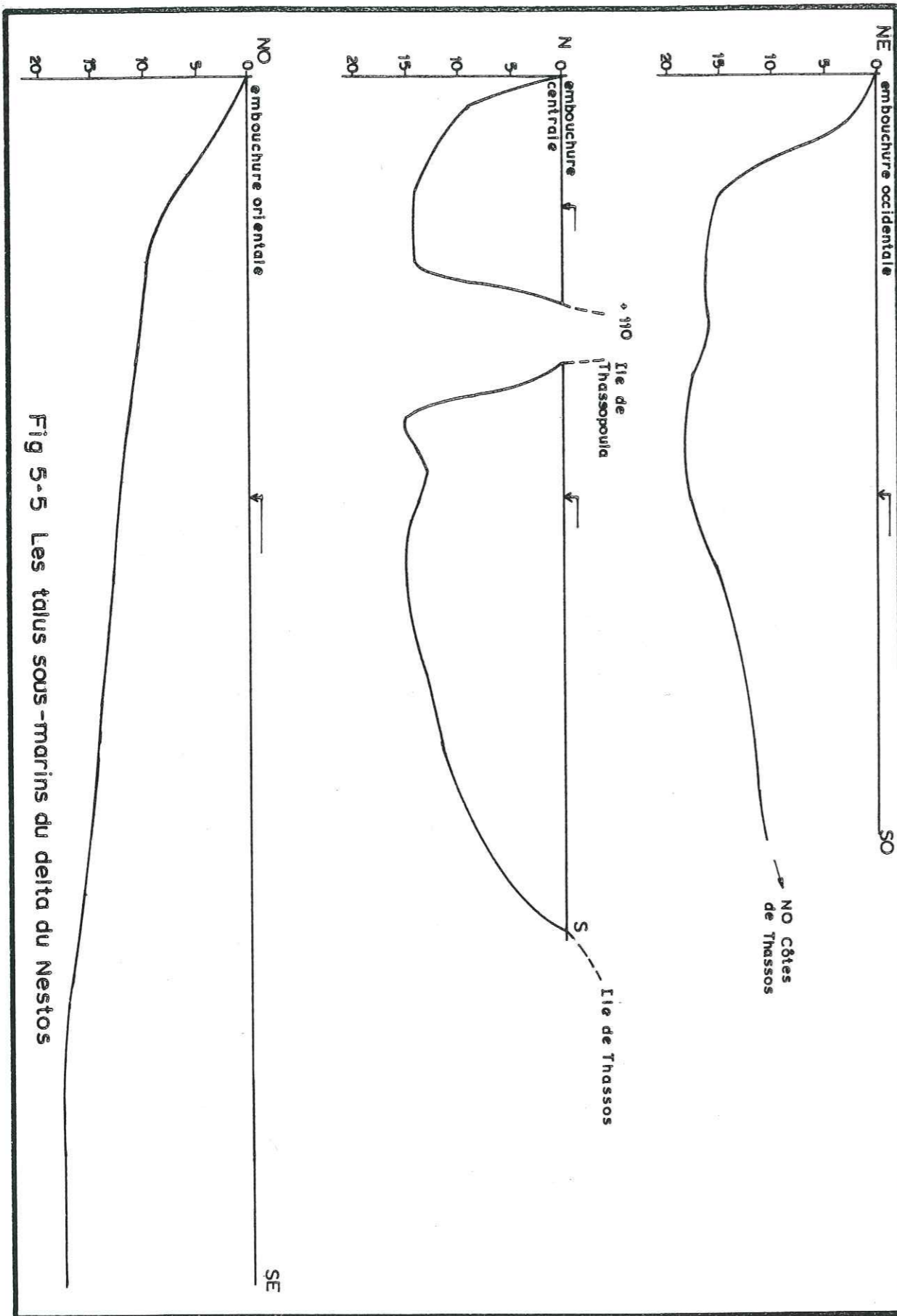


Fig 5-5 Les talus sous-marins du delta du Nestos

#### 5.4. L' EFFET DE LA HOULE

L' effet principal de la houle est le classement et la redistribution des sédiments transportés par la rivière. Le résultat de tout ceci est la formation des lignes des côtes sous la forme de côtes simples, de barrières ou de pointes. Le type de la formation de la côte, sous un régime de houle donné, dépend du régime de transport des sédiments et du régime des autres facteurs qui influencent la formation des côtes (marée, vents, climat etc.). D'autre part la géométrie des formations deltaïques ne dépend pas seulement de la grandeur de la houle et de sa distribution, mais aussi de la capacité de la rivière pour le transport des sédiments. Pour le delta du Nestos, cette capacité étant donnée, il semble que les autres facteurs participaient vivement à la formation des côtes, au moins pour le dernier stade de l'évolution du delta.

Il y a trois types de côtes dans le delta du Nestos, qui correspondent aux régions orientale, centrale et occidentale (fig.5-6, 5-7, 5-8).

Les côtes occidentales. Il est bien confirmé par les anciennes cartes topographiques (v.aussi ch.4), qu'elle est la région contenant la plupart des anciens lits de la rivière, donc d'apports de sédiments en abondance. Mais cette région est exposée, sans limites, à l'action de la houle.

Ceci a provoqué la formation de barrières typiques, tout le long de cette région. La présence de ces barrières est vérifiée aussi pour des stades plus anciens du delta, par des forages réalisés dans cette région.

Les côtes centrales. Dans ce secteur le transport des sédiments était aussi élevé tandis que l'action de la houle était relativement limitée à cause de la présence des barrages naturels, des îles Thassopoula et Thassos. D'autre part, dans cette région, l'effet des courants marins devient sensible et la formation des barrières n'est pas typique et permanente, sauf la grande barrière de Keramoti.



Les côtes orientales. Dans cette région la forme de la côte est bien différente. Il s'agit de côtes simples d'une région où les lits de la rivière sont limités ; les sédiments proviennent des débordements de la rivière et l'effet de la houle prédomine dans la répartition des dépôts.

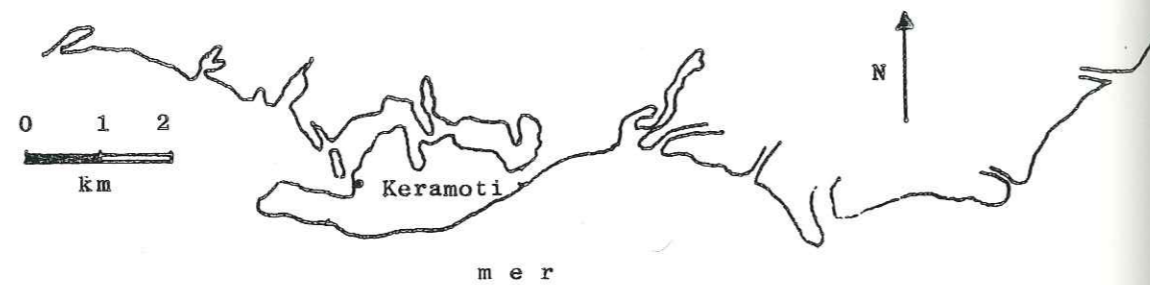


fig. 5-6 Delta du Nestos. Les côtes centrales (vers le Sud)

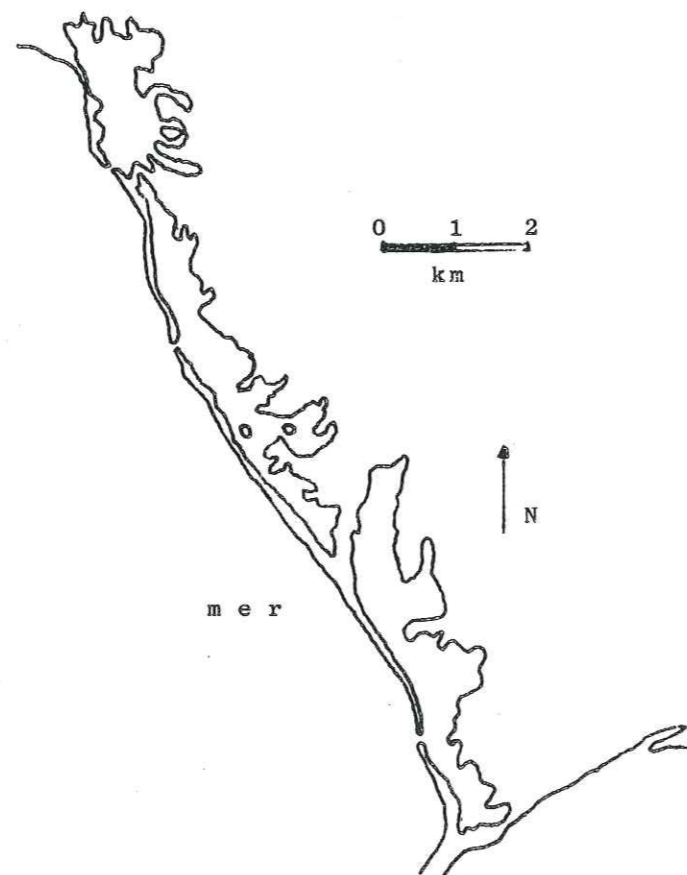


fig. 5-7 Delta du Nestos. Les côtes occidentales

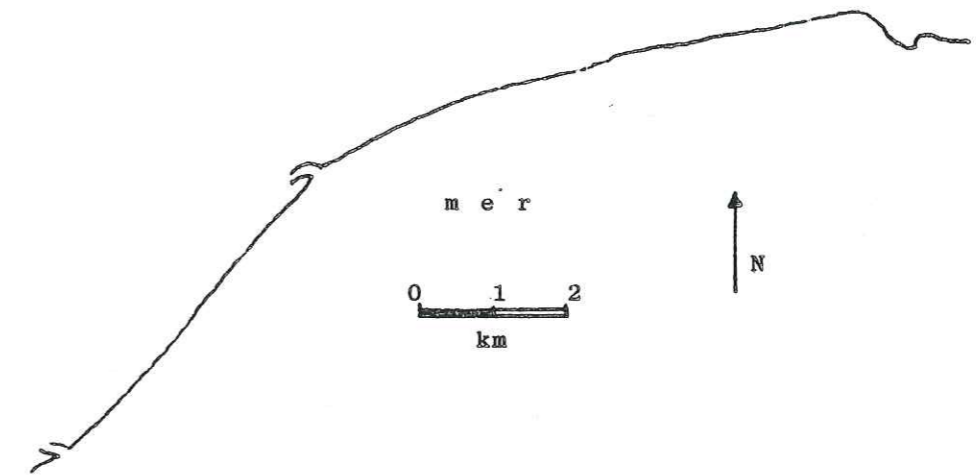


fig. 5-8 Delta du Nestos. Les côtes orientales.

### 5.5. LE TRANSPORT DES SEDIMENTS

Les facteurs qui contrôlent la quantité et la périodicité du transport des sédiments, sont nombreux. Les rivières, qui se caractérisent par une valeur élevée de sédiments en suspension, forment des plate-formes sous-marines d'extension remarquable. Les barrages naturels des îles Thassopoula et Thassos n'ont pas permis la construction de cette forme typique, sauf dans la région au SE du delta. D'autre part la forme de l'enbouchure du delta, en ce qui concerne son dernier stade d'évolution, témoigne de la présence importante et continue de matériaux en suspens dans l'eau de la rivière. Dans tous les cas de deltas de type Rhône, on trouve des conditions analogues pour le transport des sédiments. Le transport abondant et continu des sédiments par la rivière est confirmé par les résultats des forages, qui montrent une granulométrie variable dans toutes les formations deltaïques. Il en résulte que la plupart des nappes aquifères profondes se comportent comme des nappes semi-captives, puisqu'elles sont entourées par des formations qui présentent, presque toujours, une certaine perméabilité, même très limitée.



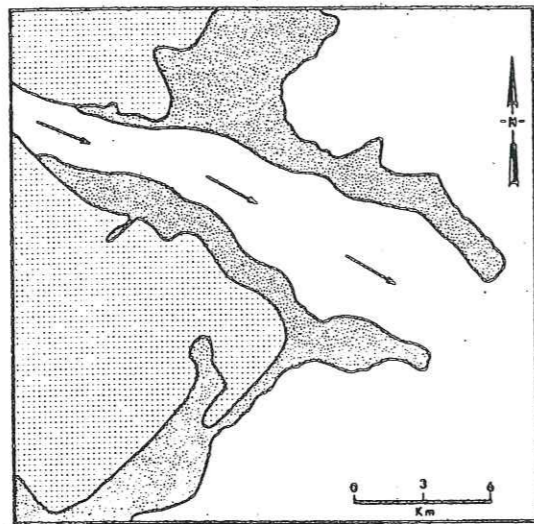


fig. 5-9 Type d'embouchure d'un delta formant plate-forme sous-marine importante (Coleman, Wright, 1975)

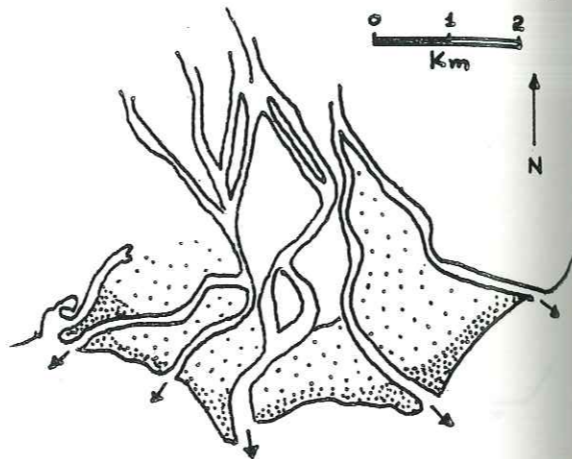


fig. 5-10 Le dernier système d'embouchures du Nestos (avant l'aménagement)

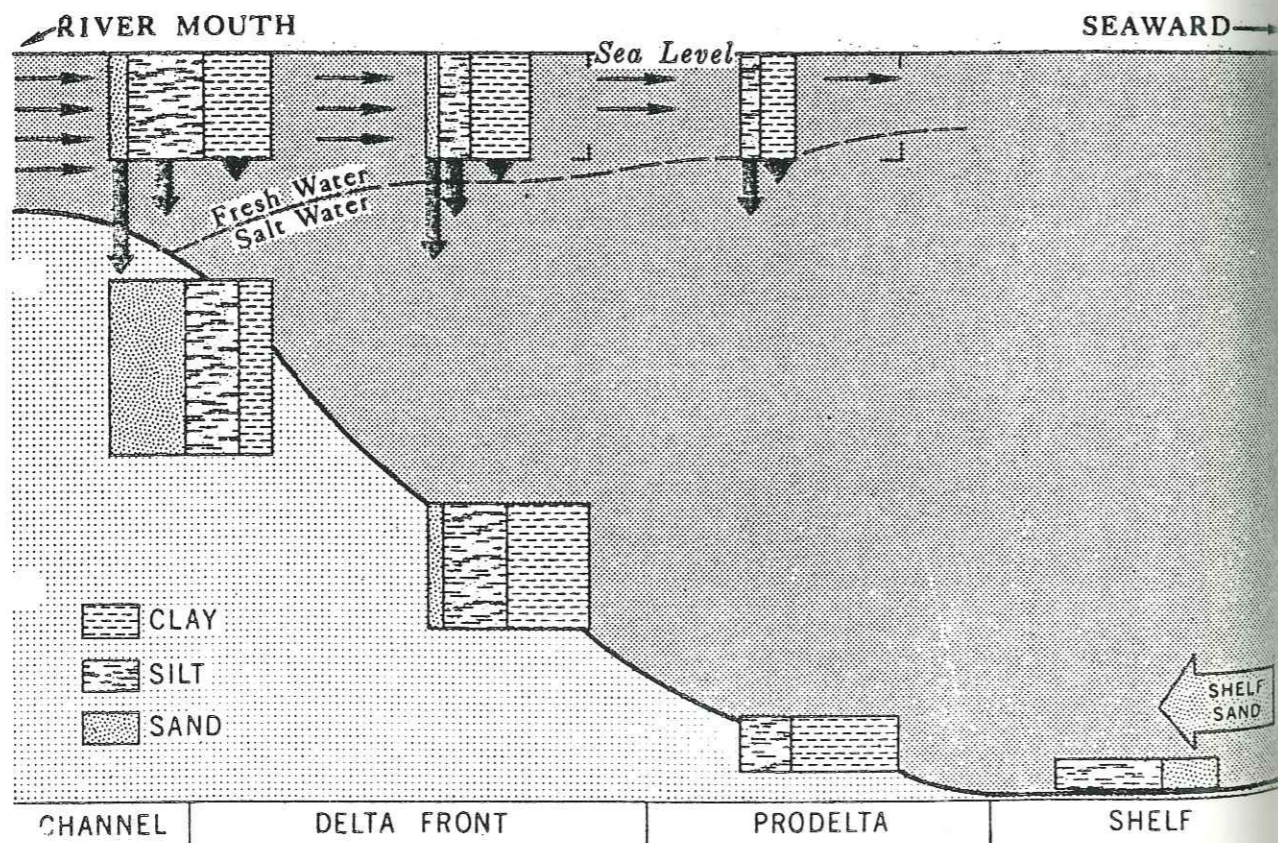


fig. 5-11 Action de dépôts des sédiments à l' embouchure de la rivière (Schéma modifié par Scruton, 1960)

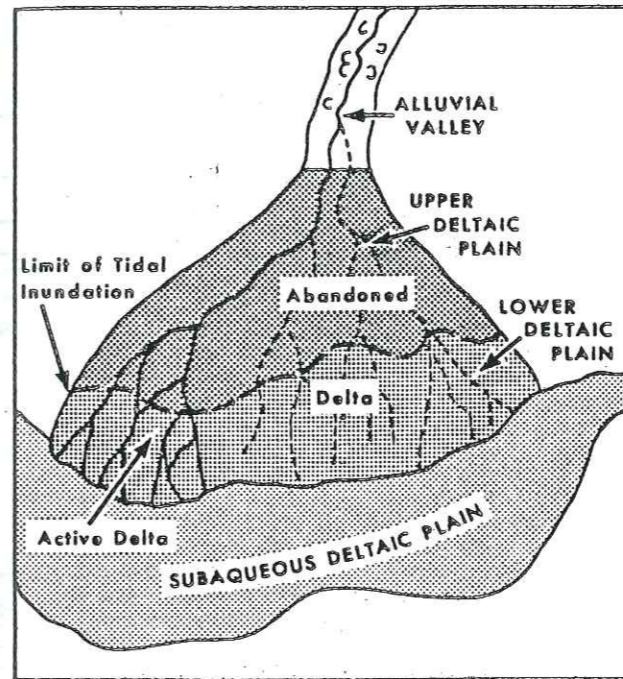


fig. 5-12 Les parties diverses du delta et de sa région environnante (Coleman, 1976)

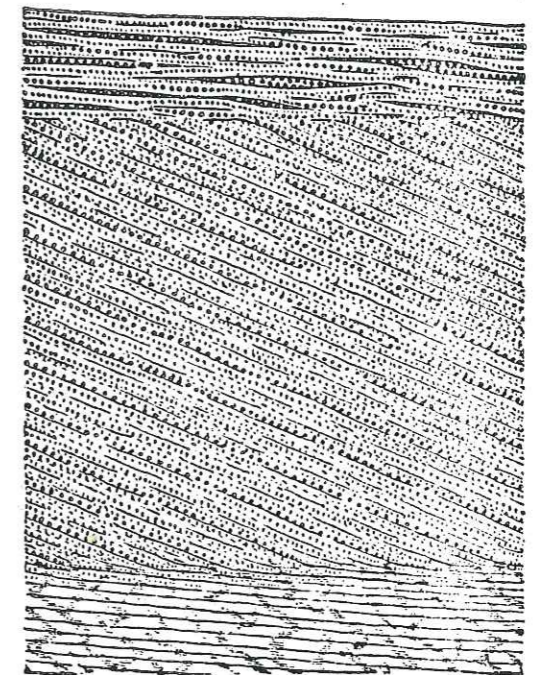


fig. 5-14 Coupe verticale d'un delta (Gilbert, 1885 dans le Blanc 1974)

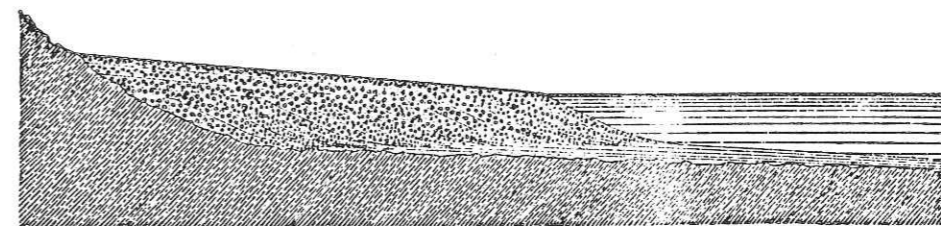


fig. 5-13 Coupe idéale d'un delta (Gilbert, 1885 dans le Blanc 1974)



**CYCLE DE DEVELOPPEMENT ET D'ABANDON D'UNE BARRE DE CHENAL**

(Allain, Laurier, Thouvenin, 1979)

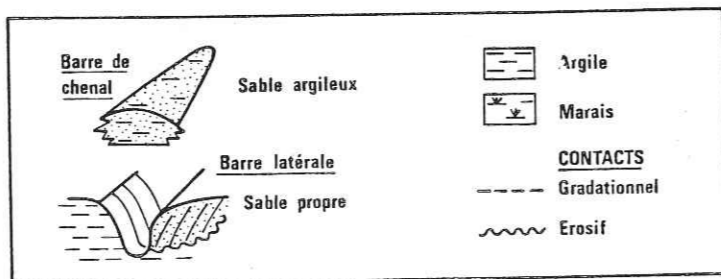
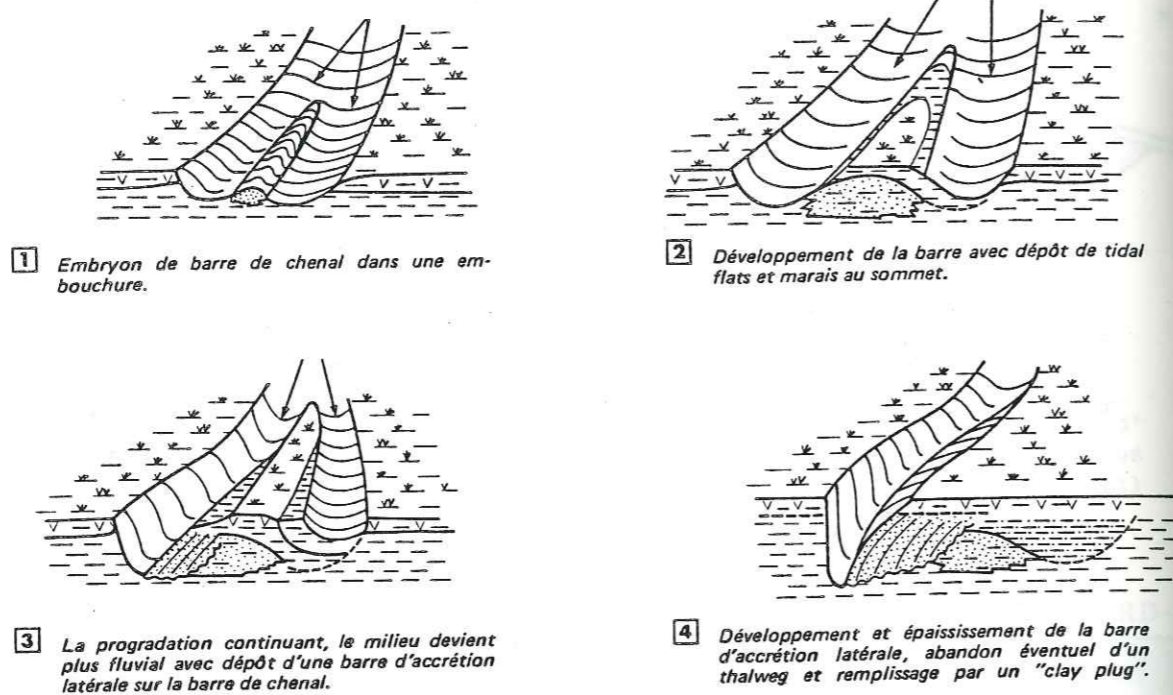
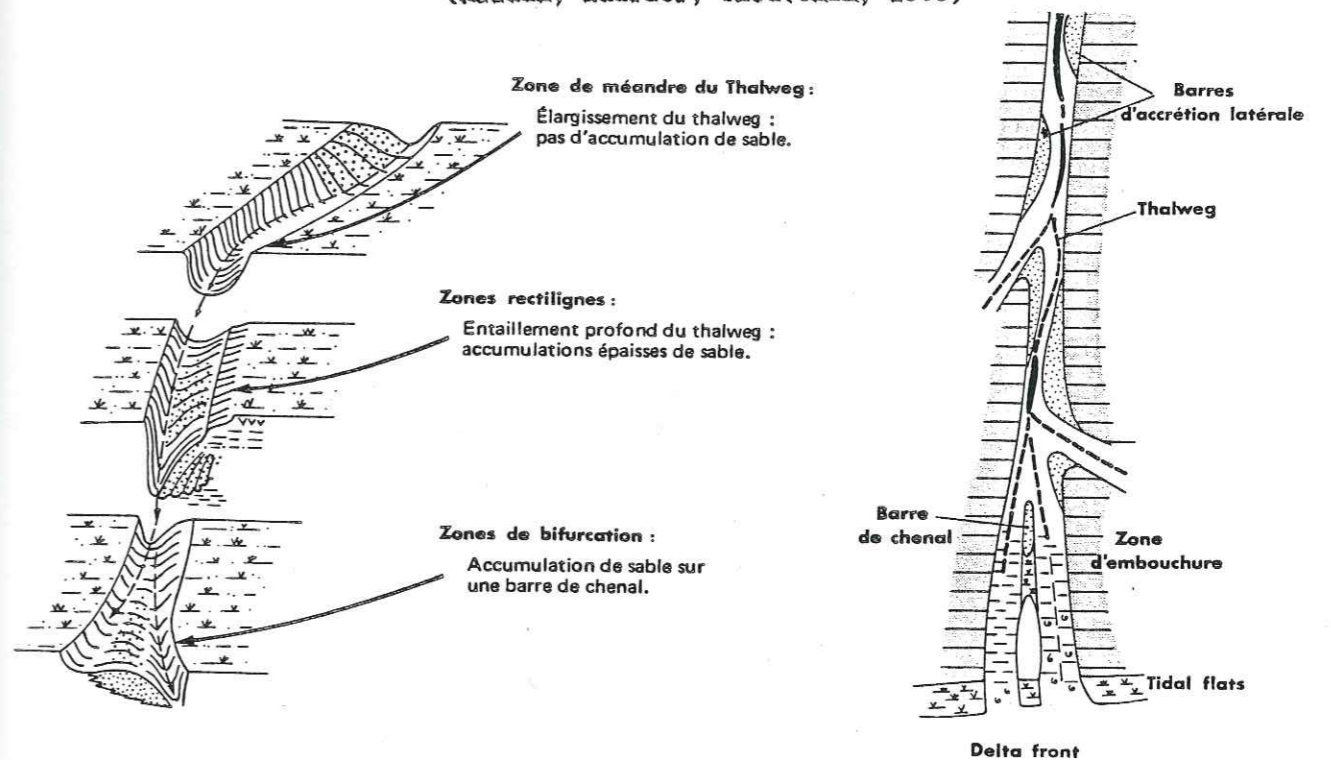


fig. 5-15 Formation des systèmes de nappes aquifères successives dans une plaine deltaïque. Pour le delta du Nestos cette formation typique est vérifiée par les sondages électriques (région de réalisation) et par les forages F1 - F10 (région occidentale du delta). Dans la région orientale ce processus est bien limité.

**MORPHOLOGIE SCHEMATIQUE des ACCUMULATIONS SABLEUSES**

(Allain, Laurier, Thouvenin, 1979)



**REPARTITION des SEDIMENTS dans les DISTRIBUTAIRES**

fig. 5-16 Complémentaire de la fig. 5-15. Cette formation typique correspond aux régions côtières de la partie occidentale du delta du Nestos.



### 5.6. ANALYSE MORPHOMETRIQUE DU DELTA

Pour qu'on puisse établir une relation entre l'action fluviale et l'action marine, qui ont influencé la morphologie du delta, il est nécessaire de faire une description quantitative de la configuration du delta. Sur ce sujet, il y a plusieurs méthodes proposées par divers auteurs. Parmi ces méthodes nous en avons envisagé une, proposée par WRIGHT et COLEMAN (1973), pour deux raisons. D'abord, du point de vue statistique, cette méthode s'applique bien pour les deltas de type Rhône, c'est-à-dire pour les deltas dont la formation est plutôt influencée par la rivière et par la houle de la mer. Ensuite cette méthode explique d'une façon plus détaillée la structure sédimentologique du delta, donc la formation des systèmes de nappes aquifères. Quelques modifications de la méthode sont dues aux particularités du Nestos et surtout aux différences sédimentologiques entre la partie occidentale et la partie orientale du delta. Malgré ces différences, cette méthode est encore valable et applicable.

La configuration des deltas est plus ou moins typique, avec une proéminence caractéristique vers la mer. L'extension de cette proéminence comparée à la largeur du delta varie parmi les divers deltas. Cette relation peut s'exprimer par le quotient  $L_m/W$ ,  $L_m$  étant la longueur de la proéminence (perpendiculaire à la ligne de la côte) et  $W$  étant la largeur maximale de cette proéminence. Plus la valeur de ce quotient est élevée, plus les côtes sont irrégulières.

Plus précisément, on peut exprimer, d'une façon quantitative, la distribution du volume des sédiments deltaïques. Le volume total  $V$  d'une proéminence deltaïque, incluant la partie sous-marine, est:

$$V = \int_{40}^h a dz$$

$a$  étant la région au dessus d'une isohypse donnée et  $z$  la distance verticale de l'isohypse de base. Pour la plupart des deltas et surtout pour les deltas de type Rhône (influencés par la rivière et par la houle), la limite marine de la partie sous-marine de la proéminence correspond à l'isohypse de 40ft (12m). Or, l'intégration concerne la profondeur de 40 ft et l'altitude maximale  $h$ , de la proéminence deltaïque.

Si cette proéminence est symétrique, le volume  $V_r$  de la partie droite de la proéminence est égal au volume  $V_l$  de la partie gauche. Dans le cas d'une accumulation de sédiments dans une partie du delta, la proéminence s'incurve et son obliquité s'exprime par le quotient  $S_k = V_r/V_l$ ,  $V_r$  étant le volume des sédiments pour la partie droite et  $V_l$  le même volume pour la partie gauche.

Pour les deltas tranchants, le volume de sédiments augmente vers l'axe de la proéminence, tandis qu'il diminue vers les bouts du delta. Le volume de sédiments des deltas, influencés par la houle conjointement à un apport important de sédiments continentaux, est distribué dans une direction parallèle à la direction générale des côtes.

Pour qu'on exprime cette distribution quantitative chaque partie du delta est divisée d'une façon indiquée dans la fig.5-18. Le volume  $v_j$ , de chaque division  $j$  est calculé et le volume cumulatif  $V_j$ , de l'axe à l'intervalle  $j$  est donné comme:

$$V_j = \sum_{j=1}^j v_j$$

Le  $V_j$  est divisé par le volume total  $V_n$  de la partie considérée pour l'estimation du volume cumulatif (sans dimensions)  $V'_j$ .

Le volume de distribution (sans dimensions) est représenté par le diagramme  $V'_j$  (axe vertical) -  $x'_j$  (distance  $x_j$  de l'axe de la proéminence, divisée par la demi-largeur de la proéminence  $x_n$  qui est la largeur maximale d'une partie de la proéminence) (fig. 5-18).

En principe une droite avec une pente égale à l'unité correspond à une côte droite simple (cas de la partie orientale du delta, en ce qui concerne la courbe isohypse de 12m). D'autre part la convexité limitée de la courbe, qui représente la partie occidentale, témoigne de nouveau que cette partie du delta fut la partie active, pendant le stade le plus récent de la formation du delta. On peut, donc, ajouter cette indication quantitative aux indications qualitatives (morphologie des côtes, résultats des forages etc.). Il s'agit donc d'un double delta de type Rhône, dont les lits actifs principaux ont été déplacés de l'ouest vers l'est, pendant le dernier stade de la formation du delta (fig.5-19).



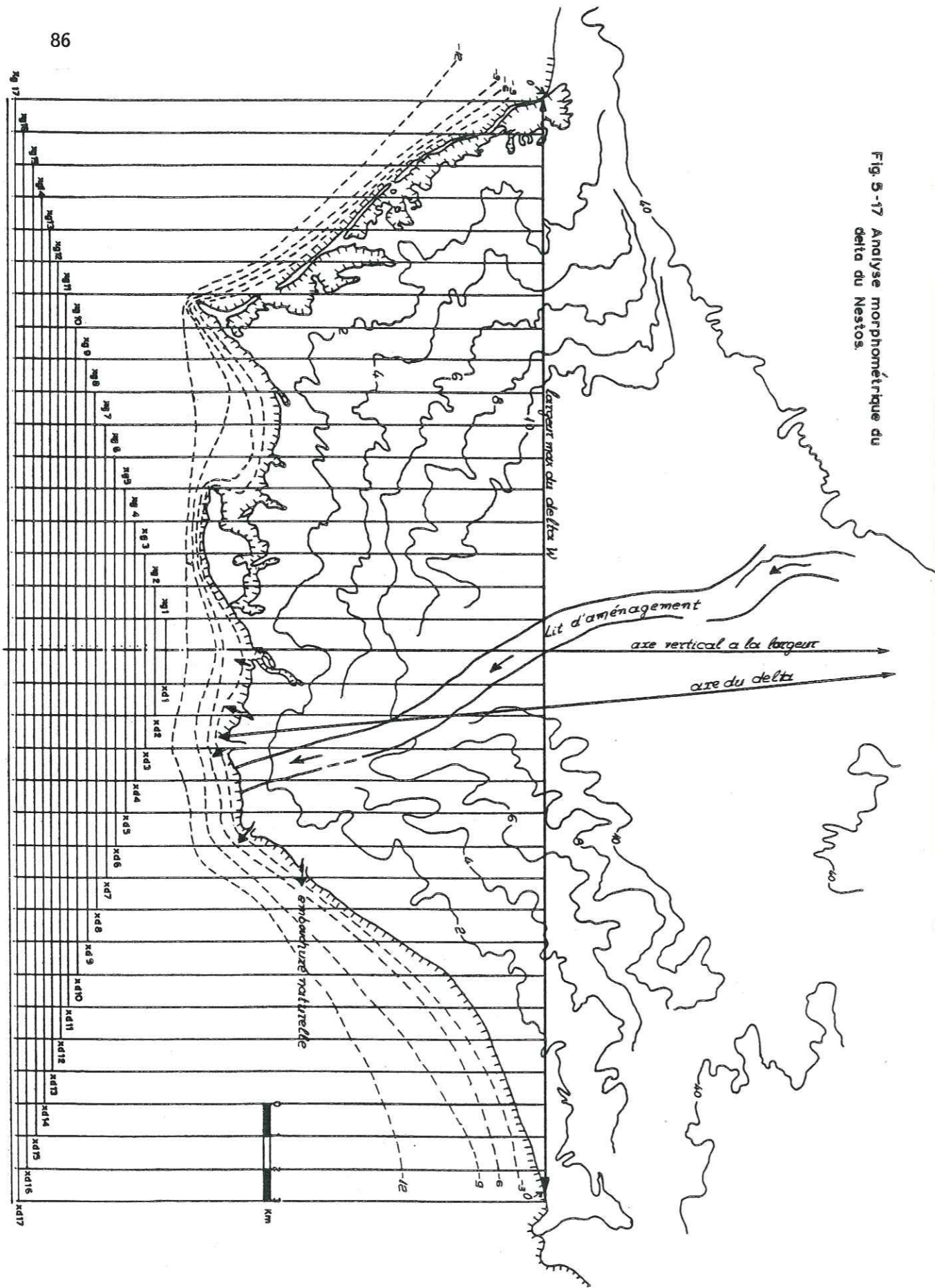


Fig 5-17 Analyse morphométrique du delta du Nestos.

partie occidentale du delta

fragm.	a (km <sup>2</sup> )	h max (m)	$h' = \frac{h+12}{2}$ (km)	$v_j = a \cdot h'$ (km <sup>3</sup> )	$\sum_{j=1}^n v_j$	$V'_j = \sum v_j / V_n$	$x_j$ (km)	$x'_j = x_j / 17$
X 1	10.8	12	0.012	0.1296	0.1296	0.0788	1	0.0588
X 2	10.8	12	0.012	0.1296	0.2592	0.1577	2	0.1177
X 3	10.8	12	0.012	0.1296	0.3888	0.2365	3	0.1765
X 4	10.7	12	0.012	0.1284	0.5172	0.3146	4	0.2353
X 5	10.7	11	0.0115	0.1231	0.6403	0.3894	5	0.2941
X 6	10.6	11	0.0115	0.1219	0.7622	0.4636	6	0.3529
X 7	10.5	11	0.0115	0.1208	0.8830	0.5370	7	0.4118
X 8	10.6	10	0.011	0.1166	0.9996	0.6080	8	0.4706
X 9	10.5	10	0.011	0.1155	1.1151	0.6782	9	0.5294
X10	10.7	9	0.0105	0.1124	1.2275	0.7466	10	0.5882
X11	10.9	8	0.01	0.1090	1.3365	0.8129	11	0.6471
X12	10.8	6	0.009	0.0972	1.4337	0.8720	12	0.7059
X13	8.0	4	0.008	0.0640	1.4977	0.9109	13	0.7647
X14	7.0	2	0.007	0.0490	1.5467	0.9407	14	0.8235
X15	6.0	1	0.0065	0.0390	1.5857	0.9644	15	0.8824
X16	5.0	1	0.0065	0.0325	1.6182	0.9842	16	0.9412
X17	4.0	1	0.0065	0.0260	1.6442	1.0000	17	1.0000

partie orientale du delta

fragm.	a (km <sup>2</sup> )	h max (m)	$h' = \frac{h+12}{2}$ (km)	$v_j = a \cdot h'$ (km <sup>3</sup> )	$\sum_{j=1}^n v_j$	$V'_j = \sum v_j / V_n$	$x_j$ (km)	$x'_j = x_j / 17$
X 1	10.9	12	0.012	0.1308	0.1308	0.1056	1	0.0588
X 2	11.1	11	0.0115	0.1277	0.2585	0.2086	2	0.1177
X 3	11.3	10	0.011	0.1243	0.3828	0.3090	3	0.1765
X 4	11.2	9	0.0105	0.1176	0.5004	0.4039	4	0.2353
X 5	10.8	8	0.01	0.1080	0.6084	0.4910	5	0.2941
X 6	10.7	7	0.0095	0.1017	0.7101	0.5731	6	0.3529
X 7	10.2	6	0.009	0.0918	0.8019	0.6472	7	0.4118
X 8	9.1	5	0.0085	0.0774	0.8793	0.7097	8	0.4706
X 9	7.5	4	0.008	0.0600	0.9393	0.7581	9	0.5294
X10	6.8	4	0.008	0.0544	0.9937	0.8020	10	0.5882
X11	6.1	3	0.0075	0.0458	1.0395	0.8390	11	0.6471
X12	5.6	3	0.0075	0.0420	1.0815	0.8729	12	0.7059
X13	5.3	2	0.007	0.0371	1.1186	0.9028	13	0.7647
X14	5.1	1	0.0065	0.0332	1.1518	0.9296	14	0.8235
X15	4.7	1	0.0065	0.0306	1.1824	0.9543	15	0.8824
X16	4.4	1	0.0065	0.0286	1.2110	0.9774	16	0.9412
X17	4.3	1	0.0065	0.0280	1.2390	1.0000	17	1.0000



Une autre façon d'exprimer la distribution (numérique cette fois) du volume des sédiments, est l'utilisation de l'index "B" (index de la distribution de la proéminence). Il s'agit de la valeur de  $x'_j$  (sans dimensions), telle que le volume  $V'_j$  (sans dimensions) est égal à 0,5 (valeur qui correspond à une côte droite, tandis qu'une côte digitale (forme d'acuité) correspond à la valeur de 0,0. On a donc:

$$\begin{aligned} \text{Pour la partie occidentale } B_{oc} &= 0.38 \\ \text{" " " orientale } B_{or} &= 0.30 \\ \text{et } B = (B_{oc} + B_{or})/2 &= 0.34 \quad (\text{fig. 5-19}) \end{aligned}$$

La fig. 5-18 présente les courbes analogues d'autres deltas pour qu'on puisse les comparer avec celle du Nestos.

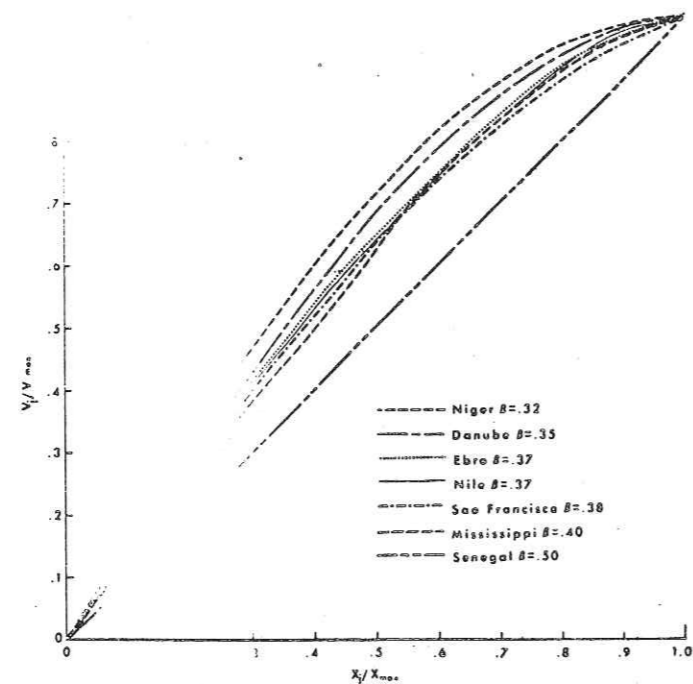


fig. 5-18 Distribution (sans dimensions) du volume de quelques deltas (WRIGHT et COLEMAN, 1973)

De la relation entre les apports à la mer, par le réseau hydrographique et l'action de la houle, résulte la configuration du front du delta. Il est bien confirmé que la concavité de profils sous-marins

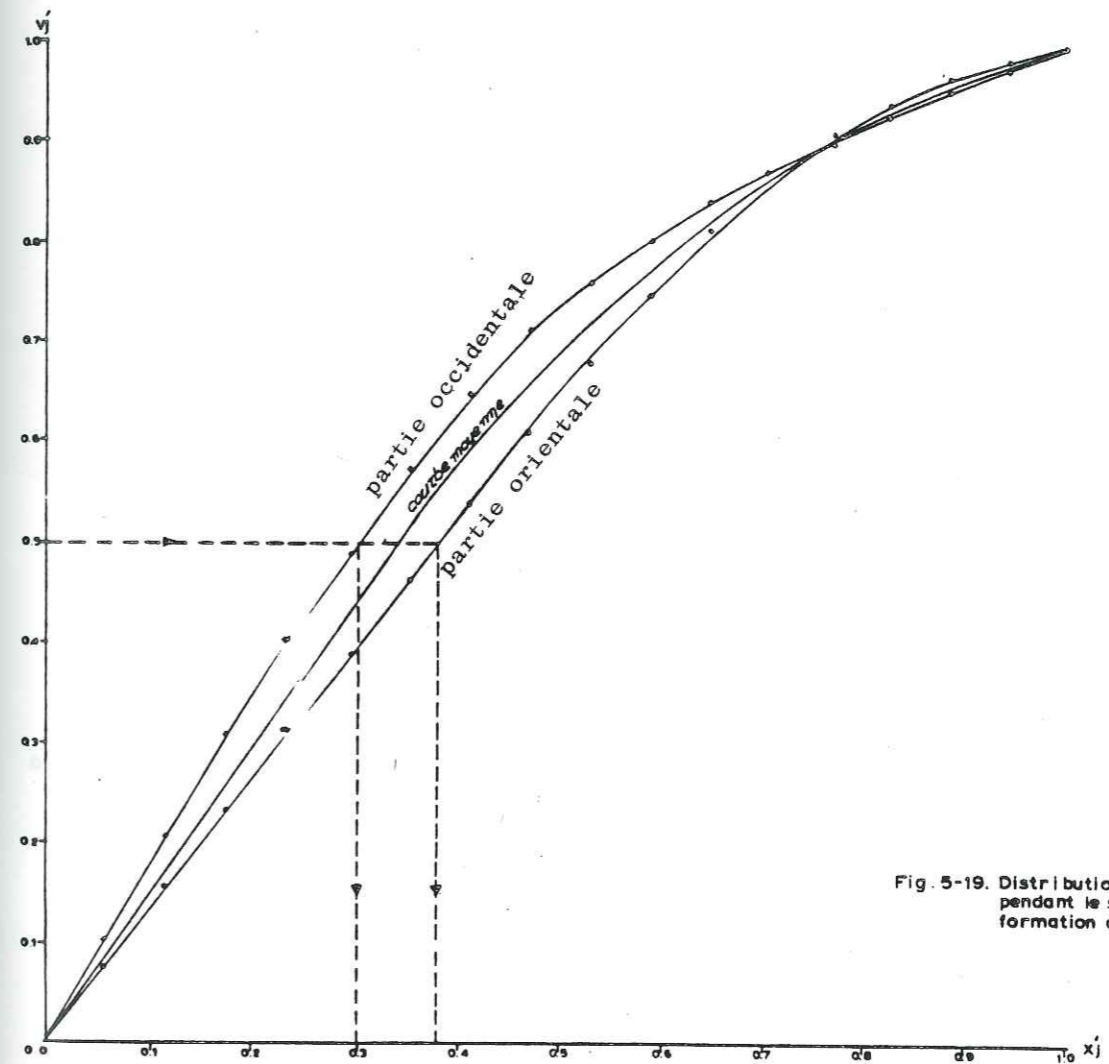


Fig. 5-19. Distribution du volume des sédiments pendant le stade le plus récent de la formation du delta.



est due à l'action de la houle, tandis que la convexité se forme quand les apports détritiques sont en quantité supérieure à la capacité de distribution de la houle. La pente générale d'un talus sous-marin, s'exprime par l'intégrale hypsométrique sous-marine.

$$HI = \int_{-40}^0 (a_s/A_s) dz$$

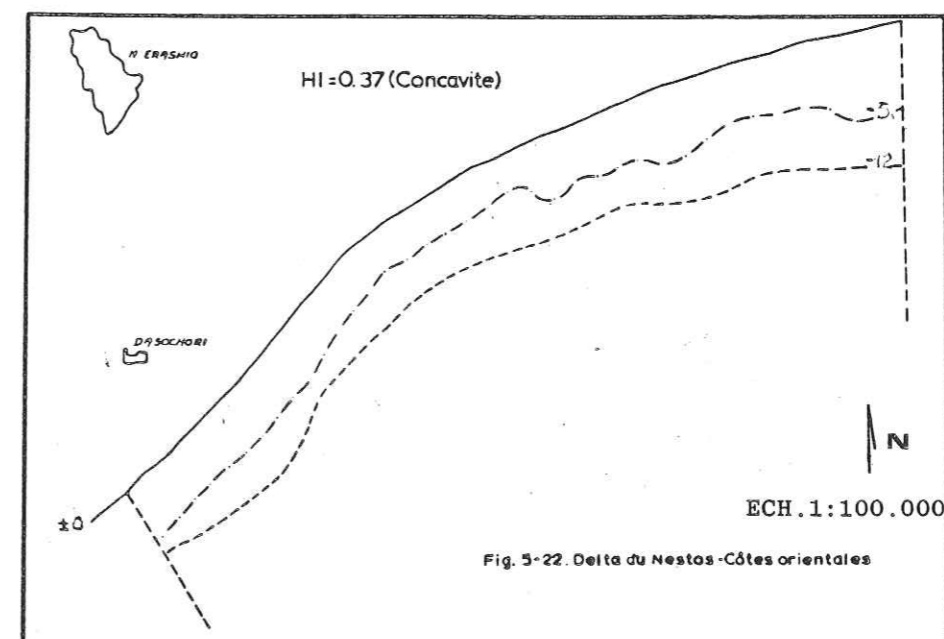
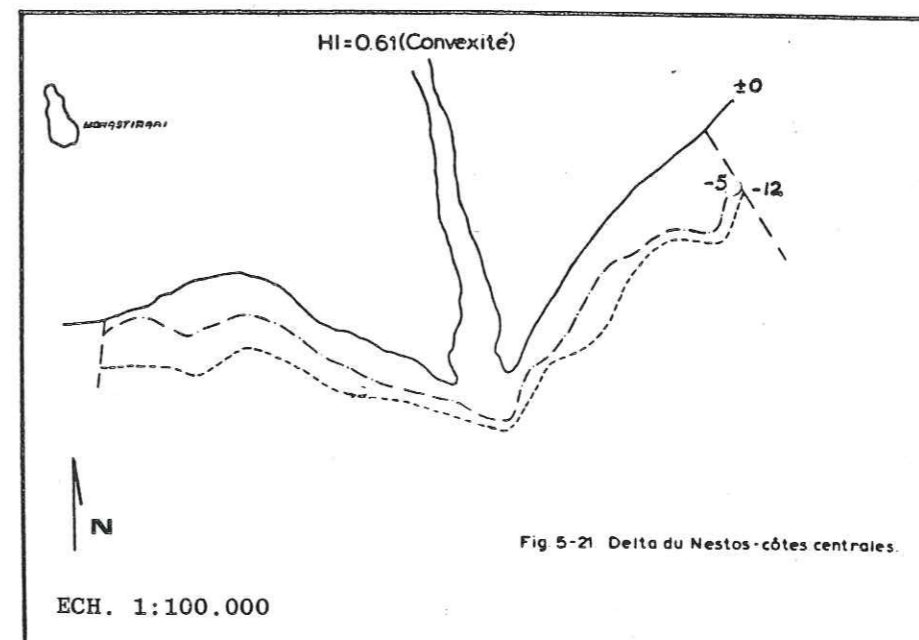
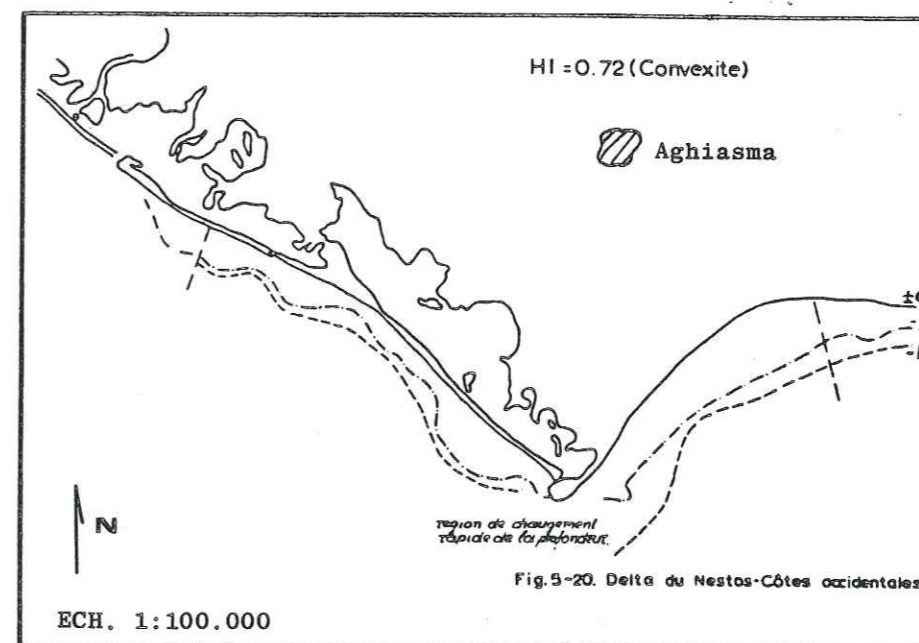
où  $a_s$  est la surface entre une courbe hypsométrique donnée, autour de la proéminence deltaïque et la ligne de la côte,  $A_s$  étant la surface entre la courbe de base (12 m) et la ligne de la côte,  $z$  la distance verticale de la courbe donnée à la courbe de base et  $Z$  la distance verticale totale de la côte de la courbe de base.

La valeur de HI se trouve entre les limites 0 et 1. Des valeurs plus élevées que 0,5 indiquent une convexité et des valeurs plus faibles que 0,5 indiquent une concavité. La valeur de 0,5 correspond à une côte linéaire.

Pour le delta du Nestos on arrive à une convexité pour les côtes occidentales et centrales et à une concavité pour les côtes orientales (fig. 5-20, 5-21, 5-22). Ceci veut dire que dans les zones occidentales et centrales on avait des apports détritiques énormes, dépassant la capacité de la distribution de la houle, tandis que dans la zone orientale la quantité de ces apports était assez limitée, donc il y avait un classement parfait, une distribution régulière sur toute la longueur de la côte.

Tout ceci vérifie les résultats précédents pour le régime différent entre la partie occidentale et la partie orientale du delta. De la différence de classement des sédiments, résulte la formation différente des systèmes de nappes aquifères dans les deux parties du delta.

L'importance de l'application de ces méthodes, dans le cas de deltas, est que l'analyse morphométrique peut fournir des informations sur le régime hydrogéologique avant l'étude hydrogéologique et avant la réalisation des travaux de recherches (forages, sondages électriques etc.).





5.7 QUELQUES DONNEES SUR LA COMPOSITION MINERALOGIQUEDES SEDIMENTS DU DELTA

Pour mieux connaître la distribution des sédiments du delta et les directions de transport, nous avons procédé à l'estimation de la composition minéralogique du remplissage de la plaine deltaïque. Pour cette raison nous avons réalisé des analyses minéralogiques (rayons X) sur divers échantillons du remplissage de la plaine deltaïque. Ni les argiles pures, ni les sables purs n'avaient subi cette analyse, tandis que les matériaux examinés concernaient les mélanges qui se composent d'argiles limoneuses et sableuses ou, plus souvent, de limons argileux et sableux. Chaque échantillon représentait l'échantillon moyen d'une certaine profondeur, du point de vue statistique. L'image des résultats est basée sur la dominance relative des minéraux principaux. Ces résultats sont donnés au tableau suivant (l'indication-signifie la participation de minéraux en traces).

D'une façon ou d'une autre, on ne pouvait pas attendre de résultats spectaculaires de ces analyses, car le nombre des échantillons était limité. Le but de ces analyses était l'apparition de quelques indices supplémentaires sur la distribution des sédiments du delta. On peut donc, observer que:

- Les minéraux dominants, sur les diagrammes de rayonnement, sont les minéraux ordinaires pour les sédiments détritiques-Quartz, Feldspaths, Calcite et Phyllosilicates (Chlorite, Biotite, Illite, etc.).
- Parmi ces minéraux, il y a une prédominance importante de Quartz et de Feldspaths, tandis que la participation des autres minéraux est assez limitée. Ceci veut dire que les sédiments du delta proviennent surtout de l'érosion de roches métamorphiques du massif du Rhodope.
- Malgré la méthode statistique de préparation des échantillons, les différences observées sur la concentration des divers minéraux peuvent être aléatoires en raison des concentrations locales.

forage	profondeur considérée	Quartz	Feldspaths	Carbonates*	Phyllosilicates
F 3	32- 38	+++++	++	-	+
"	85- 97	++++	+++	++	-
"	118-123	+++++	+++	+	-
F 9	63- 70	++++	+++	+	+
"	130-131	+++++	+++	+	+
"	162-164	++++	+++	-	-
F12	36- 42	+++	+++	++	++
"	82- 89	++++	++++	++	-
"	171-181	+++++	+++	+	-
F13	33- 43	+++++	++++	-	-
"	127-131	+++++	++++	+	-
"	182-186	+++++	++++	+	-
F14	19- 20	++++	++++	-	-
"	61- 75	++++	++	-	-
"	140-150	++++	++++	-	-
F17	81-107	++++	+++	-	-
"	151-160	++++	+++	-	-
"	176-187	++++	+++	-	-
F20	56- 57	+++	++++	-	-
"	83- 88	++++	+++	-	-
"	286-300	+++	+++	-	-
F22	26- 27	+++	+++	-	-
"	97-103	+++	+++	+	-
"	198-200	++++	+++	-	-

\* Surtout Calcite

Dominance relative des minéraux principaux du remplissage du delta du Nestos (les argiles et les sables purs ne sont pas inclus dans les échantillons examinés)



On relève d'autre part, quelques résultats remarquables. L'apparition de Calcite dans les échantillons des forages F3 et F9, indique que les marbres participaient à l'alimentation du delta en sédiments, ou bien par la rivière elle-même, ou bien par les torrents anciens de la région. On observe la même chose dans le cas du forage F12, qui montre, peut-être, l'existence d'une branche ancienne de la rivière, confirmée déjà partiellement, par des forages. La direction de cette branche était vers le SE et ceci signifie que la "fenêtre" de Melissa participait peut-être, à la formation du delta, à cette époque. L'apparition des Phyllosilicates dans les formations superficielles de la région du forage F3 est un indice du transport des sédiments par les torrents dans cette région du delta. Les mêmes conditions sont, peut-être, possibles pour la région du forage F9.

L'existence et la participation de la "fenêtre" de Melissa à la formation du delta, sont confirmées par l'étude des nappes aquifères profondes du delta du Nestos, ainsi que du bassin de Xanthi. En ce qui concerne la région du delta qui avait reçu les sédiments provenant du bassin de Xanthi et aujourd'hui reçoit les eaux souterraines de ce bassin, les conditions existantes sont analysées au chapitre 7 (Les nappes aquifères). Pour le bassin de Xanthi l'existence des axes paléogéographiques de ruissellement sont bien observés à la fig. 5-23. Un des axes principaux était dirigé vers le delta du Nestos.

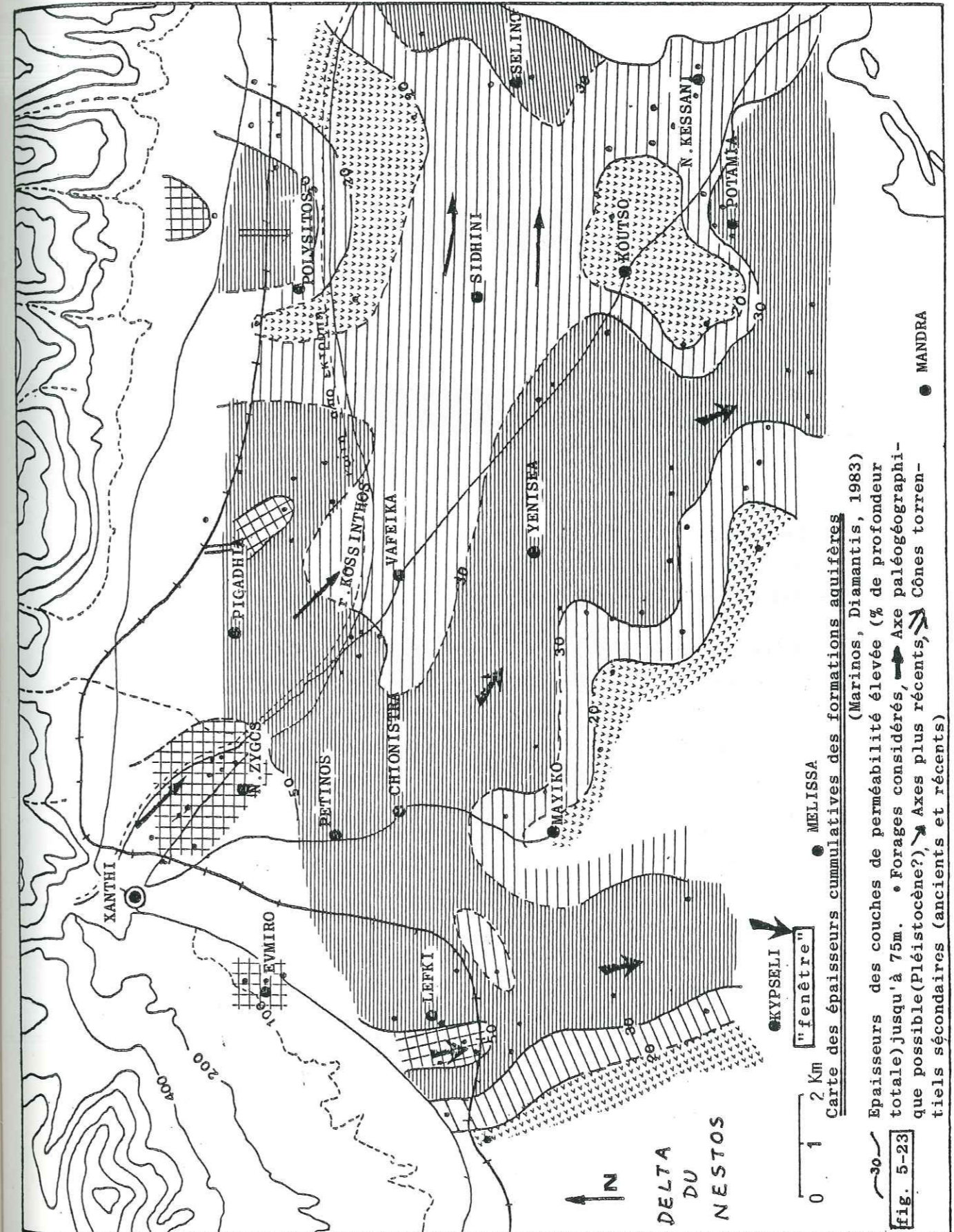


fig. 5-23



## 6. LES CONDITIONS PALEOECOLOGIQUES

La réalisation des forages F<sub>1</sub>-F<sub>20</sub> a amené à la surface des échantillons de couches fossilifères de diverses profondeurs de la plaine deltaïque. L'examen de la macrofaune d'un certain nombre d'échantillons nous amène à donner quelques résultats sur la stratigraphie et la paléoécologie de la région du delta du Nestos.

Les résultats des déterminations de la faune sont présentés au tableau suivant. Un grand nombre d'espèces (124) qui ont été déterminées comprend des Mollusques (Bivalves, Gastéropodes), Echinides, Madréporaires, Bryozoaires, Annélides, Arthropodes etc., qui peuvent nous renseigner sur la bathymétrie, le mode de vie et le climat, pendant la formation de la proéminence deltaïque.

La faune du delta du Nestos comprend un mélange d'espèces littorales et plus profondes (une 50ne de mètres environ) qui ont vécu (au moins pour la plupart) dans des sédiments grossiers et meubles.

Les éléments de thanatocénoses, qui rentrent dans la composition de la faune de chacun des forages, proviennent d'apports différents, les espèces n'indiquant pas toutes les mêmes biotopes.

Il ne semble pas que les Bivalves aient subi de transport important, car leur état de conservation est, dans l'ensemble, assez bon. On observe un tri mécanique des valves des Bivalves, des espèces les plus inéquilatérales seulement, peut-être à cause de leur plus grande fragilité ou, peut-être de leur légèreté.

L'ensemble de la faune indique un climat peu chaud à peu froid, à cause de la pénétration d'espèces nordiques, même atlantiques. L'abondance de populations de divers biotopes traduit un milieu à profondeur variable de 10 à 50 m. Ces populations proviennent de biotopes différents. Les faunes ont été regroupées sans avoir subi de transport important.

Nous avons observé que le milieu ne restait pas stable, mais subissait un brassage continu simple. De ce brassage, il résulte que

les caractères du milieu, c'est-à-dire la température, la salinité et la profondeur, ne restaient pas constants.

Les faunes ont été constituées, en très grand nombre (95%), par des individus jeunes. Cela indique que la profondeur n'était pas grande et que les biotopes étaient des golfes fermés. La présence des jeunes individus, notamment des Bivalves, qui sont habitués à vivre dans des milieux alguaire, pose la question de savoir si ces biocénoses n'avaient pas un milieu favorable pour survivre et se développer, et par conséquent ces accumulations de fossiles ne correspondent pas à une thanatocénose, mais il s'agit d'une taphocénose.

En résumé, la diversité des biotopes, les populations abondantes, la faible usure des valves, la présence de valves creuses, pour les Bivalves, sont les arguments principaux en faveur de la formation d'un ou plusieurs gisements à proximité des thanatocénoses d'origine.

Par conséquent, d'après ce qui précède, nous pouvons adopter les conclusions suivantes:

A g e : D'après les faunes étudiées, n'apparaît toutefois aucune distinction à valeur stratigraphique Plio-Quaternaire.

C l i m a t : La majorité des groupes indique une température plus chaude que celle de la Méditerranée actuelle.

P r o f o n d e u r : Etagement des faunes entre 10 et 50 m.

S a l i n i t é : Milieu franchement marin et non fermé sans aucune trace de milieux dessalés proches.

S u b s t r a t u m : Sédiments notamment meubles-sables grossiers.

T a p h o n o m i e : Les observations faites sur les faunes, en particulier les Bivalves et Gastéropodes, permettent d'envisager un transport sur de faibles distances. Il s'agit d'un simple brassage sur place (restes fragmentaires ou entiers plus ou moins usés).



Les conclusions de cette étude paléontologique et paléoécologique avec la distribution verticale et horizontale des concentrations de fossiles et quelques niveaux de lignitogenèse, conduisent à l'image suivante:

Pendant le stade le plus récent de l'évolution du delta, c'est-à-dire pendant le Plio-Quaternaire, la continentalité de la région n'était pas générale et uniforme. Il y avait de petites transgressions et régressions de la mer, qui concernaient, chaque fois, quelques parties de la région du delta. La continentalité, ou non, temporaire de quelques parties avec les apports détritiques de la rivière et l'action de la houle sur les autres parties constituent un régime qui a influencé la forme et la structure du delta.

## 7. LES NAPPES AQUIFERES

### 7.1. LA NAPPE KARSTIQUE

#### 7.1.1. DESCRIPTION GENERALE

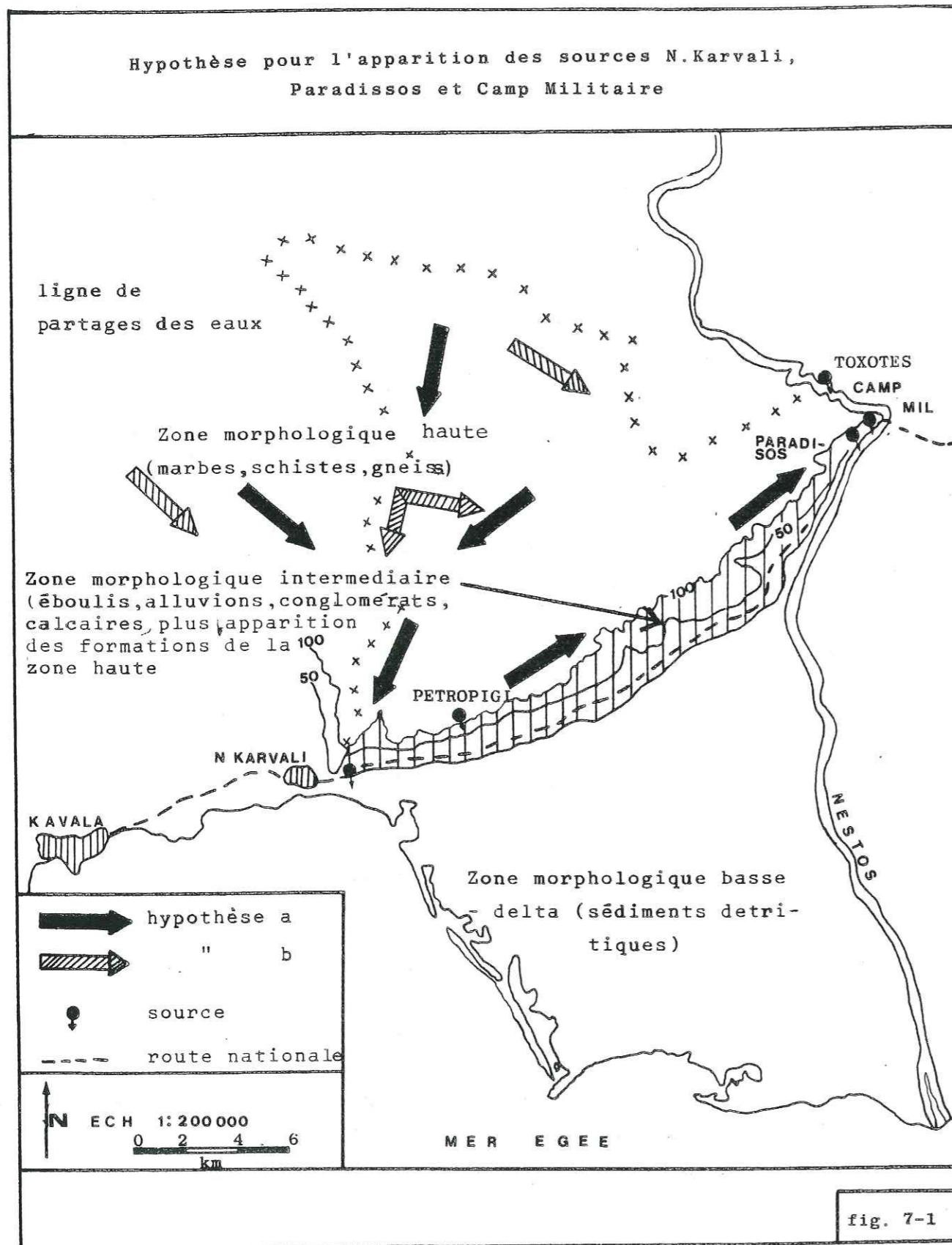
L'ensemble des marbres, qui bordent le delta, est fortement karstifié, comme en témoignent les indices de surface (formes karstiques, ruissellement limité, apparition des sources dans toutes les directions etc.) et la puissance des systèmes des grandes sources "Paradissos" et "Camp militaire" dont les débits sont les preuves, les plus précises de la karstification des marbres.

L'alimentation des marbres en eau se fait par les précipitations, la participation du Nestos, au moins pour la région proche du delta, étant difficile. Le niveau de la surface de la nappe karstique, se trouve plus haut que le niveau de la surface de la rivière, et le long de la rivière, il y a plusieurs sources karstiques qui alimentent le Nestos.

Les eaux karstiques s'écoulent vers la ligne de contact des marbres avec les sédiments, les plus récents, malgré quelques pertes intermédiaires (émergences, de toute façon, moins importantes). Parmi d'autres sources (Petropigi, Toxotes etc.), les sources principales des marbres sont, d'une part, le système des sources "Paradissos" et "Camp militaire" à l'Est et, d'autre part, la source de "Nea Karvali", à l'Ouest.

L'émergence du premier système se localise à l'altitude la plus basse (à l'Est), du contact des marbres avec l'ensemble Tertiaire-Quaternaire. Dès ce point et vers l'Ouest, les altitudes de ce contact augmentent et ensuite diminuent jusqu'à la mer (Nea Karvali). Dans cette région là, on trouve des sources karstiques, hypothermales, dont l'eau est fortement influencée par l'intrusion marine.





La relation entre les deux systèmes de sources (Paradissos, Camp militaire - Nea Karvali) est un sujet discutable. Puisqu'il s'agit de sources de la même masse karstique, on peut arriver à deux hypothèses (fig. 7-1).

- La karstification entre les deux régions est continue et la même nappe karstique concerne les deux régions. Les eaux souterraines s'écoulent vers les sources, à l'altitude de contact, la plus basse (Nea Karvali). Puisque la capacité de l'exutoire est limitée (la charge de l'eau de la mer étant un obstacle additionnel), la plupart des eaux se tournent vers l'Est, à cause de la montée de la surface piézométrique karstique.
- Les sources sont, plus ou moins, séparées, c'est-à-dire que les conduits karstiques, vers les deux régions des sources, sont pratiquement isolées entre elles.

Pour mieux envisager ce problème nous avons procédé à l'utilisation de moyens supplémentaires, qui concernent ces sources.

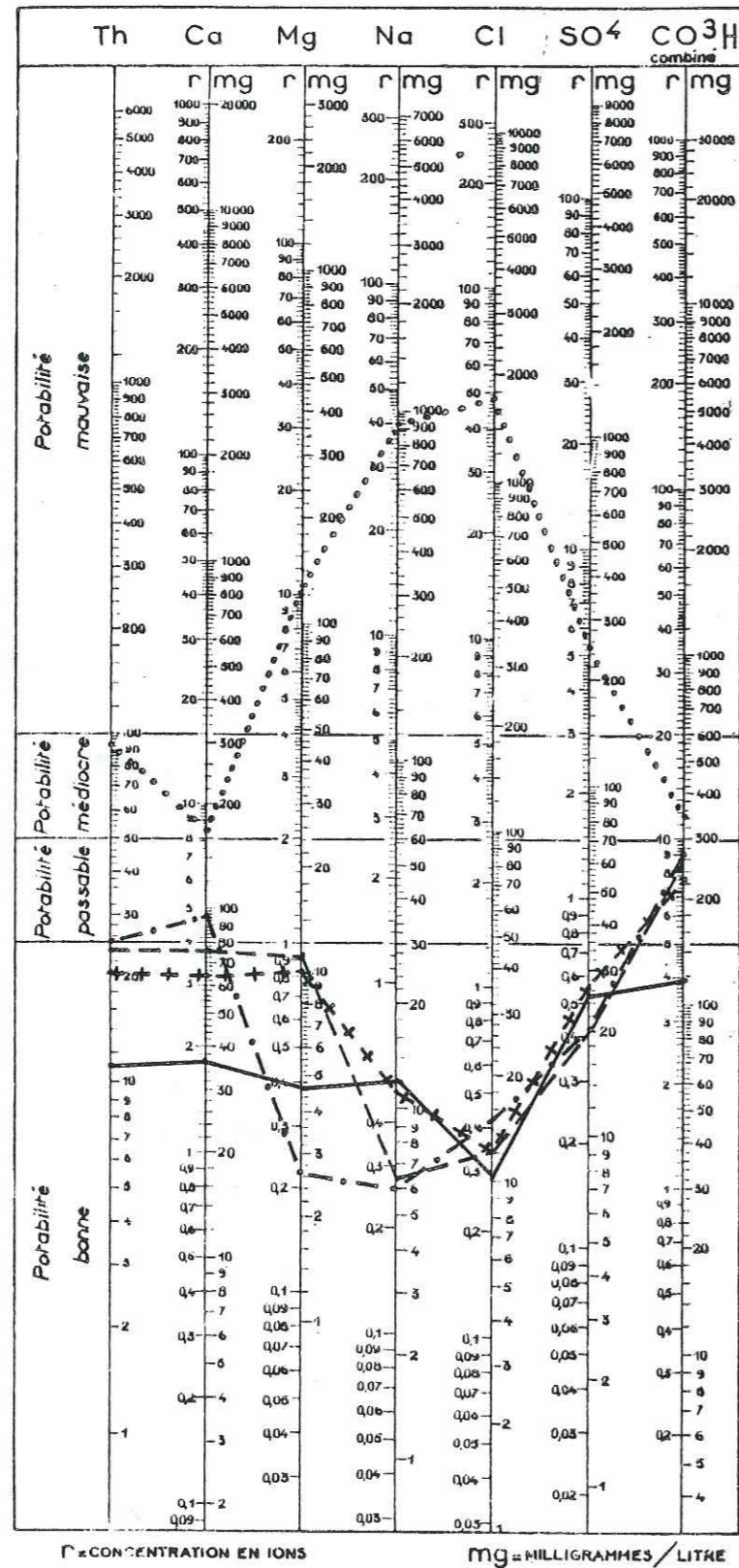
#### 7.1.2. LES CONDITIONS HYDROCHIMIQUES

En supposant que les sources Paradissos et Camp militaire représentent deux systèmes d'exutoires de la même origine, nous avons fait des analyses chimiques de quatre sources karstiques, ainsi que de l'eau du Nestos. Les résultats des analyses figurent au tableau suivant.

Par comparaison des analyses chimiques (v. aussi fig. 7-2), on constate que la composition chimique de l'eau de la source Petropigi (qui se trouve au voisinage de la source Nea Karvali, mais beaucoup plus haut), est presque la même que celle du système Paradissos-Camp militaire. La composition chimique différente de la source Nea Karvali est due, probablement, partiellement à l'intrusion marine. La température relativement élevée de cette source paraît être le résultat d'un processus bien connu dans les régions helléniques. Selon ce processus les régions formées par les phénomènes de tension et par des failles de gravité, se caractérisent par un gradient géothermique relativement élevé (ex. golfe Malliaque, région de Strymon etc.)



DIAGRAMME LOGARITHMIQUE



- ..... KARVALI
- PETROPIGI
- - - PARADISSOS
- NESTOS
- + + + TOXOTES

fig. 7-2

	N. KARVALI	PETROPIGI	PARADISSOS	NESTOS	TOXOTES
PH	6,9 27°C	7,8 28°C	7,2 24°C	7,55 24°C	7,25 24°C
µMhos/cm 25°C	5150	594	547	281	484
Cl <sup>-</sup> meq/l	49,02	0,44	0,34	0,29	0,34
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	5,60	4,40	4,30	1,95	3,65
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	5,23	0,42	0,42	0,52	0,56
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	traces	traces	lég. posit.	lég. posit.	lég. posit.
NO <sub>2</sub> <sup>2-</sup>	nég.	nég.	nég.	lég. posit.	nég.
Ca <sup>2+</sup>	8,22	4,78	3,83	1,83	3,21
Mg <sup>2+</sup>	10,44	0,22	0,94	0,38	0,83
Na <sup>+</sup>	40,13	0,26	0,27	0,52	0,49
K <sup>+</sup>	1,06	0,008	0,02	0,03	0,02
Fe <sup>2+</sup>	0,00		0,001	0,003	0,003
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	traces	nég.	nég.	nég.	nég.
Dur. p. D°	36,5	1,7	1,3	0,7	1,1
" t. "	15,7	12,3	12,0	5,5	10,2
" tot. "	52,2	14,0	13,3	6,2	11,3
S.A.R.	13,1	0,16	0,17	0,49	0,34
C - S		C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>
	67,0	4,9	5,33	18,8	10,7
SiO <sub>2</sub>	99,0				
Mn	nég.				

Les données isotopiques

Quelques analyses isotopiques ont été réalisées, en ce qui concerne les eaux des sources karstiques et du Nestos, dont les résultats figurent au tableau suivant:

	UT	Cl <sup>-</sup> ppm	δ‰ <sup>18</sup> O
Nestos			-9.1
Source Nea Karvali	23	1682	-6.9
" Paradissos			-8.0
" Toxotes			-7.8



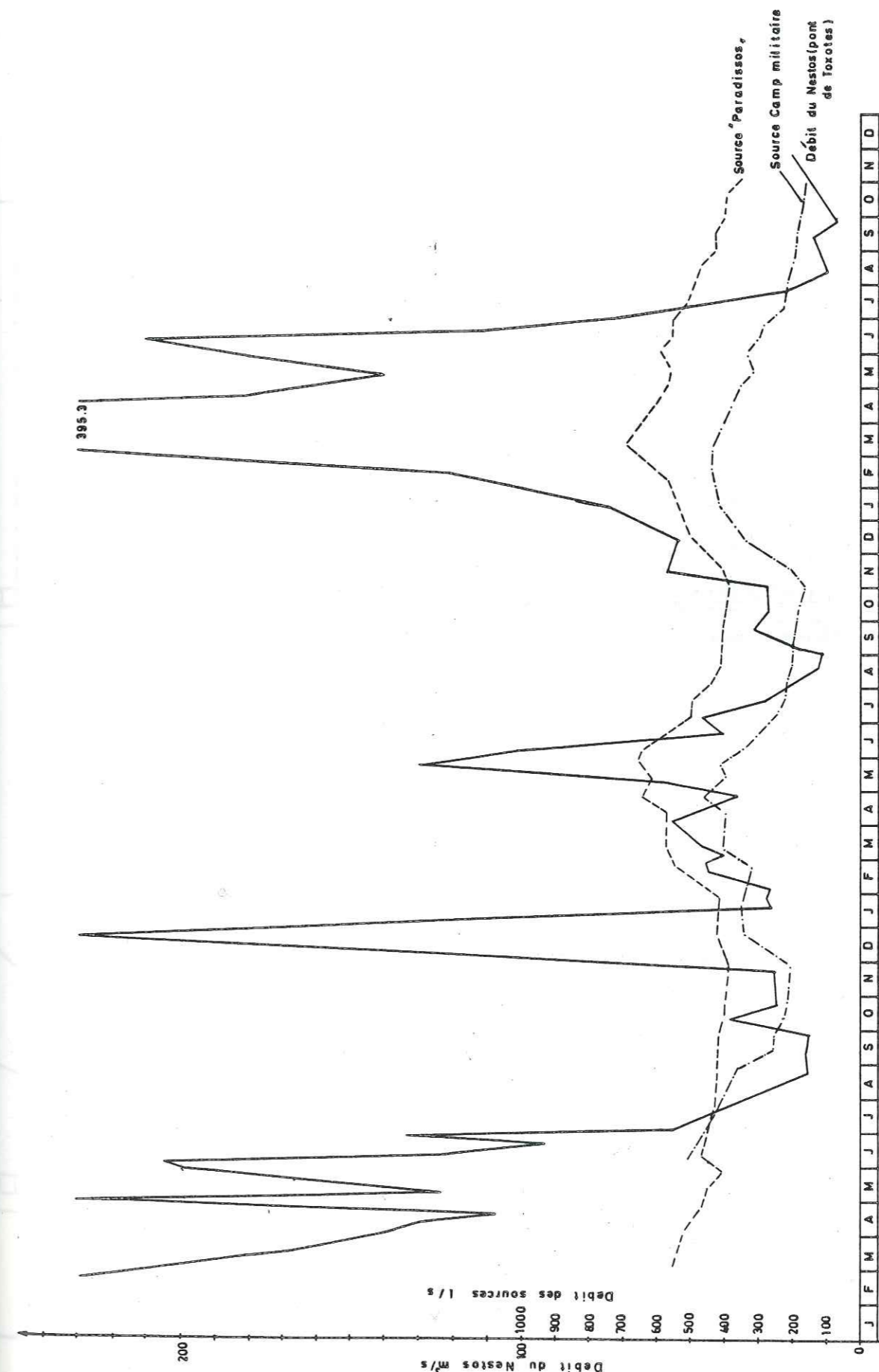
La valeur  $\delta^{18}O$  concernant la rivière ne peut pas fournir des données précises, puisque l'eau de la rivière provient de précipitations d'altitudes différentes. De plus l'évaporation au cours de l'année modifie la concentration des isotopes lourds dans les eaux superficielles.

Pour la source de Nea Karvali, l'eau de la mer, qui se mélange avec l'eau douce, modifie la valeur  $\delta^{18}O$  qui correspond à une altitude moyenne d'infiltration de 800-900m, selon les corrélations proposées pour une série de régions helléniques (v.ch. 7.2.2.). Pour les autres sources, cette altitude paraît être de l'ordre de 1500m. Ces indices confirment le régime karstique déjà supposé.

7.1.3. LES CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES

La comparaison entre les fluctuations des débits des sources "Paradisios" et "Camp militaire" et les fluctuations du débit du Nestos (fig. 7-3), offre quelques indications sur le régime de la circulation des eaux karstiques. En général les pics dans la courbe des sources correspondent aux pics dans la courbe du débit de la rivière. Ceci veut dire que les vitesses d'écoulement souterrain sont relativement élevées, surtout comparées avec les vitesses du ruissellement superficiel. Ensuite, il y a une concordance, presque parfaite, entre les courbes des deux sources. Ceci indique qu'il s'agit de deux systèmes d'exutoires d'une source principale. L'exception sur la concordance des courbes observée en 1963 est probablement due aux anomalies des précipitations au cours de cette année.

La comparaison des fluctuations des débits des sources avec le régime des précipitations sur le massif des marbres (fig. 7-4) conduit à des résultats analogues. Il y a un lien direct entre la hauteur des précipitations et le débit des sources. La courbe de la source Paradisios se présente plus émoussée que celle de Camp militaire, probablement à cause du captage et du pompage systématique dequies plusieurs années. On arrive au même résultat si on compare les courbes des sources et la pluviométrie de la station de Toxotes en ajoutant les données de l'année 1980 (fig. 7-5).



Fluctuations des débits du Nestos et des sources Paradisios et Camp militaire (Minist. d'Agriculture - Kavala)



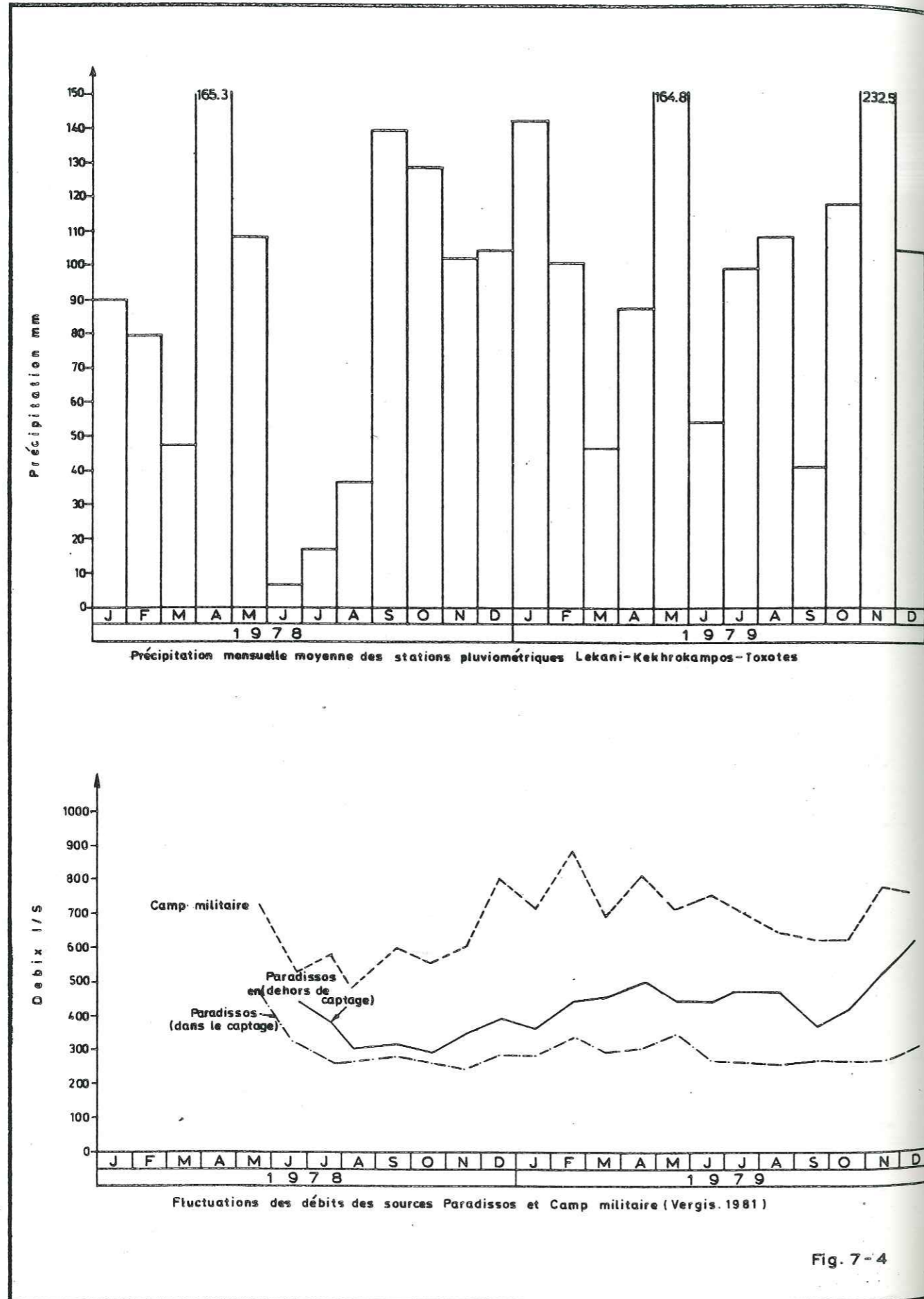


Fig. 7-4

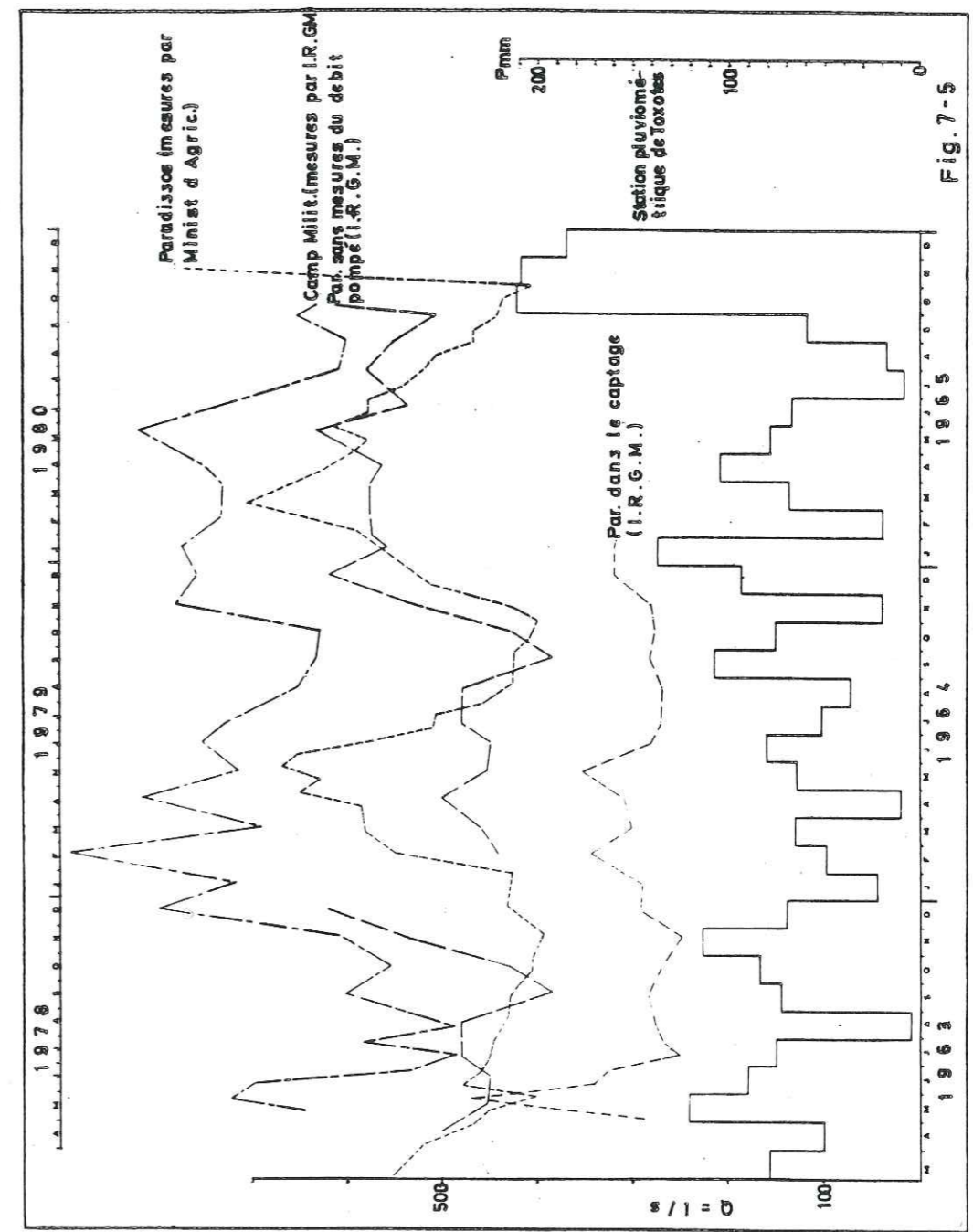
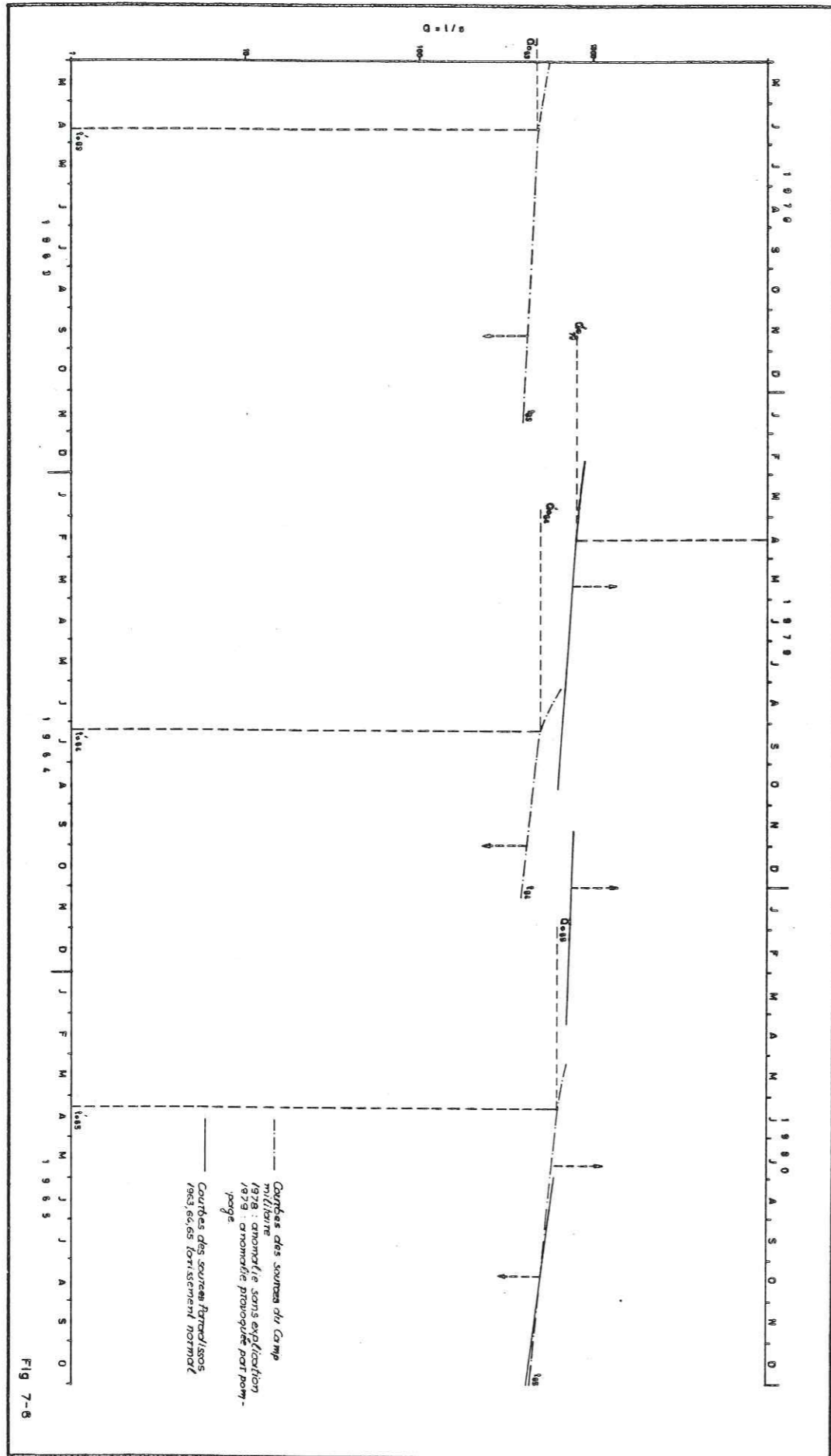


Fig. 7-5 - Fluctuation du débit des sources et des précipitations en Toxotes.





Contours des sources de Camp militaire  
1978 : anomalie sans explication  
1979 : anomalie provoquée par pompage  
Contours des sources Paradiisos  
1963 et 65 lors d'un fortissement normal

Fig 7-6

MESURES DU DEBIT DES SOURCES

SOURCE "PARADISSOS"

Date	Q(l/s)	Date	Q(l/s)	Date	Q(l/s)
3. 3.1952	685	24. 8.1963	432	18. 7.1964	509
15. 4. "	585	14. 9. "	430	1. 8. "	459
27. 5. "	618	28. 9. "	421	22. 8. "	428
12. 6. "	542	12.10. "	407	5. 9. "	428
17. 7. "	448	26.10. "	407	26. 9. "	426
13. 8. "	457	22.11. "	395	10.10. "	411
27. 9. "	465	21.12. "	433	31.10. "	402
24.10. "	426			14.11. "	428
		28. 1.1964	428	8.12. "	513
2. 3.1963	553	10. 2. "	551		
6. 4. "	521	13. 3. "	582	8. 1.1965	555
27. 4. "	470	11. 4. "	586	5. 2. "	591
11. 5. "	453	25. 4. "	651	5. 3. "	710
25. 5. "	403	9. 5. "	629	9. 4. "	630
8. 6. "	479	23. 5. "	670	30. 4. "	595
22. 6. "	461	5. 6. "	654	14. 5. "	580
6. 7. "	452	20. 6. "	571	28. 5. "	615
27. 7. "	448	4. 7. "	512	12. 6. "	580
				26. 6. "	580
				10. 7. "	543
				31. 7. "	521
				13. 8. "	509
				28. 8. "	469
				11. 9. "	469
				25. 9. "	446
				15.10. "	439
				29.10. "	409
				18.10. "	786

(Min. d'Agriculture, Departement de Macédoine)

SOURCE "PARADISSOS" (dans le captage)

Date	Q(m <sup>3</sup> /s)	Date	Q(m <sup>3</sup> /s)	Date	Q(m <sup>3</sup> /s)
3. 5.1978	0.289	17. 1.1979	0.2923	18.1.1980	0.3216
24. 5. "	0.470	20. 2. "	0.3454	30.1. "	0.3185
10. 6. "	0.341	17. 3. "	0.303		
24. 6. "	0.326	19. 4. "	0.312		
11. 7. "	0.2533	18. 5. "	0.35544		
25. 7. "	0.269	18. 6. "	0.2823		
12. 8. "	0.2716	9. 7. "	0.273		
18. 9. "	0.285	17. 8. "	0.2713		
18.10. "	0.271	20. 9. "	0.2832		
20.11. "	0.2504	18.10. "	0.2776		
18.12. "	0.2926	17.11. "	0.2824		
		18.12. "	0.3205		

(I.R.G.M.)



SOURCE "PARADISSOS" (En dehors du captage. Le débit pompé, pour les nécessités des Communes, n'est pas mesuré)

Date	Q(m <sup>3</sup> /s)	Date	Q(m <sup>3</sup> /s)
20. 2. 1979	0.4436	18. 1. 1980	0.5597
17. 3. "	0.4612	30. 1. "	0.5763
19. 4. "	0.5022	19. 2. "	0.5776
18. 5. "	0.4543	24. 3. "	0.5788
18. 6. "	0.4510	15. 4. "	0.5661
9. 7. "	0.4813	23. 5. "	0.6339
17. 8. "	0.4805	20. 6. "	0.5375
20. 9. "	0.3865	28. 7. "	0.5816
18. 10. "	0.4314	29. 8. "	0.5534
17. 11. "	0.5364	26. 9. "	0.5085
18. 12. "	0.6201	7. 10. "	0.6135

(I.R.G.M.)

SOURCE "CAMPS MILITAIRE"

Date	Q(m <sup>3</sup> /s)	Date	Q(m <sup>3</sup> /s)	Date	Q(m <sup>3</sup> /s)
11. 5. 1978	0.646	17. 1. 1979	0.719	18. 1. 1980	0.7753
24. 5. "	0.7236	20. 2. "	0.8915	19. 2. "	0.7346
10. 6. "	0.699	17. 3. "	0.692	24. 3. "	0.7341
24. 6. "	0.5342	19. 4. "	0.8168	15. 4. "	0.7521
11. 7. "	0.4873	18. 5. "	0.7165	23. 5. "	0.8211
25. 7. "	0.5842	18. 6. "	0.7539	20. 6. "	0.7326
12. 8. "	0.488	9. 7. "	0.7291	28. 7. "	0.6099
18. 9. "	0.6022	17. 8. "	0.6544	1. 9. "	0.6034
18. 10. "	0.5553	20. 9. "	0.6337	26. 9. "	0.6547
20. 11. "	0.6086	18. 10. "	0.6307	7. 10. "	0.6339
18. 12. "	0.7994	17. 11. "	0.7816		
		18. 12. "	0.7597		

(I.R.G.M.)

La courbe de tarissement et l'estimation du coefficient de tarissement "a" sont des indices quantitatifs pour l'analyse du régime hydrologique des sources. La source de Paradissos présente, pour les années 1963, 1964 et 1965 une courbe de tarissement normale. La source de Camp militaire présente un tarissement normal en ce qui concerne l'année 1979. Pour l'année 1978, il y a une anomalie sans explication tandis que l'anomalie observée pour l'année 1980 est due au pompage dans le captage de la source, commencé cette année-là. Pour les années de tarissement normal nous avons estimé le coefficient de tarissement "a" d'après la formule de Maillet (fig. 7-6)

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-at}$$

Source	Année	a
Camp militaire	1979	0.00131
Paradissos	1963	0.00080
"	1964	0.00200
"	1965	0.00190

Les valeurs de "a" correspondent à un écoulement souterrain assez régularisé, donc à une karstification de la masse des marbres, étendue et uniforme.

Les réserves en eau dans le massif karstique à l'amont des exutoires qui correspondent à chaque source, au moment du début de tarissement (Q<sub>0</sub>), figurent au tableau suivant :

Source	Année	Q <sub>0</sub> l/s	Réserves m <sup>3</sup>
Camp militaire	1979	800	52,76 x 10 <sup>6</sup>
Paradissos	1963	550	59,40 x 10 <sup>6</sup>
"	1964	600	22,92 x 10 <sup>6</sup>
"	1965	700	31,83 x 10 <sup>6</sup>

#### 7.1.4. LES CONDITIONS TECTONIQUES

Pour mieux connaître le régime de l'écoulement souterrain dans l'ensemble des marbres, nous avons procédé à une étude tectonique concernant la fracturation des marbres. L'orientation des systèmes de fracturation est un indice important pour la nature et l'orientation de la karstification, donc pour l'écoulement des eaux karstiques.

Avec l'aide de l'étude photogéologique, qui a complété les observations sur le terrain, dans le cadre de l'étude géologique classique, nous avons établi la carte de la fig. 7-7, qui présente la fracturation des marbres. Ensuite, la mesure de la direction de chaque fracture a permis la construction de la rose de la fig. 7-8. Il est évident que les fractures sont orientées dans la direction N-S tandis qu'il ne manque pas de fractures orientées dans la direction O-E. Donc, du point de vue tectonique, l'écoulement des eaux karstiques se fait d'une façon uniforme du N. vers le S, l'écoulement de l'O vers l'E étant aussi favorisé. Il semble qu'il n'existe pas de conduits distincts vers les sources "Paradissos" et "Camp militaire".



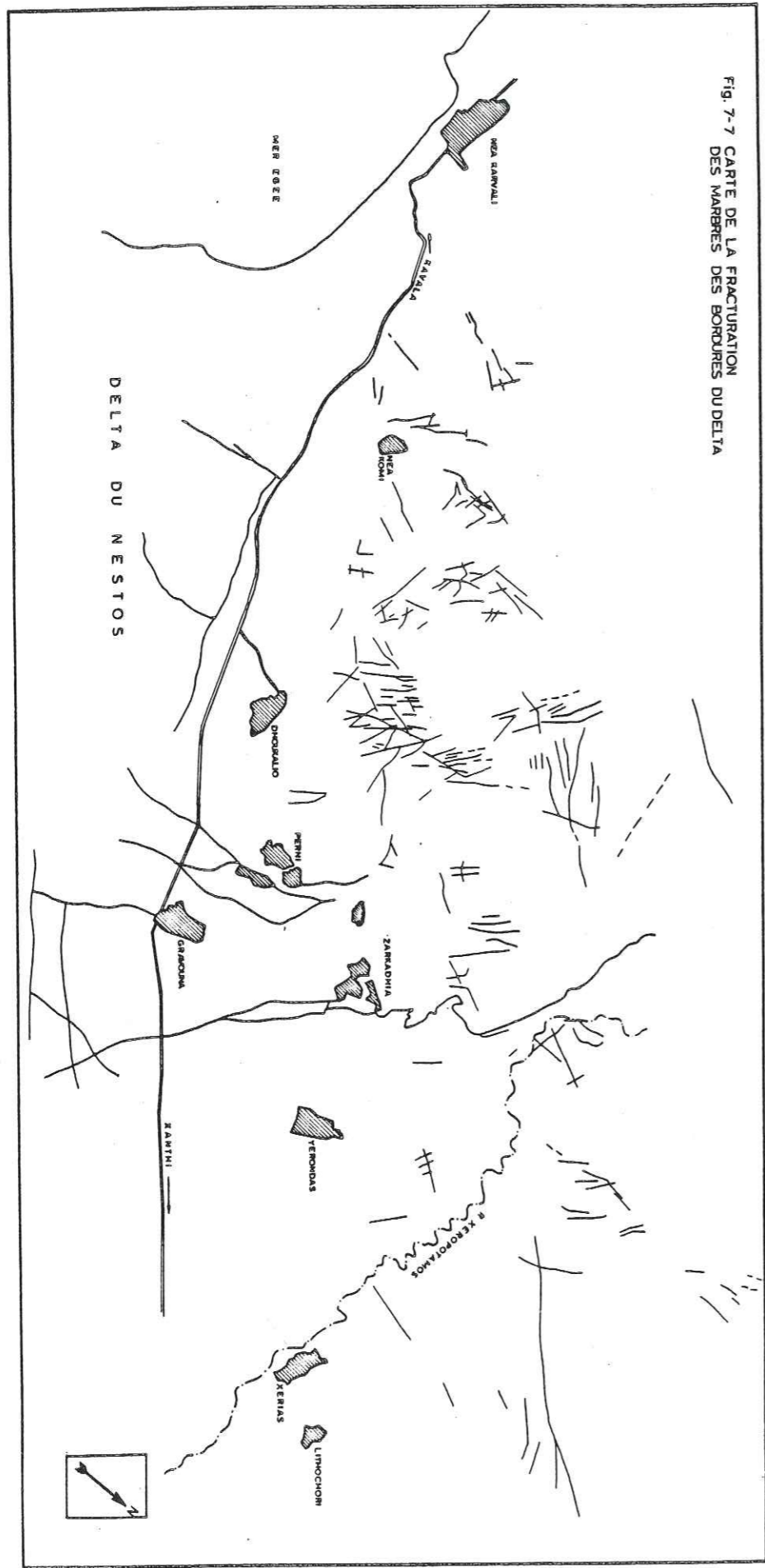


Fig. 7-7 CARTE DE LA FRACTURATION DES MARBRES DES BORDURES DU DELTA

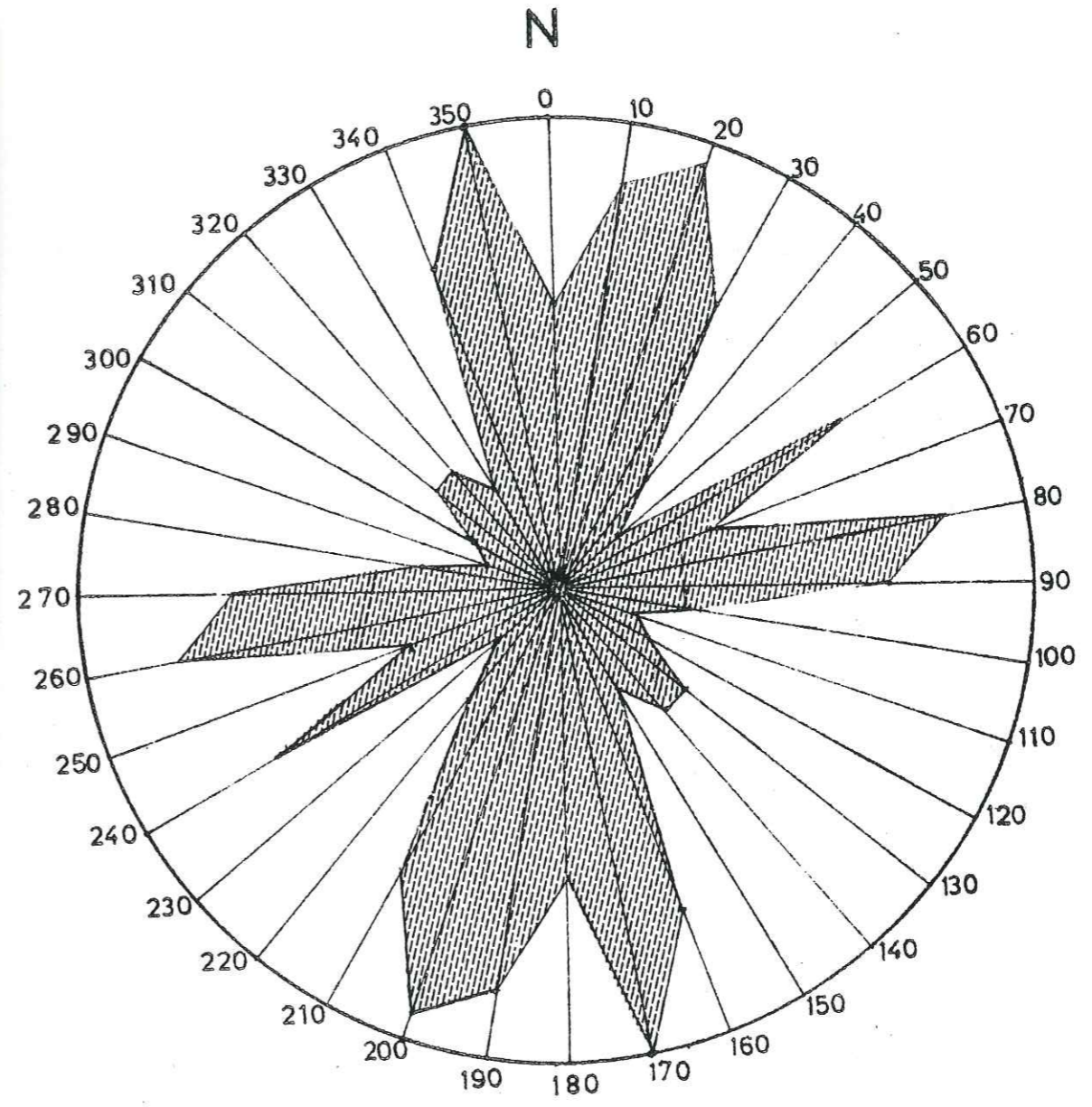


fig. 7-8 Rose des lignes tectoniques dans le massif des marbres au voisinage du delta du Nestos (mesures 220)



## 7.2. LES NAPPES AQUIFERES DU DELTA

### 7.2.1. DESCRIPTION GENERALE

Dans toute la région du delta se développe une nappe phréatique superficielle avec des caractéristiques géométriques et hydrogéologiques variables. Pour une grande partie de la plaine deltaïque cette nappe n'est que l'extrémité, vers la surface, du système des nappes profondes captives ou semi-captives. Donc, pour l'étude de la nappe phréatique il est nécessaire, mais aussi difficile, de distinguer les zones de communication des nappes, lorsque la charge des nappes profondes captives influence les caractéristiques de la nappe phréatique. Il faut encore ajouter que l'étude de la nappe phréatique devient plus difficile à cause d'un développement continu d'un système de drainage dans les zones où la surface piézométrique est très proche de la surface du delta.

Il y a une différence dans les conditions hydrogéologiques même si on tient compte seulement de la nappe phréatique. Dans la partie Ouest prédomine la phase sableuse tandis que dans la partie Est prédomine la phase argilomarneuse. Les différences lithologiques entre les deux parties du delta (v.ch. 4 et 5) jouent un rôle aussi important sur le régime hydrogéologique. Il faut signaler ici que la même nappe se comporte comme captive, semi-captive ou libre selon les points.

Plusieurs forages dans la plaine deltaïque présentent des phénomènes d'artésianisme. Sauf l'artésianisme régulier, qui est dû à la charge hydraulique des nappes profondes, dans la région du delta et surtout dans la région côtière, on rencontre aussi un " artésianisme phréatique". La structure sédimentologique, surtout dans la partie Est du delta, fait que les variations du gradient hydraulique ne sont pas régulières à l'échelle du delta ainsi qu'à l'échelle locale (v.ch. 4 et 5). Sous les conditions spéciales, la nappe phréatique est en contact partiellement avec des formations argilomarneuses de perméabilité très faible. Lorsque les altitudes de la surface topographique diminuent vers la mer, les altitudes de la surface piézométrique les approchent et on a apparition naturelle (si les conditions topographiques le permettent - apparition de marécages ou de petites sources) ou artificielle (exécution de

puits ou de forages) de cet artésianisme (fig. 7-9). La présence et le degré de ce phénomène sont influencés par les variations de la surface piézométrique de la nappe (variations saisonnières) ainsi que par l'avancement du système de drainage artificiel de la plaine deltaïque. Ce dernier modifie chaque année la forme des conditions piézométriques de la région du delta.

Si on néglige ces exceptions saisonnières et locales (qui sont davantage confirmées par l'exécution de puits et de forages), les conditions restantes de la nappe phréatique sont bien normales. La seule anomalie se présente dans les régions où la nappe phréatique communique directement avec les nappes profondes, donc il s'agit de l'extrémité, vers la surface, du système des nappes captives ou semi-captives. Dans de telles conditions on ne peut pas connaître la participation de la charge hydraulique des nappes profondes à la formation du niveau piézométrique.

En général, sauf les zones d'artésianisme phréatique, la morphologie de la surface phréatique se trouve en concordance avec la morphologie de la surface de la plaine deltaïque. Pour la plupart des puits, la profondeur de la surface libre de la nappe se trouve entre 0.5 et 4.0 m, sauf quelques exceptions dans les zones de perméabilité très élevée. On voit encore que les puits des bordures du delta présentent une profondeur de la surface libre du même ordre. Dans ces régions, les sédiments transportés par les torrents participent à la formation de la plaine deltaïque et par conséquent, il y a une communication directe de la nappe phréatique des bordures avec la nappe phréatique du delta. Pour les bordures qui se trouvent entre le delta et les marbres cette communication est un indice de leur alimentation par les marbres, puisque leur extension limitée et leur couverture argileuse superficielle ne favorisent pas la formation d'une telle nappe alimentée exclusivement par les précipitations (fig. 7-10, 7-11).

Malgré les phénomènes d'artésianisme phréatique, quelques forages, dans la zone côtière, fournissent des eaux plus ou moins salées, surtout les forages qui exploitent les nappes les moins profondes. Ceci arrive parce que ces nappes sont les plus exploitées, donc l'intrusion de la mer avance plus que dans les nappes plus profondes, qui, davantage, sont protégées par leur charge hydraulique élevée et par la vase du fond de la mer, qui se comporte comme un barrage naturel.



La description des nappes profondes figure aux chapitres 4 et 5. L'estimation quantitative de la capacité et l'efficacité de ces nappes, sous les conditions d'un delta, est une question très délicate, par leur extension latérale et verticale irrégulière. Les résultats des essais de pompage disponibles concernent le comportement moyen de toutes les nappes pénétrées par chaque forage, comme il arrive presque toujours dans le cas des forages d'exploitation. Il faut, encore, ajouter le problème qui existe toujours avec les nappes en charge, c'est-à-dire le problème de leur alimentation par rapport à leur exploitation. Après l'exécution d'un forage, la charge de la nappe donne une fausse impression pour la quantité des eaux emmagasinées, par rapport à une exploitation prolongée. Mais, comme ces nappes sont couvertes par des formations imperméables, elles sont alimentées d'une façon indirecte et, en général, limitée. Dans la région du delta du Nestos on peut marquer un changement très important dans le comportement de quelques forages, exploités pendant un certain temps.

Dans les zones de dunes les nappes sont ouvertes à l'eau de la mer d'une façon directe. L'exploitation de ces eaux est, surtout, une question de régime de pompage, c'est-à-dire d'un débit de pompage régularisé, qui permet l'exploitation de l'eau douce au dessus de l'eau salée.

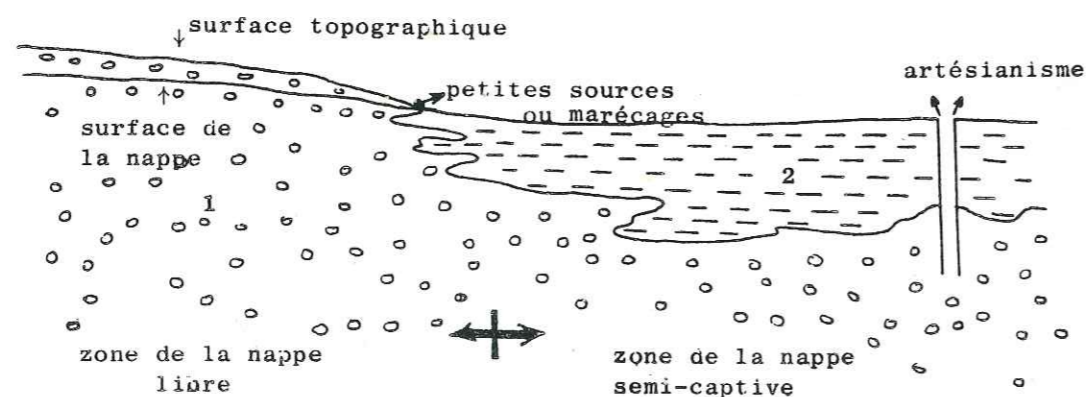


fig. 7-9 Les conditions, de l'apparition d'artésianisme phréatique schématisées. 1. Formations perméables aquifères. 2. Formations imperméables.

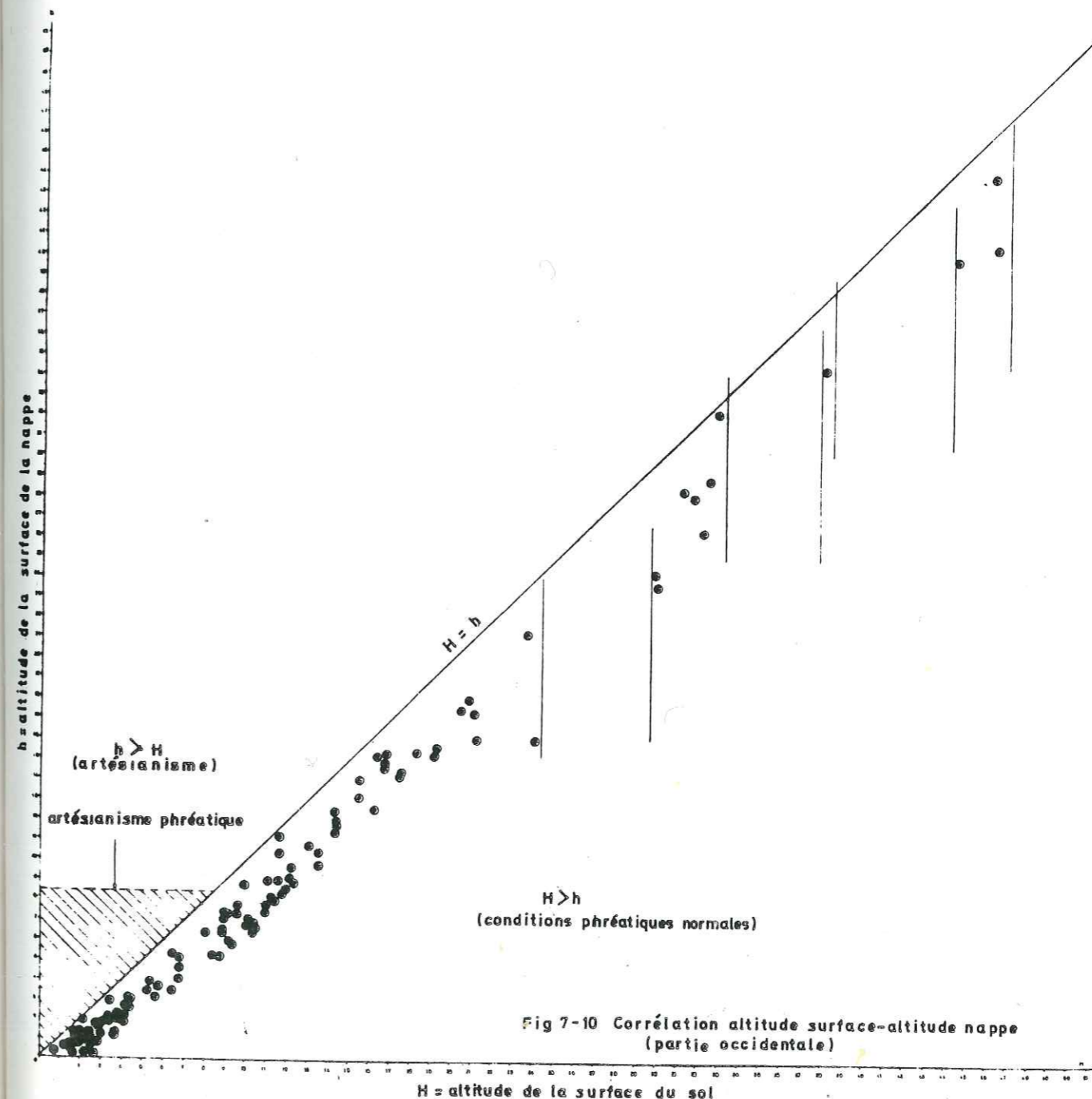


Fig 7-10 Corrélation altitude surface-altitude nappe (partie occidentale)



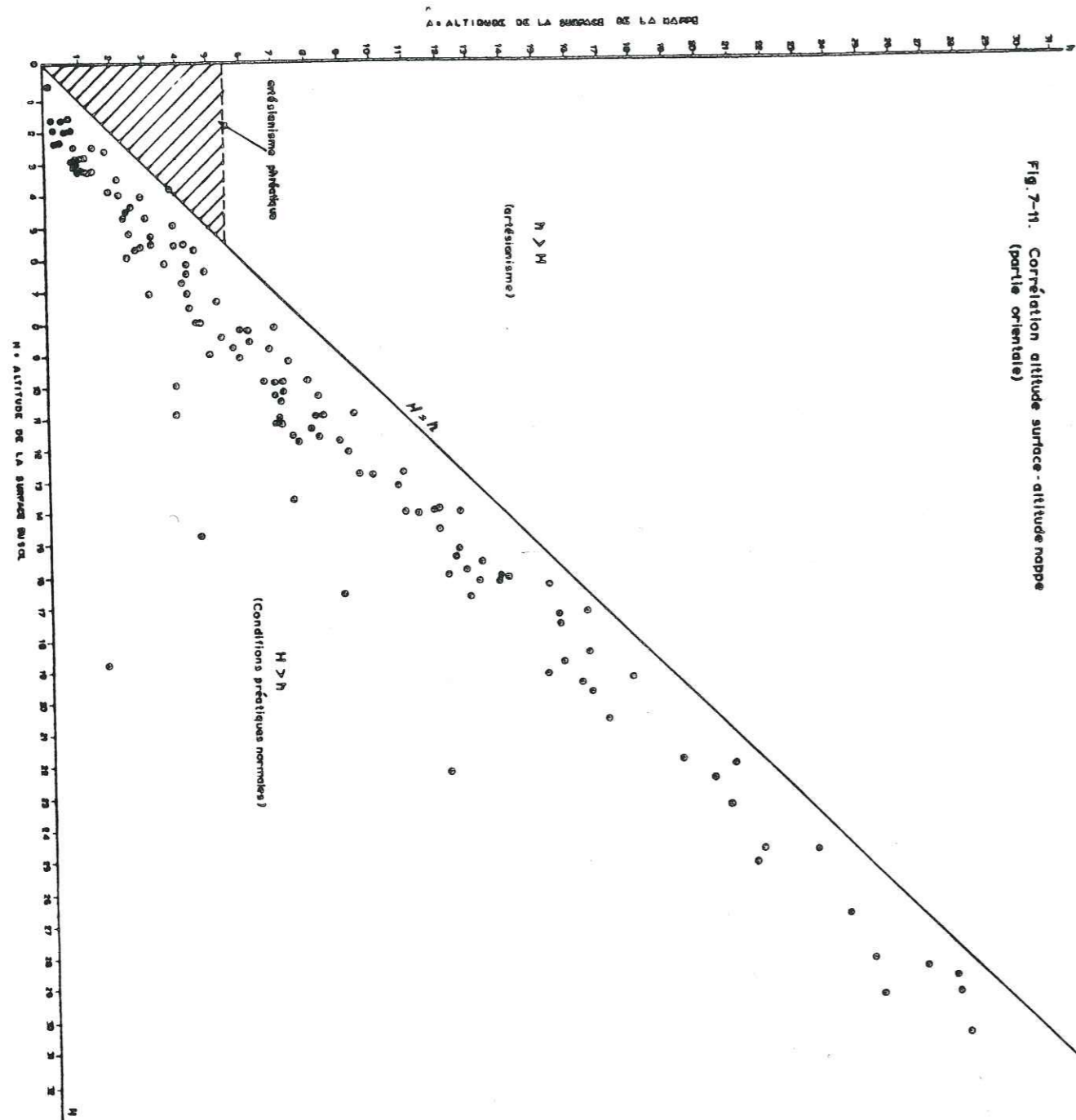


Fig 7-11. Corrélation altitude surface - altitude nappe (partie orientale)

### 7.2.2. LES DONNEES ISOTOPIQUES

Pour mieux connaître les conditions et les sources d'alimentation des nappes profondes du delta, nous avons procédé aux analyses isotopiques des eaux profondes des forages réalisés.

Nous considérons qu'il n'est pas nécessaire de présenter ici toute la théorie de l'application des isotopes naturels dans l'Hydrogéologie. Sous quelques conditions, la concentration des isotopes  $^2\text{H}$  (T), exprimée en unités de T (UT) permet la connaissance du temps écoulé après l'infiltration de l'eau considérée, donc l'âge de cette eau. En ce qui concerne les régions côtières, très souvent les premières condensations des vapeurs, qui proviennent de la mer; montrent, en général, une composition isotopique voisine de celle de l'eau de la mer. Par contre, l'eau de précipitation loin de la mer, à l'intérieur du continent, est moins riche en isotopes lourds. Plus la distance de la mer augmente, plus l'eau précipitée et infiltrée est pauvre en isotopes lourds, à condition que les facteurs restants, qui influencent leurs concentrations, restent stables.

D'autre part la teneur des eaux souterraines en  $^{18}\text{O}$  peut conduire à l'estimation de l'altitude moyenne des précipitations et d'infiltration de ces eaux. Plus les analyses isotopiques sont systématiques, plus cette estimation est précise, surtout avec l'établissement d'une corrélation "teneur en  $^{18}\text{O}$  - altitude d'infiltration" concernant une certaine région.

L'importance de l'application des isotopes stables est évidente si on tient compte que la pression de vapeur de  $\text{H}_2\text{O}^{16}$  est plus élevée que celle de  $\text{H}_2\text{O}^{18}$ . D'après des recherches réalisées, on constate que, plus la température est élevée (évaporation élevée), plus la teneur des eaux en  $^{18}\text{O}$  augmente. La teneur en  $^{18}\text{O}$  est aussi liée à l'altitude et à la latitude d'une région. Elle est encore liée au régime des précipitations (précipitations élevées - teneur en  $^{18}\text{O}$  faible).



La connaissance des profondeurs des installations des crépines dans les forages nous a permis de procéder à un échantillonnage précis, avec l'aide d'un instrument spécial, pour éviter le mélange des eaux profondes considérées avec des eaux superficielles, puisque ces forages exploitent toutes les formations aquifères pénétrées. Les résultats des analyses isotopiques en  $^3\text{H}$ , et  $\text{O}^{18}$  pour les eaux profondes des sédiments du delta, sont les suivants:

Forage	Profondeur d'échantillonnage (m)	U T	$\text{Cl}^-$ p.p.m.	$\delta\text{‰ }^{18}\text{O}$
F <sub>1</sub>	118	3	23	-8.6
F <sub>3</sub>	135	33	11	-7.1
F <sub>10</sub>	135	0	550	-8.4
F <sub>14</sub>	87	0	154	-8.0
F <sub>16</sub>	101	0	1193	-7.6
F <sub>17</sub>	125	0	153	-8.3

Pour l'analyse de ces résultats, on n'a pas besoin de corrélations, puisque pour tous les forages (sauf le F3), la participation des eaux infiltrées après 1952, à la formation de la nappe considérée, est négligeable. Ceci arrive souvent dans le cas des nappes aquifères fermées (captives) dans lesquelles le mélange avec des eaux nouvelles est négligeable et les vitesses d'écoulement sont très faibles. Dans le cas considéré il faut aussi admettre que l'alimentation latérale de ces nappes par les eaux karstiques des marbres est négligeable ou nulle, même si un écoulement latéral, des marbres vers les nappes superficielles du delta, est confirmé dans certains cas. La différence de la perméabilité des marbres karstiques par rapport à la perméabilité du milieu poreux est toujours un obstacle important pour une telle alimentation.

Pour le cas du forage F 3 on ne sait pas si cette valeur reste stable ou varie en fonction du temps. D'autre part la différence importante, par rapport aux eaux des autres forages, conduit à supposer que ce forage se localise dans un axe de perméabilité élevée verticale et latérale. Actuellement ce forage se trouve dans un axe ancien de la rivière et la différence observée par rapport au forage F 1 (au voisinage de F 3) est due à l'intervention de formations étanches, confirmées, plus ou moins, par les colonnes lithologiques des forages.

Pour comparer les résultats des analyses isotopiques, nous signalons que l'analyse de l'eau des précipitations, dans la ville de Xanthi, en 1983, était de:

$$U T = 39 \quad , \quad \text{Cl}^- \text{p.p.m.} = 3$$

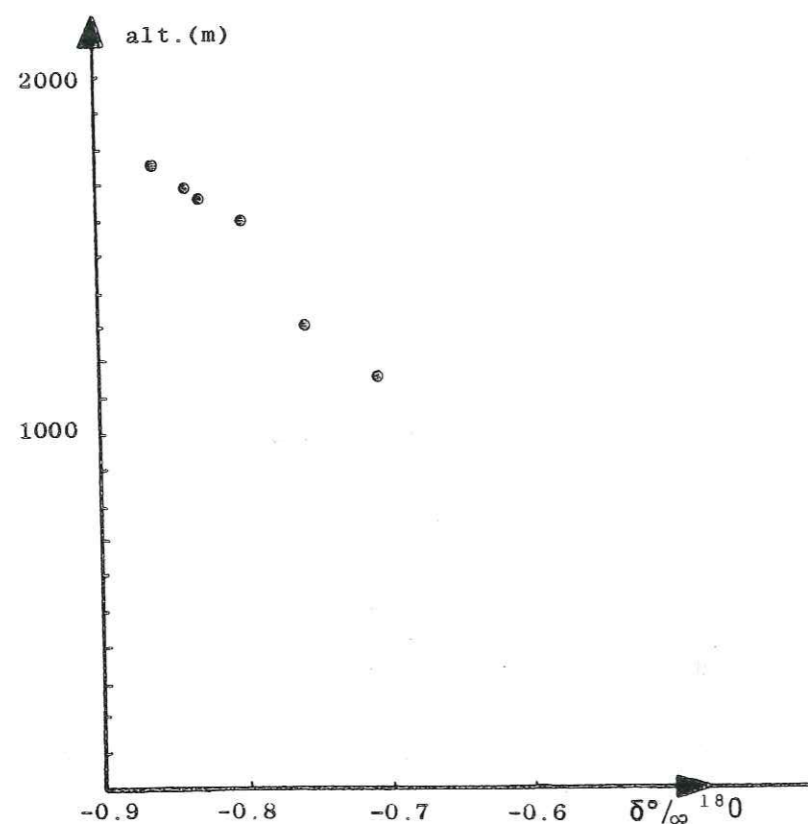
L'eau de pluie est donc encore riche en  $^3\text{H}$  au nord du delta du Nestos.

Les résultats des analyses isotopiques en  $^{18}\text{O}$  contribuent à la connaissance de l'origine des eaux profondes du delta. Ce qui est important, c'est que les valeurs de  $\delta\text{‰ }^{18}\text{O}$  obtenues montrent que ces nappes profondes du delta sont alimentées par des eaux qui correspondent à une altitude de précipitation et d'infiltration, assez élevée. Quelques études analogues pour autres régions helléniques ont permis l'établissement d'une corrélation entre la teneur en  $^{18}\text{O}$  des eaux souterraines et leurs altitudes d'infiltration. Par l'application de cette corrélation pour les forages du delta du Nestos, nous avons établi le tableau suivant.

forage	profondeur de prélèvement (m)	$\delta\text{‰ }^{18}\text{O}$	altitude moyenne d'infiltration de l'eau (m)
F <sub>1</sub>	118	-8.6	1750
F <sub>3</sub>	135	-7.1	1150
F <sub>10</sub>	135	-8.4	1700
F <sub>14</sub>	87	-8.0	1600
F <sub>16</sub>	101	-7.6	1300
F <sub>17</sub>	125	-8.3	1650

Une corrélation de ce type qui provient d'autres régions est toujours appliquée sous quelques réserves. Mais, comme la région du delta correspond aux altitudes limites (surface de la mer), il est évident, par les analyses isotopiques, qu'une partie des eaux alimentant les nappes profondes provient d'une précipitation et d'une infiltration faites à des altitudes beaucoup plus élevées que celle de la surface du delta (surface de précipitation locale). Par conséquent il est évident que la rivière et (ou) le massif karstique des marbres participent à l'alimentation des nappes profondes du delta. Il faut signaler ici que cette alimentation est limitée du point de vue quantitatif





Corrélation  $\delta\text{‰ }^{18}\text{O}$  - altitude d'infiltration de quelques régions helléniques

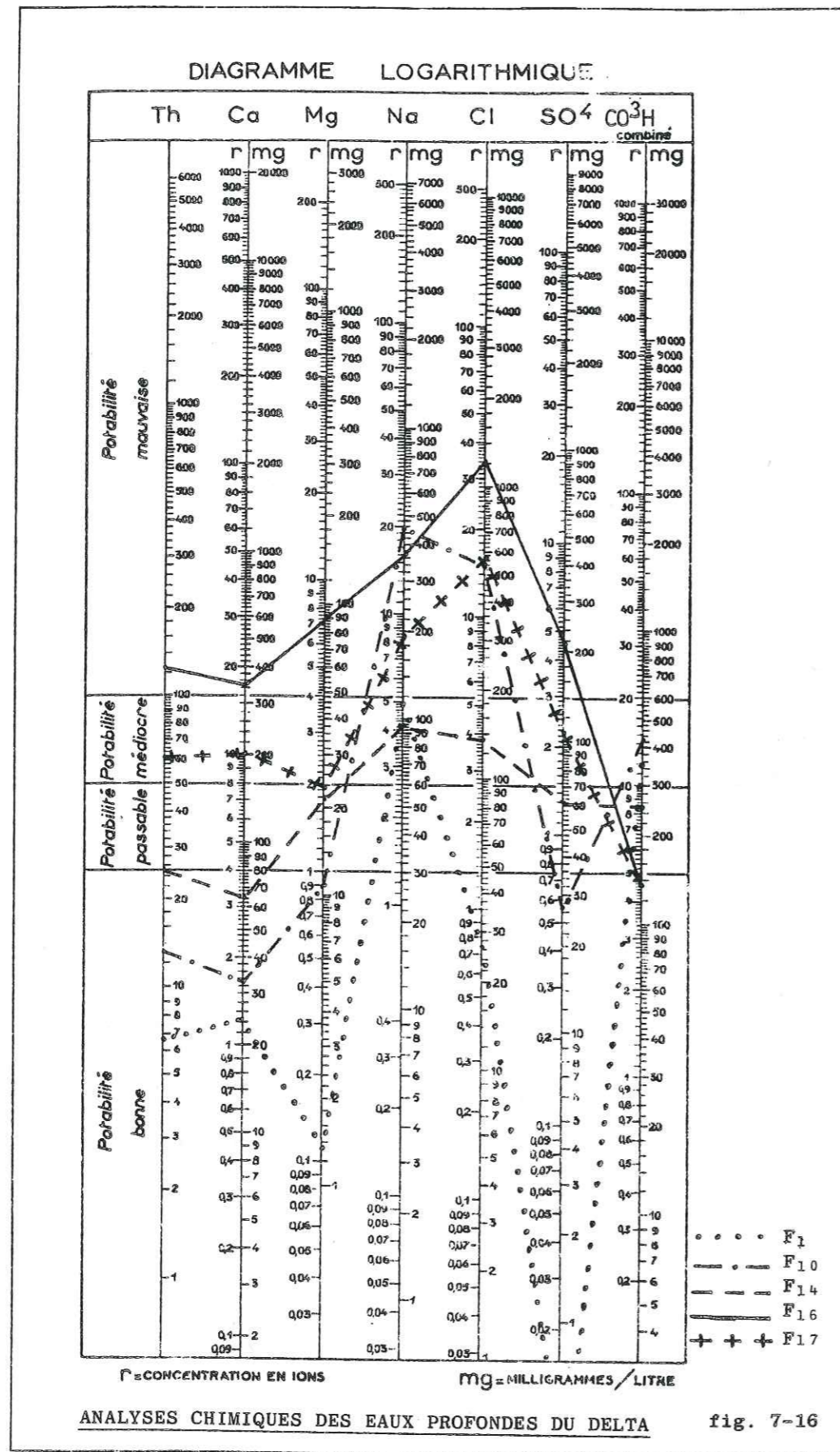
puisque les vitesses d'écoulement dans ces nappes sont très faibles, en le régime d'exploitation limitée.

Selon Levêque et al (1972) le contact tectonique du massif du Rhodope est bien distingué à l'aide des télédétections, dans la région du bassin de Xanthi-Komotini (image thermique). Son image radioactive ne présente que quelques pics. Pour la région de la plaine, les discontinuités du socle, couvertes par les sédiments du Plio-Quaternaire, ainsi que les côtes alluviales de grande épaisseur, sont bien marquées dans les photos infra-rouges et  $\gamma$ . En ce qui concerne les conditions hydrogéologiques dans le même bassin, les résultats obtenus montrent des conditions de drainage suffisant, qui se prolonge à la partie Est du delta du Nestos. Les analyses isotopiques montrent la présence de  $^3\text{H}$  dans l'eau de toutes les nappes aquifères. L'âge apparent des eaux est homogène et correspond à l'activité hydrologique des trois ou quatre dernières années. En fait, cette conclusion concerne les eaux phréatiques ou peu profondes qui ont, seules, subi des analyses isotopiques.

ANALYSES CHIMIQUES DES EAUX PROFONDES DANS LE DELTA DU NESTOS

	F <sub>1</sub>	F <sub>10</sub>	F <sub>14</sub>	F <sub>16</sub>	F <sub>17</sub>
PH	7,6 28°C	7,65 28°C	7,65 28°C	7,35 28°C	7,6 28°C
$\mu\text{Mhos (cm) } 25^\circ\text{C}$	780	2265	938	3670	1875
Cl meq/l	0,74	14,95	3,82	34,56	16,03
HCO <sub>3</sub> "	5,70	6,90	4,10	2,20	2,20
SO <sub>4</sub> "	traces	0,56	1,27	4,47	2,10
NO <sub>3</sub> "	positive	traces	positive	positive	positive
NO <sub>2</sub> "	positive	traces	traces	traces	traces
Ca "	1,22	1,67	3,22	17,33	10,17
Mg "	0,11	0,89	1,78	7,55	1,94
Na "	5,07	19,70	4,17	16,22	8,11
K "	0,04	0,15	0,02	0,13	0,11
Fe "					
NH <sub>4</sub> "	negative	negative	negative	negative	negative
Dur. per D°	0,0	0,0	2,5	63,5	27,7
" temp. "	3,7	7,1	11,5	6,2	6,2
" tot. "	3,7	7,1	14,0	69,7	33,9
S.A.R.	7,6	17,4	2,6	4,6	3,3
C-S	C <sub>3</sub> S <sub>1</sub>	C <sub>3</sub> S <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> -S <sub>1</sub>	C <sub>4</sub> -S <sub>1</sub>	C <sub>3</sub> -S <sub>1</sub>
D	78,7	87,9	45,4	39,3	40,0
N°test.	4,37	4,34			





### 7.2.3. LES CONDITIONS PIEZOMETRIQUES

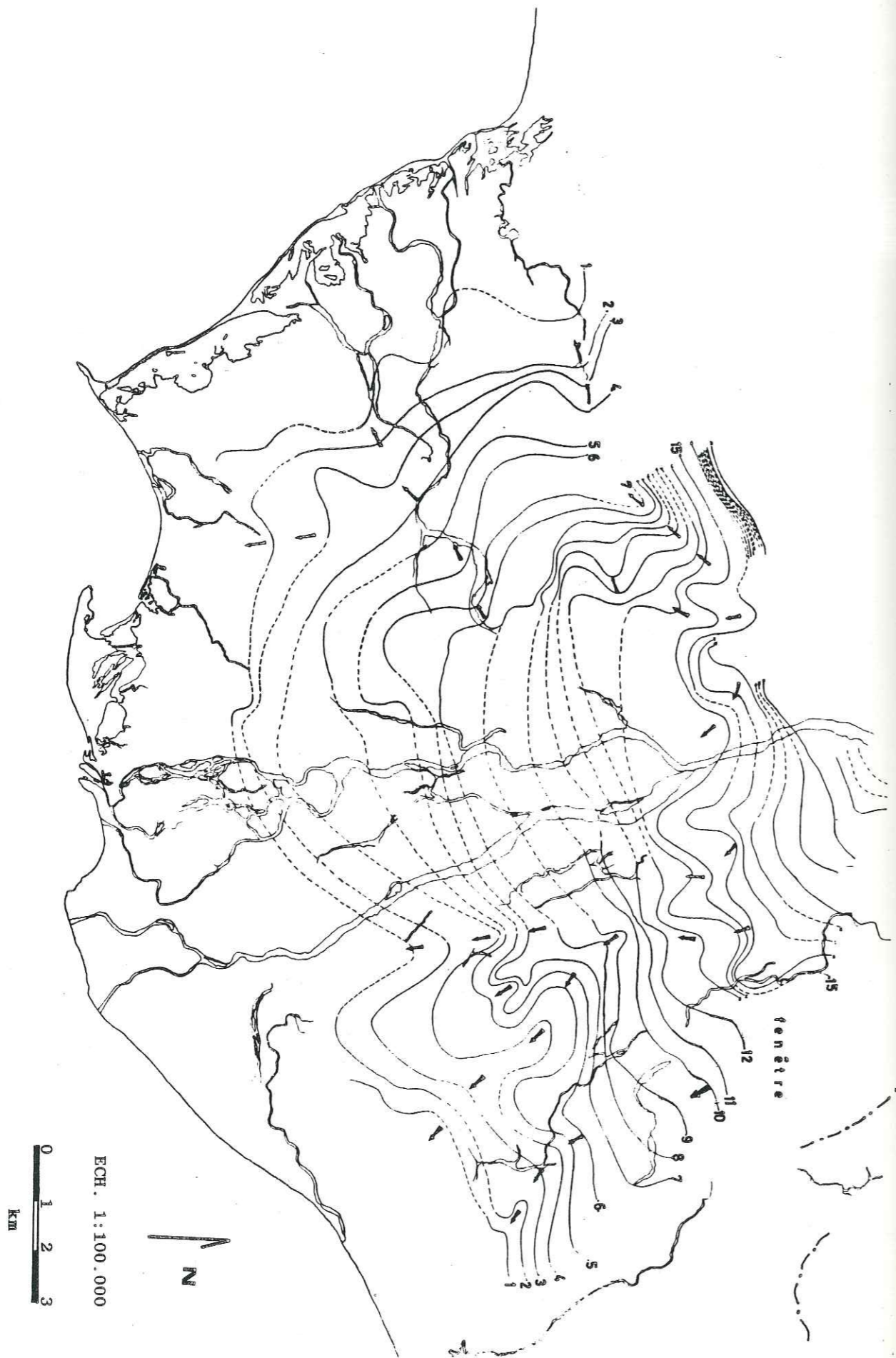
Pour le delta du Nestos et dans les conditions données, l'établissement de cartes piézométriques, pour les nappes profondes, n'est pas possible. Il manque des forages crépinés exclusivement en profondeur. Tous les forages exploitent toutes les nappes aquifères pénétrées.

En ce qui concerne la nappe superficielle phréatique, pour pouvoir établir une carte piézométrique, il faut envisager deux problèmes. D'abord, dans quelques zones du delta, la nappe phréatique n'est que l'extrémité, vers la surface, du système des nappes profondes, donc le niveau piézométrique dans ces zones est influencé par la charge hydraulique de ce système. Ensuite, le système du drainage artificiel, qui se développe chaque année, modifie la forme d'une telle carte.

La carte piézométrique, pour la nappe phréatique, de la fig. 7-12, est basée sur les mesure systématiques réalisées en Octobre 1978 et vérifiées partiellement les années suivantes. Cette carte présente la situation moyenne de la nappe phréatique dans la période des eaux basses. Pour la partie centrale du delta il manque des puits, donc des mesures du niveau piézométrique et par conséquent il manque la position et la forme des courbes piézométriques. Malgré tout ceci, la continuité des courbes à l'Est et à l'Ouest, la corrélation entre le niveau de la surface de la nappe et le niveau de l'eau de la rivière et les résultats des forages et des sondages électriques, confirment l'alimentation latérale de la nappe par la rivière. Par conséquent la partie centrale du delta, qui correspond au système des axes majeurs de la rivière, représente une ligne majeure de partage des eaux souterraines. Pour les deux parties restantes du delta, le nombre des axes principaux d'écoulement souterrain est limité. Dans la partie Ouest, hormis un axe qui se trouve vers la bordure du delta, il y a un axe principal, qui correspond à l'ancien lit du Nestos. Cet axe se partage en deux avant son arrivée aux côtes SO. Dans la partie Est, l'axe de direction NO-SE qui correspond à l'ancien lit de la rivière, s'unit à l'axe provenant de la "fenêtre" de Melissa, confirmant encore une fois l'alimentation en eau de la plaine deltaïque par le bassin de Xanthi. Plus au SE les axes se partagent de nouveau.



Fig. 7-12. Carte piézométrique de la nappe phréatique (Octobre)



La forme de la carte piézométrique confirme les données géologiques et hydrogéologiques, exprimées déjà aux chapitres précédents. Pour la bordure au NO du delta, les sédiments de la zone intermédiaire, entre la plaine deltaïque et les marbres, alimentent la nappe phréatique du delta, tandis qu'à la bordure SE, la série de collines qui séparent le delta du bassin de Xanthi est pratiquement étanche. Le faible écoulement de la nappe qui se produit dans les formations du Plio-Pléistocène est dirigé vers le delta à cause du système de gneiss, schistes et granites qui se trouve au dessous de ces formations. Dans cette région la ligne de partage des eaux souterraines coïncide avec celle des eaux superficielles.

#### 7.2.4. L'ENSEMBLE DES ECOULEMENTS SOUTERRAINS

L'alimentation en eau, des systèmes de nappes aquifères de la plaine deltaïque du Nestos, se fait d'une part directement par les précipitations et l'infiltration et d'autre part par la transfusion latérale d'une quantité des eaux du Nestos et des torrents aux bordures du delta.

A l'échelle du delta prédomine une hétérogénéité verticale ainsi que latérale de sédiments. De tout ceci il résulte parfois que la distribution des nappes aquifères est fortuite. Cependant il manque des forages expérimentaux qui pourraient fournir des données hydrodynamiques pour chacune des nappes aquifères. Pour le delta du Nestos, les forages disponibles exploitent toutes les couches aquifères pénétrées. Pour cette raison il n'est pas possible d'établir des cartes piézométriques précises pour les nappes profondes.

En supposant fausse l'impression que la distribution des nappes aquifères est fortuite, tandis qu'on peut établir des règles même pour un delta (v.ch. 4 et 5), nous avons procédé à l'utilisation d'autres moyens pour arriver à connaître le régime des écoulements souterrains.

La corrélation des données lithologiques des forages n'est pas un objectif qu'on peut facilement réussir.



Très souvent cette corrélation n'est pas possible même entre un forage et son piézomètre satellite, à cause des conditions sédimentologiques du delta. Pour cette raison nous avons considéré comme un ensemble, les couches perméables aquifères (sables, graviers, galets etc.), pour une profondeur donnée à chaque forage. L'épaisseur totale de ces formations est exprimée en % par rapport à la profondeur totale considérée. Ainsi, nous avons établi les trois cartes des fig. 7-13, 7-14, 7-15, pour les profondeurs de 0-100m, 0.125m et 0.150m.

Pour la profondeur de 0-100m, dans la partie Ouest du delta, les axes d'écoulement souterrain sont bien distincts et correspondent aux axes des lits de la rivière. Ceci vérifie notre opinion que le ruissellement du Nestos se faisait plus à l'Ouest qu'aujourd'hui. Dans la partie Est on a l'apparition d'un axe qui provient de la "fenêtre" de communication du bassin du delta avec le bassin voisin de Xanthi. Autour de cet axe les matériaux sont assez perméables, ainsi que dans la partie Ouest (fig. 7-13).

Pour la profondeur considérée de 0-125m la situation reste la même, avec les axes toujours bien distincts (fig. 7-14).

Pour la profondeur de 0-150m les axes ne sont pas si distincts et, pour la partie Est, l'axe de la "fenêtre" n'existe plus. Ceci veut dire qu'avant la formation de l'épaisseur finale de 125m du delta, les apports du bassin de Xanthi ne participaient pas à la formation du delta ou leur participation était limitée et, de toute façon, non déterminante (fig. 7-15).

Dans ce cadre on pourrait considérer des épaisseurs intermédiaires des formations aquifères et établir des cartes intermédiaires sur les changements du régime d'écoulement souterrain.

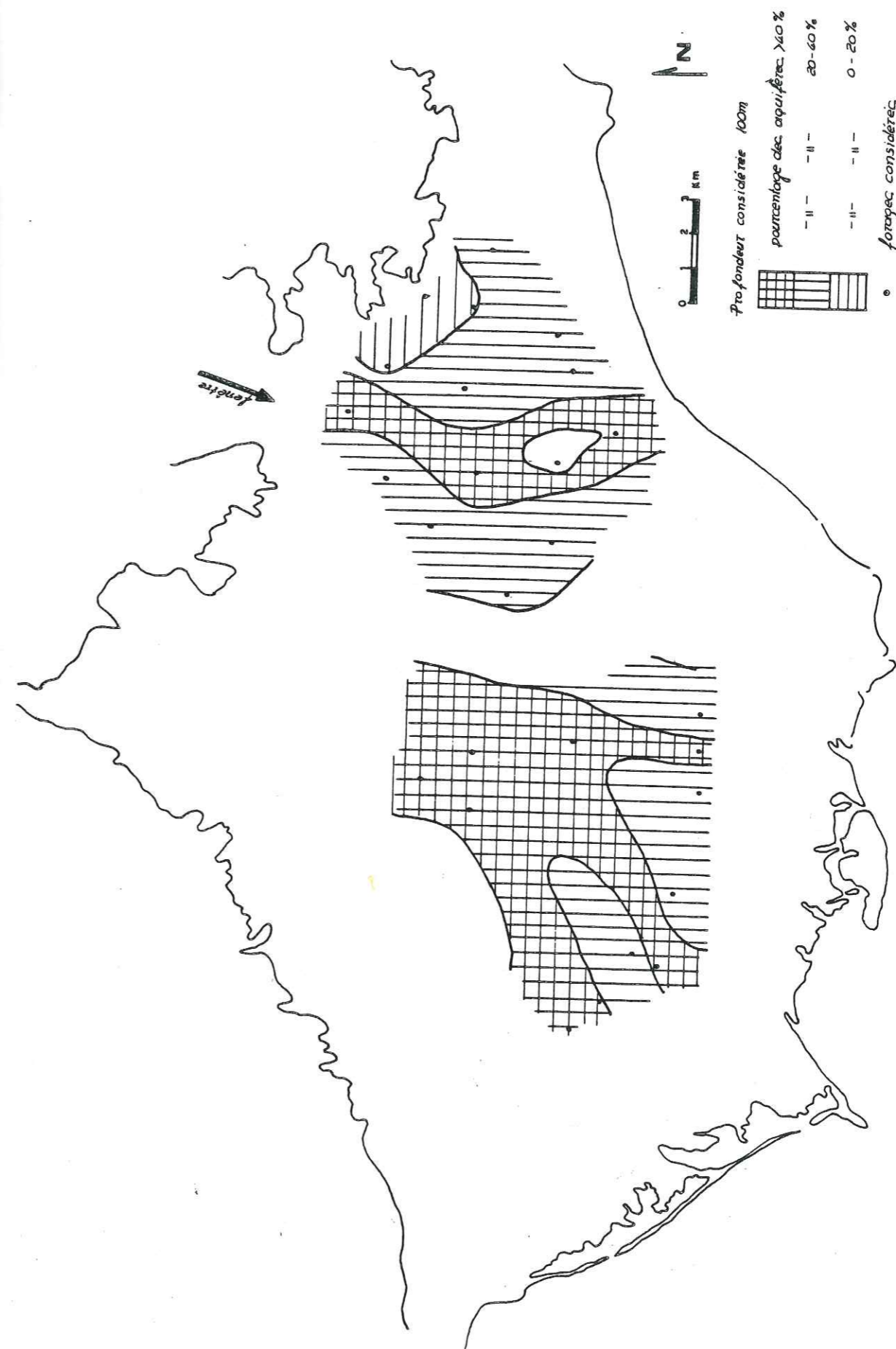


Fig. 7-13



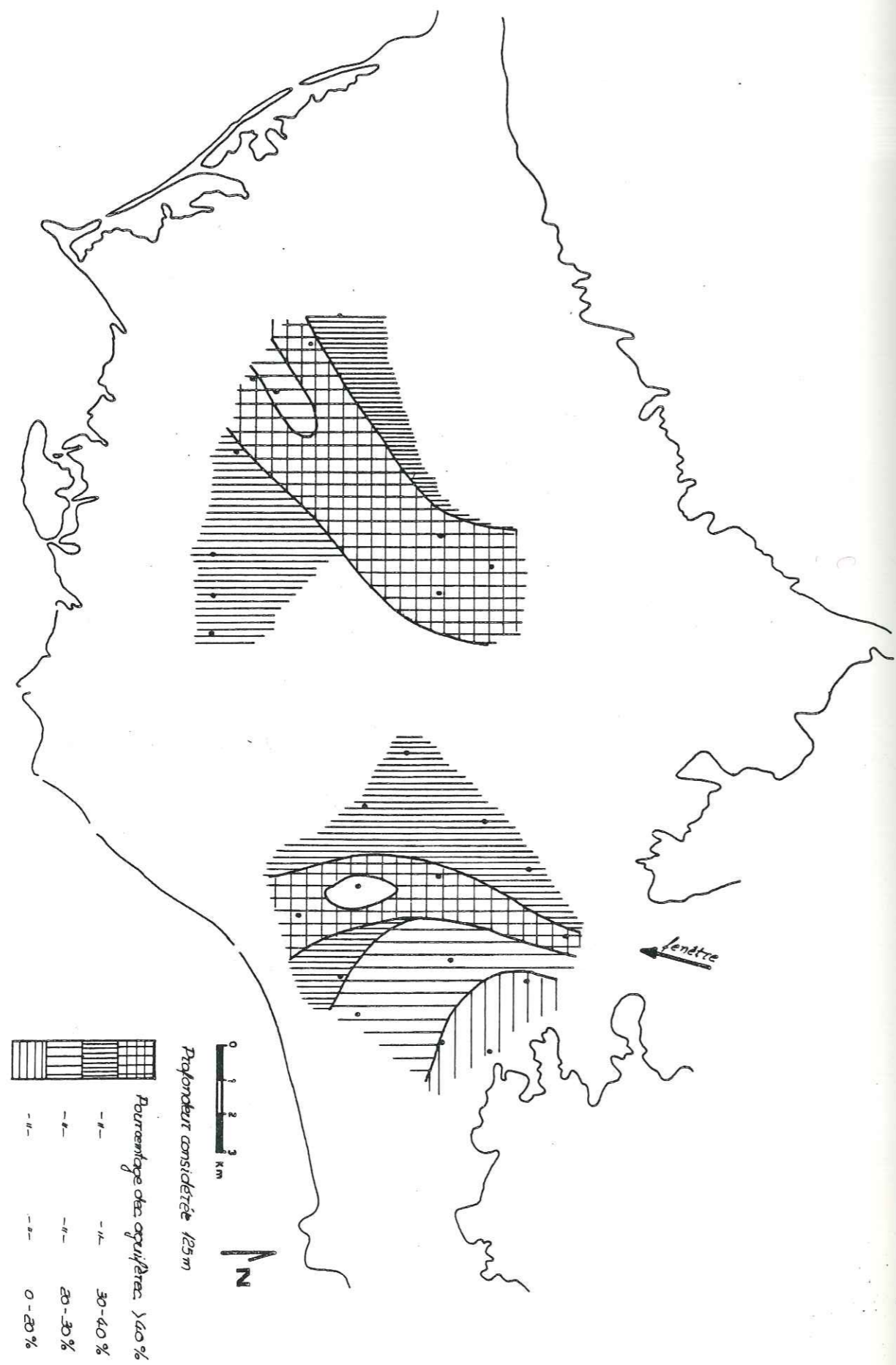


Fig. 7-14

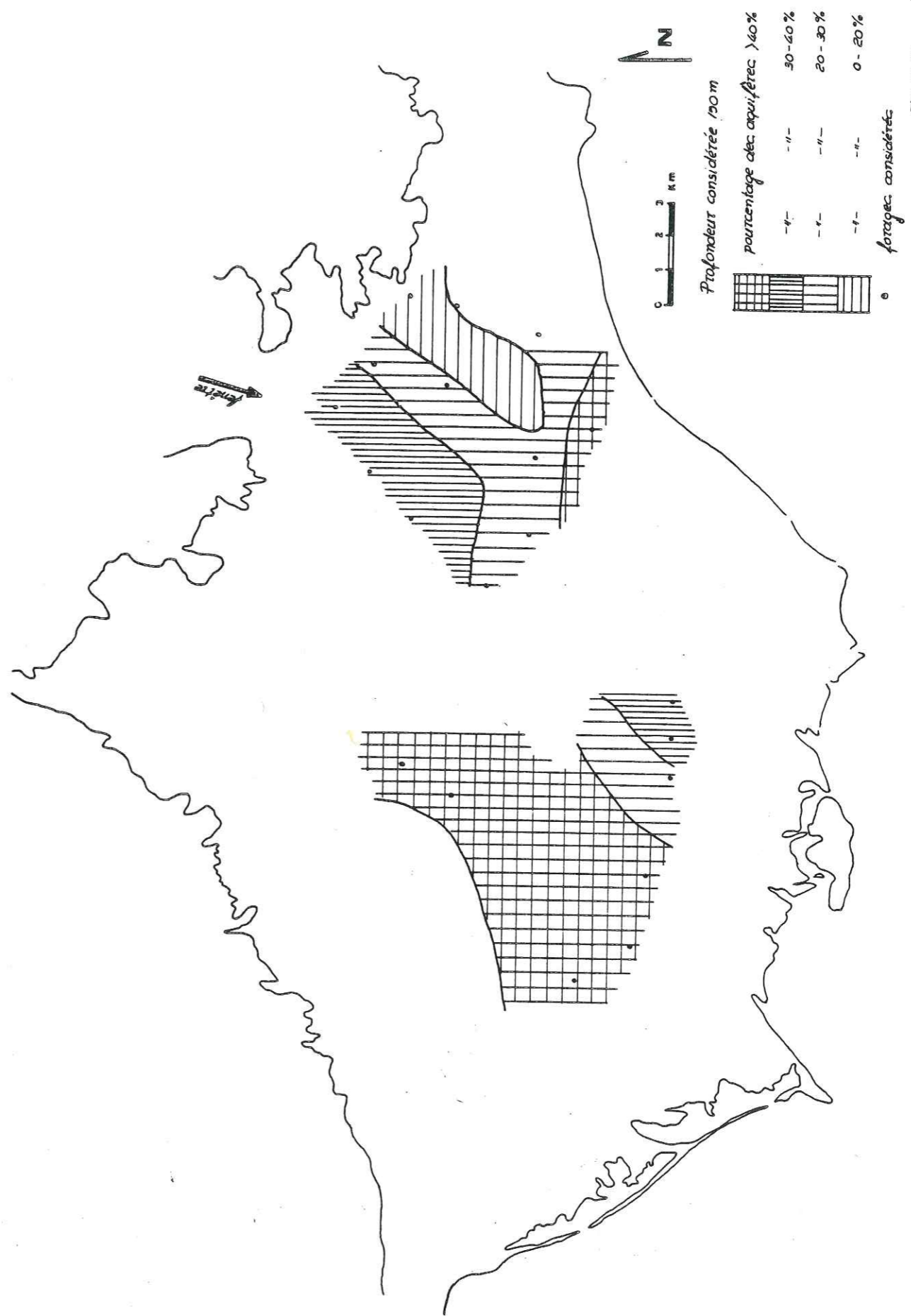


Fig. 7-15



7.2.5. LES CONDITIONS HYDROCHIMIQUES

7.2.5.1. LA QUALITE DE L'EAU DU NESTOS

La comparaison de la composition chimique et des propriétés physico-chimiques de l'eau de la rivière en fonction du niveau de l'eau (fig. 7-17), conduit aux observations suivantes.

On constate une bonne concordance avec la règle générale selon laquelle, plus le débit de la rivière diminue, plus la concentration des ions augmente. La déviation qu'on observe en Août 1973 ne change pas le régime donné. D'une façon approximative, on peut arriver à la conclusion que la composition chimique de la rivière reste presque stable et que les fluctuations observées (des teneurs des différents ions), sont dues à l'eau des précipitations qui se joint rapidement au ruissellement, sans avoir le temps de s'enrichir en ions dans le terrain.

L'eau de la rivière présente une qualité générale qui ne change pas au cours de l'année. Ses caractères généraux restent stables:

- S.A.R. = 0.2 (sauf quelques exceptions, mais toujours < 0.4).
- Classification Salinité-Alcalinité: C<sub>2</sub>-S<sub>1</sub>
- Conductivité électrique entre 170 et 400  $\mu$ mhos/cm.
- pH entre 6.8 et 7.8.

Les différences remarquables dans la composition chimique de l'eau de la rivière, correspondent à la saison sèche de l'année, dont la durée est variable en fonction du régime hydrologique de chaque année (ex. 1972 Mai à Octobre, 1973 Juillet à Septembre).

On peut admettre que les variations de la Conductivité électrique ainsi que les variations d'autres paramètres (P.H., S.A.R., Salinité-Alcalinité, concentrations en ions) ne sont pas importantes au cours d'année, tenant compte qu'il s'agit d'une fleuve dont le débit n'est pas régularisé dans le bassin versant, sauf le petit barrage de Toxotes, à l'entrée de la rivière dans le delta.

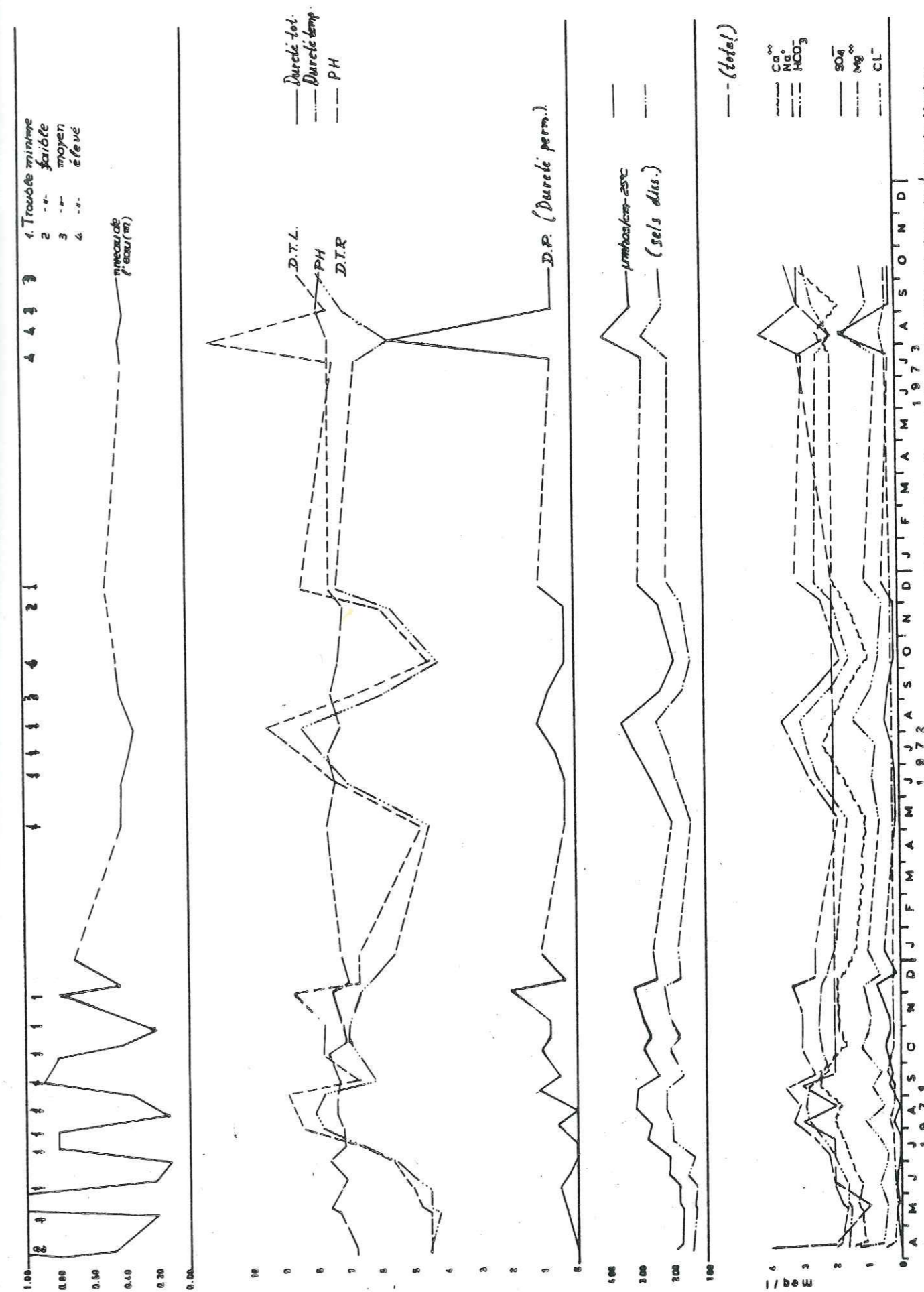


Fig. 7-17. Variations de la composition chimique de l'eau du Nestos.



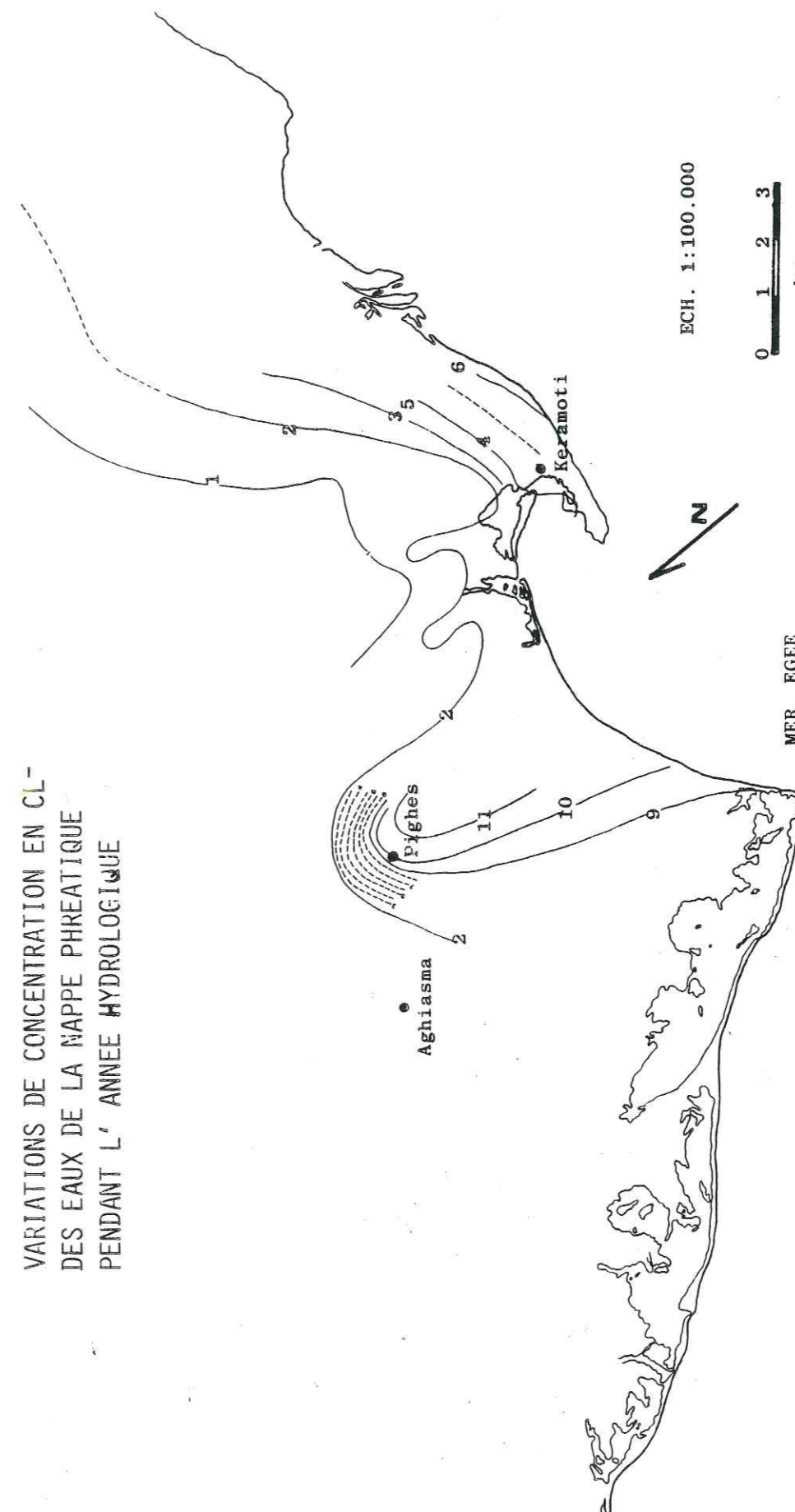
### 7.2.5.2. LA QUALITE DES EAUX DE LA NAPPE PHREATIQUE

D'après les analyses chimiques des eaux souterraines du delta on peut arriver aux conclusions suivantes:

Partie Ouest (hautes eaux) Pour la plupart des puits et des forages, les eaux souterraines présentent une Salinité élevée ( $C_3$ ), avec une conductance électrique de 730 à 2250 mhos/cm (25°C). Une conductance médiocre est marquée dans la zone qui se trouve vers les bordures NO du delta et dans la zone centrale du delta à côté du Nestos. Cette dernière zone se prolonge vers le village d'Aghiasma, cette prolongation correspondant avec l'axe du lit ancien de la rivière. Le facteur principal pour la valeur de la Salinité est l'intrusion marine et les eaux provenant par la "fenêtre" de Melissa. Ces eaux sont plus riches en  $Na^+$  à cause du voisinage du massif cristallin et cristallophyllien. L'Alcalinité est, en général, faible ( $S_1$ ) ou médiocre ( $S_2$ ) donc, la concentration en  $Na^+$  dans les eaux n'est pas élevée. On trouve des valeurs plus élevées dans les mêmes conditions que pour la Salinité. Les valeurs de pH sont entre 6.90 et 7.85.

Partie Ouest (basses eaux) Dans cette période les conditions hydrochimiques ne changent pas par rapport celles de Février. On a quelques changement locaux qui n'influencent pas le régime général de cette partie du delta.

Partie Est (hautes eaux) Ici c'est la Salinité médiocre ( $C_2$ ) prédomine, mais il existe un certain nombre de zones à Salinité élevée ( $C_3$ ). Cette dernière est marquée dans quelques zones côtières (horizontales et verticales) et surtout dans la région de Dassochori. Cette Salinité concerne quelques zones à la surface et quelques nappes aquifères, en profondeur, en fonction de leur charge hydraulique et leur régime d'exploitation. D'autre part l'Alcalinité est toujours faible ( $S_1$ ) sauf la région côtière et les régions qui se trouvent vers la "fenêtre" de Melissa, pour les mêmes raisons exprimés ci-dessus. Le PH est de 6.80 à 8.10.





Partie Est (basses eaux) Comme dans la partie Ouest, les différences de la qualité des eaux souterraines sont peu importantes au cours de l'année hydrologique (fig. 7-28 à 7-31).

#### 7.2.5.3. L'INTRUSION MARINE

En général, la forme de la carte de la distribution de  $Cl^-$ , est identique à celle de la carte piézométrique. Les axes d'intrusions marines se localisent sur les lignes de partage des eaux souterraines, tandis que cette intrusion n'avance pas beaucoup dans les axes d'écoulement souterrain (fig. 7-18). A l'échelle locale on trouve quelques déviations de cette règle générale, qui sont dues à différents facteurs. L'artésianisme phréatique qui permet la décharge hydraulique à la surface, permet, en même temps, l'avancement de l'intrusion marine. D'autre part les puits et les forages n'exploitent pas les mêmes nappes aquifères dans le delta, donc plusieurs fois les analyses chimiques ne sont plus représentatives pour la nappe phréatique ou pour les nappes profondes.

Ceci est, surtout, marqué dans la partie Ouest du delta, qui présente la plus grande hétérogénéité et anisotropie. Cette hétérogénéité générale du delta, fait qu'il n'y a pas une corrélation linéaire entre la distance de la mer et la concentration en  $Cl^-$ . Les corrélations que nous avons essayé, entre la distance des puits à la mer et la concentration en  $Cl^-$  (arithmétiques ou logarithmiques) pour Février et Octobre et pour les parties Ouest et Est du delta, ont donné des coefficients de corrélation 0.42-0.58.

#### 7.2.5.4. LE RAPPORT Ca/Mg

Le rapport  $r \text{ Mg/r Ca}$ , très souvent utilisé en Hydrogéologie est un moyen pour la définition du régime hydrochimique des eaux souterraines.

Les rapports  $\frac{\{CO_3\}\{Mg\}}{\{CO_3\}\{Ca\}} = \frac{K_{Mg}}{K_{Ca}}$  montrent qu'avec  $K_{Mg} = 2.6 \cdot 10^{-3}$

et  $K_{Ca} = 10^{-8}$ , il peut y avoir dans une eau beaucoup plus de Mg que de Ca jusqu'à un rapport  $\frac{\{Mg\}}{\{Ca\}} = 2.6 \cdot 10^3$ , ce qui peut arriver si l'

eau reçoit un apport de Mg provenant d'une autre source que celle des carbonates. Il est à remarquer, que d'une manière générale, le rapport  $r \text{ Mg/r Ca}$  est assez constant dans des roches assez variables (Schoeller, 1962). Cela doit être en rapport avec les solubilités respectives des carbonates. Dans le cas où la dissolution n'est pas poussée à saturation, lorsque l'on dissout de la dolomie seule, le rapport Mg/Ca de l'eau est le même que celui de la dolomie. Dans les calcaires dolomitiques, la roche s'enrichit en dolomie, la solubilité de la calcite étant plus grande. Donc le rapport Mg/Ca des eaux, sera plus faible que celui de la roche.

Le rapport  $r \text{ Ca/r Mg}$  pour la nappe superficielle. Pour ce rapport nous avons établi deux cartes, qui correspondent aux périodes de Février et d'Octobre (fig. 7-19, 7-20), La forme des deux cartes est presque la même, malgré la différence des valeurs des courbes. La forme générale n'est pas loin de la forme de la carte piézométrique, ceci étant très intéressant pour l'analyse de cette forme. On peut donc arriver aux conclusions suivantes :

- (a) La coïncidence des formes des cartes  $r \text{ Ca/r Mg}$  et piézométrique montre qu'il n'existe pas d'axes d'écoulement souterrain qui ne sont pas visibles sur la carte piézométrique. Le rapport Mg/Ca augmente selon la direction d'écoulement souterrain.
- (b) L'augmentation de ce rapport signifie que, dans la plaine deltaïque, il n'y a pas d'apports, en eau, supplémentaires, au moins par le voisinage de cette région. Donc le régime d'écoulement souterrain est très



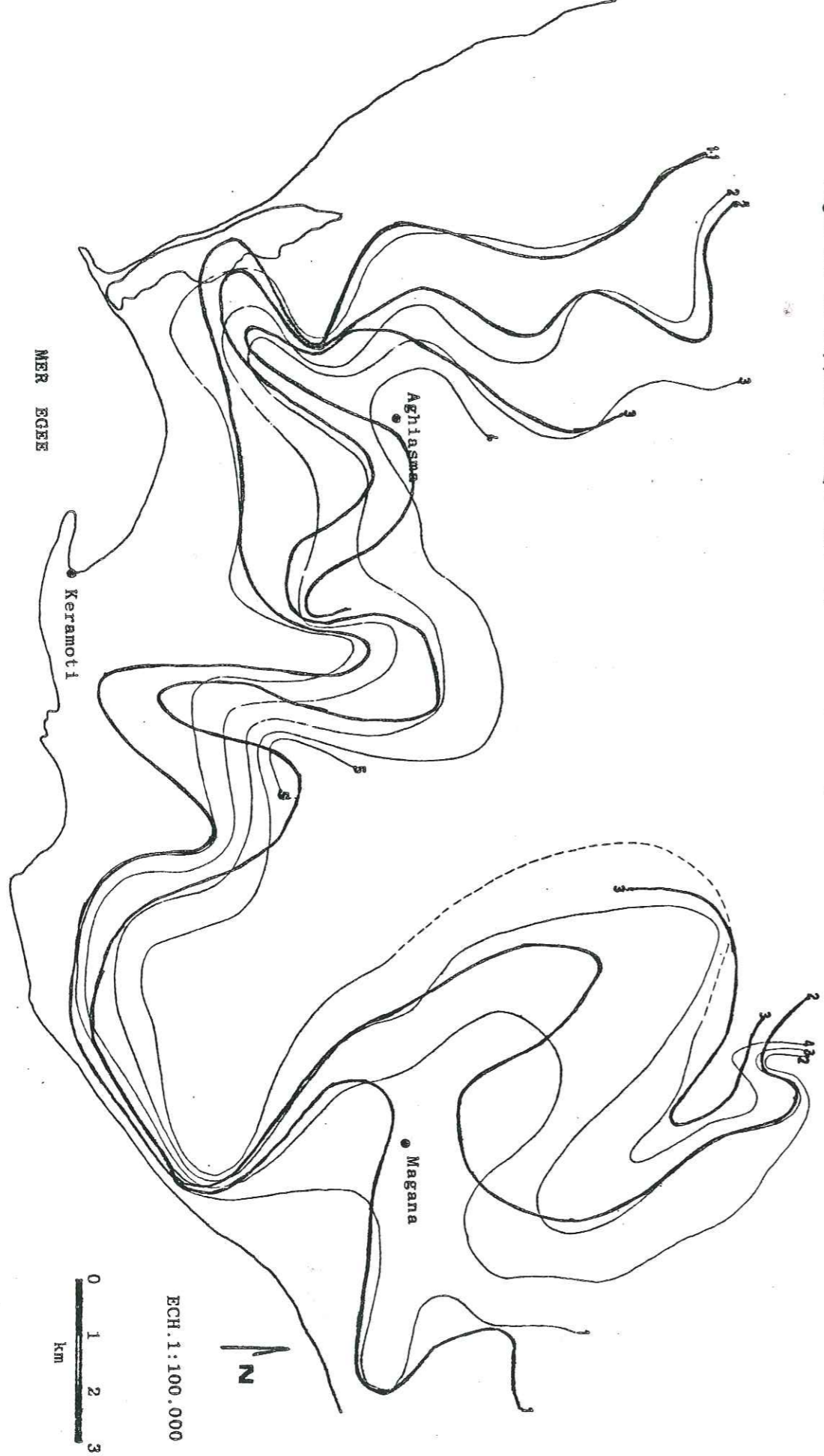


Fig. 7-19. Le rapport Ca/Mg (nappe superficielle) -- FEV, -- OCT

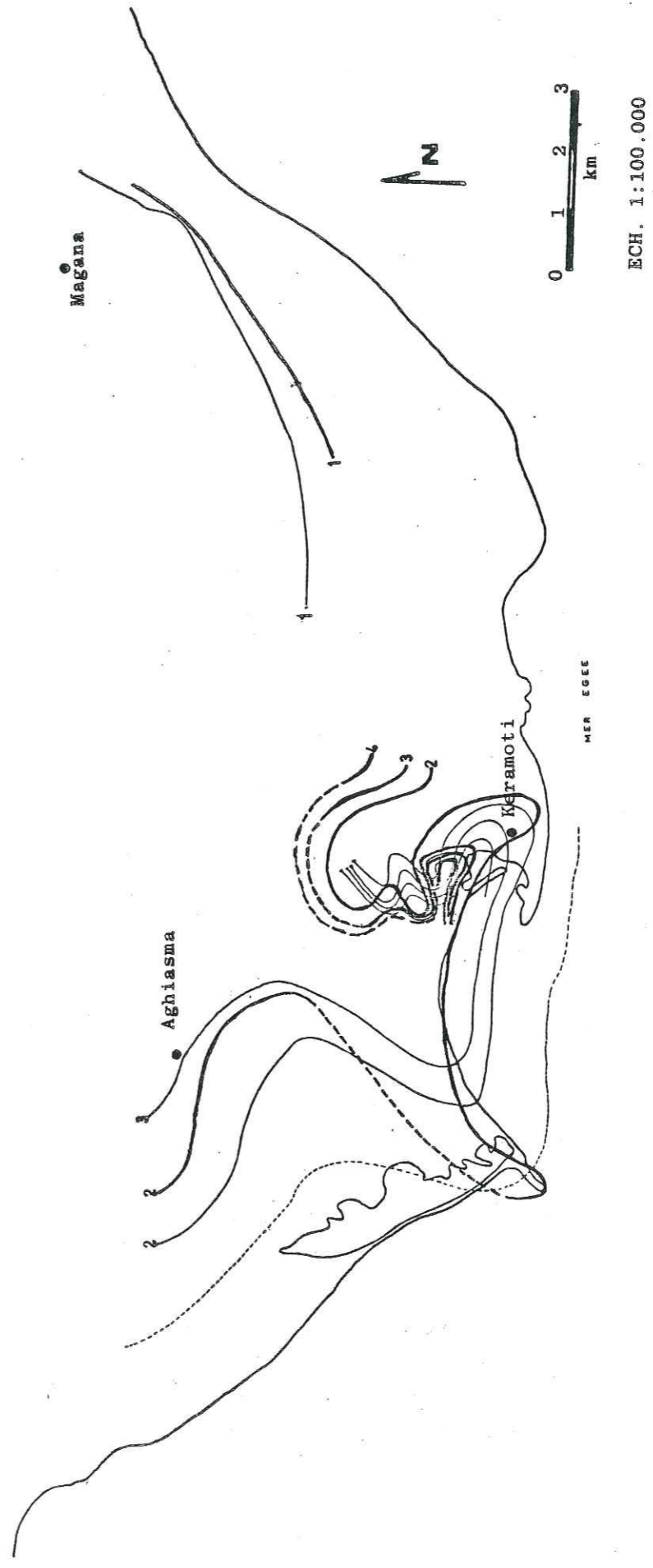


Fig. 7-20. Le rapport Ca/Mg (nappes profondes) -- FEV, -- OCT



bien exprimé par la forme de la carte piézométrique.

- (c) La coïncidence des formes des cartes de Février et d'Octobre signifie que, pendant l'année hydrologique, il n'y a pas des changements importants sur le régime d'écoulement souterrain. Les plus grandes différences se trouvent dans la région Est du delta. Dans cette région, l'alimentation en eau de la nappe, en dehors des précipitations et de l'infiltration depuis la rivière se fait par les apports de la "fenêtre" de Melissa. Il est bien normal que les changements hydrogéologiques dans le bassin de Xanthi, pendant l'année, provoquent cette différence sur la forme et la localisation des courbes.

Pour les nappes profondes, il manque les données pour établir une carte de toute la région du delta. Cependant, il semble que dans la partie Est et dans la partie Ouest l'écoulement, donc la diminution du rapport Ca/Mg se fait d'une façon normale. Pour la région côtière centrale du delta (région de Keramoti), on observe quelques anomalies caractéristiques. Plus précisément, les concavités des courbes de Février se transforment en convexités en Octobre et les convexités en concavités. Il se fait donc un déplacement des petits axes locaux d'écoulement souterrain. Ceci résulte des modifications importantes de la charge hydraulique des nappes artésiennes peu profondes (v.ch. 7, artésianisme phréatique), qui modifient le régime de la distribution dans l'espace des charges hydrauliques totales (les forages exploitent toujours toutes les formations aquifères pénétrées).

Puisque la concentrations en  $Mg^{2+}$  augmente vers la mer, il semble que les roches métamorphiques ne participent pas beaucoup à la formation de la composition chimique des eaux souterraines.

#### 7.2.5.5. L'INDICE D'ECHANGE DES BASES (I.e.b.)

L'indice d'échange des base (I.e.b.) est un terme proposé par Schoeller en 1934 pour le rapport entre les ions échangés et les ions de même nature, primitivement existants. Si nous admettons que dans l'eau primitive il y avait autant de  $r Cl$  que de  $r(Na+K)$ , lorsqu'il y a échange de

Na et de K de l'eau contre des alcalino-terreux des permutolites, on a, pour l'échange des alcalins:

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

Lorsqu'il y a un échange des alcalino-terreux de l'eau contre des alcalins, on a pour l'échange des alcalino-terreux:

$$I.e.b. = r \frac{Cl-(Na+K)}{SO_4 + HCO_3 + NO_3}$$

Un déséquilibre dans l'eau  $\delta = rCl - r(Na+K)$  n'est pas toujours une caractéristique d'échange des bases (Schoeller, 1962). En effet l'eau de mer a un rapport  $\frac{Cl-(Na+K)}{Cl}$  positif sans l'intervention obligatoire.

d'échange des bases. Les eaux provenant de l'altération des roches cristallines et clistallophylliènes ont, presque toujours, un rapport  $\frac{Cl-(Na+K)}{SO_4 + HCO_3 + NO_3}$  négatif, puisque la destruction des silicates amène beaucoup plus d'ions alcalins que d'ions chlore en solution.

La distribution des valeurs d'indice d'échange des bases

$$I.e.b. = \frac{Cl^--(Na^++K^+)}{SO_4^{2-}+HCO_3^-+NO_3^-}$$

pour le delta du Nestos figure dans la carte de fig. 7-21. La forme de cette carte présente une déviation par rapport à la forme de la carte piézométrique à cause des anomalies lithologiques du delta et surtout des intercalations argileuses et argilomarneuses. Malgré tout ceci, si on constate que les valeurs de I.e.b. deviennent plus négatives, sans cesse, dans la direction d'écoulement souterrain, on aperçoit que la distribution de l'ensemble des valeurs de I.e.b. est bien régulière. D'après les analyses chimiques disponibles, les valeurs de I.e.b. varient entre -0.09 et -0.9. Cette distribution correspond à la proéminence deltaïque dont les eaux souterraines présentent une composition chimique originelle, modifiée progressivement par l'intrusion marine.



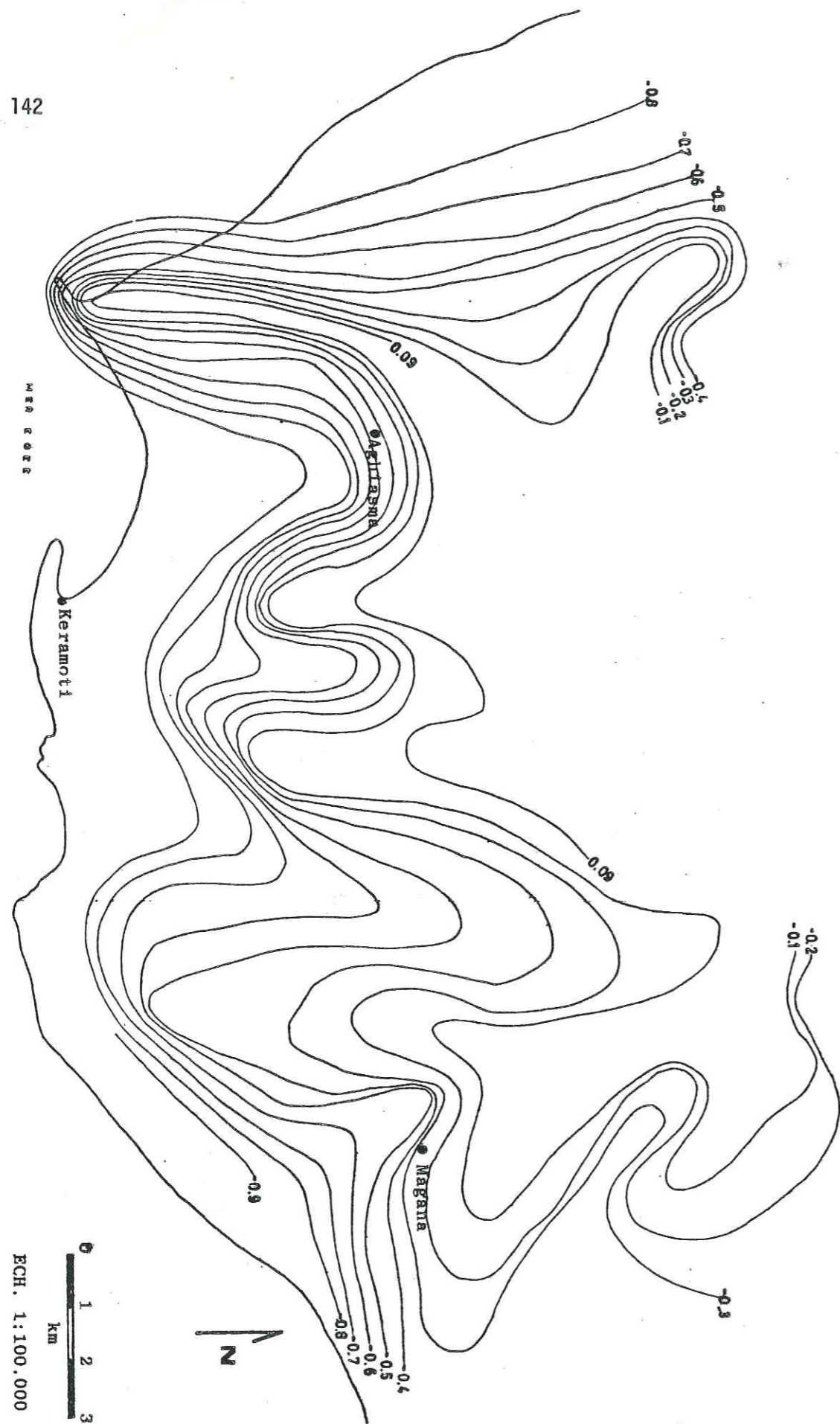


Fig. 7-21. La distribution de l.e.b. (FEV)

#### 7.2.5.6. LA DISTRIBUTION DE LA RESISTIVITE ELECTRIQUE

La forme de la distribution de la résistivité (ou de la conductance) électrique reste la même au cours de l'année hydrologique (fig. 7-21, 7-21a). Les valeurs de conductance diminuent aux axes d'écoulement souterrain. Ceci vérifie que les variations dans la qualité des eaux sont dues à l'intrusion marine et à l'échange des bases. Donc, malgré l'hétérogénéité élevée à l'échelle du delta il y a un équilibre entre la distribution quantitative et qualitative des eaux souterraines, au moins en ce qui concerne la nappe phréatique. Pour les nappes profondes il y a des déviations qui sont dues à la discontinuité de ces nappes et la variabilité de leur charge hydraulique, surtout sous un régime d'exploitation.

#### 7.2.5.7. LA QUALITE D'ENSEMBLE DES EAUX SOUTERRAINES FOURNIES PAR LES FORAGES

D'après les analyses chimiques de l'eau de chaque forage, avant, durant et après le pompage, on peut exprimer les résultats suivants:

- La composition chimique de l'eau, fournie par chaque forage, n'a pas changé à cause du pompage pour le  $t$  et le  $Q$  considérés. Donc, le débit de pompage n'exerce aucune influence sur le régime hydrodynamique d'équilibre entre l'eau douce et l'eau salée, surtout pour le cas des forages situés vers la côte.
- La composition chimique des eaux des forages divers, varie fortement. Cette variation est due aux nappes diverses pénétrées par les forages. En général, le débit de chaque nappe est inversement proportionnel à l'intrusion de l'eau de la mer (théorie exprimée par Ghyben-Hertzberg), sauf en cas de diffusion, où la composition chimique du terrain et sa granulométrie interviennent aussi. Ensuite, la composition chimique de chaque nappe est significative de son parcours jusqu'au point considéré et de ses sources d'alimentation. La composition chimique de l'eau de chaque forage (eau analysée après l'essai de pompage) est illustrée aux figures 7-22 et 7-23 (diagrammes logarithmiques de SCHOELLER).



Les zones des forages 4,5,6 et 14,16,20, présentent une composition chimique presque identique au point de chaque forage, ainsi que les zones des autres forages présentent une variation forte et remarquable.

- Pour la plupart des forages, ils s'agit d'eaux potables, sauf les cas des eaux des forages 16,17,18,19, en raison de leur dureté totale (surtout liée à la concentration de Ca) et de leur concentration en Cl.

En ce qui concerne la possibilité d'usage de ces eaux pour l'irrigation de la région du delta, il faut qu'on tienne compte que cette possibilité n'est pas seulement fonction de la composition chimique de l'eau, mais aussi fonction de la composition chimique du terrain et des espèces cultivées. Donc, la caractérisation d'une eau peut varier selon les méthodes diverses de classification considérées. Pour les eaux des forages du delta du Nestos, on peut distinguer les cas suivants:

- Pour la plupart des forages, il s'agit d'eaux qui présentent une alcalinité moyenne et, en même temps, une salinité faible (fig.7-25). On peut, donc, les considérer comme des eaux, en général, acceptées pour l'irrigation.
- On obtient les mêmes résultats, d'après la classification proposée par WILCOX (fig. 7-26), basée sur le conductivité électrique (qui correspond à une certaine quantité des sels dissous) et la concentration (%) en Na. Selon WILCOX, la plupart des eaux analysées sont caractérisées comme des eaux "excellentes à bonnes" ou "bonnes à acceptables".
- La concentration en Na est très importante pour l'eau d'irrigation puisque Na réagit avec le sol en éliminant sa perméabilité et, donc le drainage. Il s'agit d'un cas particulier du phénomène assez connu sous le nom d' "échanges des bases". L'absorption de Na provoque une augmentation du rayon de la zone d'absorption autour les particules argileuses et, par conséquent, une élimination des

dimensions des espaces où l'eau peut s'écouler par gravité (drainage). Le laboratoire de la Salinité du Département de l'Agriculture (U.S.A.) a établi une relation entre le Na, d'une part et le Ca, Mg, d'autre part, permettant une classification des eaux d'irrigation généralement acceptées. Il s'agit du terme bien connu S.A.R. (Ratio de Sodium Absorbé).

Cette relation ( $SAR = \frac{Na}{\sqrt{(Ca+Mg)/2}}$ ) exprime directement la possi-

bilité et la grandeur d'absorption de Na par le sol. Selon cette classification nous avons le tableau suivant:

SAR	Caractérisation de l'eau	Forages correspondants
<10	excellente	1 (5.30), 2 (0.92), 3 (0.58), 7 (0.80), 11 (0.22), 12 (5.34), 14 (1.31), 15 (1.28), 16 (3.42), 17 (4.83), 18 (4.51), 19 (4.00), 20 (1.09).
10-18	bonne	6 (15.32), 10 (18.00), 13 (12.30)
18-26	médiocre	4 (24.50), 5 (20.00), 8 (21.30)
> 26	mauvaise	9 (36.20)

Ces résultats sont aussi illustrés dans la figure 7-24 (représentation cartographique de S.A.R.). Sur cette carte on observe deux régions à valeurs irrégulières ( $F_7$  et  $F_{12}, F_{13}$ ). Les mêmes régions montrent aussi des anomalies à l'élaboration des données différentes (voir aussi la représentation cartographique des Transmissivités). On a supposé que certaines anomalies dans la composition chimique des eaux souterraines dans ces régions, sont dues à l'enrichissement particulier des eaux durant leur parcours dans les formations cristallines et cristallophylliennes de Rhodope. Pour que l'on puisse vérifier cette hypothèse et examiner la participation de l'eau de la mer dans la composition chimique des eaux souterraines, nous avons utilisé le critère de Revelle.



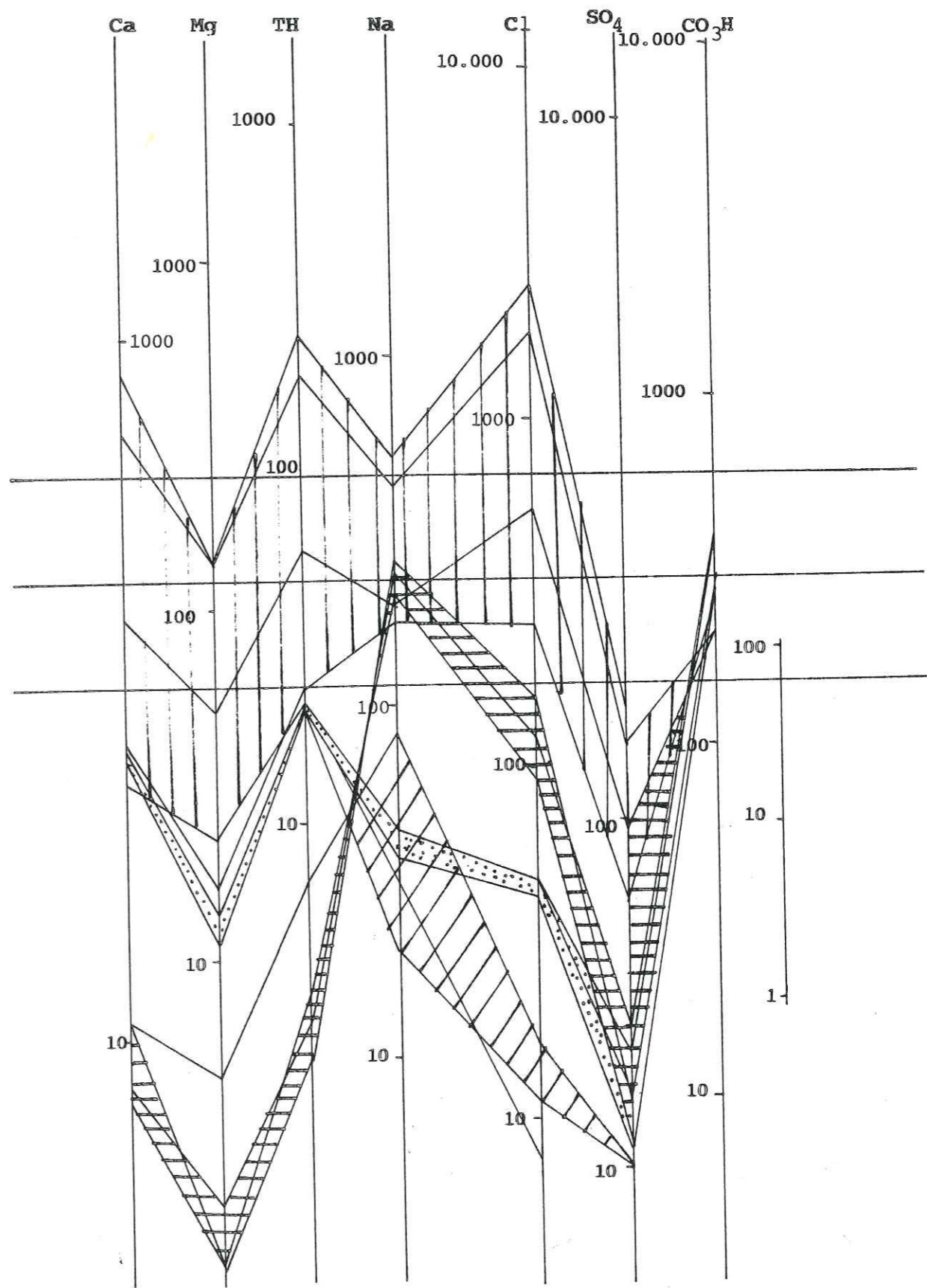
L'analyse chimique d'une eau, qui se trouve dans la zone d'intrusion de la mer, donne des résultats différents d'un mélange simple proportionnel entre l'eau douce et l'eau salée. Les modifications sur la composition chimique de cette eau sont dues à trois facteurs.

- Les échanges de base entre l'eau et les minéraux de l'aquifère.
- La réduction des sulfates et la substitution de carbonates ou d'un autre acide faible.
- La dissolution et la précipitation.

Seul le dernier processus peut changer la concentration totale des sels. Pour éviter des erreurs sur la vérification de l'intrusion de l'eau de la mer, Revelle a établi le rapport  $\frac{Cl}{CO_3 + HCO_3}$  comme un critère

correspondant.  $Cl^-$  est l'anion prédominant dans l'eau de la mer, tandis que sa concentration dans les eaux souterraines est normalement faible, sauf quelques cas exceptionnels (évaporites, roches ultrabasi-ques etc.). En plus les processus précédents n'influencent pas les valeurs de la concentration de  $Cl^-$ . D'autre part le  $HCO_3^-$  est norma-lement l'anion prédominant dans les eaux souterraines et sa présence dans l'eau de la mer est faible. Parfois il y a d'autres facteurs qui peuvent changer le rapport  $Cl/CO_3 + HCO_3$  mis à part l'intrusion de la mer.

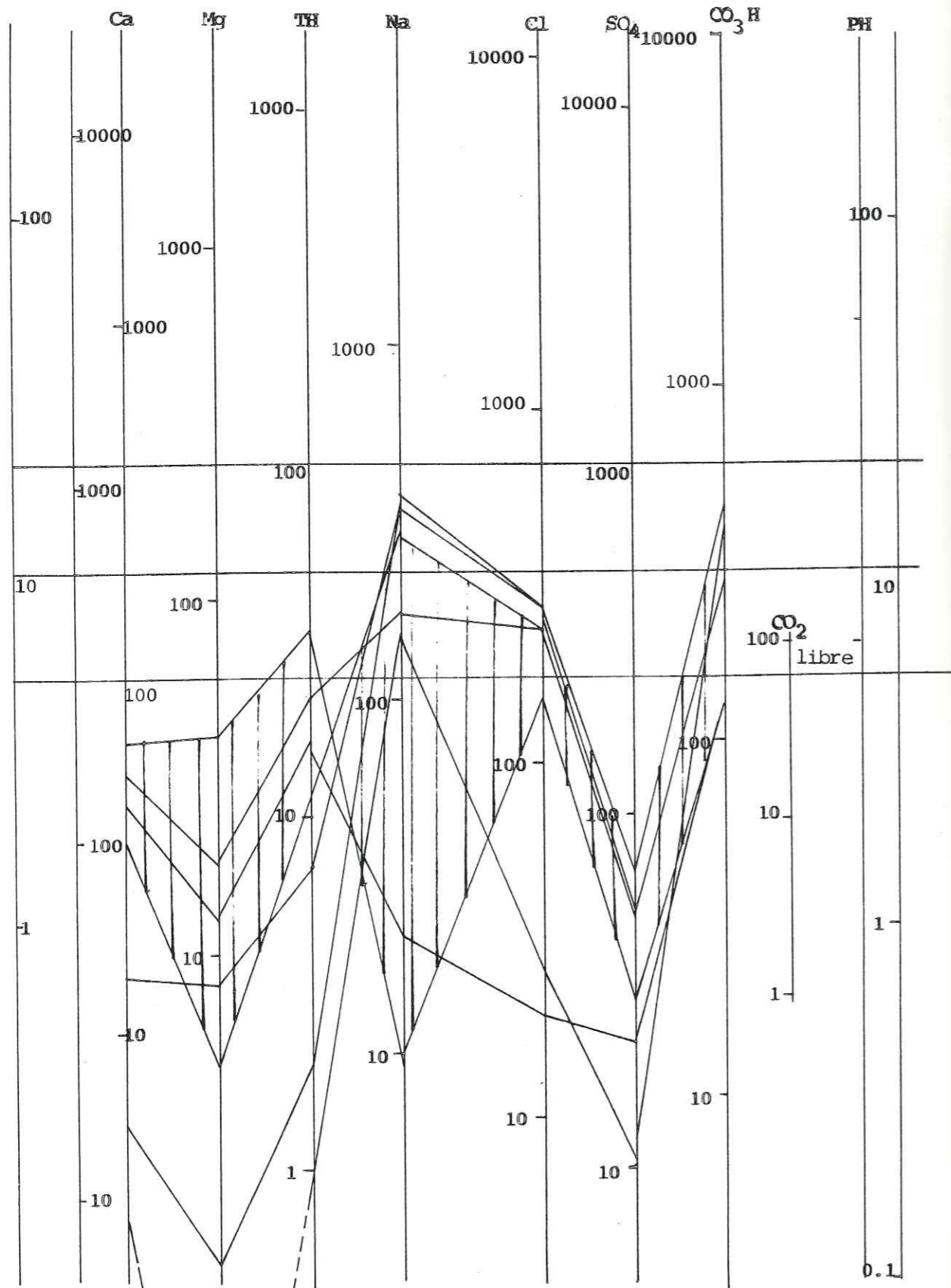
En utilisant le critère de Revelle pour les eaux des forages du Nes-tos, nous sommes arrivés à l'hypothèse que la plupart de ces eaux ne sont pas influencées par l'eau de la mer, sauf quelques cas exceptio-nels.



- 1, 2, 3
- 4, 5, 6
- 16, 17, 18, 19
- 14, 16, 20

Analyses chimiques après le pompage





rest. 12,13,11  
7,8,9,10

Diagramme Schoeller  
(mg/l)

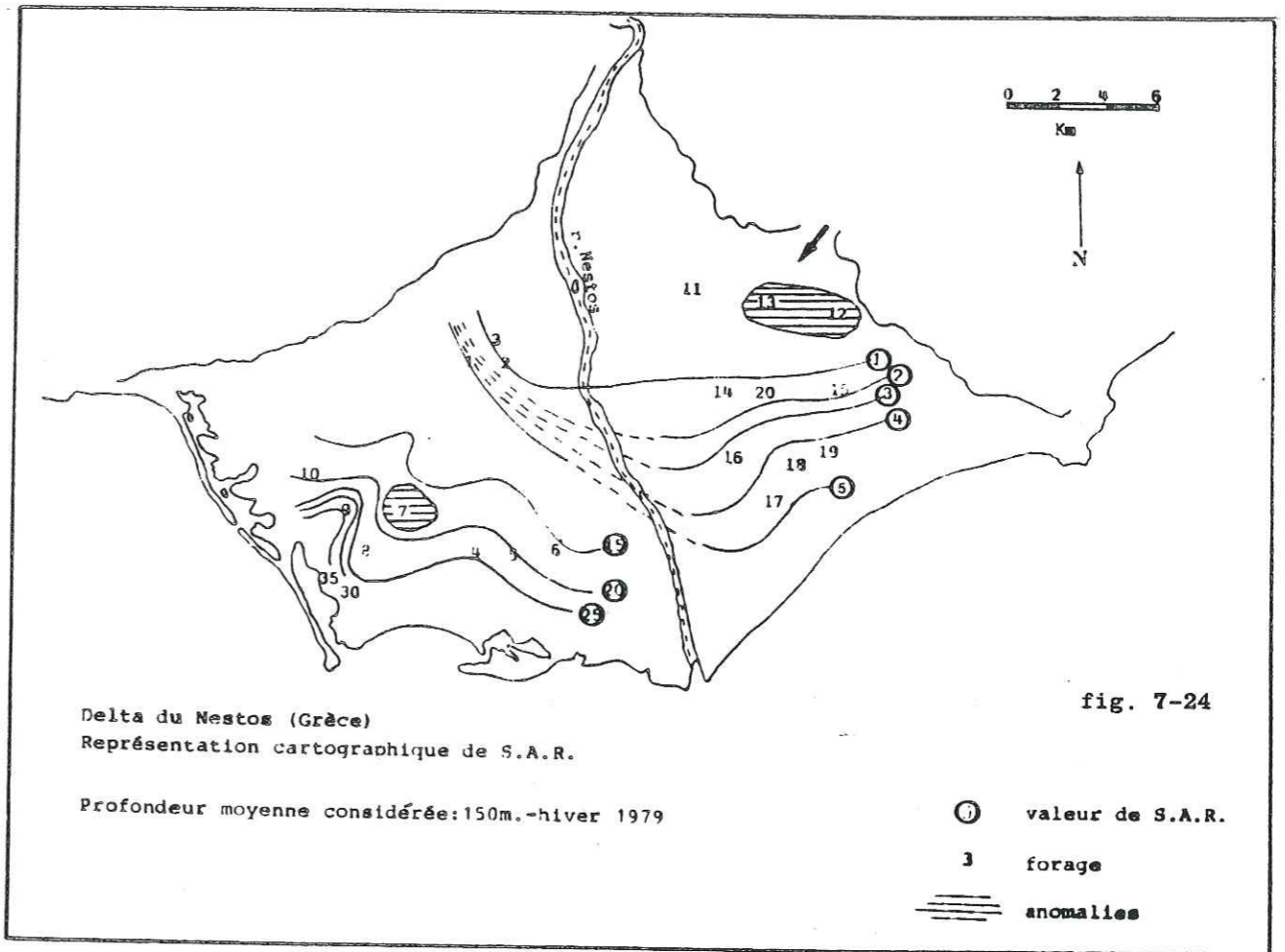


fig. 7-24

Delta du Nestos (Grèce)  
Représentation cartographique de S.A.R.  
Profondeur moyenne considérée: 150m.-hiver 1979

○ valeur de S.A.R.  
• forage  
/// anomalies

CLASSIFICATION DES EAUX SOUTERRAINES  
(FORAGES 1-20) SELON LEUR ALCALINITE (C)-SALINITE (S)

C <sub>1</sub> -S <sub>1</sub>	7	C <sub>1</sub> -S <sub>3</sub>	-
C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>	1 2 3 11 14 15 20	C <sub>2</sub> -S <sub>3</sub>	8
C <sub>3</sub> -S <sub>1</sub>	12 17	C <sub>3</sub> -S <sub>3</sub>	5 6 10
C <sub>4</sub> -S <sub>1</sub>	16	C <sub>4</sub> -S <sub>3</sub>	-
C <sub>1</sub> -S <sub>2</sub>	-	C <sub>1</sub> -S <sub>4</sub>	-
C <sub>2</sub> -S <sub>2</sub>	-	C <sub>2</sub> -S <sub>4</sub>	-
C <sub>3</sub> -S <sub>2</sub>	-	C <sub>3</sub> -S <sub>4</sub>	4 9 10
C <sub>4</sub> -S <sub>2</sub>	18 19	C <sub>4</sub> -S <sub>4</sub>	-

Delta du Nestos (Grèce), profondeur moyenne considérée: 150m, hiver 1979

fig. 7-25



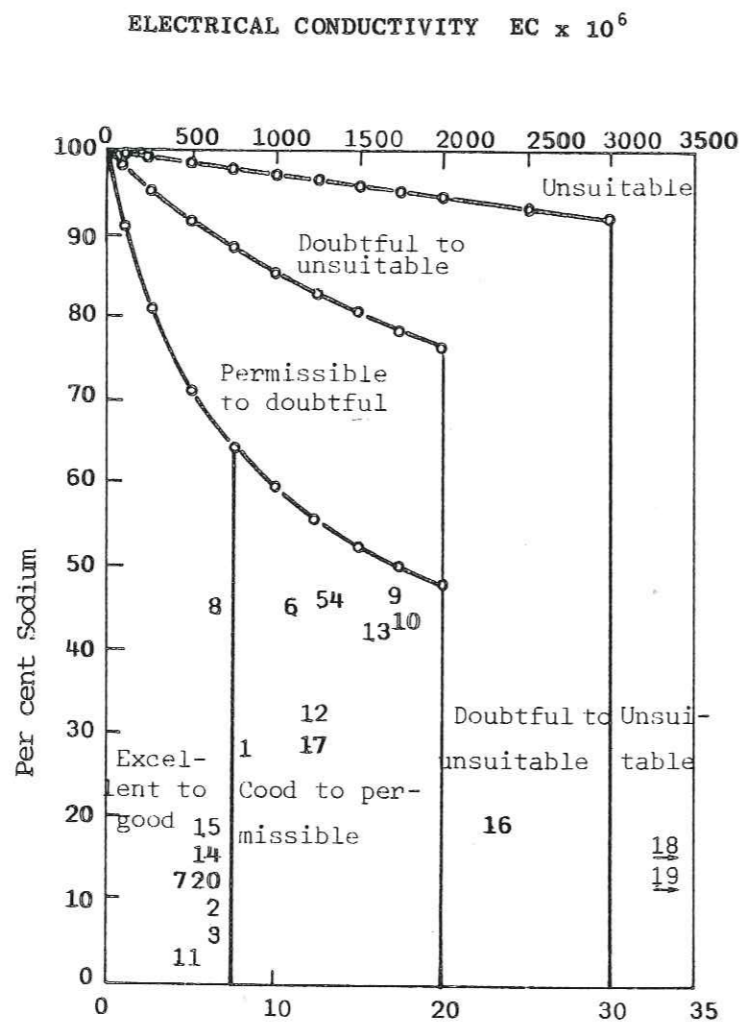


fig. 7-26 Classification d'après Wilcox

Delta du Nestos (Grèce)

Distinction de la proportion de mélange eau souterraine-eau de mer (d'après le Critère de Revelle)

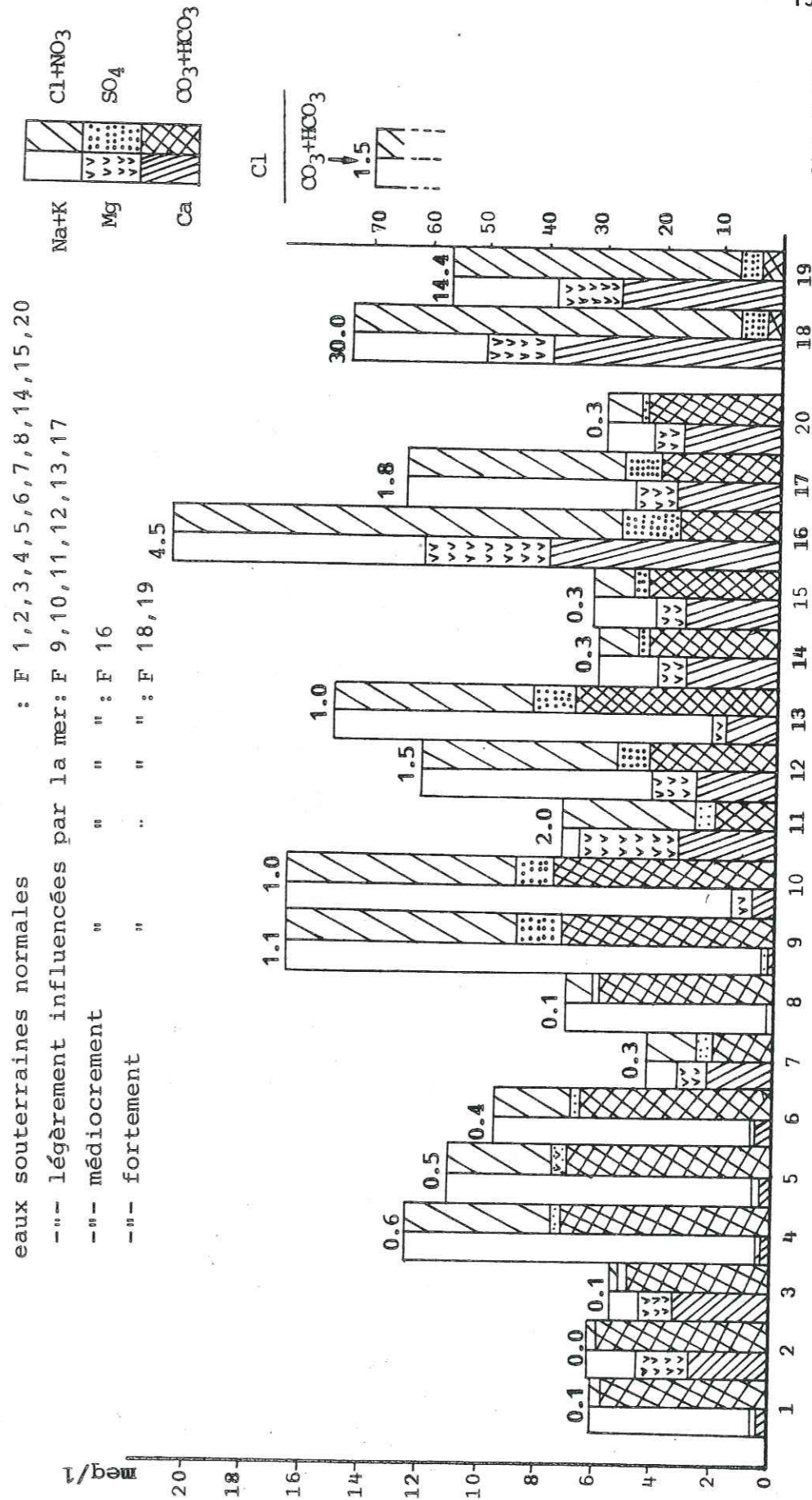


fig. 7-27



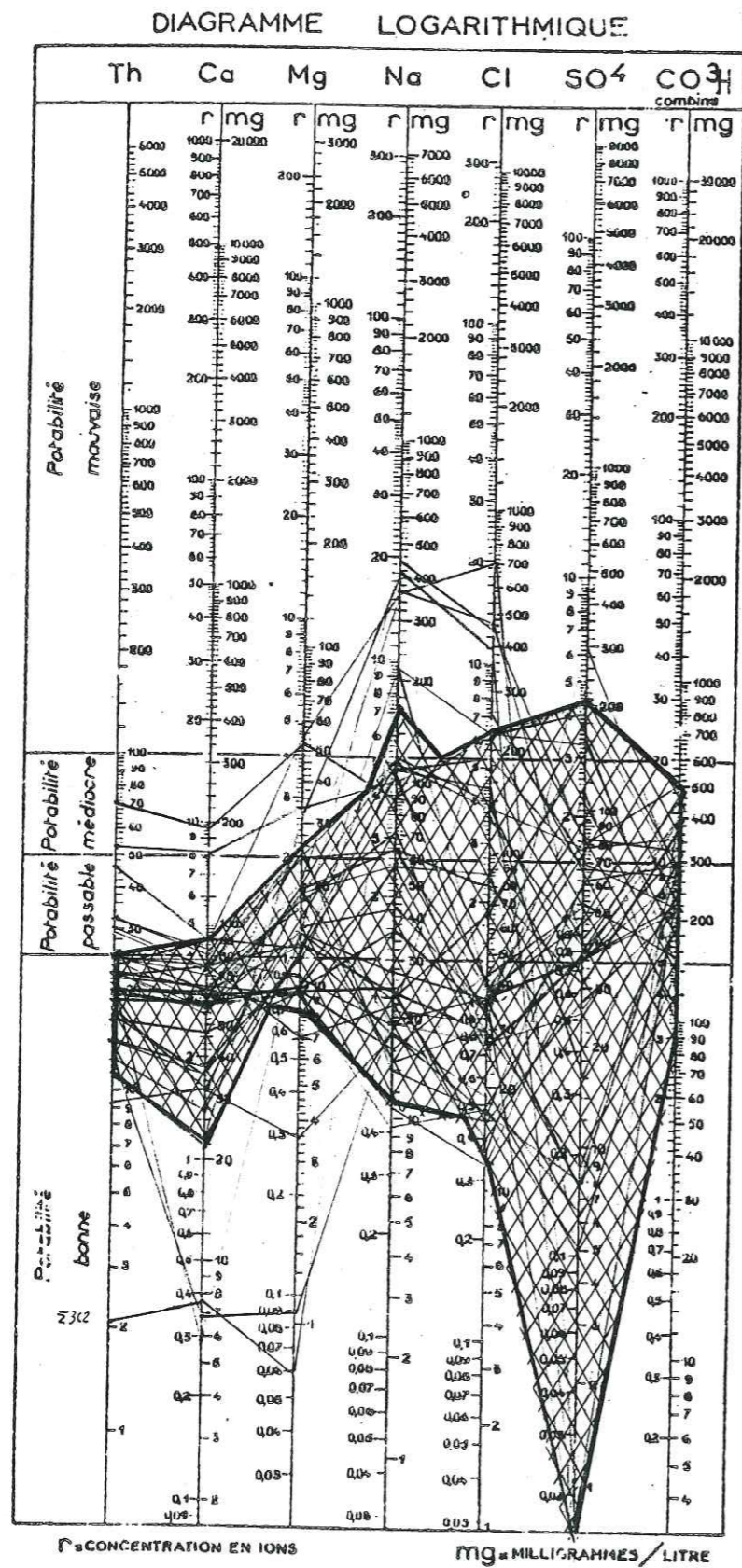


fig. 7-29 Partie Est-Fevrier. Analyses différentes et domaine de variation de la composition chimique des eaux de la nappe phréatique.

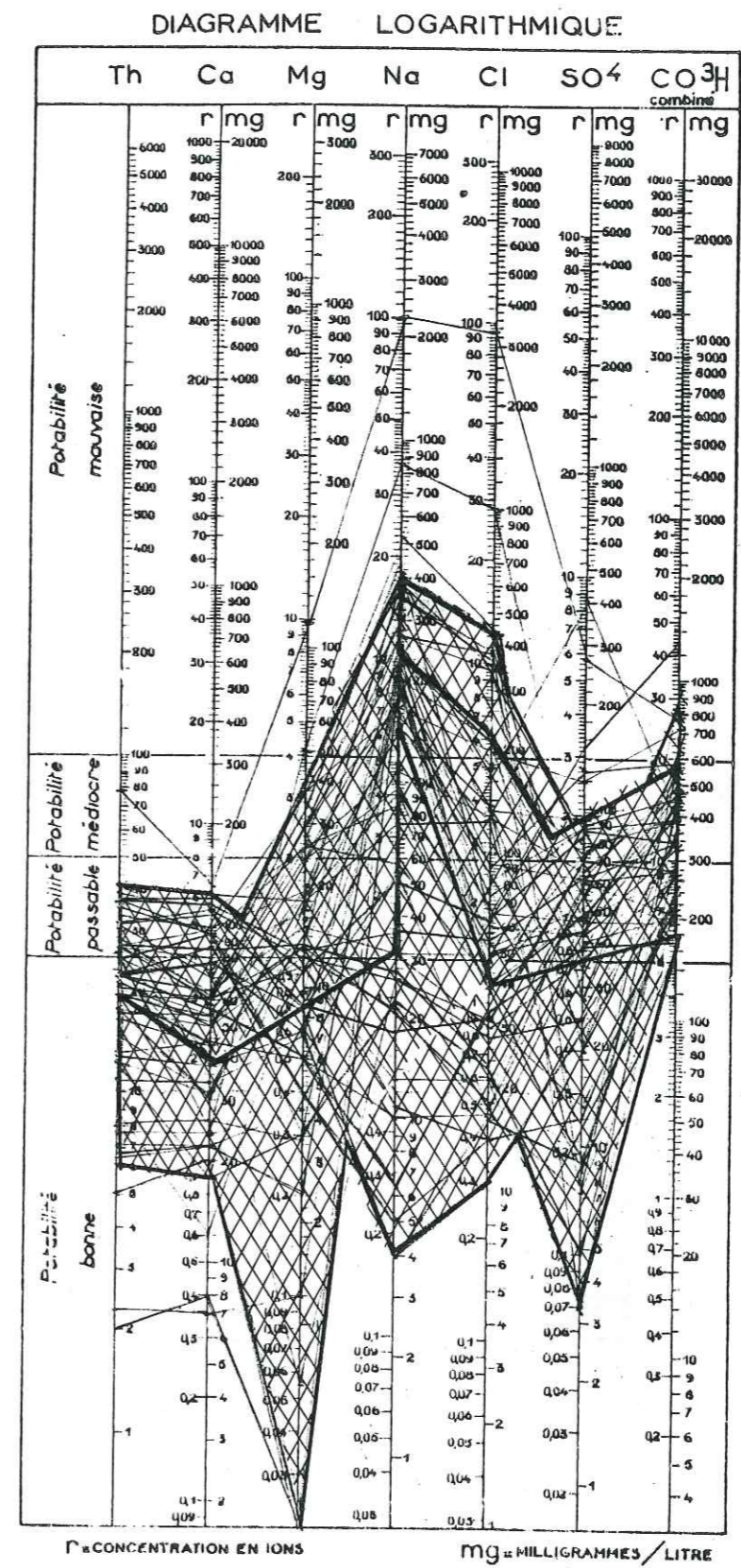


fig. 7-28 Partie Ouest-Fevrier. Analyses différentes et domaine de variation de la composition chimique des eaux de la nappe phréatique.



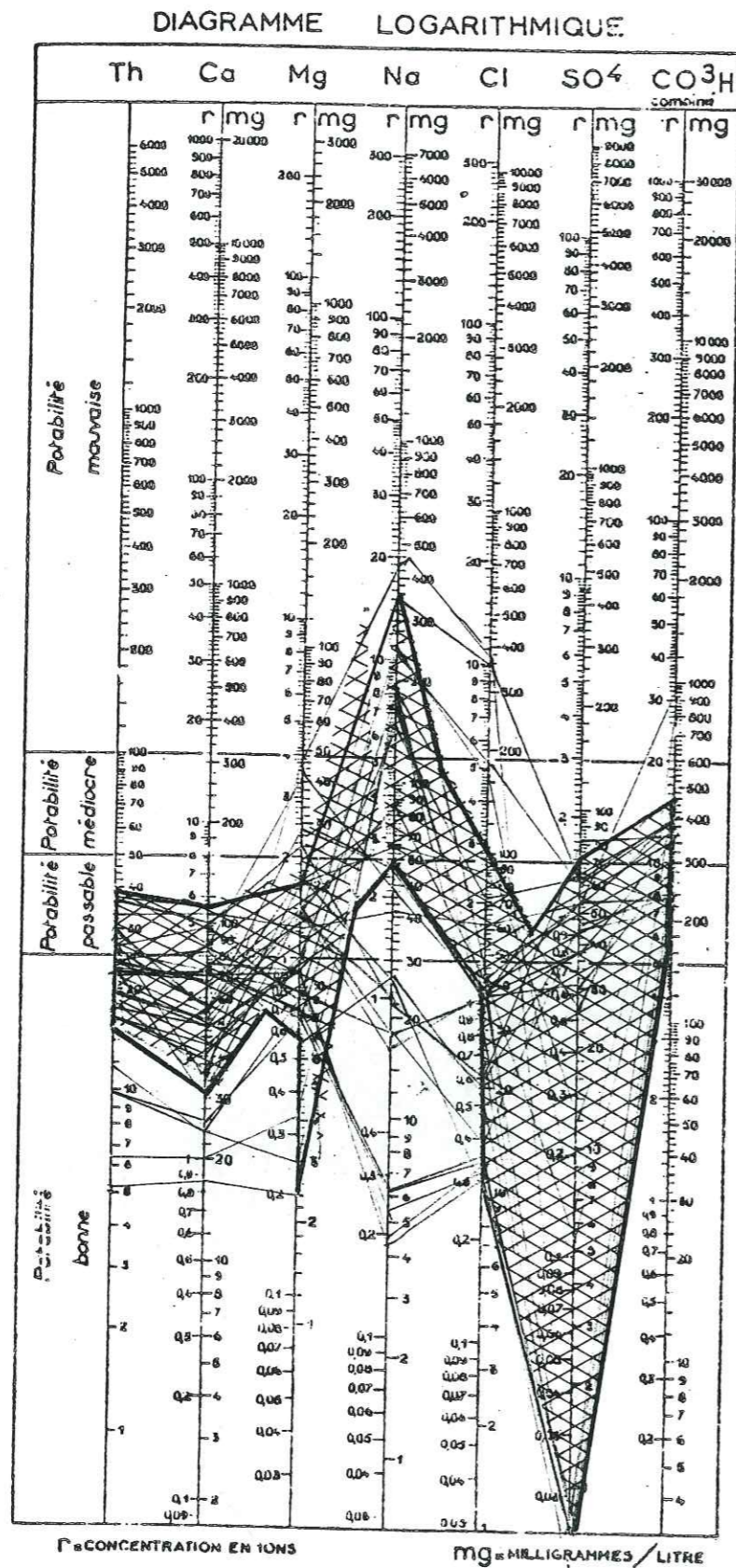


fig. 7-30 Partie Ouest-October. Analyses différentes et domaine de variation de la composition chimique des eaux de la nappe phréatique.

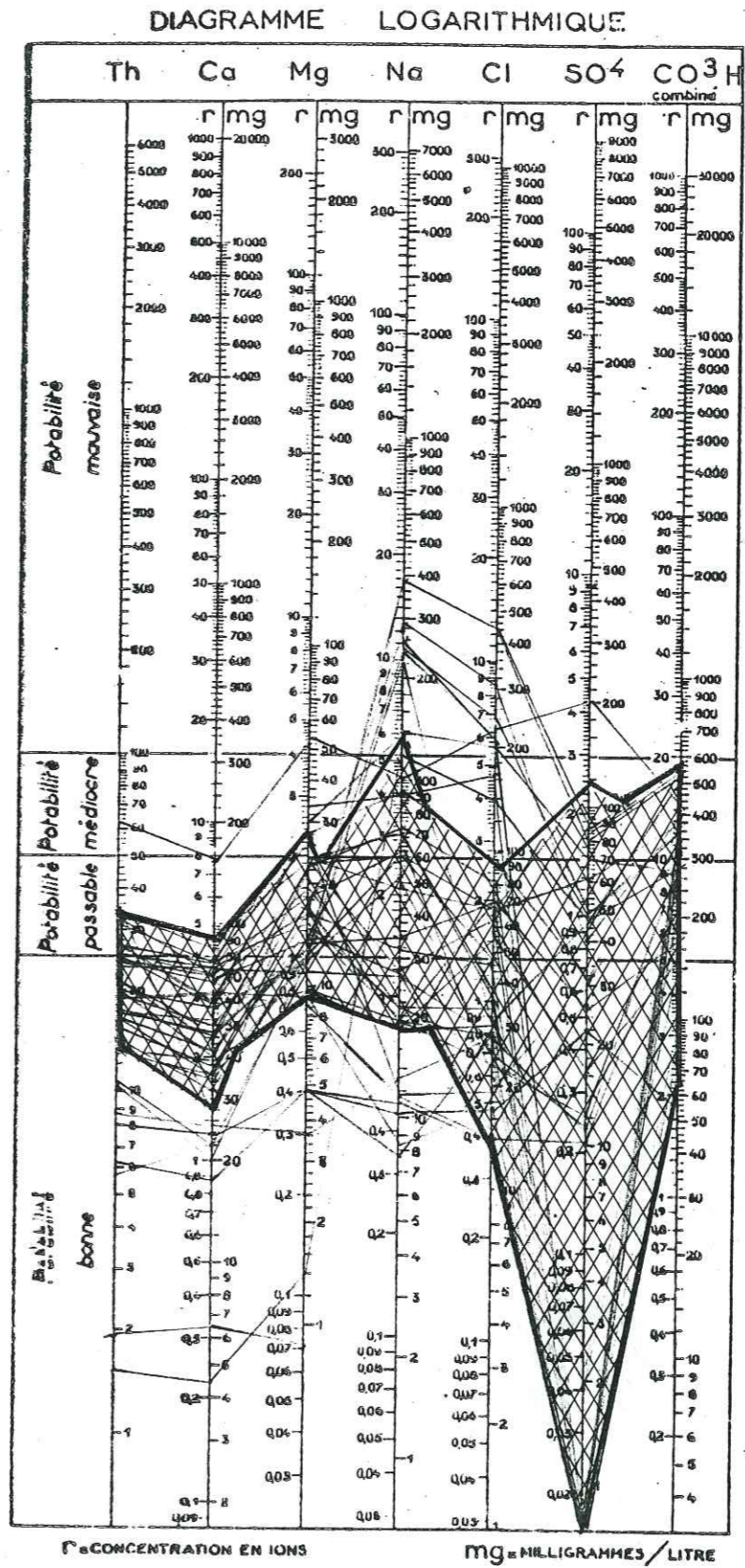


fig. 7-31 Partie Est-October. Analyses différentes et domaine de variation de la composition chimique des eaux de la nappe phréatique.

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



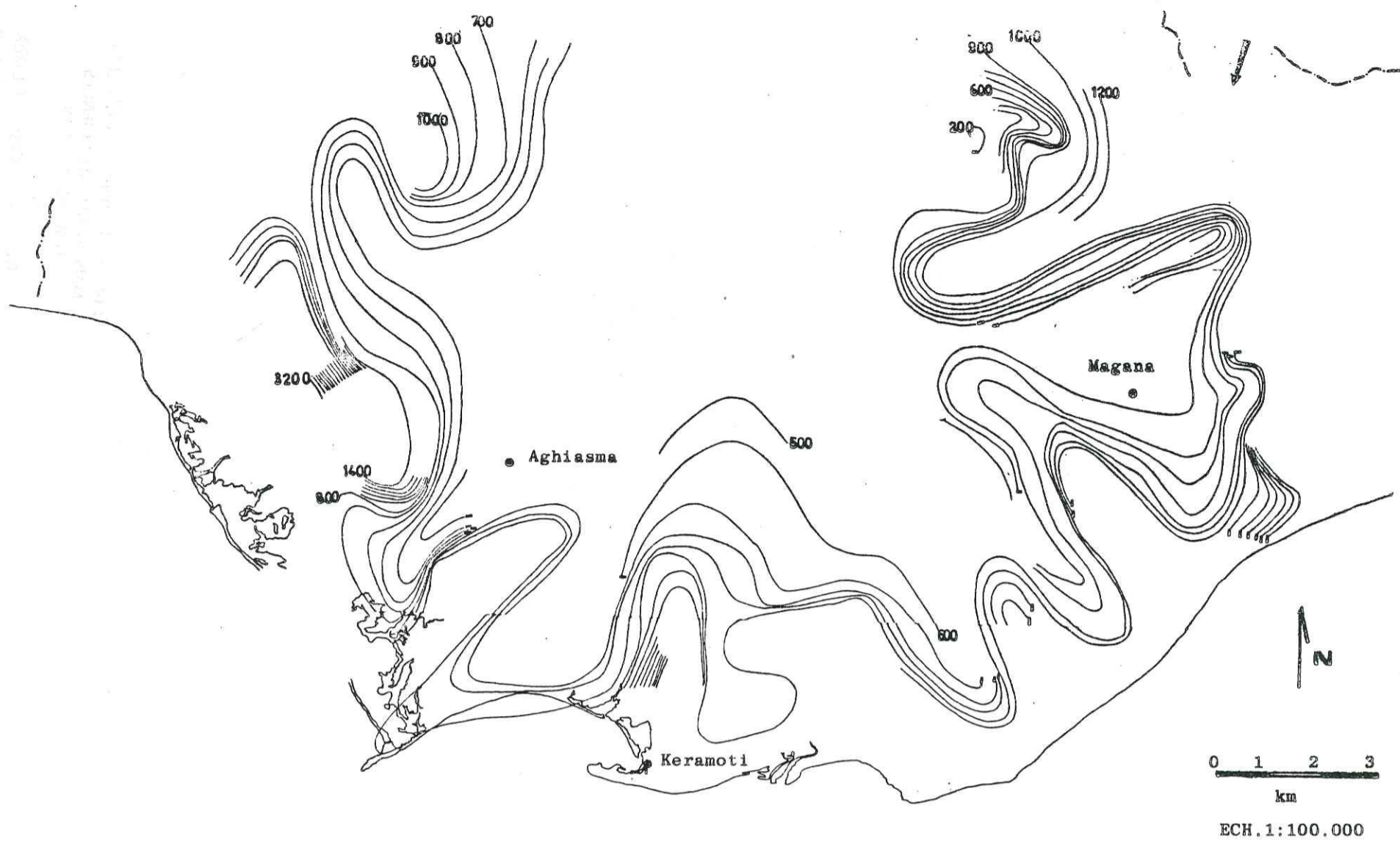


Fig.7-32. Carte de distribution de la conductivité électrique des eaux de la nappe phréatique (Fevrier)

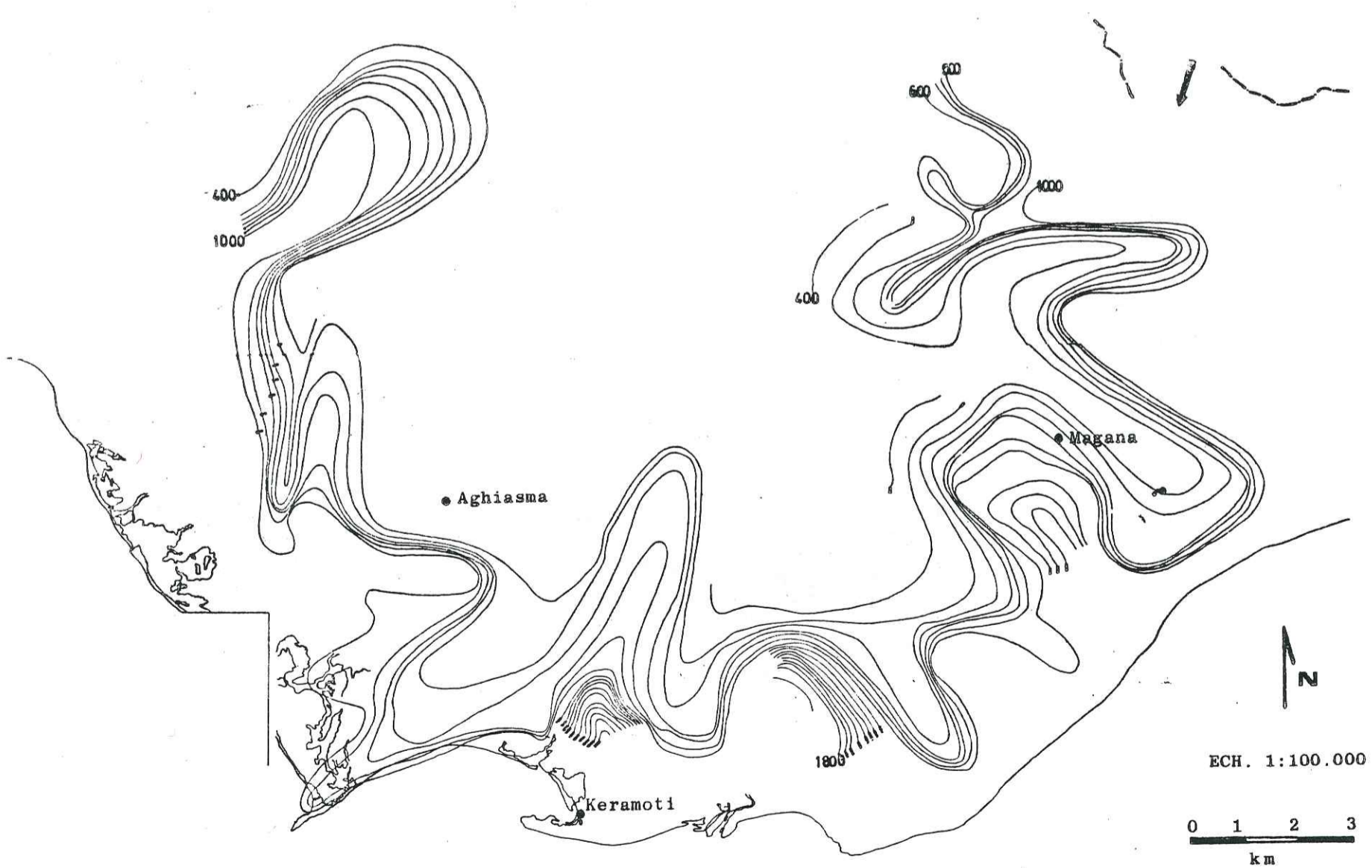


Fig.7-33. Carte de distribution de la conductivité électrique des eaux de la nappe phréatique (Octobre)



## 8. LES ESSAIS DE POMPAGE

### 8.1 CARACTERISATION DES SYSTEMES DE NAPPES AQUIFERES PAR LEUR COURBE CARACTERISTIQUE DE POMPAGE

Les forages dans la région du delta du Nestos ont traversé plusieurs couches aquifères. Les aquifères ont des caractéristiques individuelles, mais comme ils sont isolés de la nappe phréatique (réalisation de forages) et sont exploités tous ensemble, on peut ignorer ces caractéristiques et envisager leur comportement global. On peut, donc, considérer ce système comme caractérisé par un comportement moyen d'une nappe unique, où les couches moins perméables jouent le rôle d'intercalations, qui provoquent un écoulement vertical limité.

Le comportement hydraulique et hydrodynamique global de ces systèmes de nappes est représenté par leur courbe caractéristique ( $\log \Delta - \log t$ ) pendant le pompage. Avant l'essai de caractérisation de ces systèmes de nappes par leur courbe de pompage unique, il faut rappeler la classification générale des nappes aquifères et leurs propriétés, qui expliquent cette classification (fig. 8-1).

Une nappe libre correspond à une couche perméable, partiellement saturée et qui se trouve au dessus d'une couche imperméable ou moins perméable. La surface supérieure de la couche est la surface du terrain et la limite supérieure de la nappe est la surface libre de l'eau, qui peut monter ou descendre, en relation avec l'alimentation, l'exploitation etc. La pression sur la surface libre de la nappe, est la pression atmosphérique.

S'il n'existe pas d'écoulement vertical important dans la nappe, l'eau dans un puits, est à la même hauteur que la surface libre. Lorsque les particules de l'aquifère sont très fines (porosité élevée-perméabilité faible), on n'a pas un drainage de gravité instantané et l'eau est restituée après un certain temps, qui suit le rabattement dans le forage ou dans le puits. Les aquifères, qui présentent ce phénomène, s'appellent des aquifères à débit retardé.

La propriété qui exprime le volume d'eau contenue dans les nappes libres, est la porosité utile, une partie de la porosité totale (rapport du volume de vides sur le volume total de la partie saturée de la couche aquifère). La porosité utile, elle, est une grandeur purement empirique.

Une nappe captive, est une couche perméable, totalement saturée, limitée au dessous et au dessus par des couches imperméables ou des couches beaucoup moins perméables que la couche aquifère. Comme des couches absolument imperméables sont rares, plusieurs nappes ne sont pas vraiment captives, même si on les considère comme telles. Le stockage de l'eau est dû à l'arrangement des grains-résultat de la charge d'eau, mais aussi à la déformation plastique des couches limites. La pression de l'eau stockée est, en général, plus forte que la pression atmosphérique et l'eau dans le forage monte plus haut que la limite supérieure de la nappe. Ce niveau est la surface piézométrique de la nappe, qui, en cas de nappe libre, est la surface libre elle-même. La surface piézométrique se compose et se caractérise par deux familles de courbes: les courbes d'écoulement souterrain et les courbes équipotentielles, avec une relation rectangulaire entre elles. Les courbes équipotentielles sont constituées de points de la même charge totale-charge de position, charge de pression et charge d'énergie cinétique. Cette dernière est négligeable puisque les vitesses dans les milieux poreux sont souvent très faibles.

La propriété qui exprime la quantité d'eau contenue dans une nappe captive, est le coefficient d'emmagasinement dont la valeur numérique correspond à la valeur numérique de la porosité utile pour le cas des nappes libres.

Une nappe semi-captive est une couche totalement saturée, dont la limite supérieure est une couche semi-perméable et la limite inférieure une couche semi-perméable ou bien imperméable. La perméabilité des nappes semi-captives est souvent faible, mais toujours mesurable. Le rabattement de cette nappe provoque un écoulement vertical, dans la couche su-

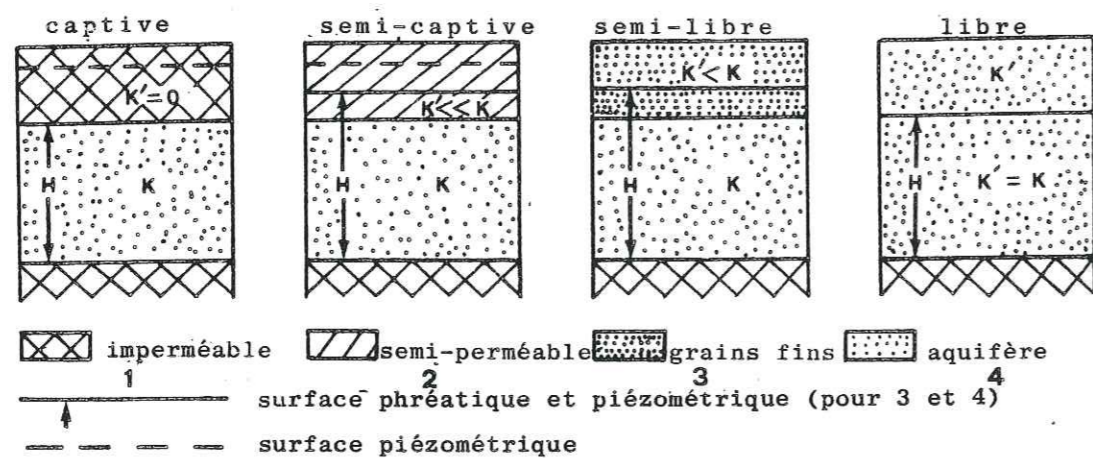


périeure, vers l'aquifère pompé comme la conductivité hydraulique de la couche supérieure est faible, on peut ignorer l'écoulement horizontal dans cette couche. Pour qu'on puisse obtenir des mesures représentatives pendant le pompage, les piézomètres doivent pénétrer la couche supérieure et aussi la couche inférieure, si cette dernière montre une perméabilité relative. En principe le rabattement dans la couche supérieure est faible, comparé à celui de la nappe pompée.

Une nappe semi-libre est une situation intermédiaire entre les nappes semi-captives et les nappes libres. Ce qui caractérise cette catégorie de nappes, est que l'écoulement horizontal dans la couche supérieure, pendant le pompage de l'aquifère, n'est pas négligeable, comme sa conductivité hydraulique est assez forte et, de toute façon, mesurable.

Il est donc évident que, sauf le cas de nappes libres, la formation supérieure et sa perméabilité sont les facteurs qui caractérisent la nappe aquifère.

Schématisation des nappes diverses, basée sur les variations de K



(D'après G.R. KRUSEMAN, N.A. DE RIDDER, 1970) fig. 8-1

8.2 LE COMPORTEMENT DES NAPPES DIVERSES PENDANT LE POMPAGE ET LEUR COURBE CARACTERISTIQUE (fig. 8-2)

La réaction des nappes captives en régime de non équilibre (rabattement pendant le pompage) est représentée par l'approximation de Theis

$$\Delta = \frac{Q}{4\pi K H} W(u), \quad u \text{ étant égal à } \frac{x^2 S}{4K H t} \text{ et } W(u) \text{ étant égal à } -0.5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2.2!} + \frac{u^3}{3.3!} - \frac{u^4}{4.4!} + \dots, \text{ où}$$

- $\Delta$ = le rabattement mesuré dans le piézomètre
- $X$ = la distance entre le piézomètre et le forage pompé
- $Q$ = le débit constant pompé du forage
- $S$ = le coefficient d'emmagasinement (dans dimensions)
- $K$ = la perméabilité de la couche aquifère
- $H$ = l'épaisseur de l'aquifère
- $T (=K H)$ = la Transmissivité de l'aquifère
- $t$ = le temps de pompage

Donc, pour les nappes captives, les courbes prototypes de Theis sont toujours valables dans les conditions de non équilibre (courbe  $W(u)-u$ , courbe  $W(u)-\frac{1}{u}$ ) et par conséquent la relation  $\log \Delta - \log t$  doit donner une courbe analogue à celle de Theis. D'ailleurs d'après la simplification de COOPER-JACOB ( $u < 0,01$ ) pour les pompages prolongés (grandes valeurs de  $t$  et/ou petites valeurs de  $x$ ), les facteurs  $\dots + u - \frac{u^2}{2.2!} + \dots$  deviennent négligeables et on peut transformer la formule de Theis en

$$\Delta = \frac{Q}{4\pi K H} (-0.5772 - \ln \frac{x^2 S}{4K H t}) \quad \text{ou} \quad \Delta = \frac{2.3Q}{4\pi K H} \log \left( \frac{2.25 K H t}{x^2 S} \right)$$

D'après la dernière équation la relation  $\Delta - \log t$  doit être linéaire.

En cas de nappe libre, si le rabattement est faible, par rapport à l'épaisseur de la zone saturée, les écoulements provoqués seront les mêmes (écoulement à deux dimensions avec une épaisseur constante) que ceux des nappes captives et on peut utiliser la formule de Theis (et



les simplifications correspondantes) pour analyser les mesures de pompage. La courbe caractéristique  $\log\Delta - \log t$ , aura la même forme que celle des nappes captives.

Si le rabattement est important (en général jusque 25% de l'épaisseur de la zone saturée) on utilise un rabattement corrigé  $\Delta' = \Delta - \frac{\Delta^2}{2H}$  (d'après la corrélation avec la formule de Dupuit). La courbe caractéristique sera déformée, comparée à la courbe théorique de Theis, la déformation étant égale à  $\frac{\Delta^2}{2H}$ .

En cas de nappe semi-captive, comme sa charge est constante après un certain temps de pompage, il y aura un équilibre entre le débit pompé et la réaction de la nappe. L'équilibre continu lorsque la surface de la nappe reste stable, c'est-à-dire la charge  $\Phi$  reste constante. Pour des pompages très prolongés on pourra avoir des déviations. Donc la courbe caractéristique  $\log\Delta - \log t$  présentera, après un certain temps, une augmentation du rabattement pratiquement égale à zéro.

Enfin, pour le cas de nappe semi-libre, la charge n'est pas constante, donc la surface phréatique n'est pas non plus constante ( $\Phi \neq \text{cte}$ ) et on a un écoulement retardé avec un vecteur horizontal important. Donc, pendant le pompage on a un équilibre temporaire et ensuite de nouveau un rabattement, qui suit la forme de la formule de Theis.

Les courbes caractéristiques, exprimées de la façon précédente, sont réelles si le débit du pompage reste constant et les conditions supposées pour l'application de la formule de Theis sont réalistes.

### 8.3. CARACTERISATION DES SYSTEMES DE NAPPES AQUIFERES POMPEES PAR LES FORAGES

Les courbes  $\log\Delta - \log t$ , ont été établies pour la définition du comportement global et la caractérisation de chaque système de nappes, ou de la même nappe aux points différents,  $\Delta$  étant le rabattement dans les forages eux mêmes (fig. 8-3/8-7)..

D'après l'établissement des courbes, on peut distinguer les cas suivants:

- L'ensemble des nappes, traversées par les forages  $F_5, F_6, F_{10}, F_{15}$  et  $F_{19}$ , présente une courbe caractéristique de nappes captives. La lithologie de la coupe de chaque forage confirme cette classification, puisque la formation supérieure pour les forages  $F_5$  et  $F_{15}$  est une formation argileuse et pour le reste est une formation argilomarneuse avec une épaisseur assez grande.
- L'ensemble des nappes, traversées par les forages  $F_1, F_3, F_4, F_7, F_8, F_9, F_{11}, F_{12}, F_{14}, F_{18}, F_{20}$ , présente une courbe presque caractéristique de nappes semi-captives. La lithologie confirme aussi cette classification, car les couches supérieures se composent de matériaux à teneur importante de sable à l'exception du cas du forage  $F_{11}$ , où la couche supérieure est une formation argileuse. Mais, la lithologie de la coupe du piézomètre satellite montre que cette formation a une extension latérale limitée, puisque le piézomètre n'a pas traversé cette formation (distance forage-piézomètre: 68.50m). La comparaison des coupes des forages et des piézomètres satellites montre aussi une augmentation latérale du pourcentage de sable dans les couches supérieures dont la composition aux points de forages n'est pas parfois très sableuse.

Le cas du forage  $F_2$  est un cas particulier. La couche supérieure est aussi une formation argileuse, mais limitée d'après la coupe du piézomètre satellite (distance 50m). Au dessus de cette formation il y a la nappe phréatique dont l'aquifère a une épaisseur de 25m. Au milieu du piézomètre, cet aquifère a une épaisseur de 22m et il continue en profondeur avec une alternance graveleuse à la place de la formation argileuse du milieu du forage. Il est donc évident que dans ce forage la nappe phréatique n'est pas actuellement isolée et l'ensemble les nappes dans le forage  $F_2$  présente un comportement de nappe semi-libre (écoulement vertical important vers le système pompé).



- Pour le forage  $F_{13}$ , il s'agit d'un cas intermédiaire entre une nappe semi-captive et semi-libre. La couche supérieure est une formation marneuse d'épaisseur très importante (82m), assez sableuse. Les crépines, d'une longueur totale de 12m., qui sont posées le long de cette formation et la crépine de 3m qui est posée à la base de la nappe phréatique, ont provoqué la forme particulière de la courbe. On peut observer les mêmes conditions dans le forage  $F_{16}$ . Le rabattement dans ces forages comparé à l'épaisseur totale des couches aquifères est très grand ( $F_{13}$ :103%,  $F_{16}$ :48%) et ceci est une indication supplémentaire pour leur caractérisation comme nappes semi-libres.
- Le forage  $F_{17}$  montre, en général, une courbe caractéristique pour les nappes semi-captives, sauf entre 26' et 35' de pompage, où le rabattement augmente disproportionnellement. On peut exprimer ceci comme un résultat de comportements différents des couches aquifères pendant le pompage.

On peut, donc, classer les systèmes de nappes aquifères, dans la région influencée par le pompage, d'après leur courbe caractéristique unique, de la façon suivante:

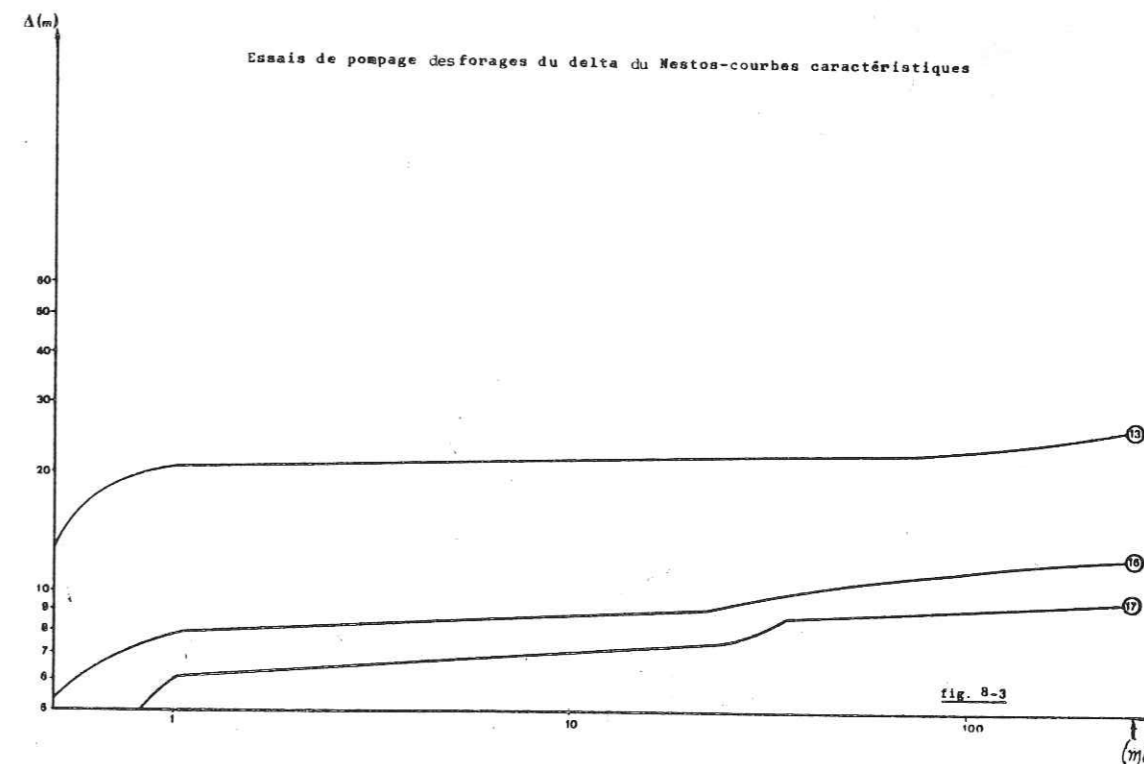
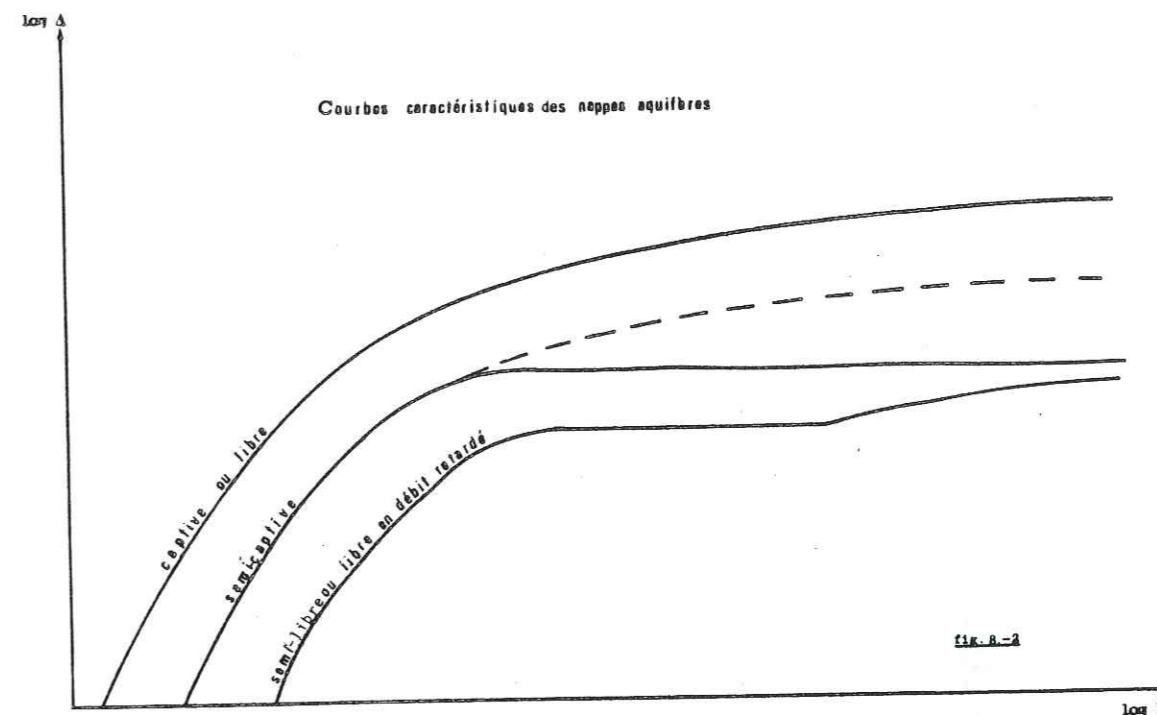
Nappes captives :  $F_5, F_6, F_{10}, F_{15}, F_{19}$

Nappes semi-captives:  $F_1, F_3, F_4, F_7, F_8, F_9, F_{11}, F_{12}, F_{14}, F_{17}, F_{18}, F_{20}$

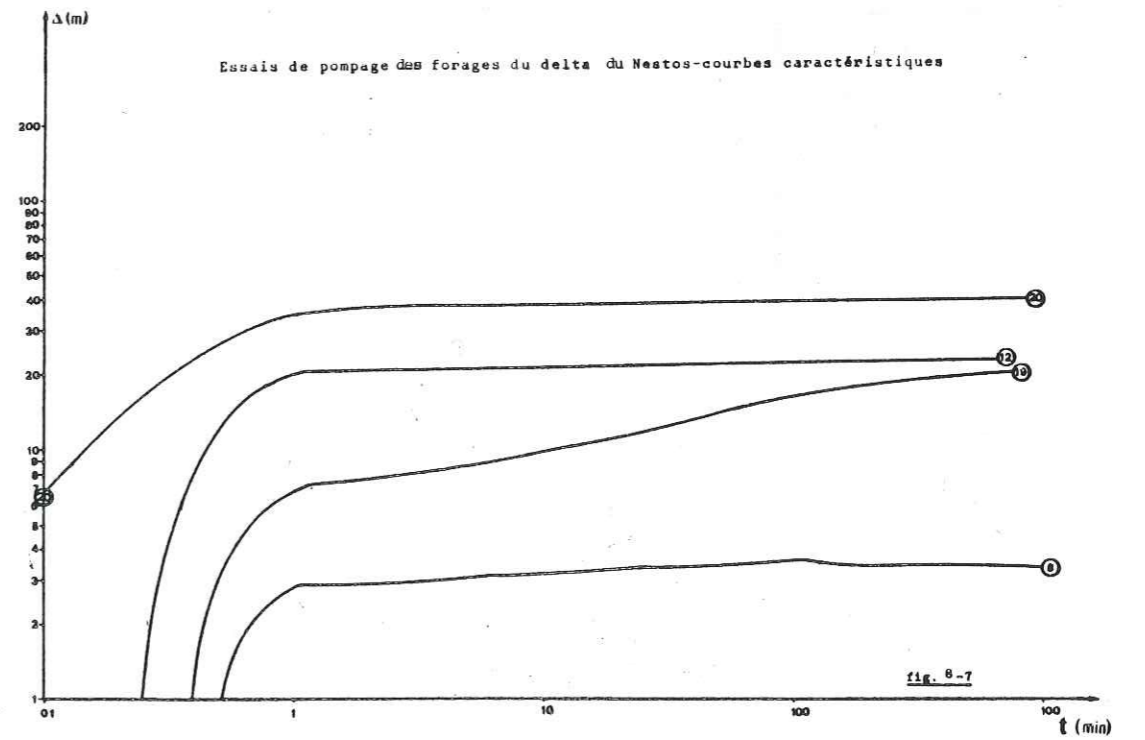
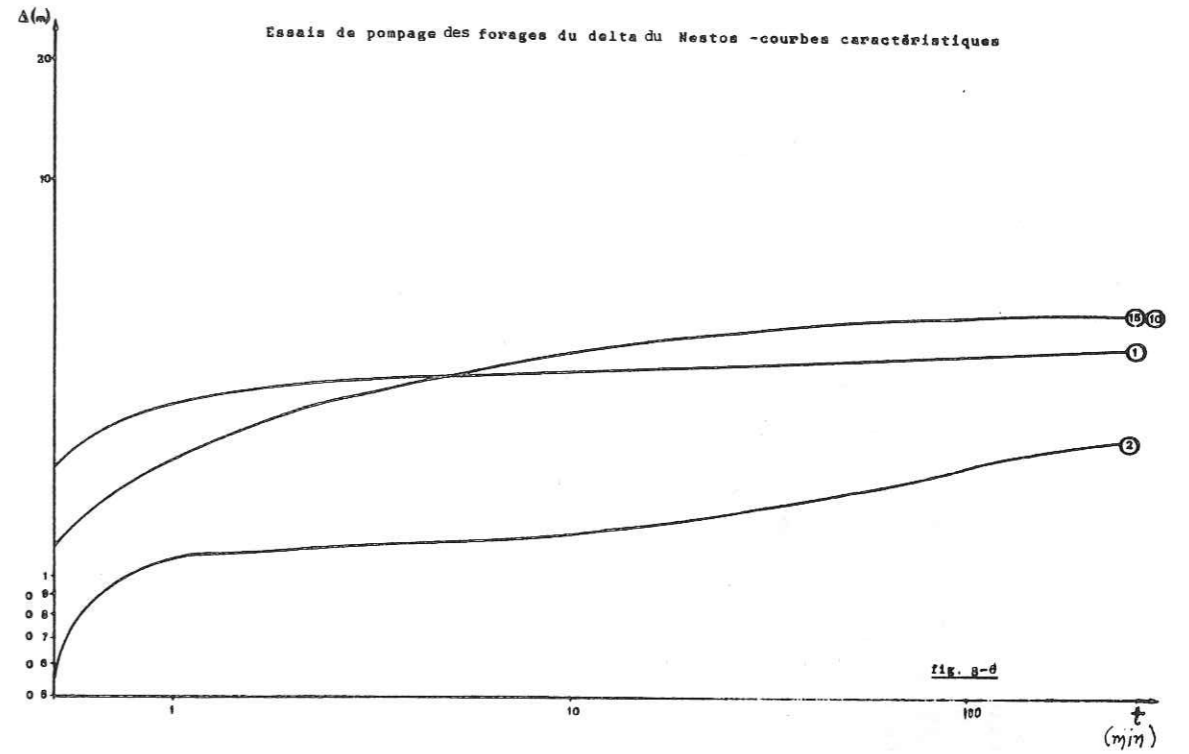
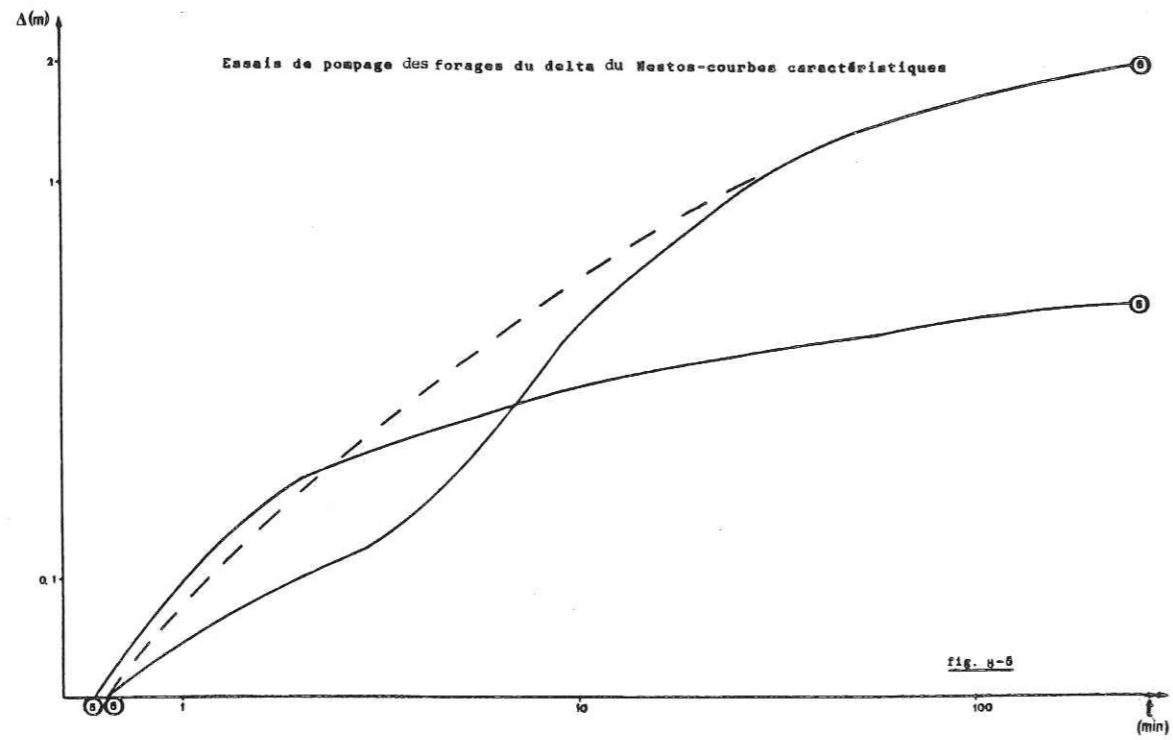
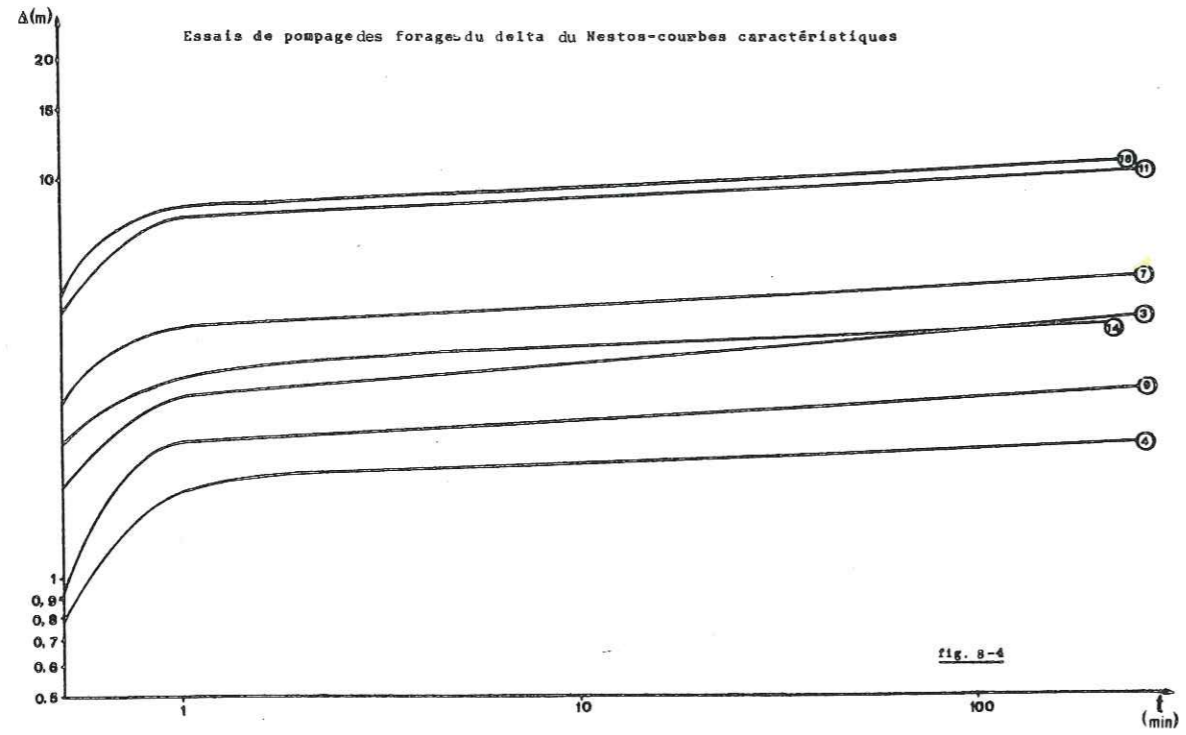
Nappes semi-libres :  $F_2, F_{13}, F_{16}$

#### 8.4. LES CARACTERISTIQUES DES FORAGES

Des essais de pompage dans chaque forage sont réalisés, pour l'estimation des paramètres hydrauliques et des caractéristiques des forages. On a pompé les forages à débit constant et il y a des mesures disponibles de rabattement dans les forages et dans les piézomètres satellites et des mesures de la remontée dans les forages. Avant le pompage final, un pompage préliminaire à la soupape, à air-lift et avec la pompe, pour le nettoyage et le développement des forages, a été réalisé.









### Caractéristiques techniques des forages

Diamètre des forages:  $\Phi$  17½"

Diamètre du tube des forages:  $\Phi$  10"

Diamètre du tube piézométrique dans les forages:  $\Phi$  1½"

Isolation de la nappe phréatique: tube cimenté  $\Phi$  24"

Diamètre des piézomètres satellites:  $\Phi$  10½"

Diamètre du tube des piézomètres:  $\Phi$  4"

Remplissage de graviers entre les tubes et le terrain.

Crépines installées d'après des diagraphies électriques en combinaison avec d'autres facteurs (stabilité de tubage etc.).

Forage	Epaisseur totale des couches aquifères (m)			Longueur totale des crépines (m)			0/0	Forage	Epaisseur totale des couches aquifères (m)			Longueur totale des crépines (m)			0/0	Forage	Epaisseur totale des couches aquifères (m)			Longueur totale des crépines (m)			0/0																																																								
	1	2	3	4	5	6			7	8	9	10	11	12			13	14	15	16	17	18		19	20	21																																																					
1	41	59	144	6	67	48	72	11	48	35	73	16	29	51	176	2	43	48	112	7	43	27	63	12	30	32	107	17	84	72	86	3	73	48	66	8	98	75	77	13	27	45	167	18	36	37	103	4	40	41	103	9	46	45	98	14	33	37	112	19	40	35	88	5	44	63	143	10	36	33	92	15	29	33	114	10	40	84	210

## 8.5. ANALYSE ET ELABORATION DES MESURES DE POMPAGE

### 8.5.1. EQUATION DE THEIS-SIMPLIFICATION DE COOPER-JACOB

Pour l'analyse et l'élaboration des mesures de pompage et l'estimation des paramètres hydrauliques de chaque système de nappes aquifères nous avons choisi la formule de Theis, comme il s'agit de nappes captives ou semi-captives (pour les nappes semi-libres il y aura une correction) et d'un régime de non équilibre. Les mesures utilisées sont celles qui correspondent à la période du rabattement.

Pour l'utilisation des méthodes d'analyse des données de pompage, on doit envisager quelques suppositions nécessaires, qui sont les suivantes:

- La nappe aquifère a une extension latérale illimitée. Pratiquement, cela veut dire, que l'extension latérale de la nappe est plus grande que sa partie influencée par le pompage. Pour notre cas ce facteur est en général valable.
- L'aquifère est homogène, isotrope, d'une épaisseur uniforme au moins dans la région influencée par le pompage. L'hétérogénéité et l'anisotropie qu'on trouve presque toujours posent un problème puisque la perméabilité verticale est très faible comparée à l'horizontale, surtout à cause des intercalations des couches moins perméables. Mais pendant le pompage c'est le vecteur horizontal qui est le plus important, sauf le cas de puits incomplet où les lignes d'écoulement ne sont plus horizontales mais déformées vers le fond du forage. De toute façon il y a des méthodes spéciales pour distinguer les perméabilités horizontale et verticale, si ceci est nécessaire. Dans notre cas les puits sont tous complets.
- Avant le pompage la surface piézométrique doit être presque horizontale dans la région influencée par le pompage. Cela arrive généralement, sauf dans les cas où le gradient hydraulique est fort, à cause de la structure géologique ou des conditions de drainage, naturel ou artificiel.
- Le débit de pompage est constant. Ceci peut être facilement contrôlé.
- Le puits est parfait, donc l'écoulement vers le forage, pendant le pompage, est horizontal. Autrement, on doit faire les corrections nécessaires. Tous les forages considérés se sont arrêtés dans une formation imperméable ou fortement moins perméable que les nappes aquifères.



Les conditions supplémentaires, pour l'application de l'équation de Theis, sont les suivantes:

- (f) La nappe aquifère est captive. Pratiquement cette formule est aussi valable pour les nappes semi-captives et même pour les nappes libres, après une correction correspondante et sous quelques conditions spéciales (rabattement faible par rapport à une épaisseur importante). Tous les systèmes de nappes considérées correspondent aux nappes captives ou semi-captives.
- (g) L'écoulement souterrain se réalise en régime non permanent, donc le rabattement est une fonction du temps et le gradient hydraulique n'est pas constant pendant le pompage. Pour les essais de pompage considérés, nous avons utilisé les mesures correspondant au régime non permanent avant l'obtention d'équilibre.
- (h) L'eau est libérée du stockage d'une façon instantanée. Cela pose quelques problèmes en cas de nappes qui sont constituées de particules très fines (drainance etc.).
- (i) Le diamètre du puits ou du forage doit être petit, donc la quantité d'eau contenue dans le tubage, avant le début du pompage, doit être négligeable. Pour des forages profonds cela pose quelques problèmes, mais on peut les envisager en ignorant les premières mesures qui correspondent à la sortie de cette eau.

$$\text{D'après Theis: } \Delta = \frac{Q}{4\pi KH} W(u), \quad u = \frac{x^2 S}{4KHt} \quad \text{et}$$

$$W(u) = -0.5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2.2!} + \frac{u^3}{3.3!} - \frac{u^4}{4.4!} + \dots$$

La solution graphique de cette équation n'est pas difficile en utilisant les courbes prototypes de Theis  $W(u)-u$  ou  $W(u)-1/u$ . Mais, il existe toujours une possibilité d'erreur importante, puisque la coïncidence entre les courbes prototype et expérimentale et le choix du point caractéristique sont toujours des questions subjectives.

COOPER et JACOB (1946) ont simplifié l'équation de Theis en admettant que, pour des pompages prolongés ( $t$  grand), le facteur

$$u = \frac{x^2 S}{4KHt} \quad \text{devient assez faible, donc, dans la série } W(u), \text{ tous les facteurs à partir de } u \text{ peuvent être considérés comme négligeables.}$$

$$\text{L'équation de Theis se transforme en } \Delta = \frac{2.30Q}{4\pi KH} \left( -0.5772 - \frac{\ln x^2 S}{4KHt} \right)$$

En transformant les logarithmes népériens aux décimaux, on a

$$\Delta = \frac{2.30Q}{4\pi KH} \log \frac{2.25 KHt}{x^2 S}. \quad \text{Cette équation indique que la relation}$$

$\Delta - \log t$  est linéaire. Pour les conditions limites ( $\Delta=0, t=t_0$ )

$$\text{on a } 0 = \frac{2.30Q}{4\pi KH} \log \frac{2.25 KH t_0}{x^2 S}, \quad \text{donc } \boxed{S = \frac{2.25 KH t_0}{x^2}}$$

pour  $t/t_0=10$ , donc  $\log t/t_0=1$ , on peut remplacer  $\Delta$  par  $d\Delta$  (différence de rabattement pour un cycle logarithmique) et on a

$$\boxed{KH = T = \frac{2.30Q}{4\pi d\Delta} = \frac{0.183Q}{d\Delta}}$$

Pour l'application des formules de COOPER-JACOB il y a une supposition supplémentaire:

- (j) Le temps  $t$  de pompage doit être grand pour que les valeurs de  $u = \frac{x^2 S}{4KHt}$  soient faibles ( $<0.01$ ).

Après la classification des systèmes de nappes par leur courbe caractéristique, la méthode de COOPER-JACOB est valable pour les cas des nappes captives ou semi-captives; donc pour tous les forages, sauf le  $F_2, F_{13}$  et  $F_{16}$ . Le comportement de ces forages correspond à une nappe semi-libre ou libre, à condition que le rabattement ne soit pas important par rapport à l'épaisseur (en général  $<10-20\%$  d'épaisseur saturée). Le rabattement obtenu est:  $F_2:2,75\text{m}$ ,  $F_{13}:27,87\text{m}$ ,  $F_{16}:13,83\text{m}$  et comparé à l'épaisseur totale des couches aquifères, est 6.4%, 103%, 48%.



Pour le forage  $F_2$  la méthode est encore valable. Pour les forages  $F_{13}$  et  $F_{16}$  on a aussi trouvé une Transmissivité en remplaçant  $\Delta$  par

$\Delta' = \Delta - \frac{\Delta^2}{2H}$ , d'après l'équation de Dupuit pour les nappes libres ( $\Delta = H_0 - H$ ). Pour les mesures dans les piézomètres satellites il n'y a aucun problème parce-que le rabattement est toujours faible. Donc, selon les mesures de rabattement dans les forages et dans les piézomètres on peut estimer deux séries de valeurs de Transmissivité.

Des mesures de la remontée de l'eau après le pompage sont encore disponibles pour les forages. Pour plusieurs auteurs, il s'agit de la meilleure période pour estimer les paramètres hydrauliques, puisqu'on a un fonctionnement de la nappe elle-même, sans l'intervention du pompage qui provoque des résultats non contrôlés (débit relativement constant, écoulement turbulent etc.).

La méthode de COOPER-JACOB est encore valable pour les mesures de la remontée. Si on considère un débit  $Q$  constant et égal au débit moyen actuel pendant le pompage, l'équation de Theis se transforme en

$$\Delta'' = \frac{Q}{4\pi KH} \left( \ln \frac{4KHt}{x^2 S} - \ln \frac{4KHt''}{x^2 S''} \right), \quad \Delta'' \text{ étant le rabattement résiduel au mo-}$$

ment considéré,  $t''$ , le temps de l'arrêt du pompage jusqu'au point considéré où on mesure le  $\Delta''$ ,  $x$ , la distance entre le piézomètre et le forage, et si les mesures sont réalisées dans le forage pompé,  $x$  est approximativement le rayon effectif du forage, " $S$ " le coefficient d'emmagasinement pendant la remontée. Si on suppose  $S$  et  $S''$  constants et égaux et la valeur de  $u = \frac{x^2}{4KHt''}$  assez faible, l'équation peut se transformer en

$$\Delta'' = \frac{2.30Q}{4\pi KH} \log t/t''. \quad \text{Cela signifie que la relation } \Delta'' - \log t/t'' \text{ est liné-}$$

aire et pour un cycle logarithmique on a: 
$$KH = T = \frac{2.30}{4\pi d \Delta''} = \frac{0.183Q}{d \Delta''}$$

On ne peut pas estimer de valeurs de  $S$  par cette méthode. Donc, avec les mesures de la remontée nous avons estimé une troisième série de valeurs

de Transmissivité, d'après des diagrammes  $\Delta'' - \log t+t'/t'$  ( $t$ =temps de pompage et  $t'=t''$  de COOPER-JACOB).

Les diagrammes de la méthode COOPER-JACOB se trouvent aux figures de 8-8 à 8-23, et les diagrammes  $\Delta' - \log t$  ( $\Delta' = \Delta - \frac{\Delta^2}{2H}$ ) pour les forages  $F_{13}$  et  $F_{16}$ , à la figure 8-24.

#### Quelques remarques sur les mesures et les courbes correspondantes

En ce qui concerne le rabattement dans les forages et dans les piézomètres nous avons ignoré les premières mesures d'un rabattement très rapide, dû à l'eau stockée dans le tubage. Nous avons aussi ignoré les dernières mesures, au cas où le rabattement est très faible, autrement dit le régime devient presque permanent et l'équation de Theis et la simplification de COOPER-JACOB ne sont plus valables.

Pour les courbes de remontée, nous avons ignoré les premières mesures qui correspondent à une remontée très rapide, due aux arrivées d'eau, dans le forage, pendant les derniers moments du pompage. Nous avons aussi ignoré les dernières mesures, si elles correspondaient au régime permanent.

Comme le temps de pompage doit être long (nécessité pour l'application de la méthode) il arrive très souvent que les points de couples de valeurs  $\Delta - \log t$  (ou  $\log t+t'/t' - \Delta'$ ) ne forment pas une droite unique, mais une ligne brisée qui se compose de deux, trois ou plusieurs parties droites. On trouve les mêmes formes pour les courbes de remontée. Ceci est dû à la progression du cône d'influence du forage dans des milieux plus ou moins perméables que le milieu au point du forage. Donc, l'eau arrive dans le tubage avec une perméabilité moyenne (résultante). Nous avons, donc estimé une valeur de Transmissivité pour chaque partie de la droite brisée et, à partir des valeurs diverses, une valeur moyenne, pour le système des nappes au milieu de chaque forage.



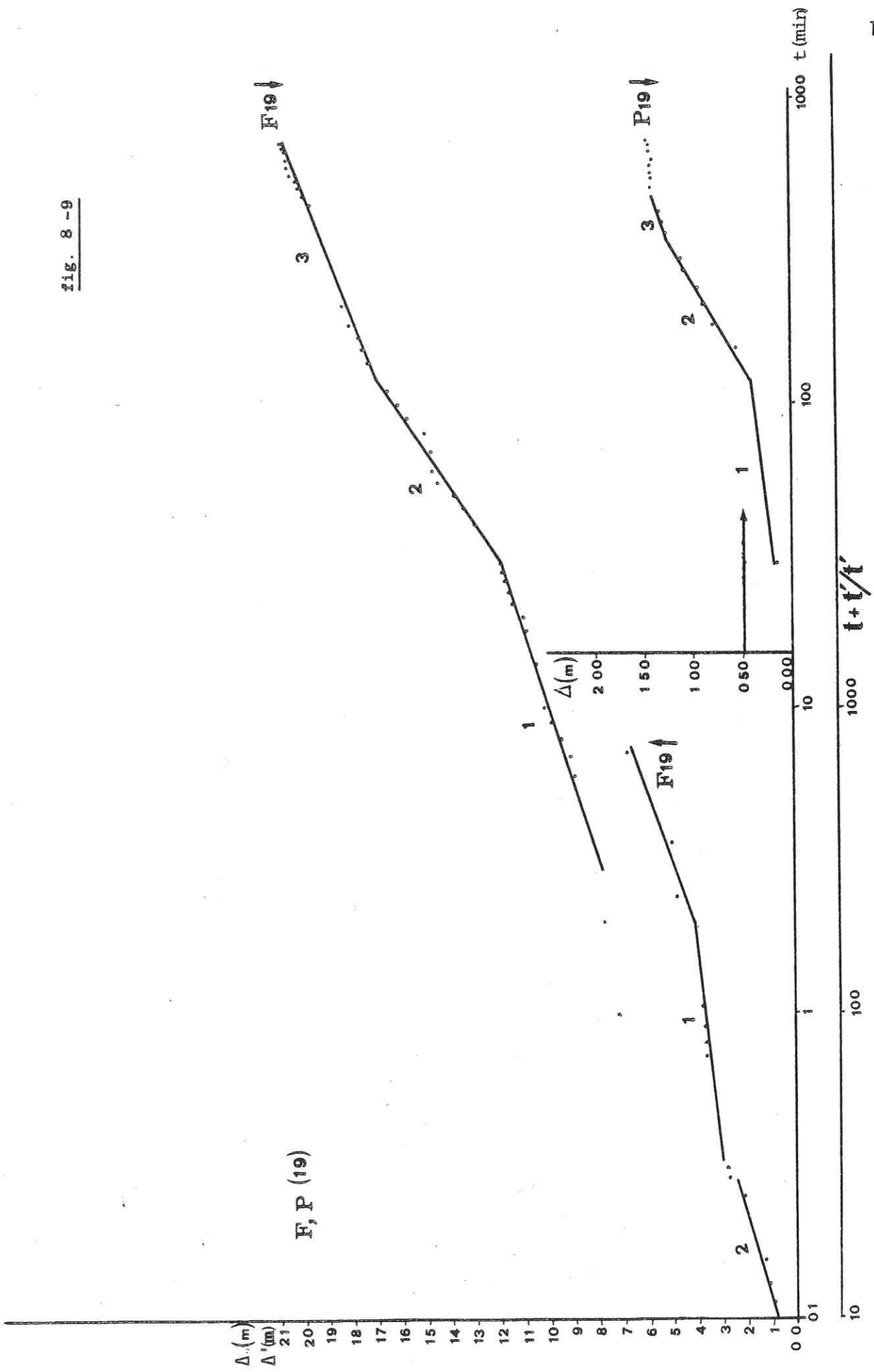


fig. 8-8

Fig. 8-8a

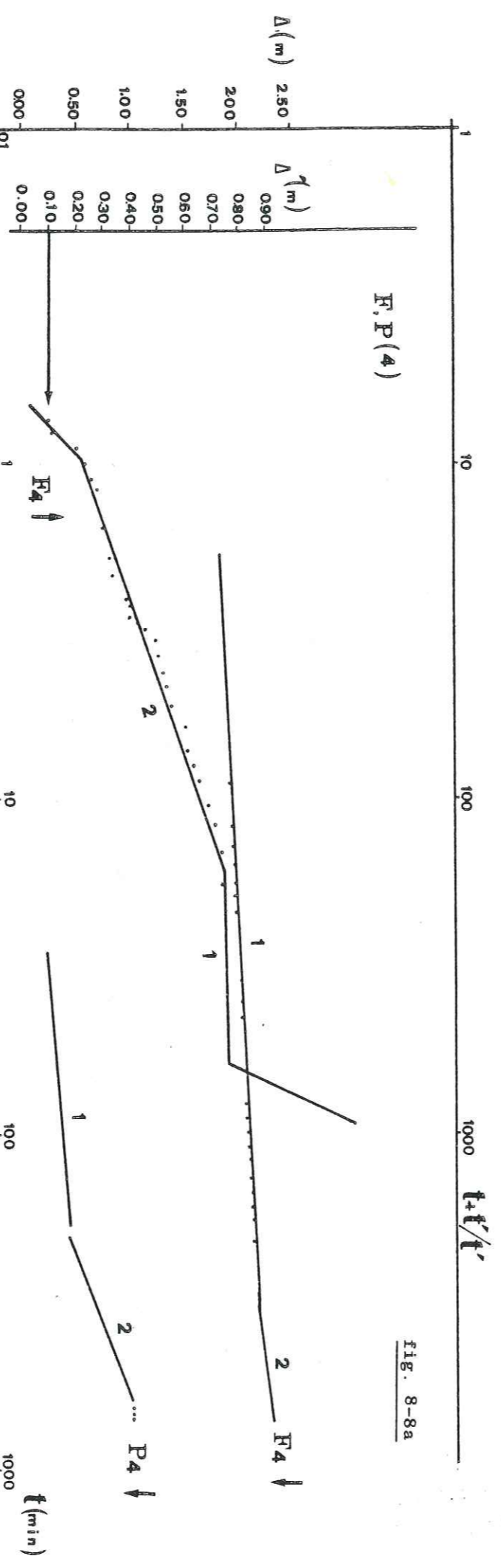
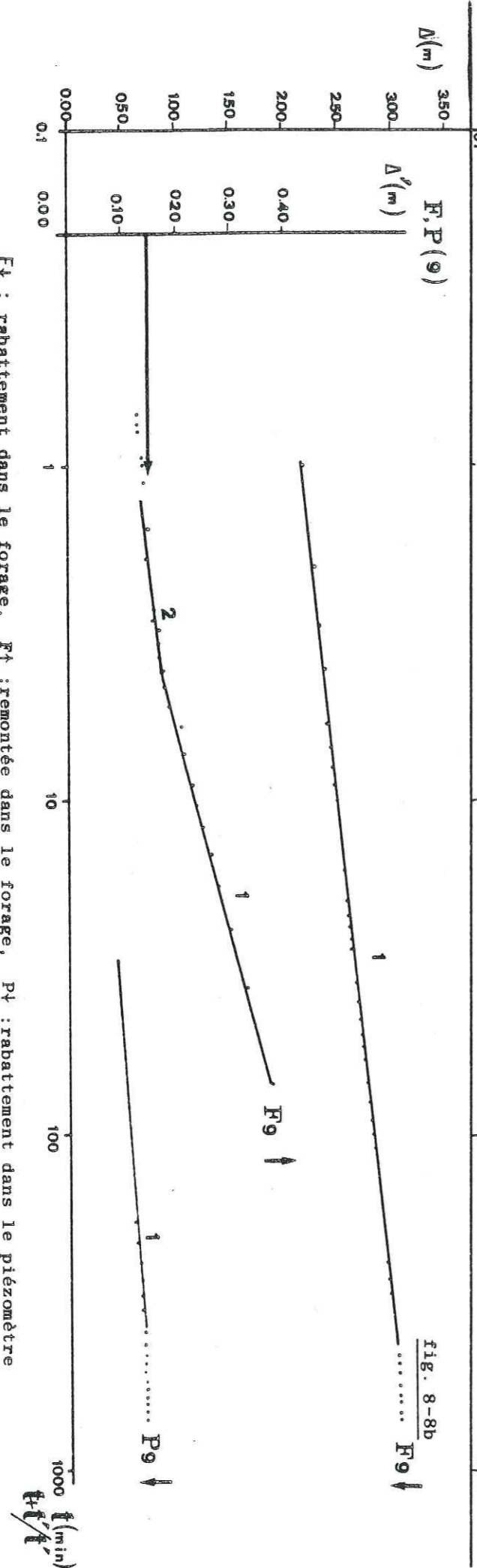


Fig. 8-8b



F↓ : rabattement dans le forage, F↑ : remontée dans le forage, P↓ : rabattement dans le piézomètre



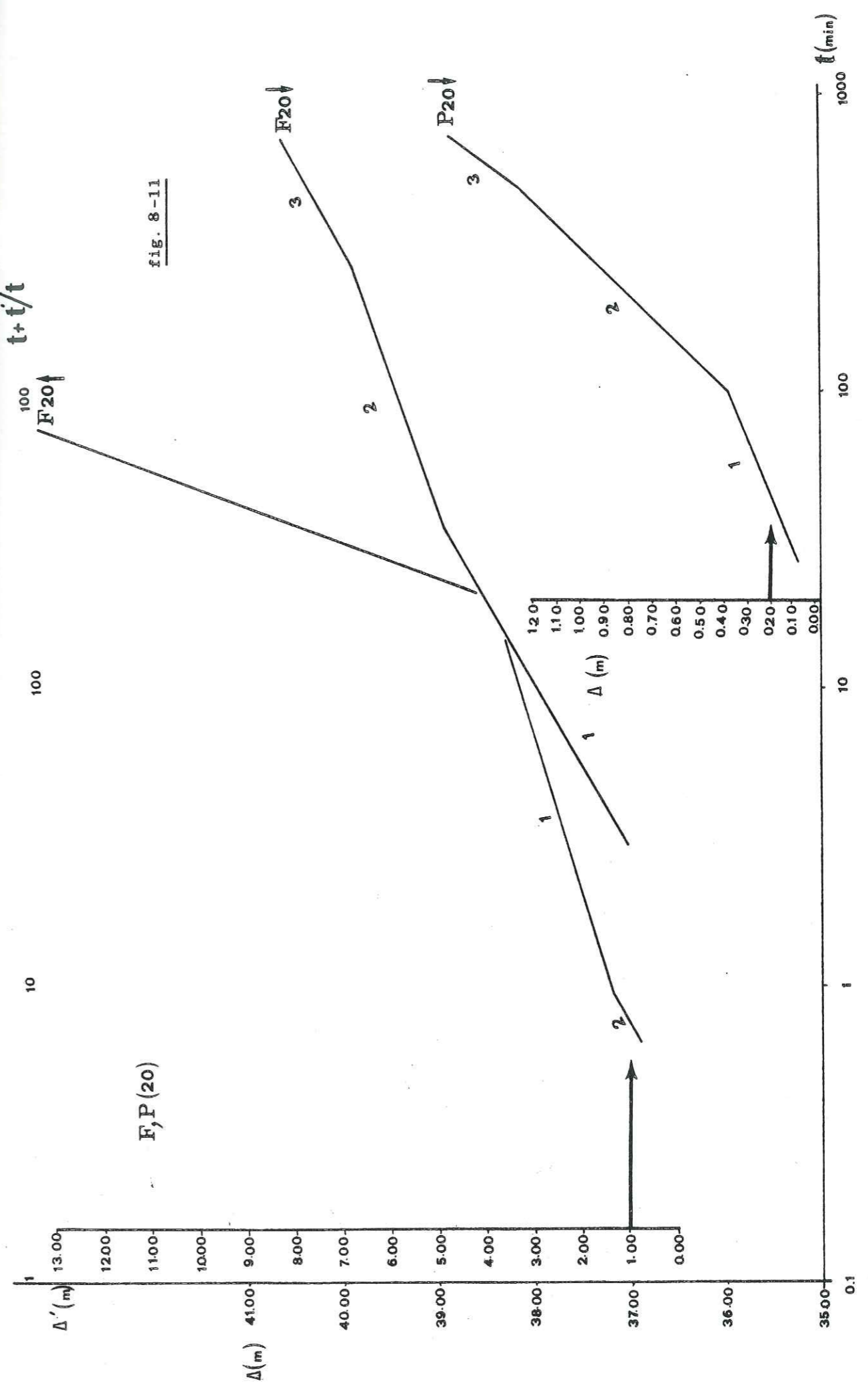


fig. 8-11

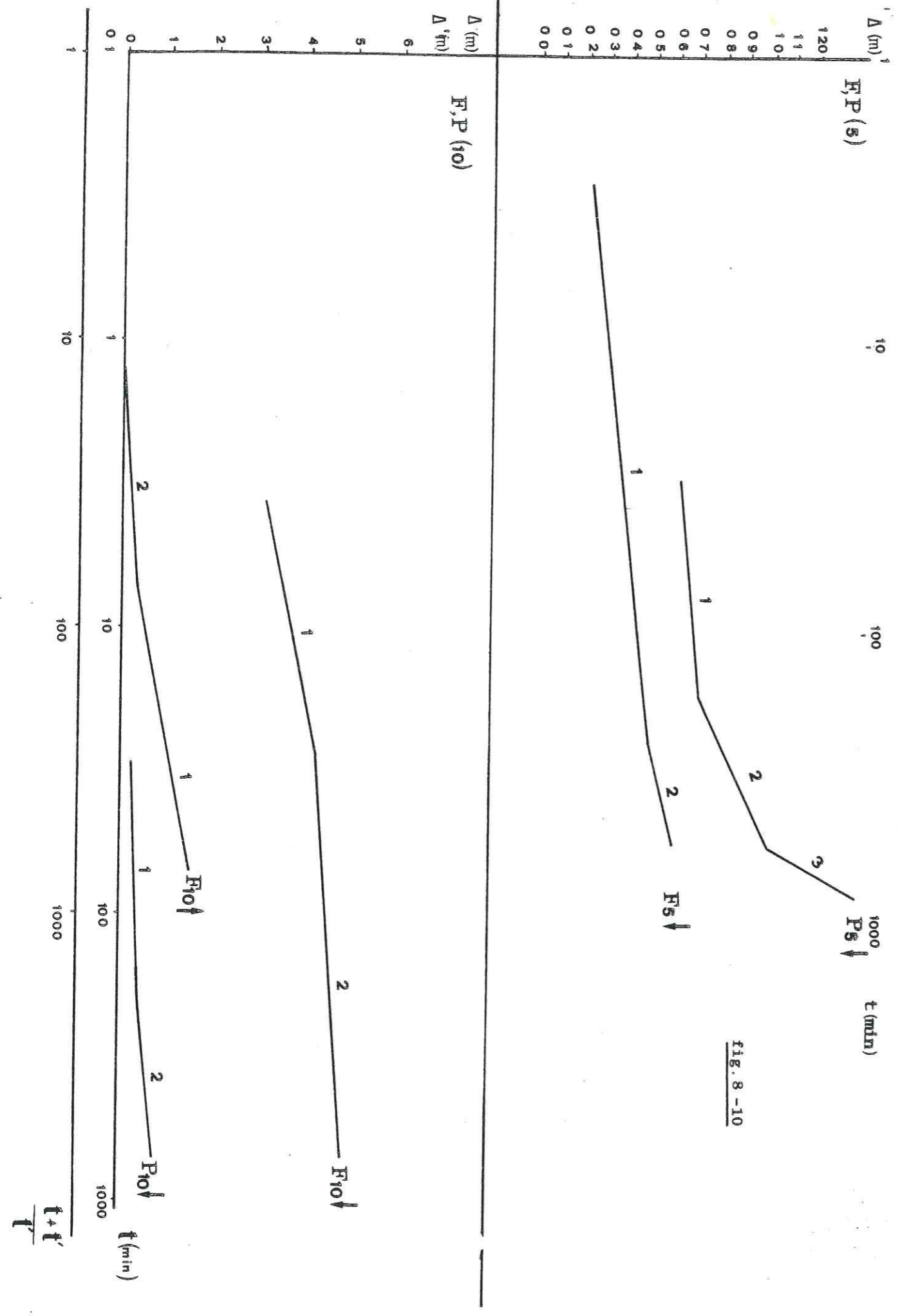


fig. 8-10

$\frac{t+t'}{t'}$



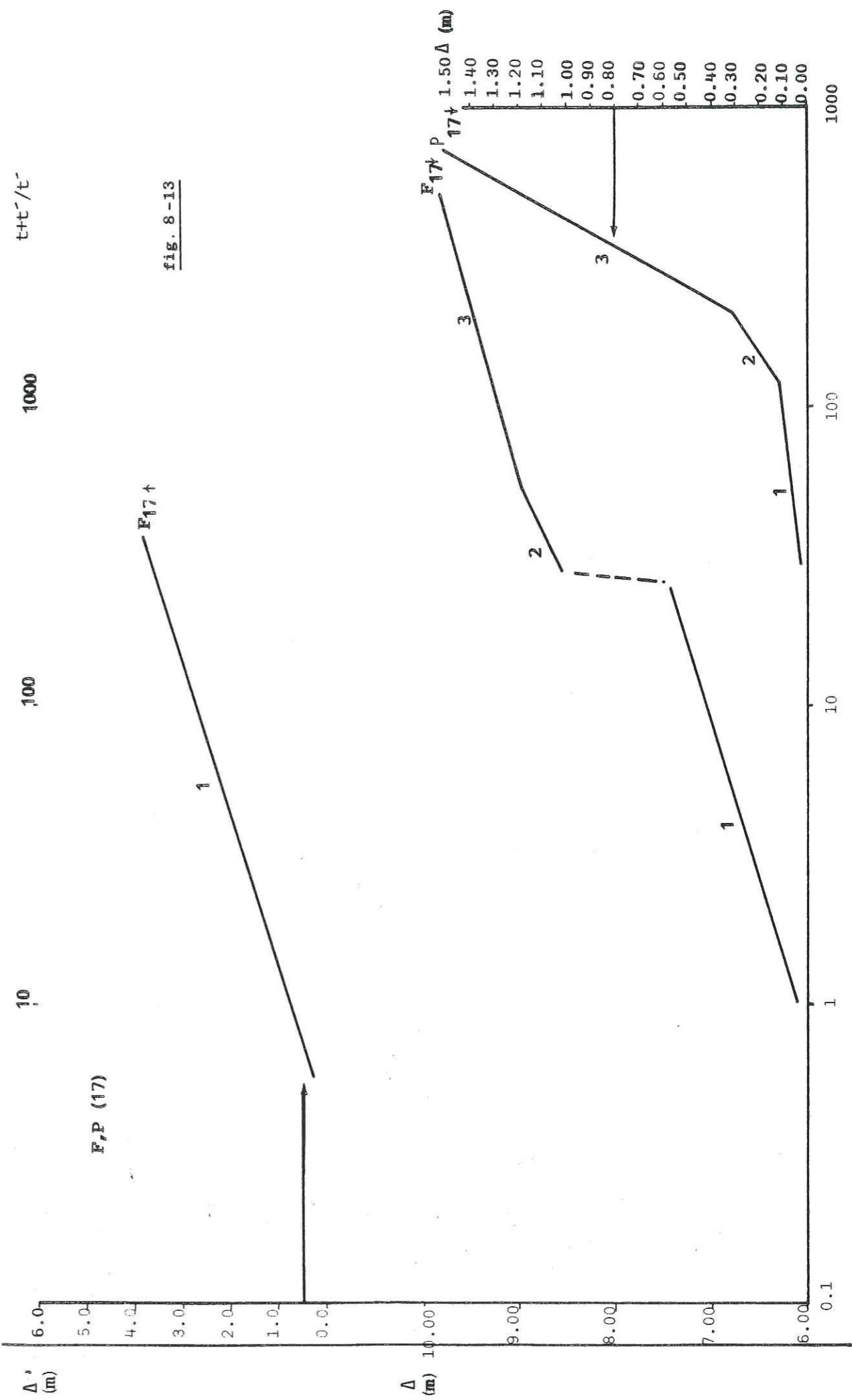
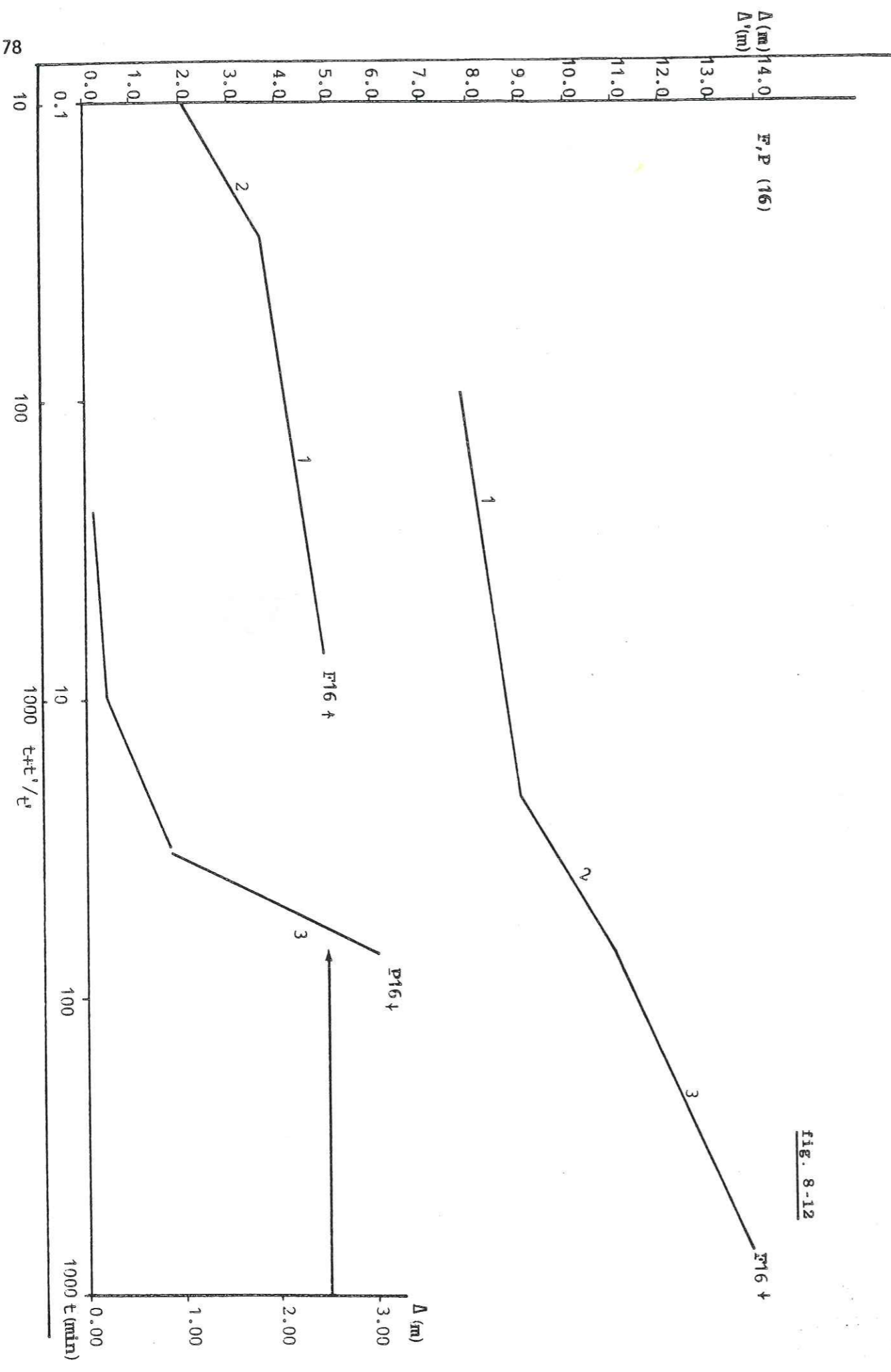
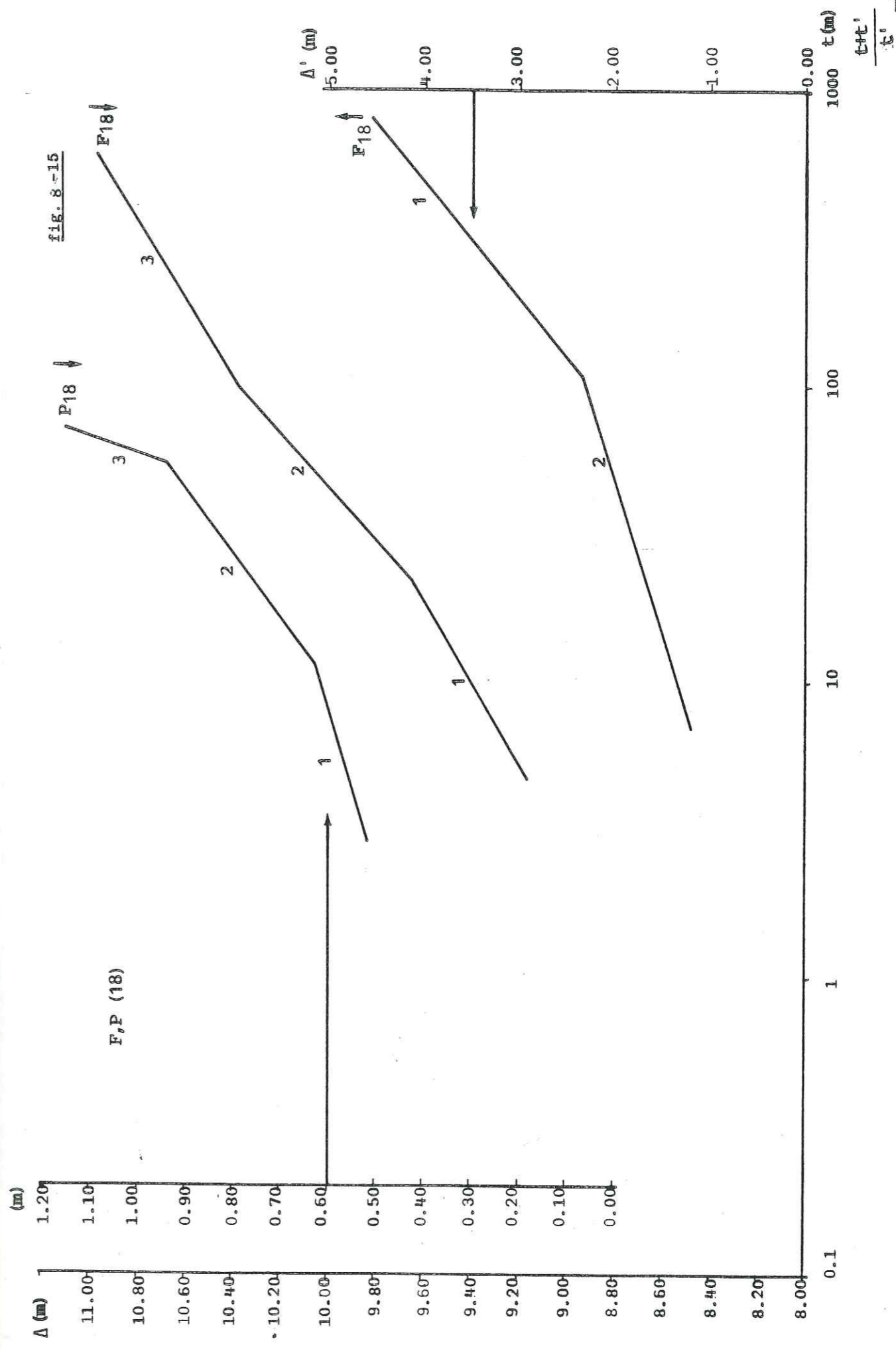
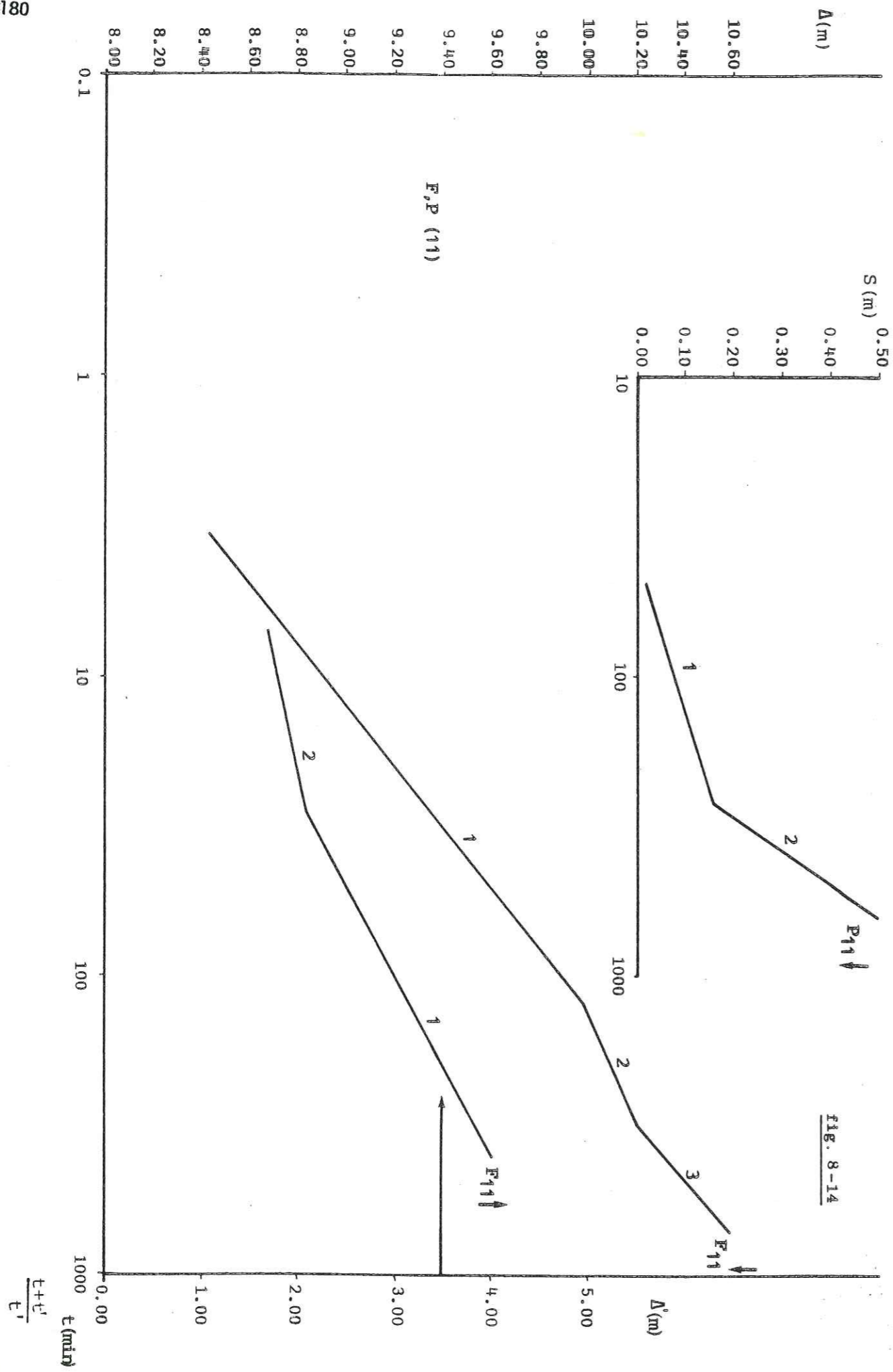


fig. 8-13

fig. 8-12









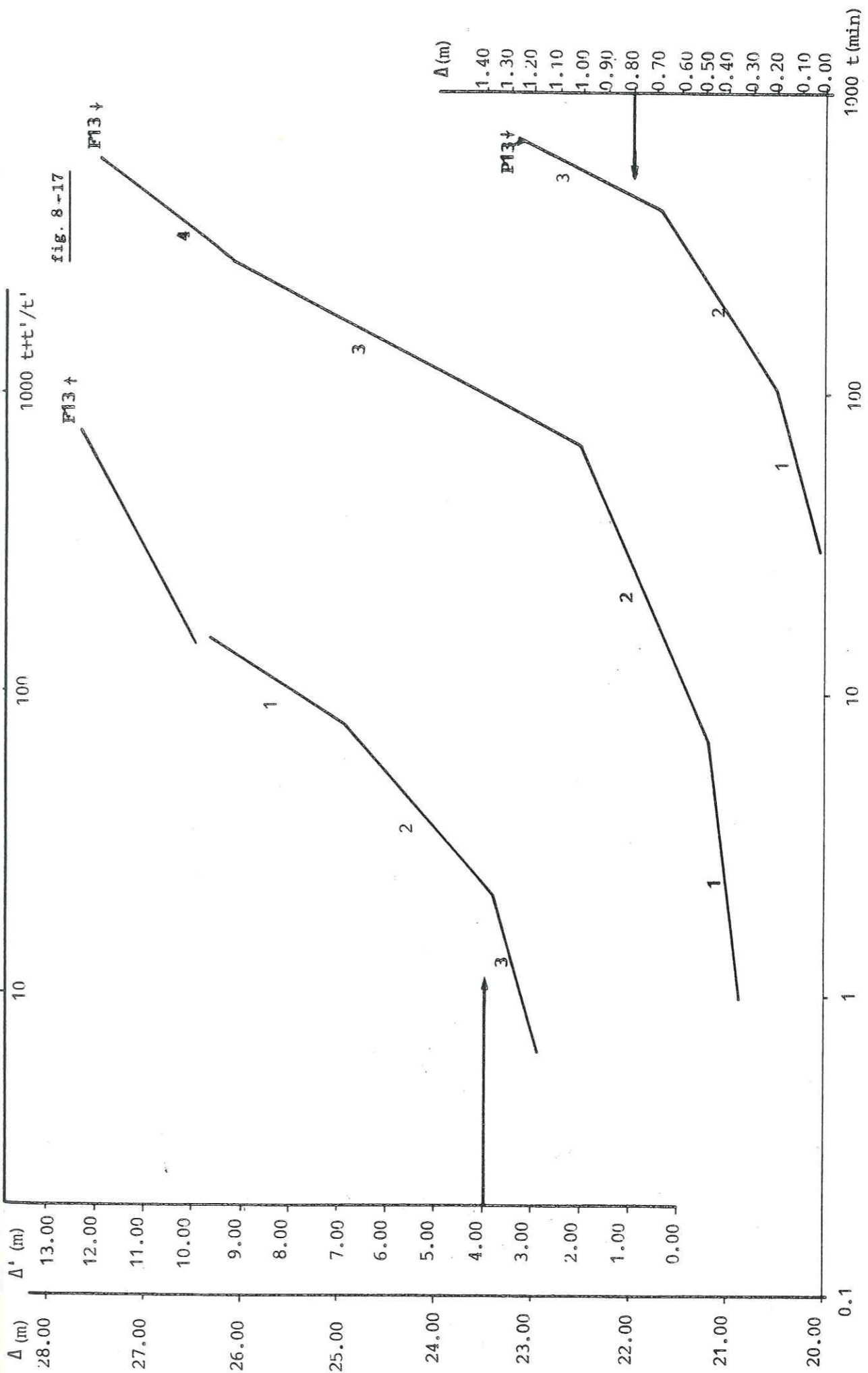
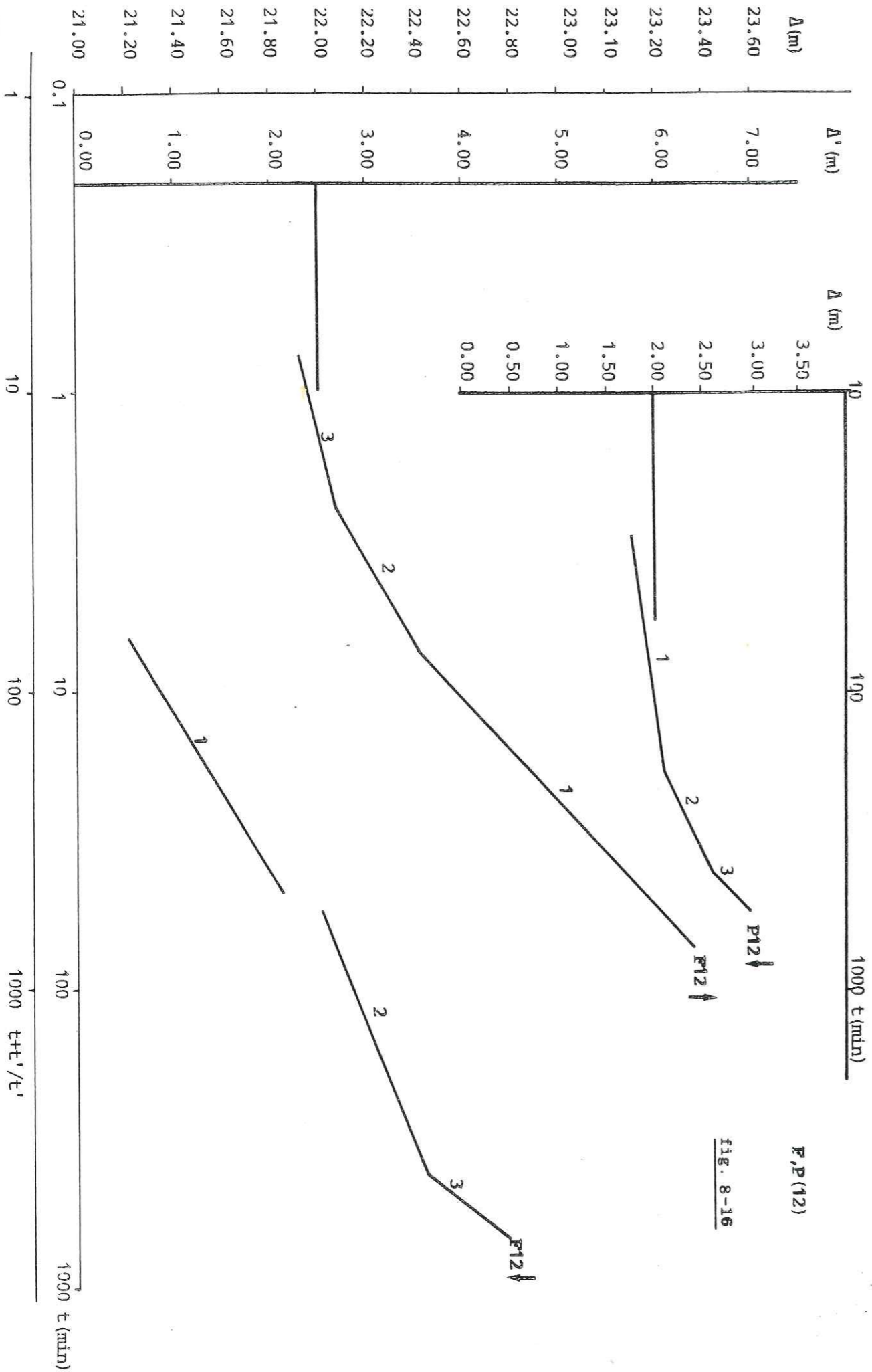


fig. 8-17

$P, P(12)$

fig. 8-16





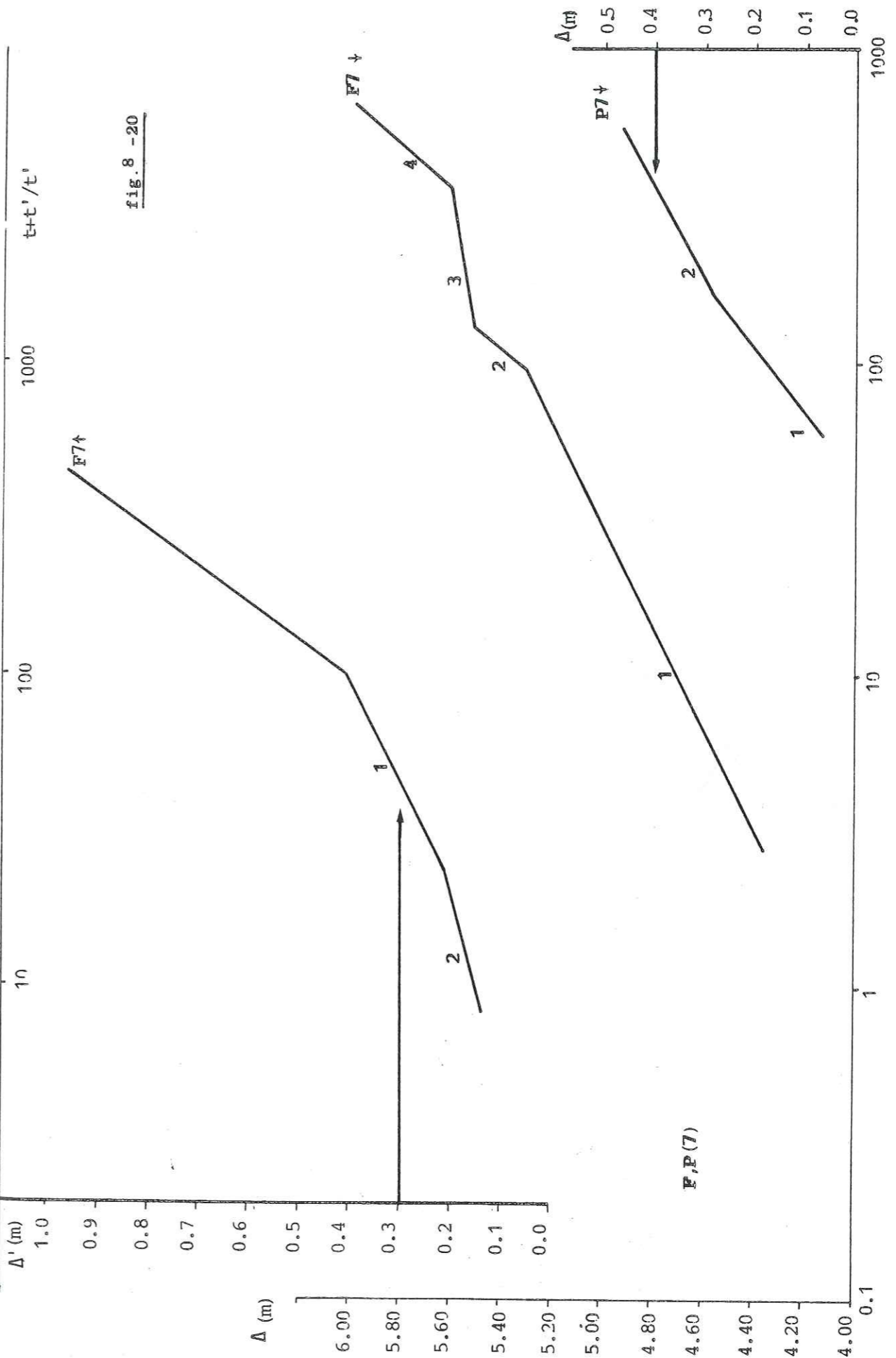
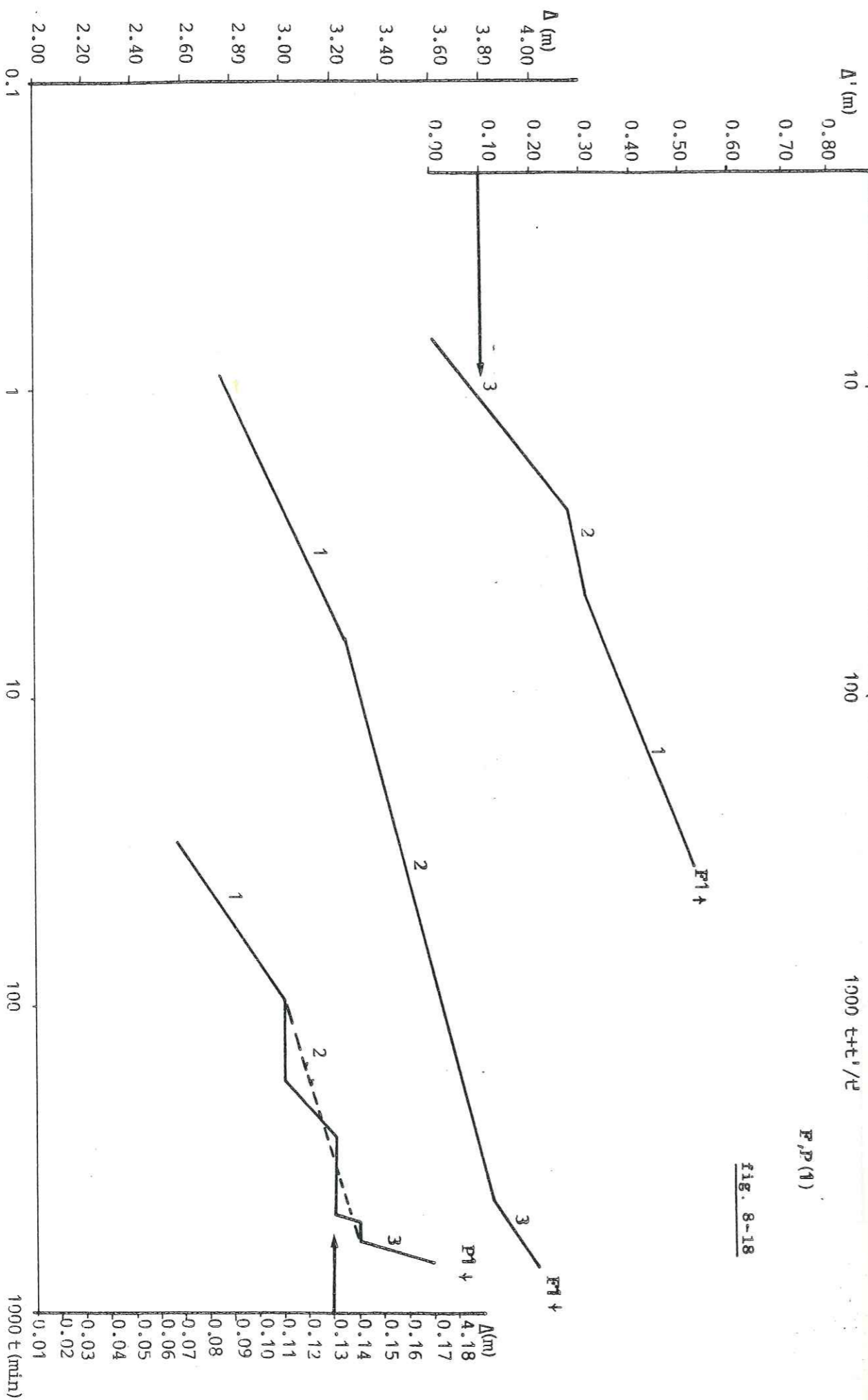


Fig. 8-18





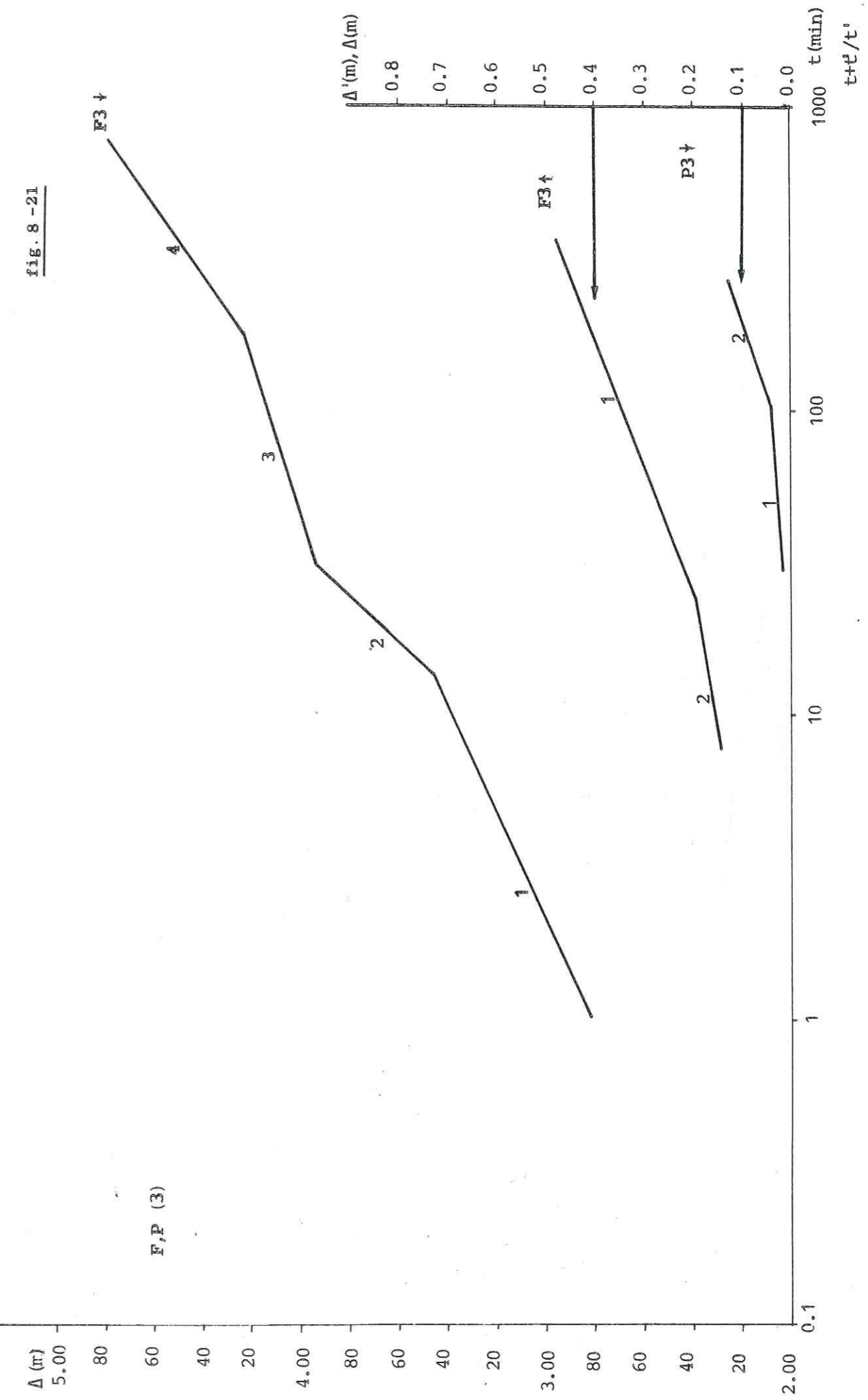


fig. 8-21

F,P (3)

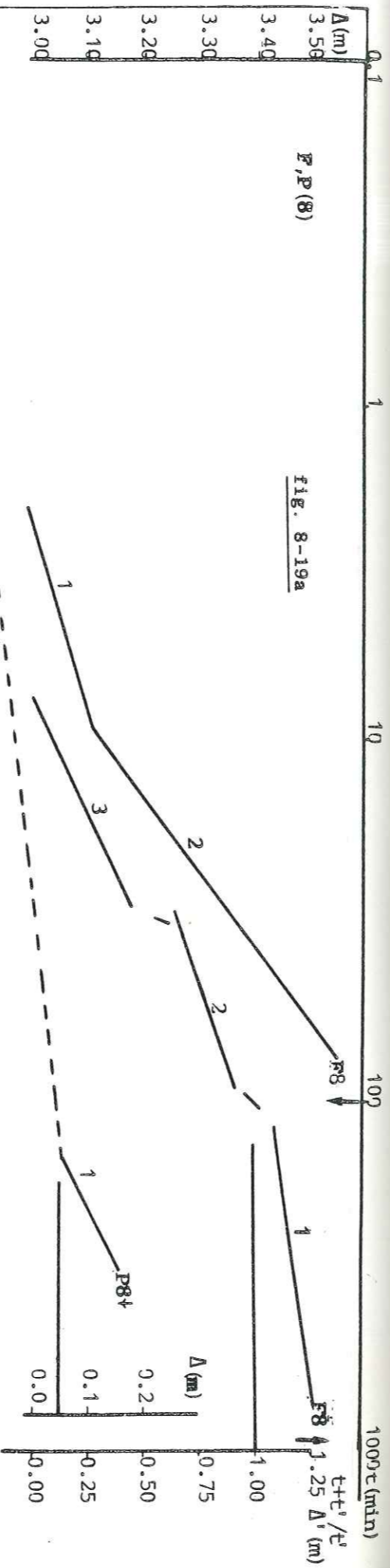


fig. 8-19a

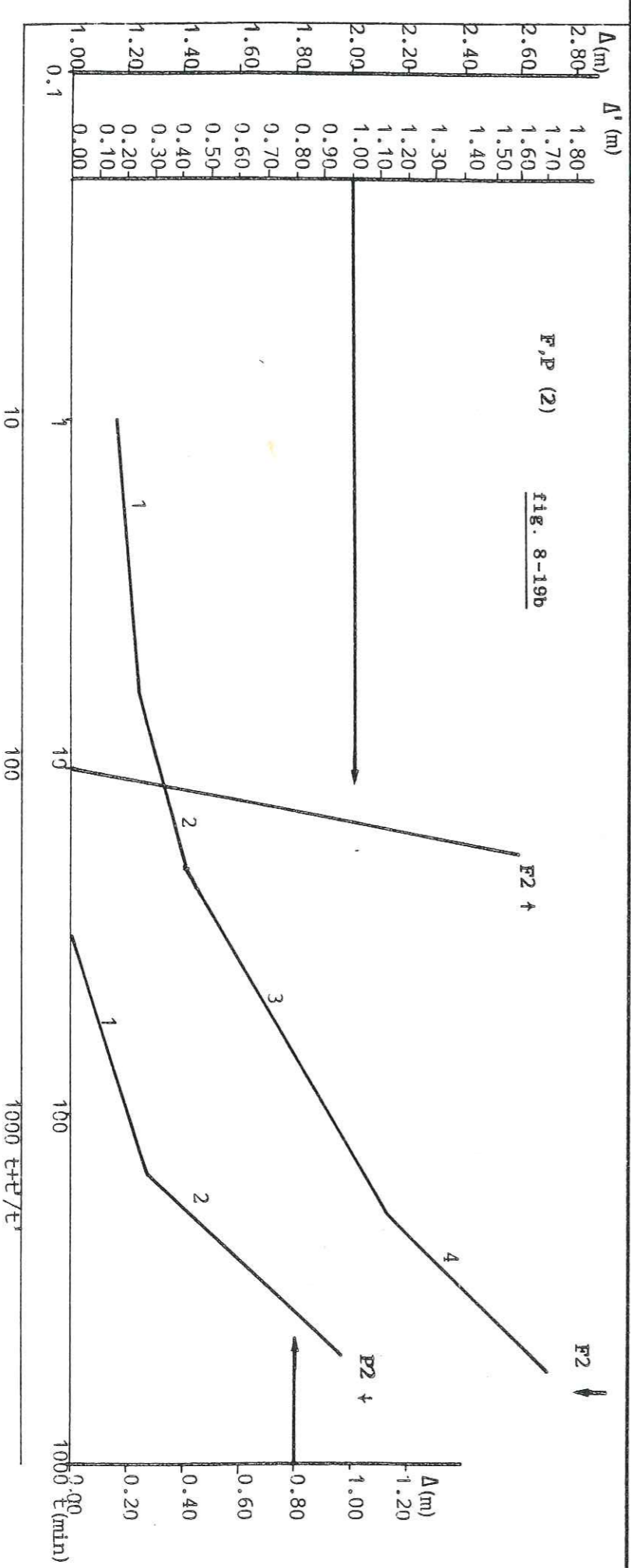


fig. 8-19b

F,P (2)



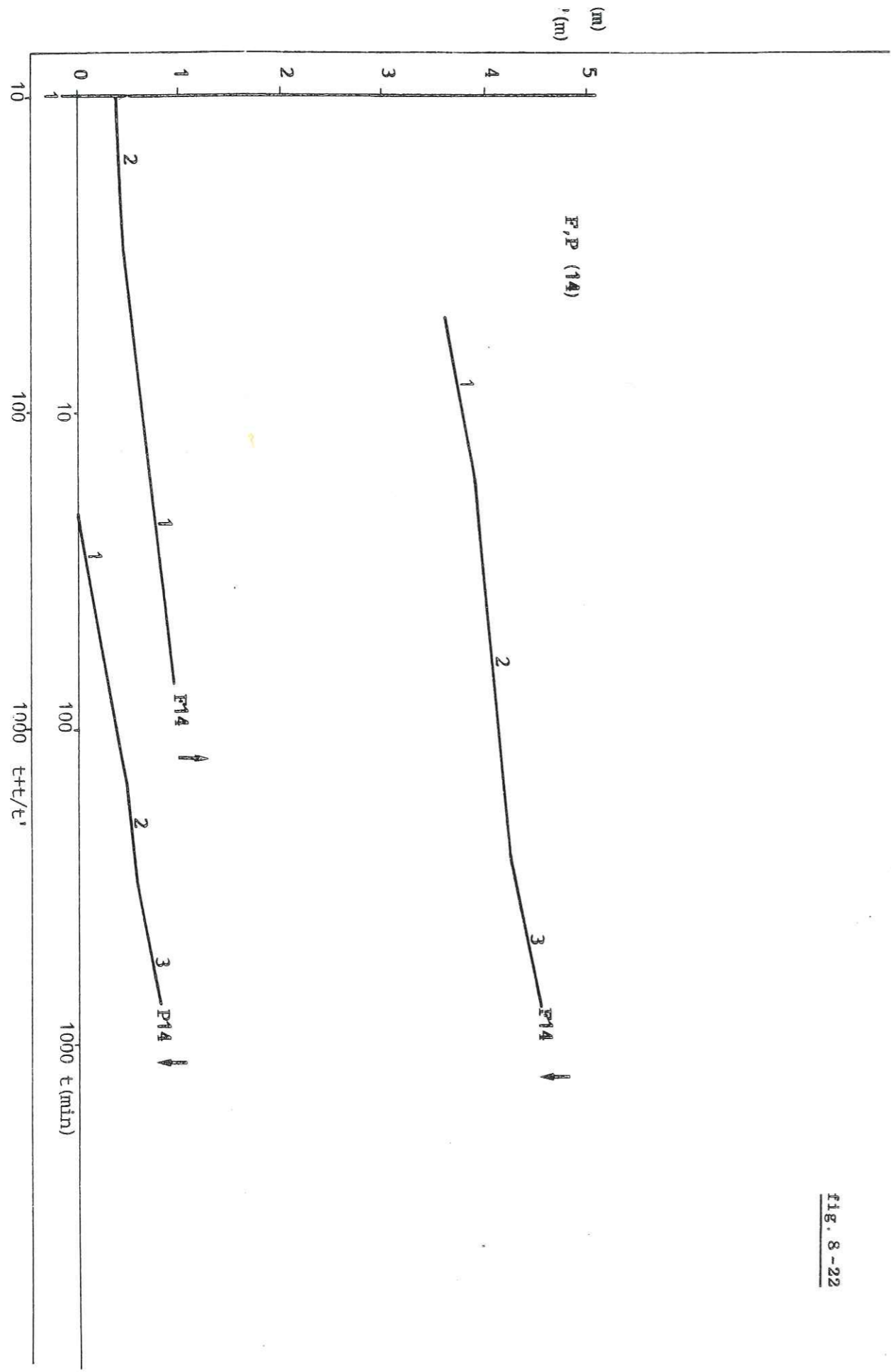


fig. 8-22

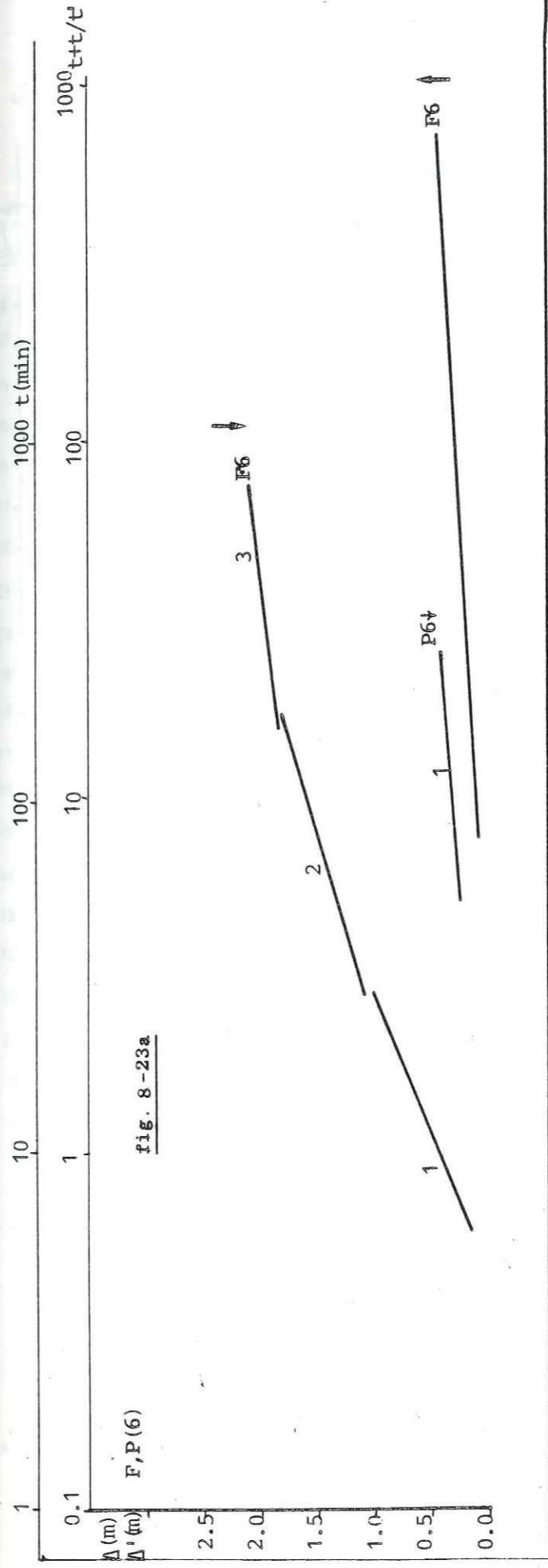


fig. 8-23a

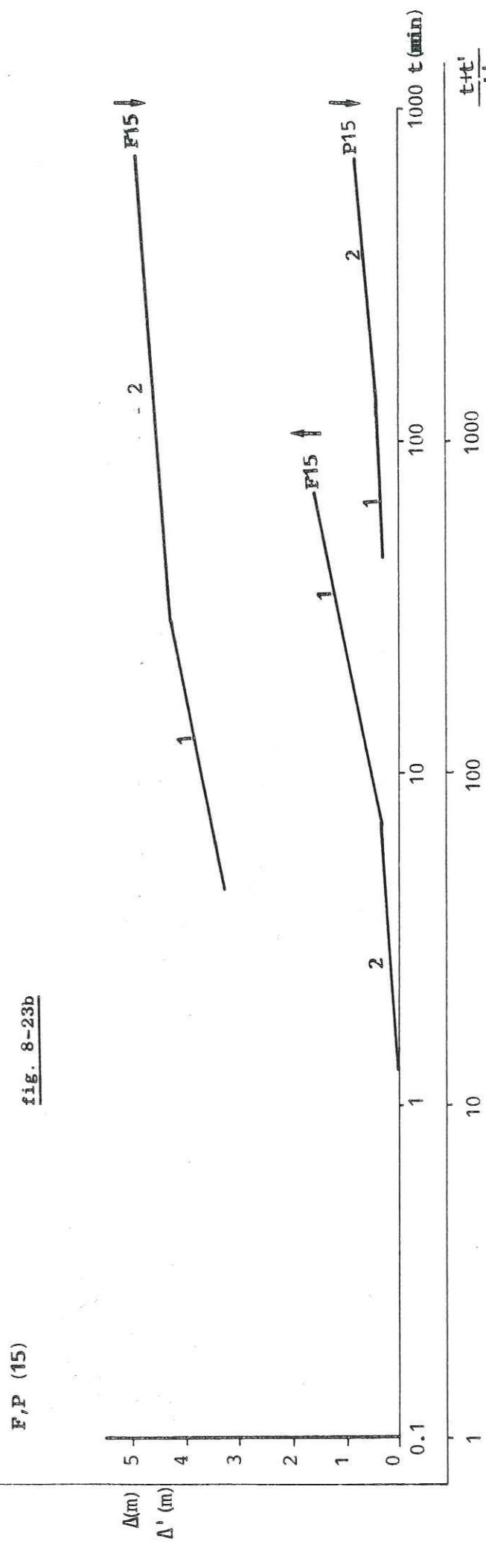


fig. 8-23b



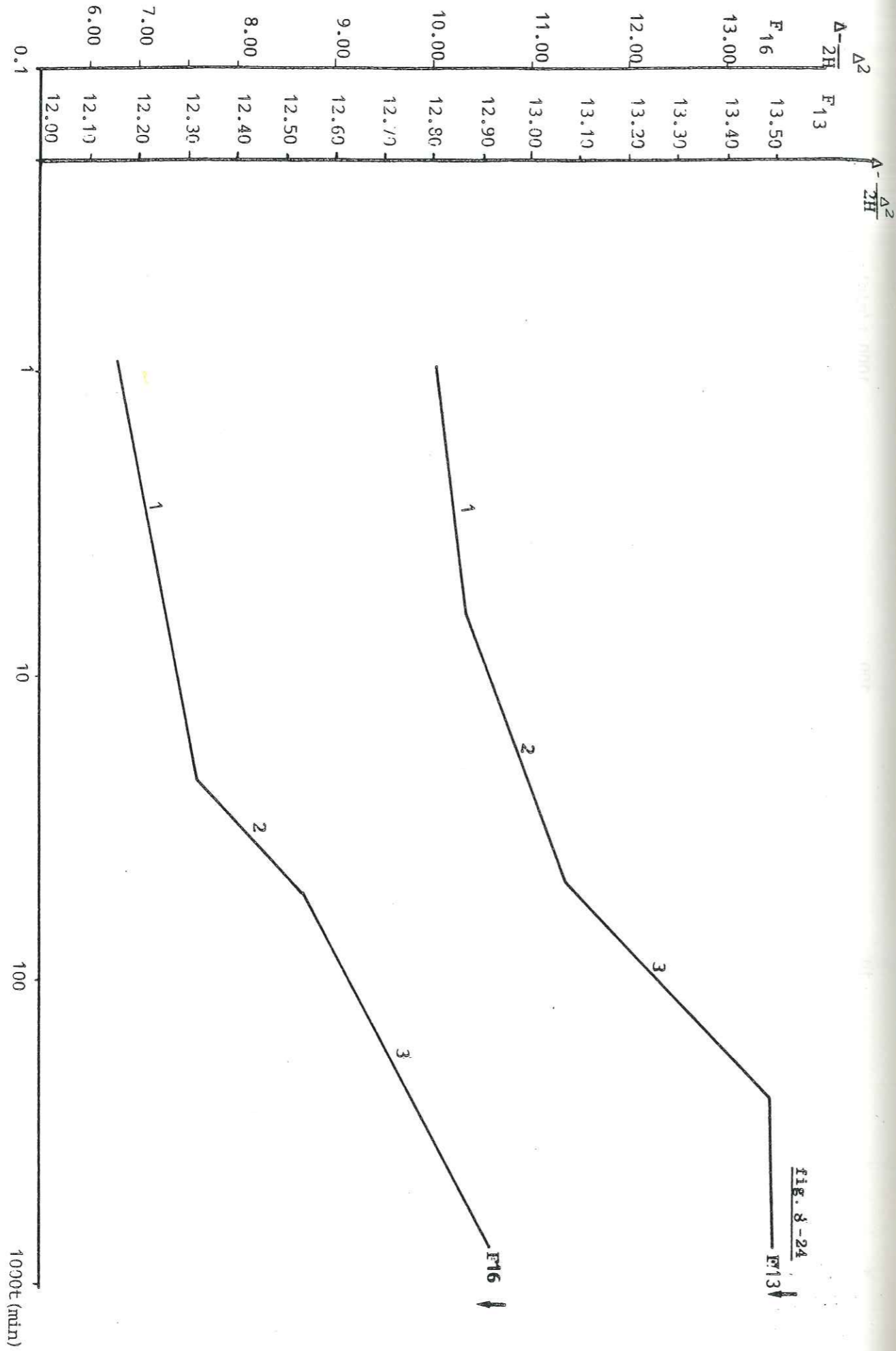
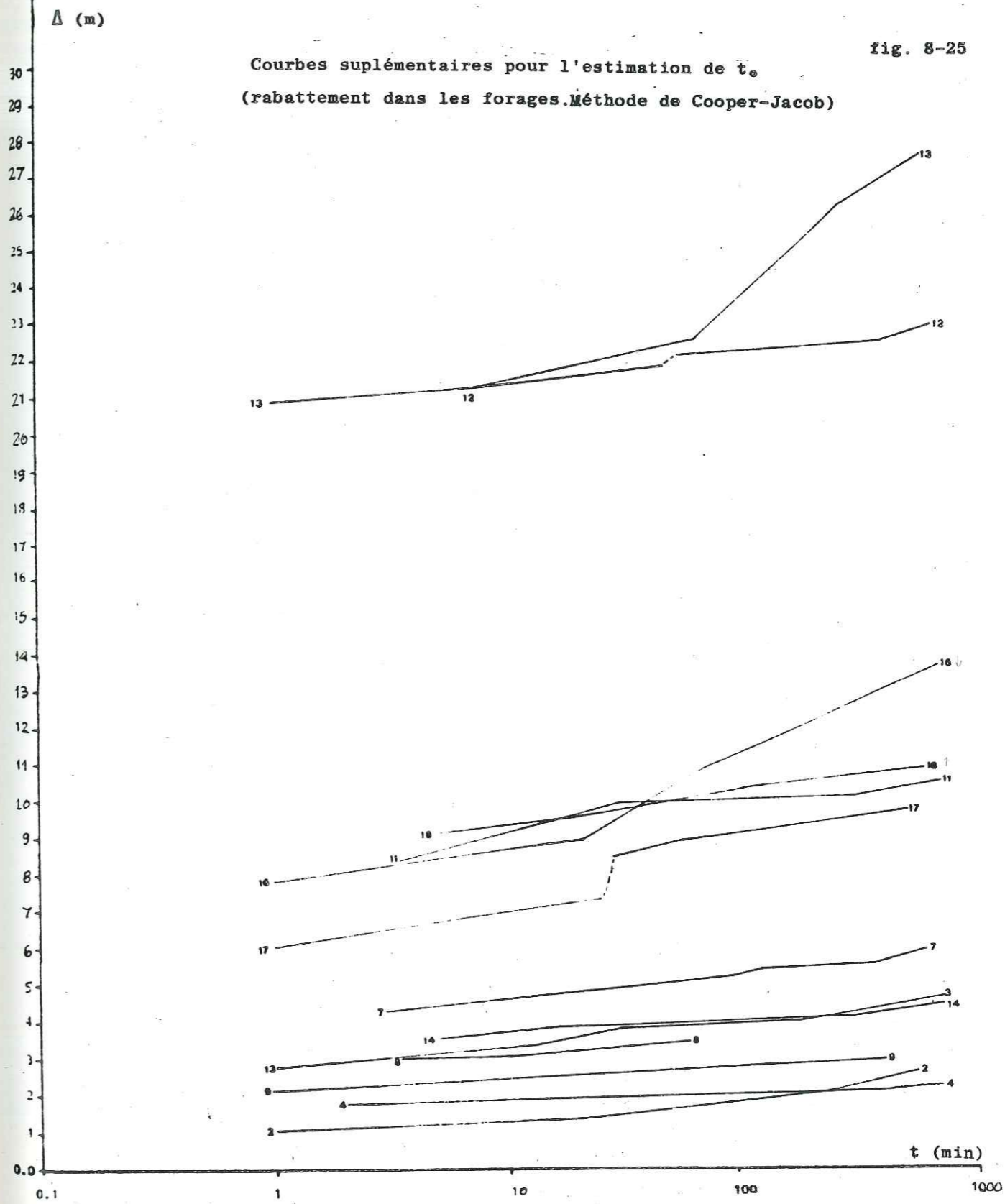


fig. 8-25  
 Courbes supplémentaires pour l'estimation de  $t_0$ .  
 (rabattement dans les forages. Méthode de Cooper-Jacob)





### 8.5.2. METHODE DE HANTUSH-JACOB

Lorsqu'il y a drainance, on peut exprimer l'influence de la couche drainante par le facteur  $B = \frac{Tb'}{k'}$  = facteur de drainance et  $\frac{k'}{B}$  résistance hydraulique-paramètre de drainance. Si le rapport  $X/B \leq 0,05$ , la formule proposée par DE GLEE  $\Delta_m = \frac{Q}{4\pi T} K_0\left(\frac{X}{B}\right)$  peut se transformer en  $\Delta_m = \frac{2.30Q}{2\pi T} (\log 1.12 \frac{B}{X})$ ,  $\Delta_m$  étant le rabattement max, observé dans un piézomètre situé à la distance  $x$  du forage pompé,  $Q$  le débit de pompage,  $B$  le facteur de drainance ( $m$ )  $C=k'/b'$ , la résistance hydraulique pour les nappes semi-captives,  $b'$  leur épaisseur saturée et  $k'$  leur conductivité hydraulique.

On peut, donc, construire un diagramme  $\Delta_m - \log x$  et obtenir une ligne droite, dans la partie où le rapport  $x/B$  est faible. Nous avons construit ces droites, en utilisant, comme deux piézomètres, d'une part, le piézomètre satellite existant et d'autre part le forage pompé lui-même, en estimant que le tube piézométrique du forage qui permettait la réalisation des mesures, se trouve à une distance de 20cm du centre du forage.

La pente de cette droite, pour un cycle logarithmique de  $x$ , peut s'exprimer

$$\Delta_{sm} = \frac{2.30Q}{2\pi T} \quad \text{et donc} \quad T = \frac{2.30Q}{2\pi \Delta_{sm}}$$

Par l'extrapolation de la droite, on peut arriver au point  $x_0 = (\Delta = 0)$

$$\text{Donc } 0 = \frac{2.30Q}{2T} (\log 1.12 \frac{L}{X}) \quad \text{et } 1.12 \frac{L}{x_0} = \frac{1.12}{x_0} \sqrt{KHC} = 1 \quad \text{ou}$$

$$C = \frac{(x_0/1.12)^2}{KH} = \frac{(x_0/1.12)^2}{T} = \frac{k'}{b'} \quad (\text{paramètre de drainance})$$

D'après cette formule et avec l'aide de la fig. 7-26, nous avons estimé les valeurs de  $C$ , qui figurent au tableau suivant. Il faut signaler ici qu'il y a une différence sur  $C$  entre les auteurs Français et les auteurs Américains. Les premiers utilisent le rapport  $k'/b'$ , donc les valeurs de  $C$  ont la valeur de l'inverse d'un temps et le "Paramètre de drainance  $C$ " signifie la capacité d'une couche à transmettre l'eau verticalement. Il

se définit comme le débit qui s'écoule à travers une unité de la surface limite, entre la couche aquifère captée et son éponté semi-perméable (toit ou mur), pour une différence de pression unitaire entre la nappe captée et la nappe alimentant la drainance. Les autres utilisent le rapport  $b'/k'$ , donc les valeurs de  $C$  ont l'unité de  $T$  et  $C$  s'exprime comme "Résistance hydraulique". La formule proposée par HANTUSH-JACOB exprime  $C$  en unités de  $T$  (jours).

Une autre variante de cette méthode peut s'appliquer. Pour un temps déterminé (dans notre cas c'est 720min), on construit le diagramme  $\Delta - \log x$  ( $x$  étant la distance de deux piézomètres). A partir de l'équation de Theis on a:

$$\Delta_2 - \Delta_1 = \frac{0.183Q}{T} (\log \frac{2.25Tt}{S} - \log \frac{2.25Tt}{S} - \log x_1^2 + \log x_2^2) \quad \text{donc}$$

$$\Delta_2 - \Delta_1 = \frac{0.183Q}{T} \log \frac{x_2^2}{x_1^2} \quad \text{et} \quad T = \frac{0.183Q}{\Delta_2 - \Delta_1} 2 \log \frac{x_2}{x_1}$$

Pour l'application de cette méthode, deux hypothèses sont encore nécessaires:

- La nappe aquifère est semi-captive. Cela arrive pour la plupart des forages du Nestos, mais aussi le comportement des nappes aux points du reste des forages n'est pas typique des nappes captives ou semi-libre, autrement dit assez proche du comportement d'une nappe semi-captive.
- L'écoulement vers les forages se fait en régime permanent. Dans notre cas nous avons utilisé les dernières mesures du rabattement qui correspondent au régime permanent ou presque permanent et c'est pour cela d'ailleurs, qu'elles ne sont pas utilisées dans l'application de la méthode de COOPER-JACOB.
- La surface phréatique de la nappe est constante (rabattement <5% de l'épaisseur saturée-résultat du régime permanent), donc, l'écoulement dans la couche supérieure se fait en proportion avec le rabattement de la surface piézométrique. Ce pourcentage de rabattement



ment existe pour la plupart des forages. Pour les forages  $F_5$ ,  $F_6$ ,  $F_{10}$ ,  $F_{15}$  et  $F_{19}$ , qui présentent des courbes caractéristiques des nappes captives, c'est la lithologie (formations semi-perméables, intermédiaires), qui permet un écoulement vertical proportionnel au rabattement piézométrique.

-  $H_{sat} > 3B$ , condition normale pour les nappes semi-captives.

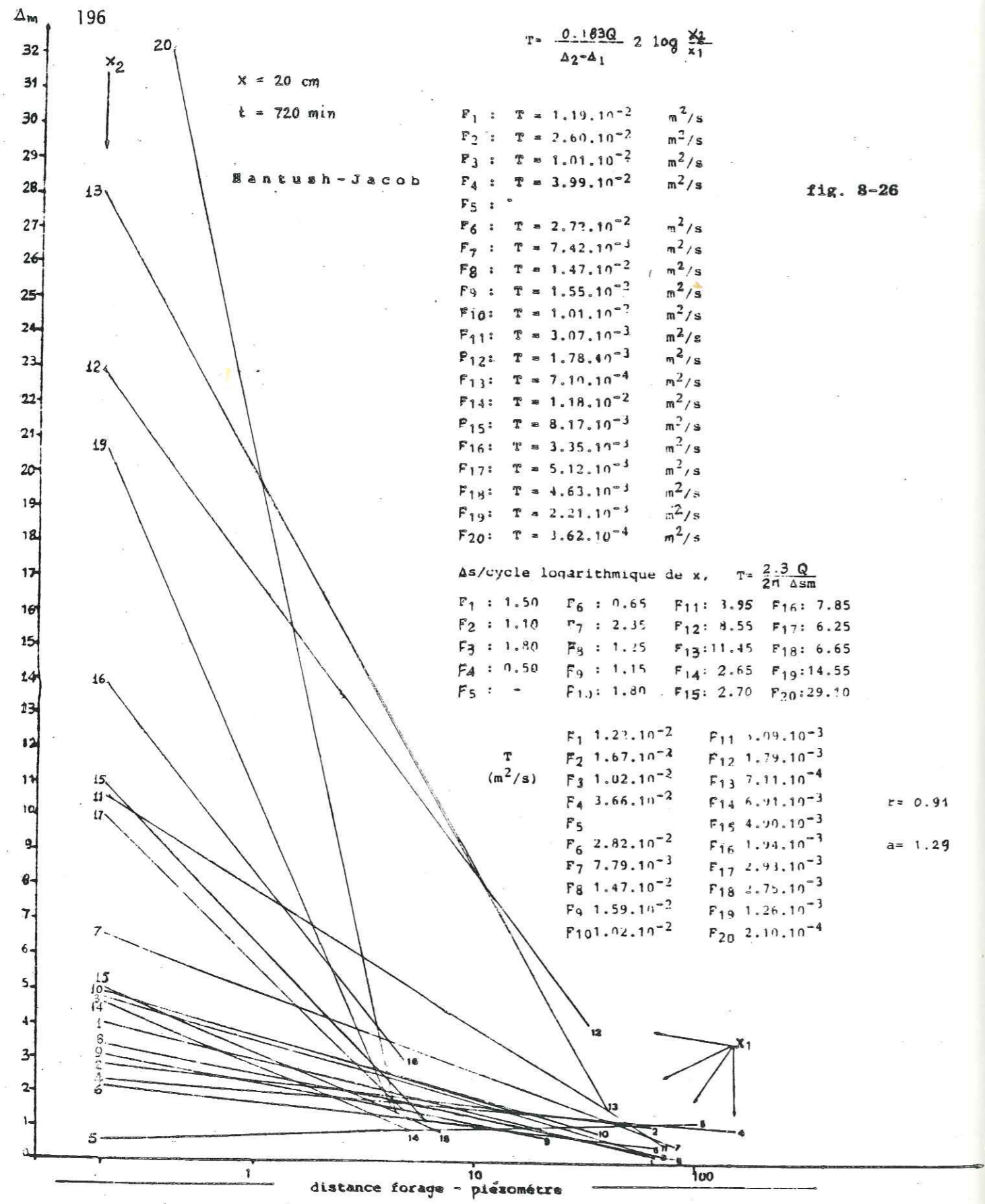
Donc, d'après la construction des droites caractéristiques des forages (fig. 7-26), nous avons estimé deux séries de Transmissivité, selon les deux variantes de la méthode de HANTUSH-JACOB.

Pour le delta du Nestos, il résulte que les valeurs de  $C$  sont élevées dans la partie Ouest, ainsi que les valeurs obtenues pour les forages  $F_{11}$ ,  $F_{12}$  et  $F_{13}$  de la partie Est, mais dans la zone d'un ancien lit de la rivière. Les valeurs élevées signifient une résistance hydraulique élevée, qui résulte des nombreuses intercalations des couches argileuses ou argilomarneuses. Dans la partie Est, où la sédimentation est beaucoup plus régulière, la drainance se fait plus facilement, donc les valeurs de  $C$  sont faibles.

La méthode de HANTUSH-JACOB est valable à condition que le rapport  $x/B$  soit inférieur ou égal à 0.05. Donc, cette méthode est théoriquement valable seulement pour le forage  $F_4$  et, peut-être pour le forage  $F_2$  (v. tabl.). Ceci arrive parce que les forages sont crépines même aux niveaux des couches semi-perméables (drainantes), donc une grande partie d'écoulement par drainance, est conduite dans le tube du forage directement sans l'intervention de la couche aquifère principale. Donc, dans le quotient  $x/B$ , le dénominateur devient plus faible et, par conséquent, la valeur de  $C$  plus élevée. Ceci n'est pas valable pour les forages  $F_{14}$ ,  $F_{20}$ , puisque ces forages sont mieux crépinés et la valeur de  $C$  est incontestablement élevée. Donc, malgré la forme de la courbe caractéristique, l'ensemble des formations aquifères de ces forages se comporte comme une nappe captive.

forage	$X_0$ (m)	$C$ (jours)	$B=\sqrt{T.C}$ (m)	$x$ (m)	$x/B$
$F_1$	85.0	5.46	75.89	63.7	0.84
$F_2$	1900.0	1994.53	1696.43	50.0	0.03
$F_3$	95.0	8.16	84.82	66.0	0.78
$F_4$	40,000.0	$3.50 \times 10^{10}$	35,714.29	144.6	0.004
$F_5$	-	-			
$F_6$	390.0	49.77	348.21	60.4	0.17
$F_7$	140.0	23.22	125.00	57.2	0.46
$F_8$	110.0	7.60	98.21	80.1	0.82
$F_9$	90.0	4.70	80.36	20.0	0.25
$F_{10}$	110.0	10.95	98.21	36.2	0.37
$F_{11}$	100.0	29.86	89.29	68.5	0.77
$F_{12}$	100.0	51.55	89.29	31.4	0.35
$F_{13}$	55.0	39.26	49.11	41.9	0.85
$F_{14}$	12.0	0.19	10.71	50.0	4.67
$F_{15}$	14.0	0.40	12.95	66.7	5.15
$F_{16}$	11.5	0.63	10.27	46.3	4.51
$F_{17}$	8.5	0.23	7.59	47.0	6.19
$F_{18}$	9.0	0.27	8.04	61.5	7.65
$F_{19}$	5.5	0.22	4.91	42.1	8.57
$F_{20}$	4.9	1.06	4.38	45.0	10.27





8.5.3. LA METHODE DE BOULTON

Exceptées les conditions générales nécessaires à l'élaboration des données des essais de pompage, cette méthode s'applique aux nappes semi-captives ou libres avec un débit retardé et sous régime transitoire. Dans le processus de la méthode intervient le coefficient "a" (indice de retard de Boulton-1/a), qui intervient aussi dans l'estimation du "Coefficient (facteur) d'égouttement, B" traduisant l'écoulement vers l'ouvrage.

$$B = \sqrt{\frac{T}{aS'}}$$

S'étant le coefficient d'emménagement de la couche plus perméable du système considéré. Ce coefficient B est analogue au "Coefficient de drainage" pour les nappes captives (Hantush).

Boulton a développé une technique pour cette configuration et il a montré, si un piézomètre est disponible à quelques mètres du forage, qu'on peut observer un rabattement Δ', qui est égal à:

$$\frac{Q}{4\pi T} \left\{ W\left(\frac{x^2 S}{4Tt}\right) - \ln \frac{S+S'}{S} - W(at) + W\left(\frac{S+S'}{S} at\right) \right\}$$

Le rabattement Δ' est la résultante du rabattement Δ du terrain peu perméable plus le rabattement négatif fourni par l'apport de la couche drainante

$$\Delta = \frac{Q}{4\pi T} W\left(\frac{x^2 S}{4Tt}\right) \quad \text{et}$$

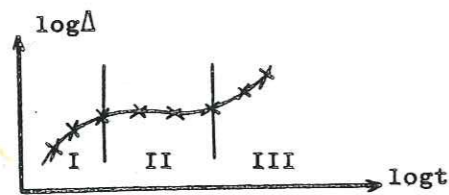
$$\Delta - \Delta' = \frac{Q}{4\pi T} \left\{ \ln \frac{S+S'}{S} + W(at) - W\left(\frac{S+S'}{S} at\right) \right\}$$

Les modifications d'écoulement souterrain pendant le pompage d'une nappe libre (non captive)

A condition que la nappe aquifère soit pompée à débit constant, la courbe de rabattement, dans le piézomètre de mesure, présente la forme clas-



sique de  $S$  sur un diagramme bi-logarithmique. Cette courbe se compose de trois segments distincts.



Au début du pompage, une nappe libre se comporte dans le cadre de propriétés élastiques. L'eau se libère de l'emmagasinement sous la décompression de l'aquifère, qui provient de la réduction instantanée de la pression hydrostatique juste au début du pompage. Durant cette période initiale qui correspond aux premières minutes de rabattement, le processus est décrit par l'équation de Theis pour les nappes captives, il y a donc des "conditions de Theis". Simultanément avec la réponse élastique de l'aquifère, la discontinuité de rabattement provoque un écoulement horizontal et élève progressivement une influence reflétée par la déviation des éléments du rabattement de la courbe de Theis. Ce processus correspond au premier segment (I) de la courbe typique.

Ensuite, l'écoulement vertical augmente et la courbe de rabattement approche l'asymptote horizontale. Pour les nappes libres ceci correspond à la période d'un régime de quasi-équilibre qui est représenté par le deuxième segment de la courbe typique. On n'a plus de "conditions de Theis".

Le troisième segment correspond à la diminution de l'écoulement vertical ceci étant le résultat de l'égalisation progressive de la charge hydraulique tout au long d'une verticale. Sous un régime de débit constant, le rapport de l'abaissement du rabattement moyen augmente (tandis que durant la période du segment II il diminue). Finalement la courbe rabattement-temps se confond avec la courbe de Theis pour le régime transitoire, qui est liée avec le débit spécifique de la nappe aquifère.

Le coefficient d'emmagasinement effectif est

$$vS_A = S_A + S_Y$$

$S_A$  étant le volume d'eau instantanément libérée pour l'unité de rabatte-

ment et pour l'unité de la surface horizontale (coefficient d'emmagasinement effectif au débit du pompage).  $S_Y$  étant le volume du débit retardé pour l'unité de rabattement et de la surface horizontale (débit spécifique).

$$v = 1 + \frac{S_Y}{S_A}$$

La solution générale de l'équation d'écoulement est complexe (équation différentielle) et peut s'exprimer (comme l'équation de Theis)

$$\Delta = \frac{Q}{4\pi T} W(u_{AV}, x/B)$$

Pour la première partie du pompage on a

$$\Delta = \frac{Q}{4\pi T} W(u_A, x/B) \quad \text{et} \quad u_A = \frac{x^2 S_A}{4Tt}$$

Pour la dernière partie du pompage on a

$$\Delta = \frac{Q}{4\pi T} W(u_Y, x/B) \quad \text{et} \quad u_Y = \frac{x^2 S_Y}{4Tt}$$

Ces formules sont applicables à condition que  $v > 100$ . Si  $10 < v < 100$ , la deuxième partie de la courbe n'est plus horizontale, mais le processus proposé par Boulton fournit des résultats de bonne approximation. Or, pour la deuxième partie du pompage

$$\Delta = \frac{Q}{2\pi T} K_0\left(\frac{x}{B}\right) \quad (L)$$

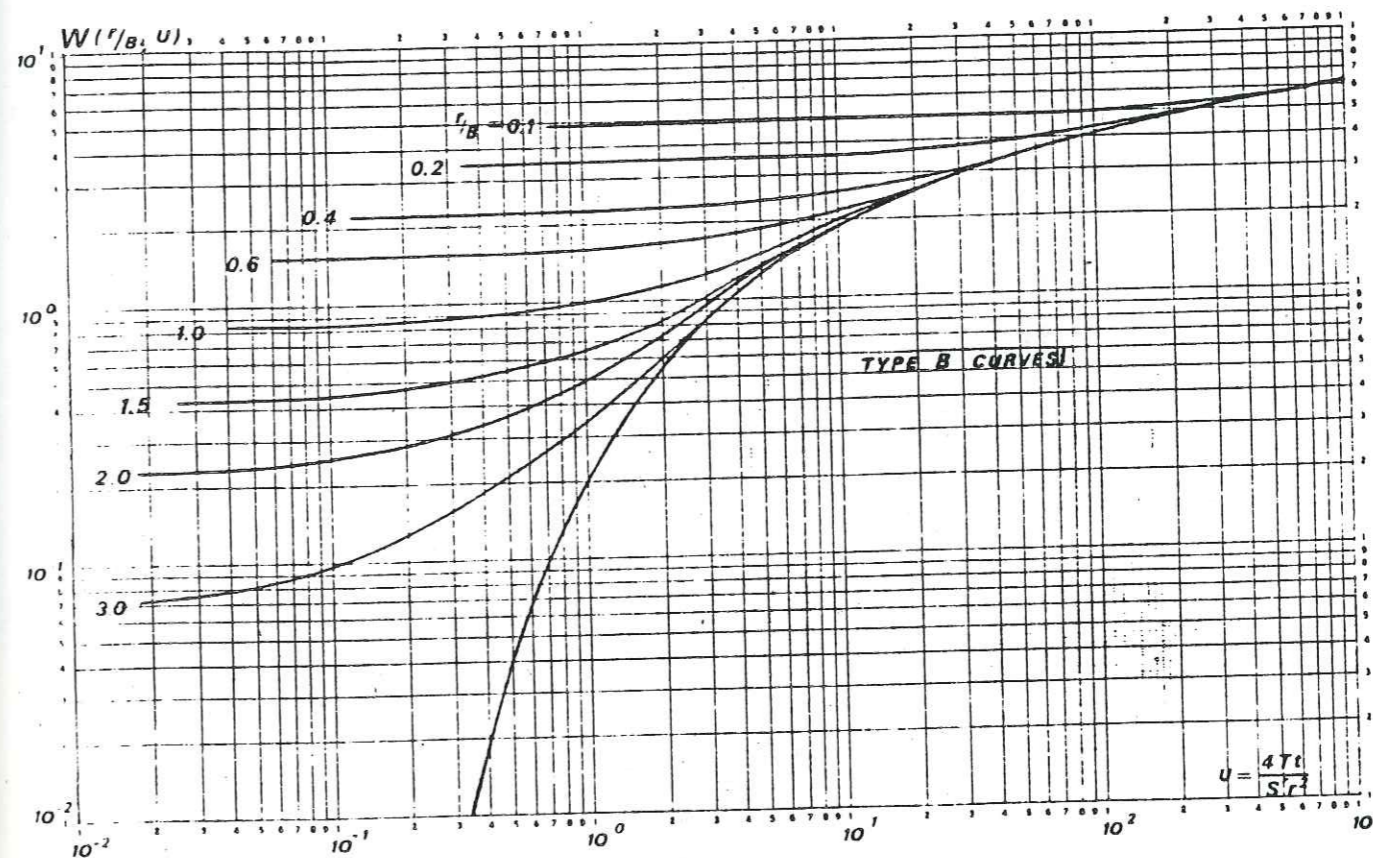
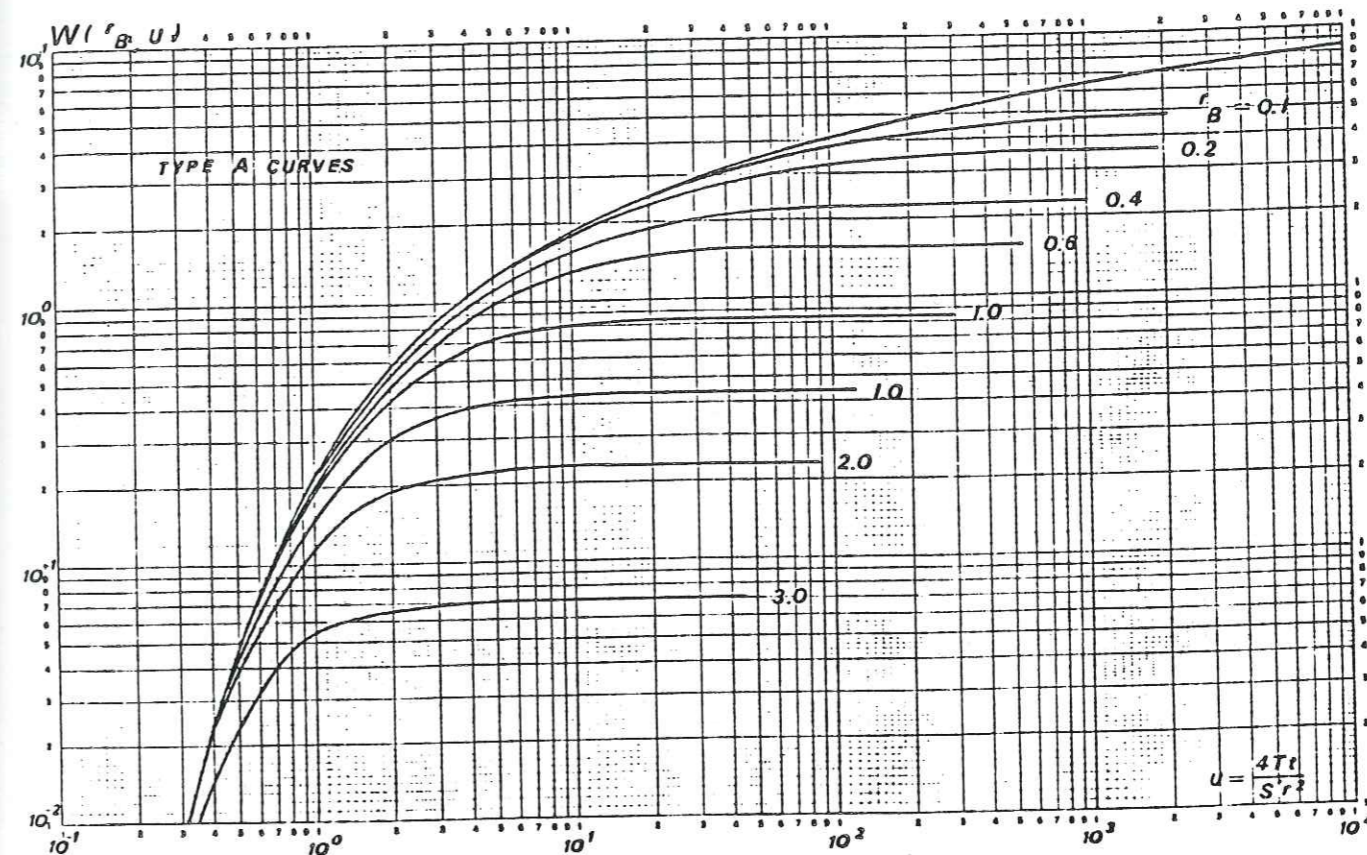
$K_0\left(\frac{x}{B}\right)$  étant la fonction de Hankel-fonction Bessel modifiée (v.méthode de Hantush-Jacob - paramètre de drainance).

Pour appliquer cette méthode nous avons établi les diagrammes  $\log \Delta - \log t$  pour les mesures dans les piézomètres (avec les courbes correspondantes des forages, pour qu'on puisse les comparer) (fig. 8-27 à 8-46). Ensuite nous avons cherché la coïncidence possible de ces courbes avec les courbes prototypes A et B. A partir de cette coïncidence nous avons trouvé les facteurs  $x/B$  (donc nous avons estimé les valeurs de  $B$ ),  $\Delta_0$ ,



$t_0$ ,  $W(x/B, u)$ ,  $1/u_A$ ,  $1/u$  et nous avons estimé les valeurs de  $T_A$ ,  $S_A$ ,  $T_V$ ,  $S_V$ . Il est évident que la coïncidence avec les courbes A et B concerne les nappes semi-captives ("conditions Boulton"). La coïncidence seulement avec les courbes A conduit à une nappe libre ("conditions Walton") et la coïncidence seulement avec la courbe B à une nappe captive ("conditions Theis"). Les résultats de l'application de cette méthode figurent au tableau suivant. D'après le tableau on a encore une série de valeurs de Transmissivités.

On peut observer pour plusieurs régions, que la classification obtenue de la courbe caractéristique diffère de celle, obtenue par application de la méthode de Boulton. Ceci est un résultat de la différenciation lithologique, donc hydrodynamique, entre le point du forage et celui du piézomètre, même si leur distance est très faible.





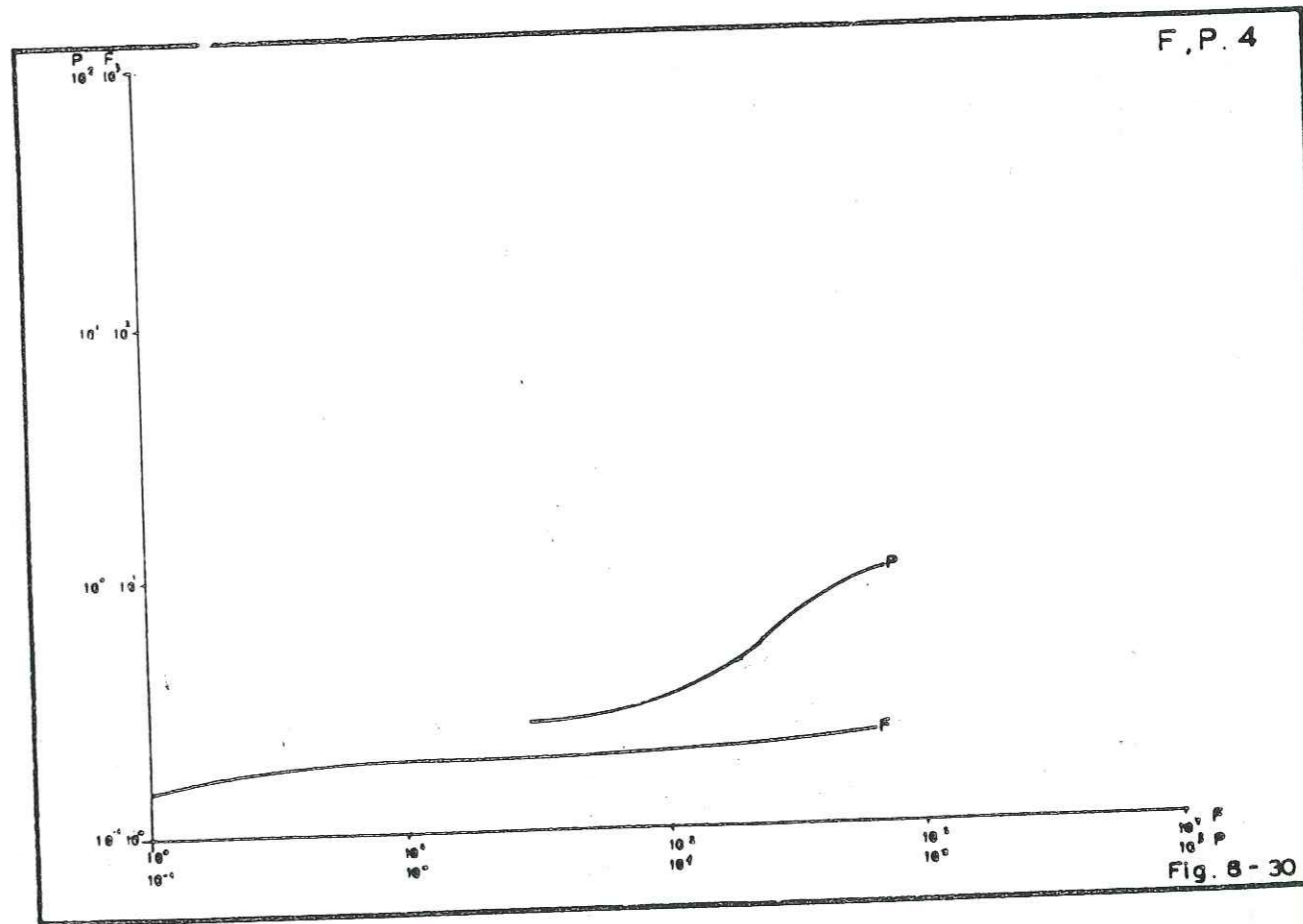
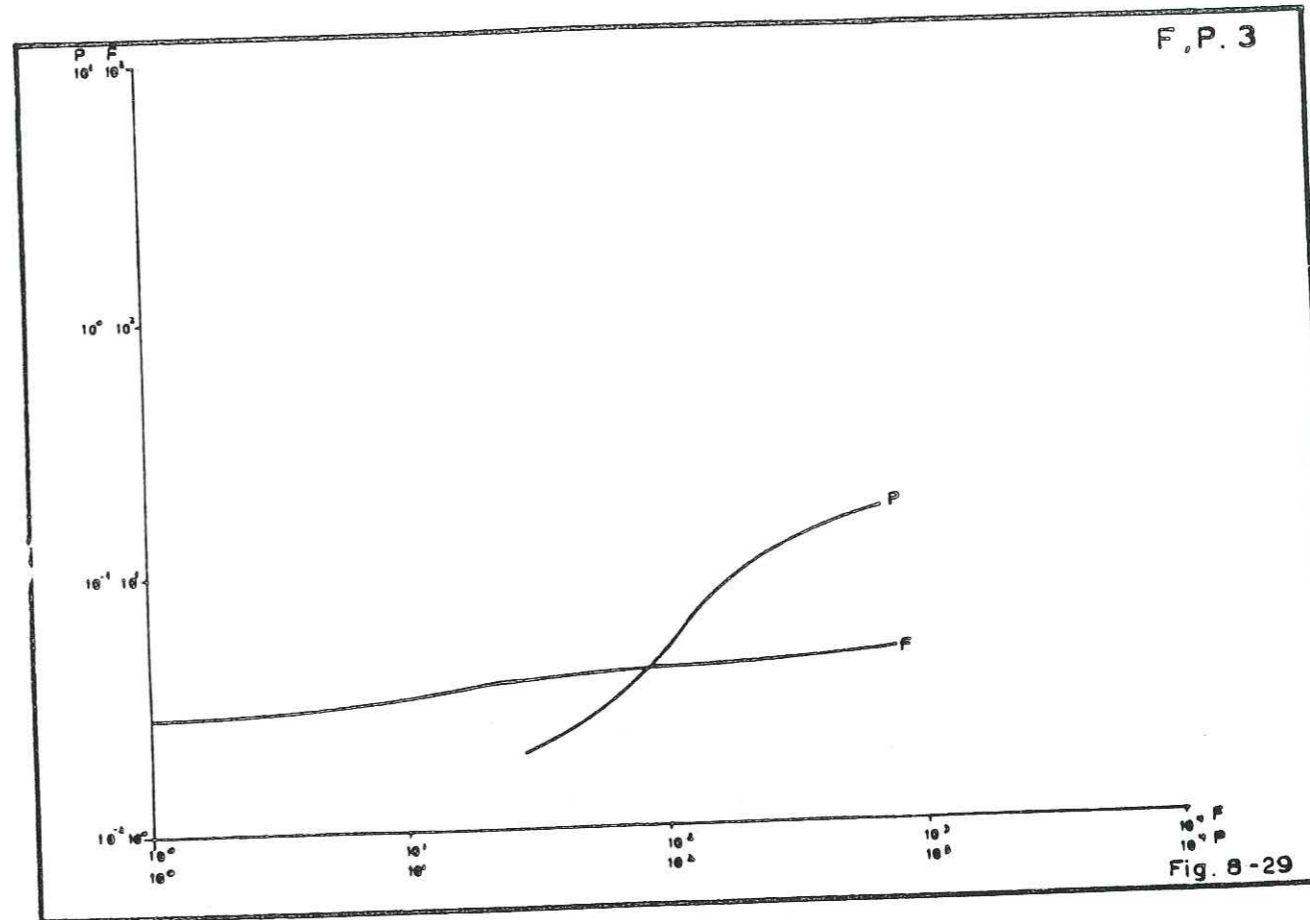
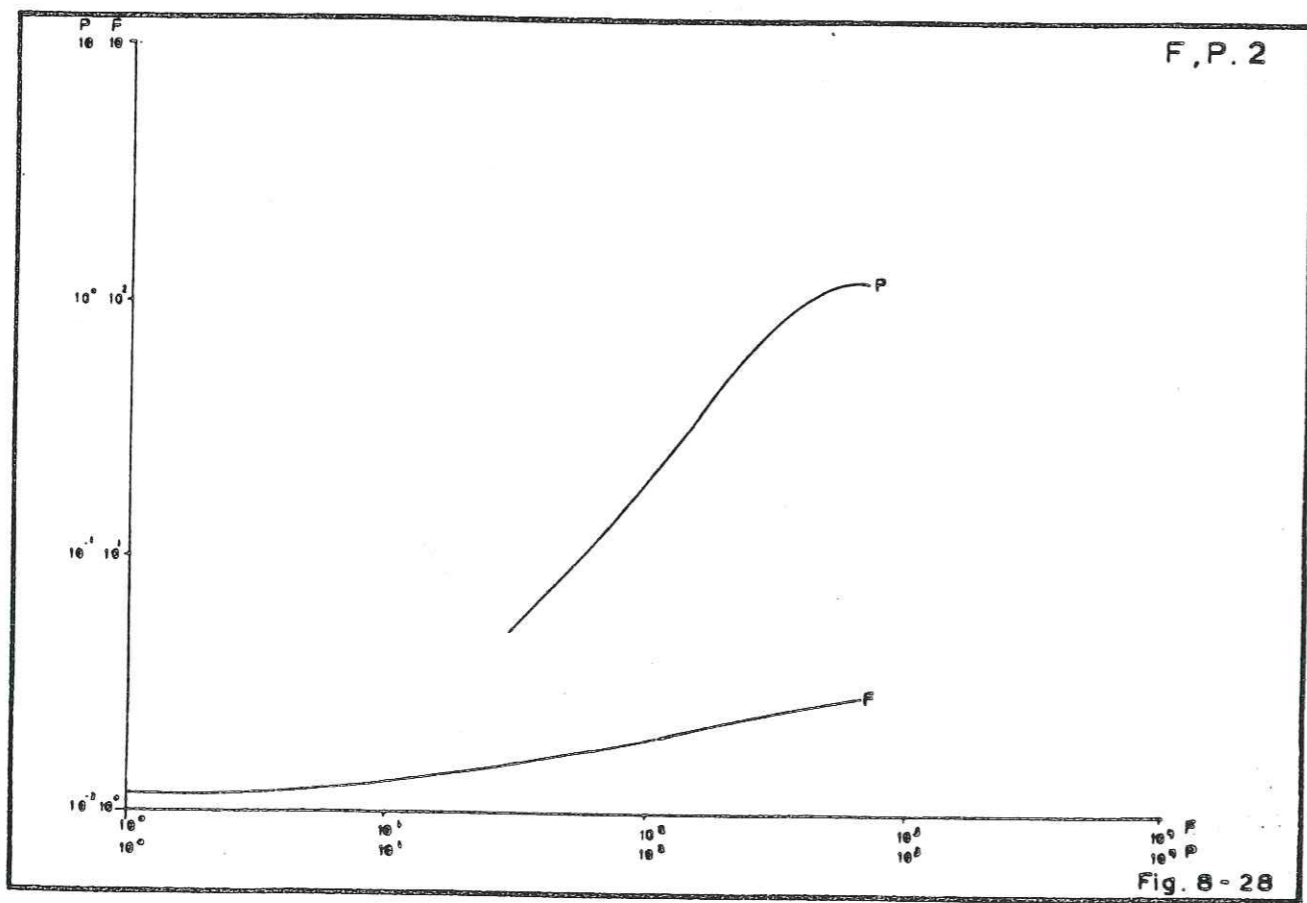
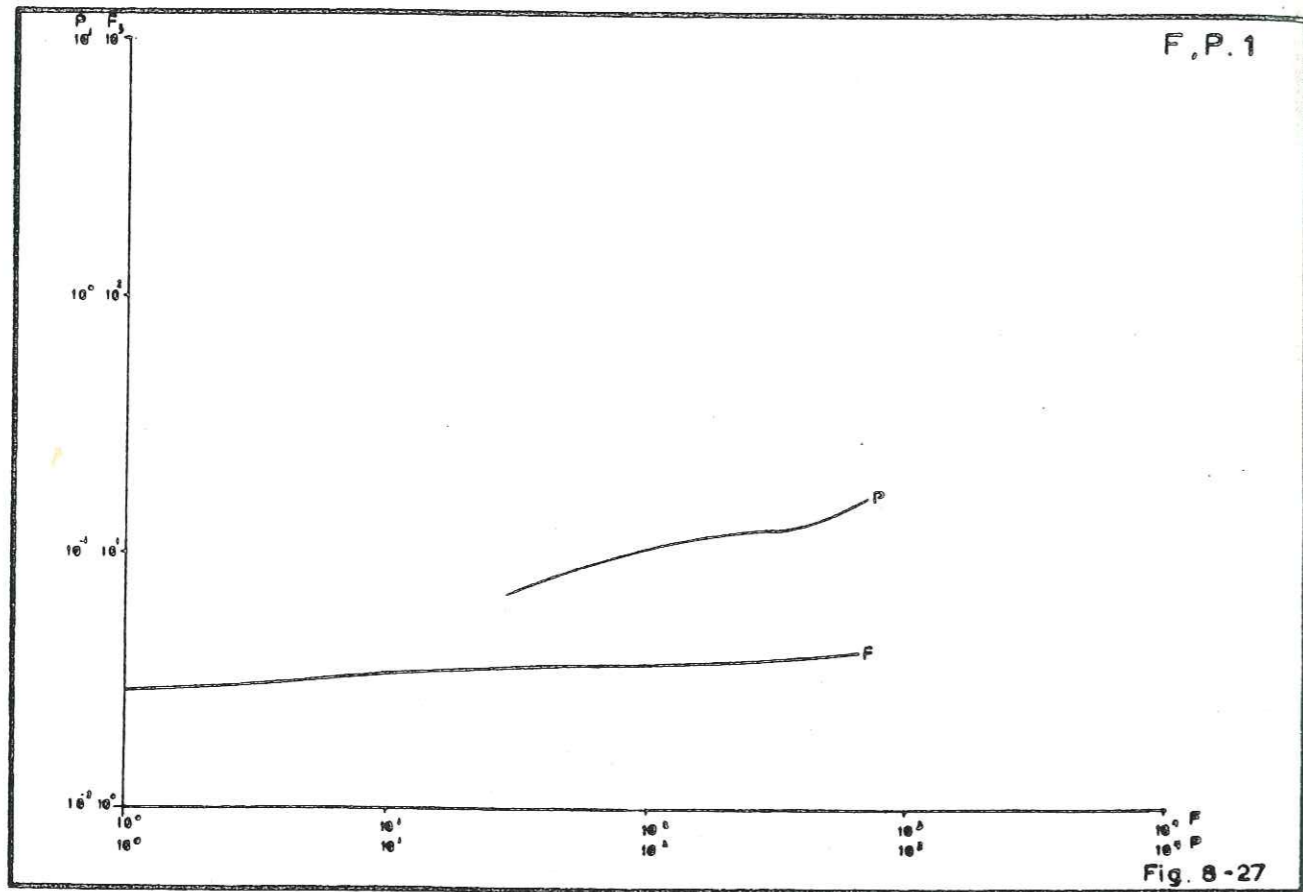
APPLICATION DE LA METHODE DE BOUTON SUR LES MESURES DES PIEZOMETRES

Pisatom	Courbe	x/B	1/u <sub>A</sub>	1/u <sub>V</sub>	W(u <sub>A</sub> )	W(u <sub>V</sub> )	Δ(m)	t(min)	T(m <sup>2</sup> /s)
1	A	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.48	25.0	8.20·10 <sup>-3</sup>
1	Z	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.48	25.0	8.20·10 <sup>-3</sup>
2	A	3.0	1.0	1.0	1.0	1.0	17.00	420.0	2.34·10 <sup>-3</sup>
2	Z	3.0	1.0	1.0	1.0	1.0	17.00	420.0	2.34·10 <sup>-3</sup>
3	A	1.8	1.0	1.0	1.0	1.0	0.52	95.0	7.66·10 <sup>-3</sup>
3	Z	1.8	1.0	1.0	1.0	1.0	0.52	95.0	7.66·10 <sup>-3</sup>
4	A	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	2.60	93.0	1.53·10 <sup>-3</sup>
4	Z	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	2.60	93.0	1.53·10 <sup>-3</sup>
5	A	3.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.18	120.0	1.48·10 <sup>-3</sup>
5	Z	3.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.18	120.0	1.48·10 <sup>-3</sup>
6	A	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.12	210.0	2.21·10 <sup>-3</sup>
6	Z	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.12	210.0	2.21·10 <sup>-3</sup>
7	A	3.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.95	9.3	5.85·10 <sup>-3</sup>
7	Z	3.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.95	9.3	5.85·10 <sup>-3</sup>
8	A	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.95	9.3	5.85·10 <sup>-3</sup>
8	Z	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.95	9.3	5.85·10 <sup>-3</sup>
9	A	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.92	55.0	1.92·10 <sup>-3</sup>
9	Z	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.92	55.0	1.92·10 <sup>-3</sup>
10	A	3.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.18	120.0	1.48·10 <sup>-3</sup>
10	Z	3.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.18	120.0	1.48·10 <sup>-3</sup>
11	A	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.12	210.0	2.21·10 <sup>-3</sup>
11	Z	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.12	210.0	2.21·10 <sup>-3</sup>
12	A	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.92	55.0	1.92·10 <sup>-3</sup>
12	Z	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.92	55.0	1.92·10 <sup>-3</sup>
13	A	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.92	55.0	1.92·10 <sup>-3</sup>
13	Z	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.92	55.0	1.92·10 <sup>-3</sup>
14	A	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.92	55.0	1.92·10 <sup>-3</sup>
14	Z	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.92	55.0	1.92·10 <sup>-3</sup>
15	A	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.92	55.0	1.92·10 <sup>-3</sup>
15	Z	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.92	55.0	1.92·10 <sup>-3</sup>
16	A	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.92	55.0	1.92·10 <sup>-3</sup>
16	Z	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.92	55.0	1.92·10 <sup>-3</sup>
17	A	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.92	55.0	1.92·10 <sup>-3</sup>
17	Z	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.92	55.0	1.92·10 <sup>-3</sup>
18	A	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.92	55.0	1.92·10 <sup>-3</sup>
18	Z	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.92	55.0	1.92·10 <sup>-3</sup>
19	A	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.92	55.0	1.92·10 <sup>-3</sup>
19	Z	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.92	55.0	1.92·10 <sup>-3</sup>
20	A	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.92	55.0	1.92·10 <sup>-3</sup>
20	Z	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.92	55.0	1.92·10 <sup>-3</sup>

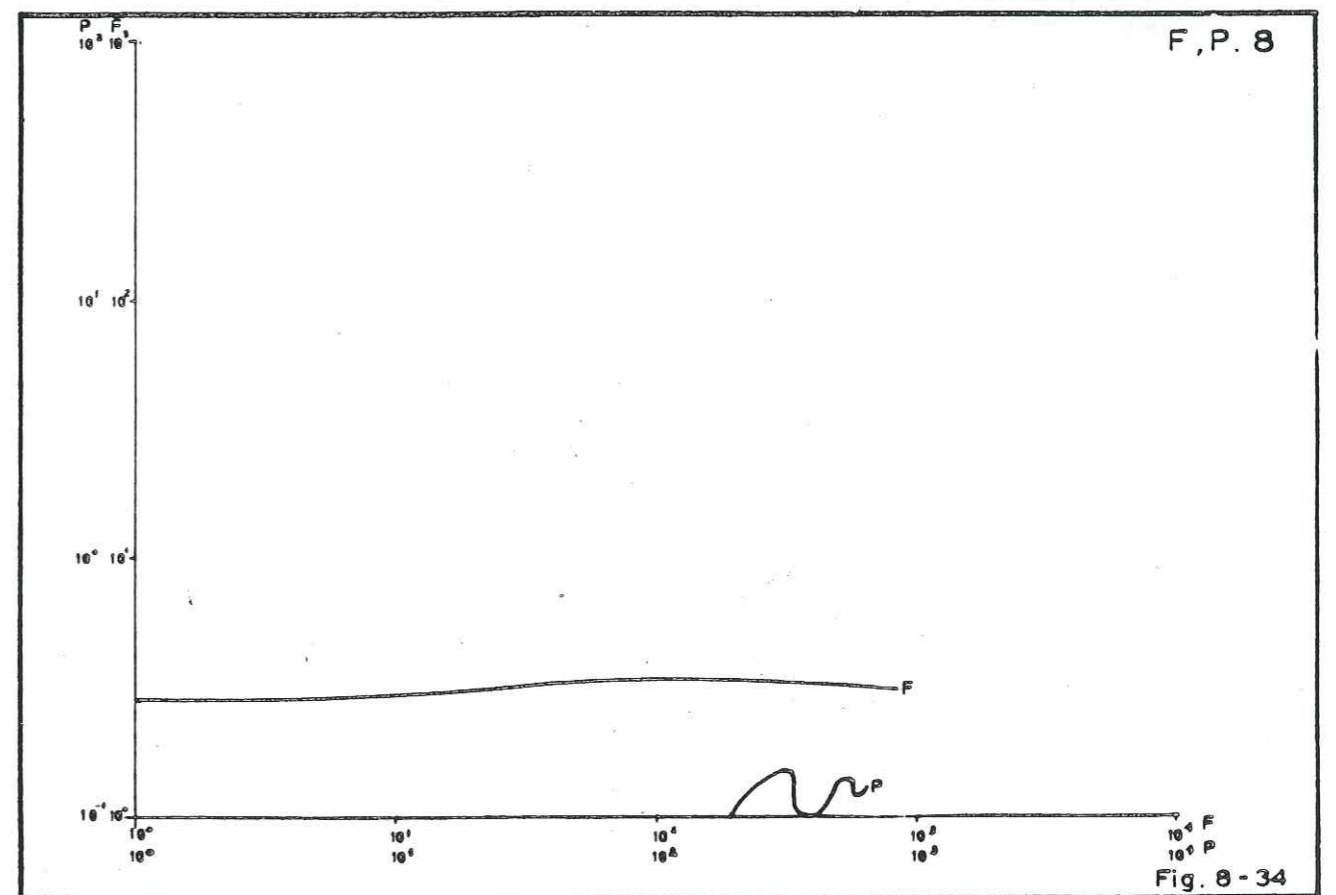
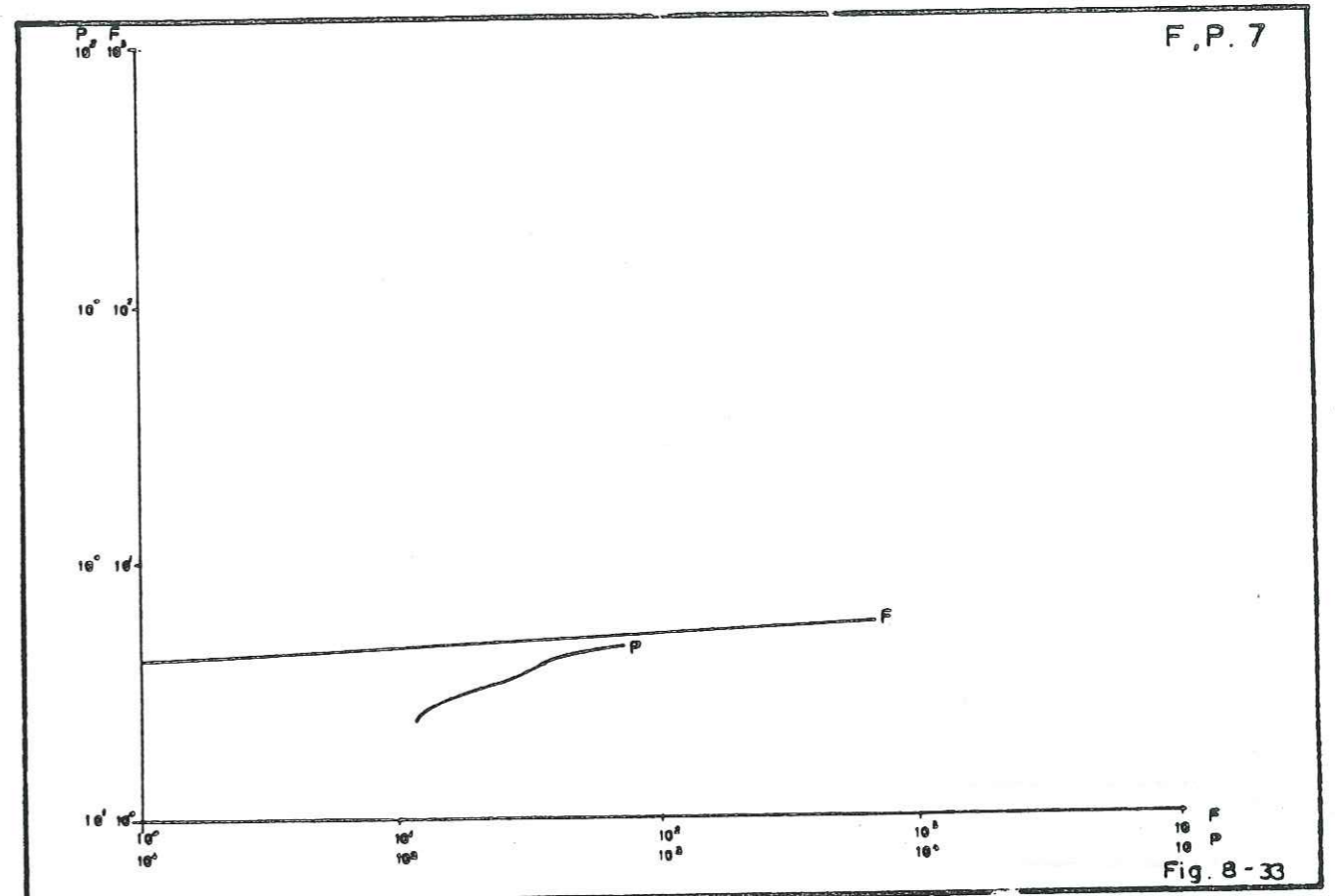
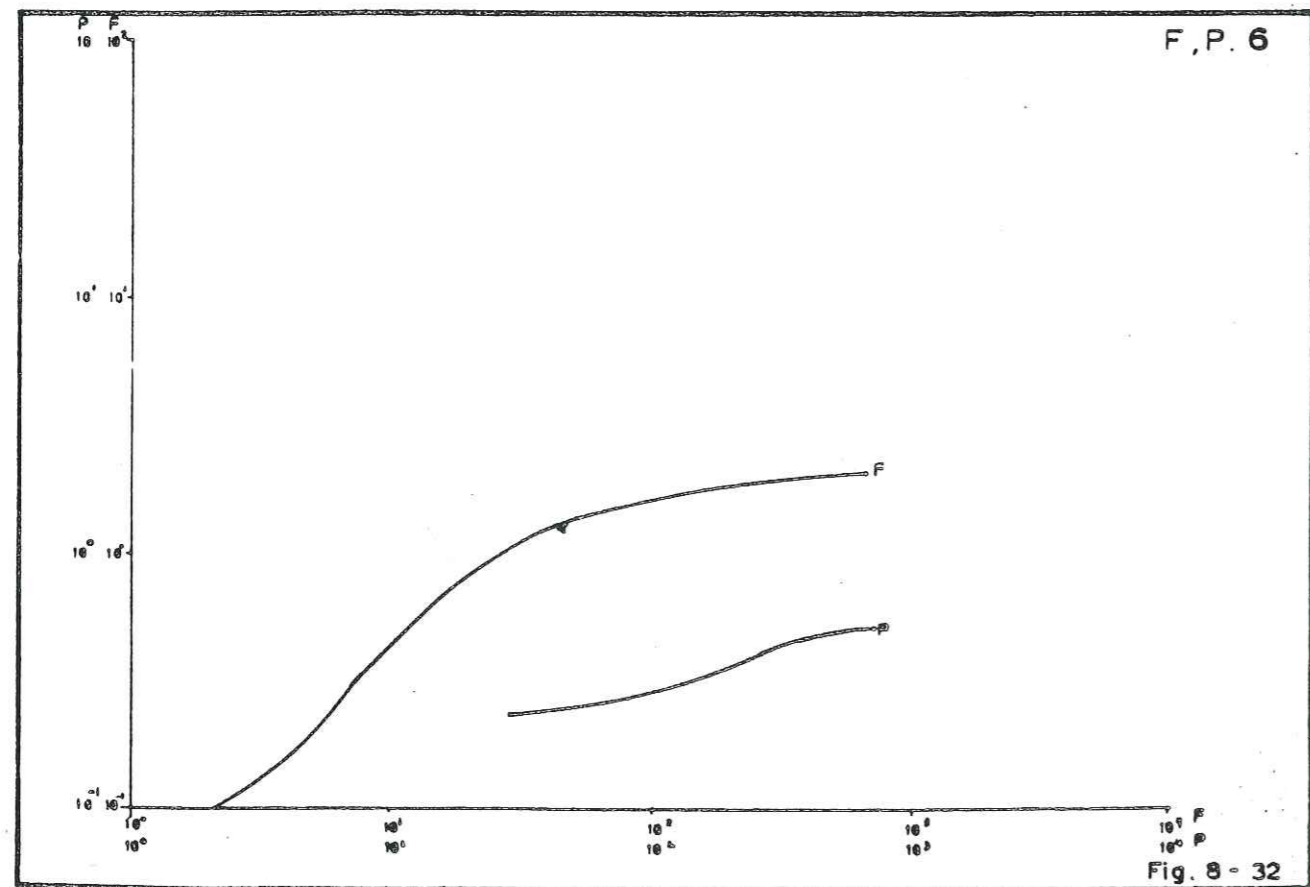
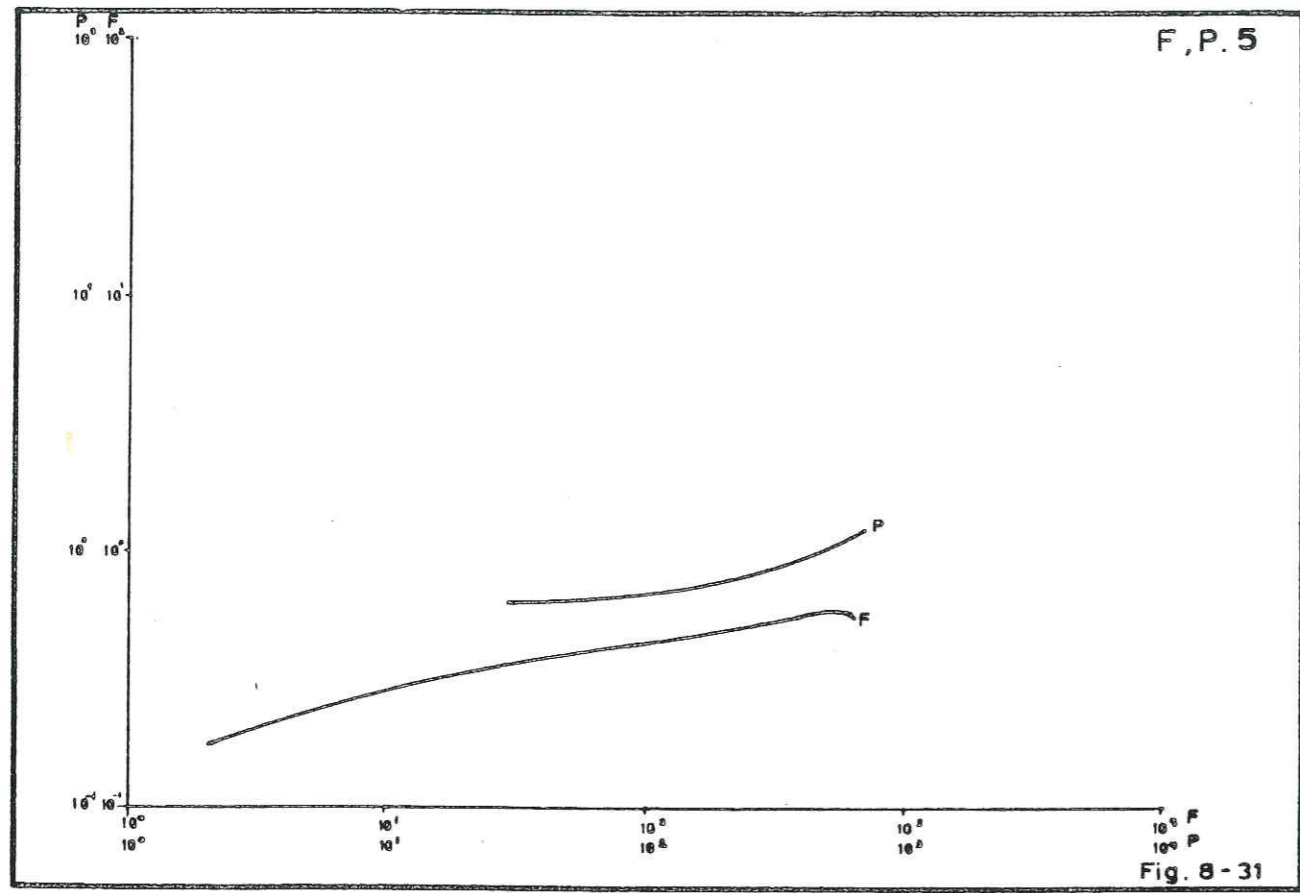
APPLICATION DE LA METHODE DE BOUTON  
SUR LES MESURES DES FORAGES (pour comparaison)

Forage	x/B	1/u <sub>A</sub>	1/u <sub>V</sub>	W(u <sub>A</sub> )	W(u <sub>V</sub> )	Δ(m)	t(min)	T(m <sup>2</sup> /s)
1	A	1.5	10.0	1.0	1.0	7.2	3.4	5.53·10 <sup>-4</sup>
1	Z	1.5	10.0	0.1	1.0	8.0	135.0	4.98·10 <sup>-4</sup>
2	A	0.4	100.0	10.0	10.0	5.4	3.2	7.37·10 <sup>-3</sup>
2	Z	0.4	100.0	1.0	10.0	6.6	6.0	6.03·10 <sup>-3</sup>
3	A	1.0			1.0	3.6	2.0	1.11·10 <sup>-3</sup>
3	Z	1.0		0.1				
4	A							
4	Z							
5	A	0.2	10.0	10.0	10.0	1.1	2.6	3.62·10 <sup>-2</sup>
5	Z	0.2	10.0	10.0	10.0	1.05	13.0	3.79·10 <sup>-2</sup>
6	A							
6	Z							
7	A							
7	Z							
8	A							
8	Z							
9	A	1.5	10.0	1.0	1.0	5.6	2.5	7.11·10 <sup>-4</sup>
9	Z	1.5	10.0	0.1	1.0	6.2		6.42·10 <sup>-4</sup>
10	A							
10	Z							
11	A							
11	Z							
12	A							
12	Z							
13	A	1.5	10.0	1.0	1.0	50.0	1.8	3.54·10 <sup>-5</sup>
13	Z	1.5	10.0	0.1	1.0	52.0	83.0	3.40·10 <sup>-5</sup>
14	A							
14	Z							
15	A							
15	Z							
16	A							
16	Z							
17	A							
17	Z							
18	A							
18	Z							
19	A							
19	Z							
20	A	0.4	100.0	10.0	1.0	26.0	2.1	5.10·10 <sup>-4</sup>
20	Z	0.4	100.0	2.8	1.0	18.0	2.8	7.36·10 <sup>-5</sup>

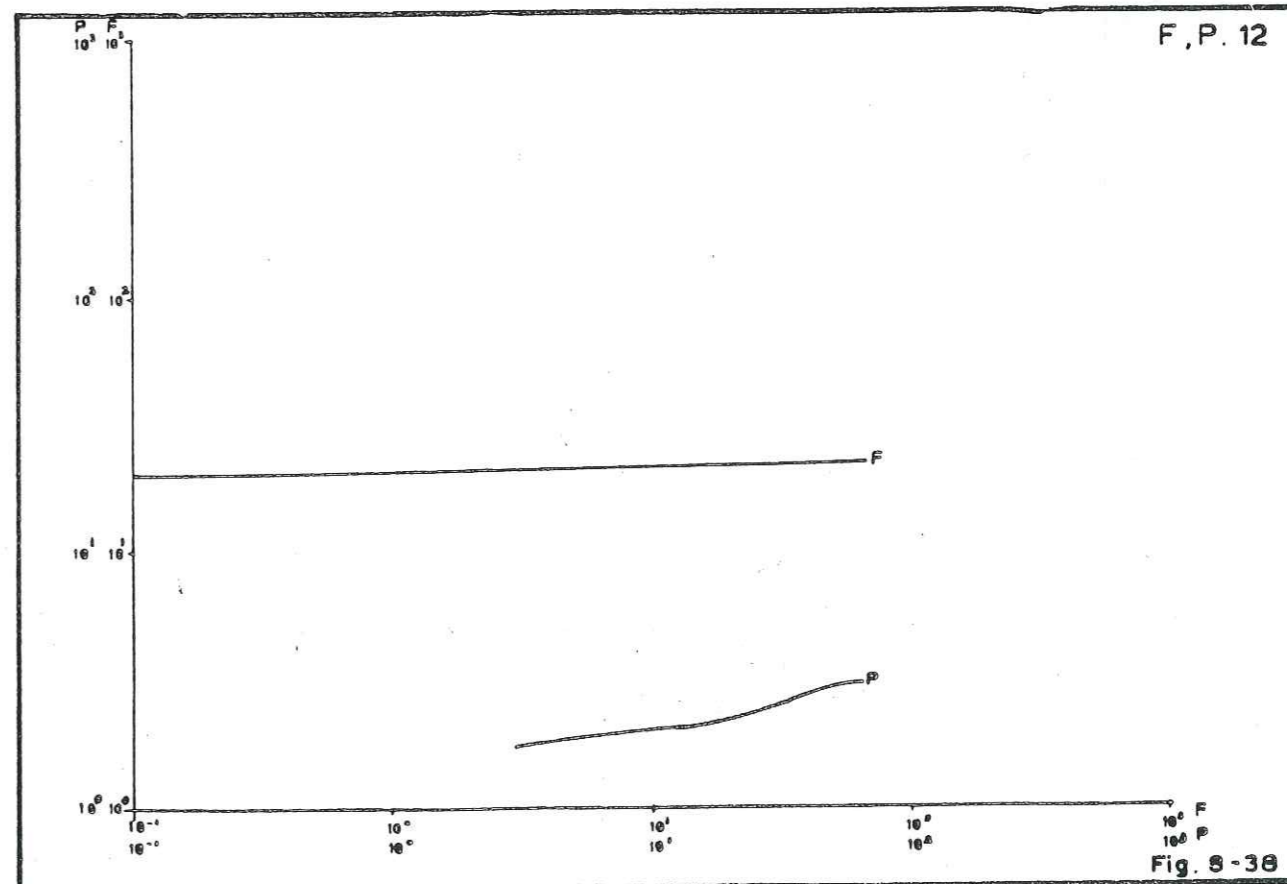
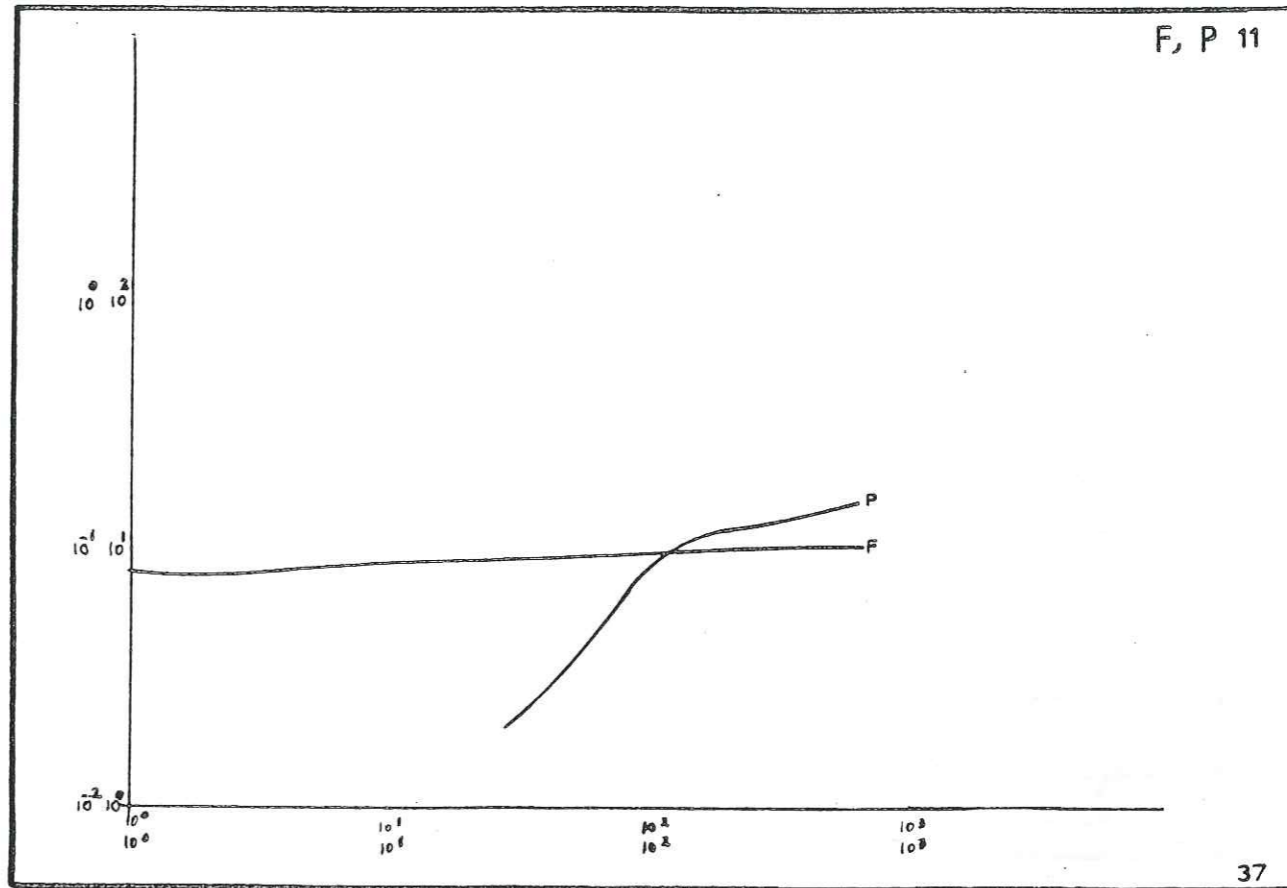
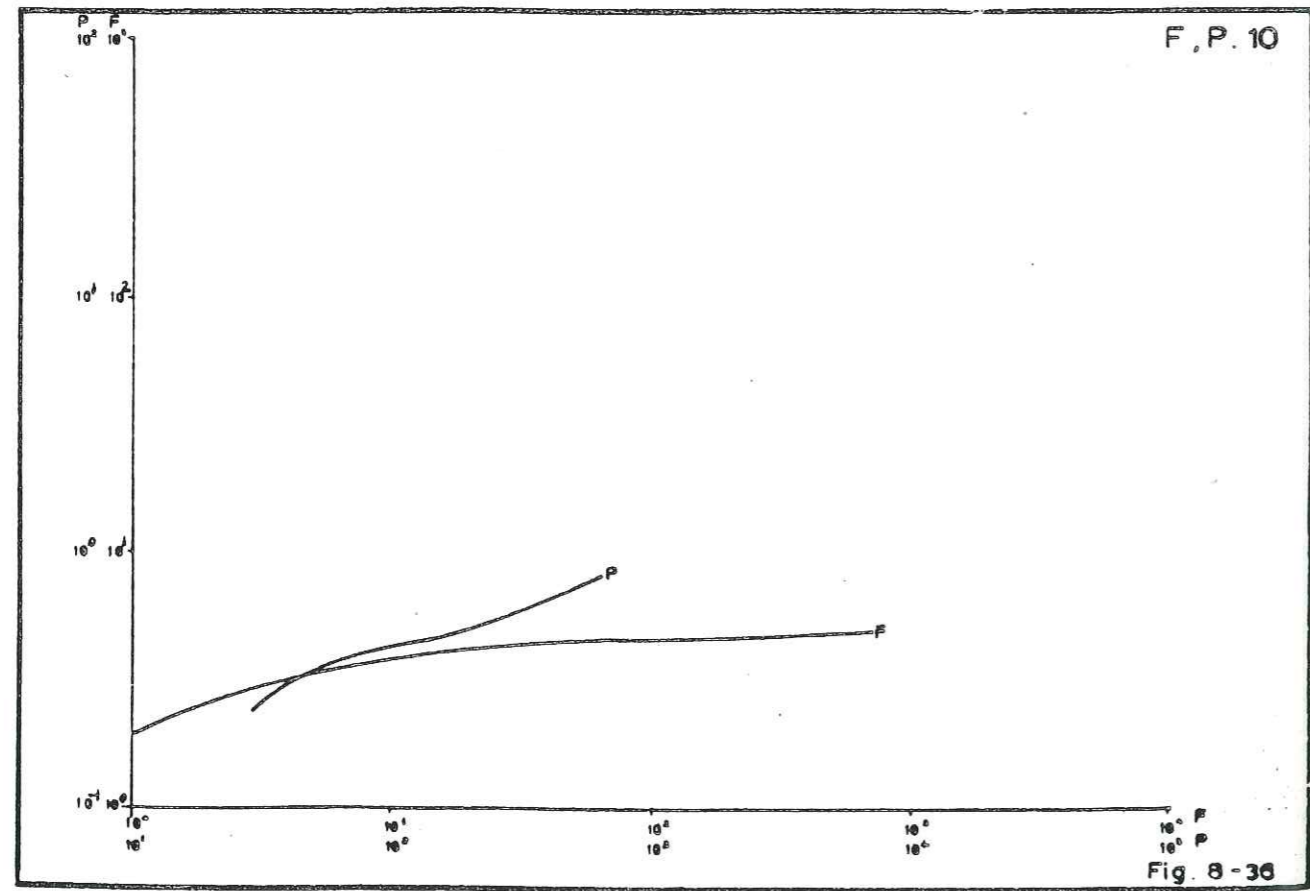
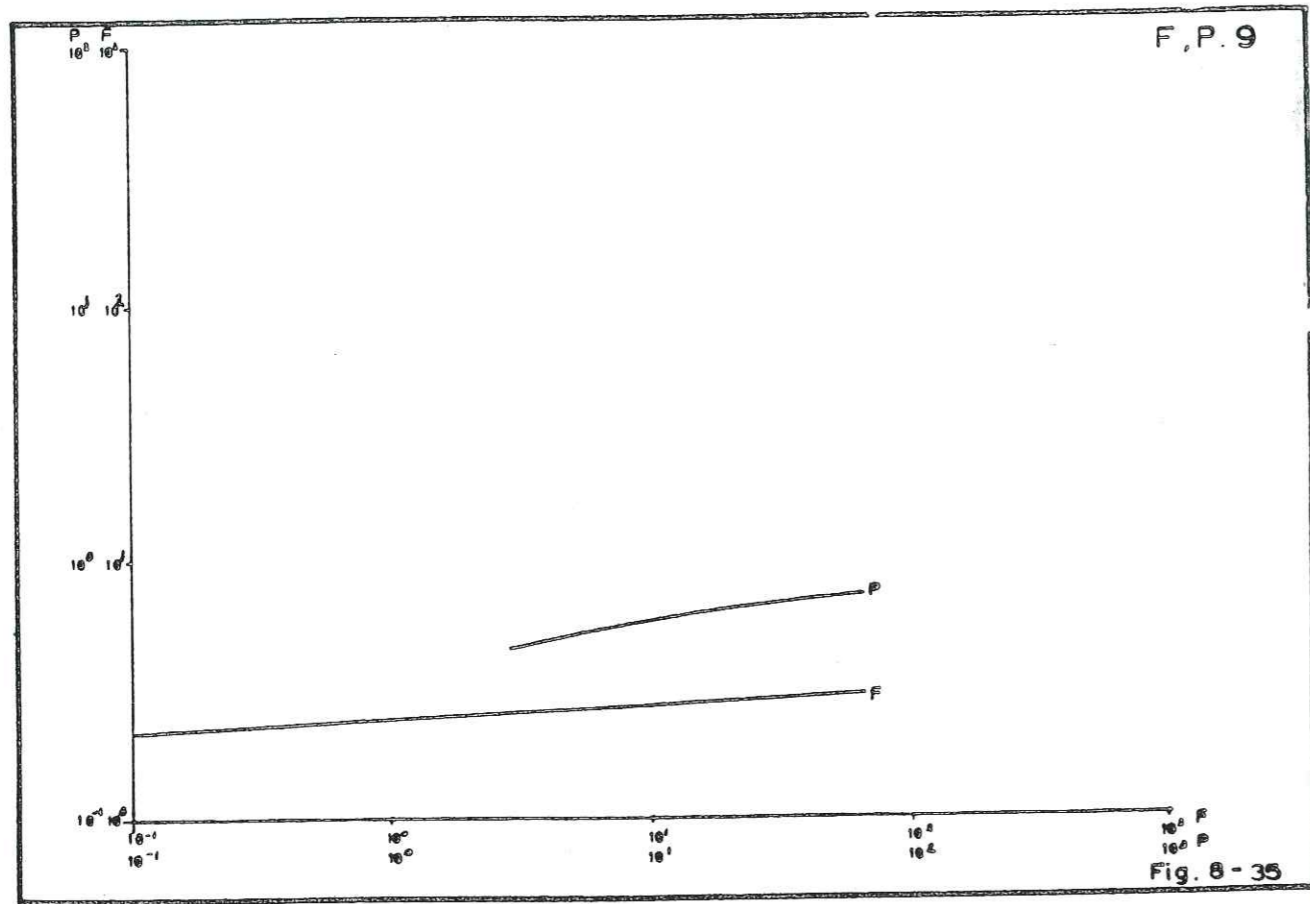




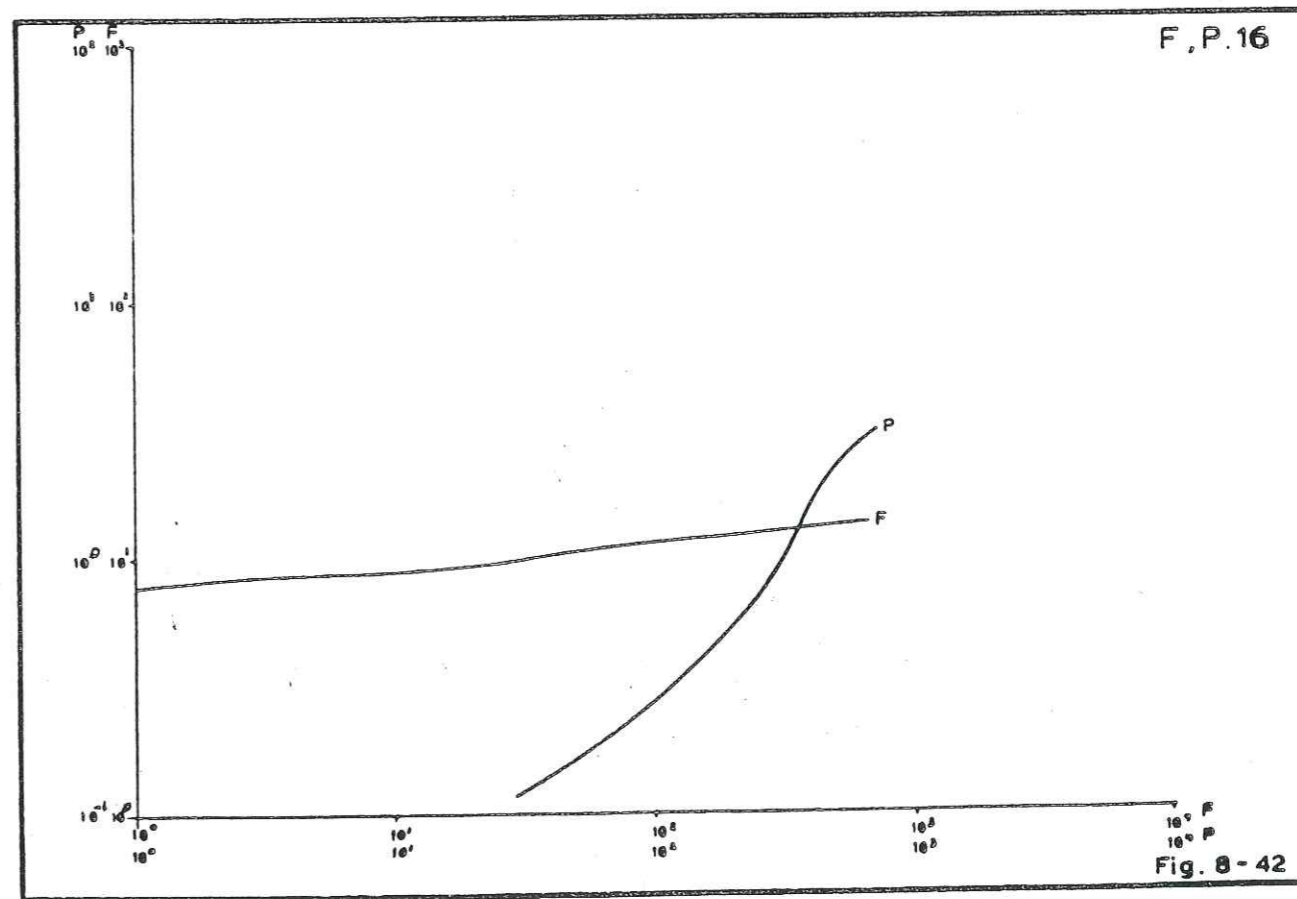
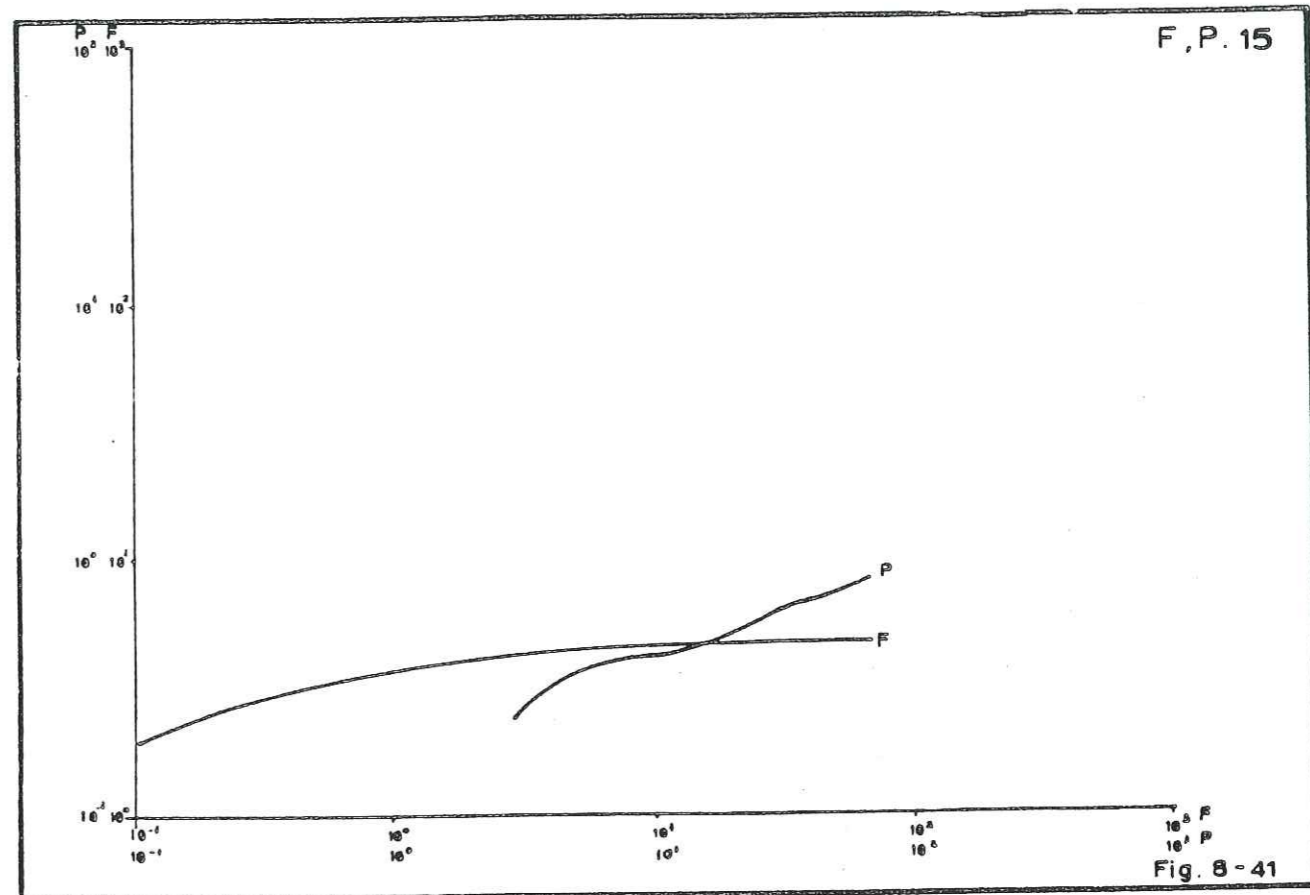
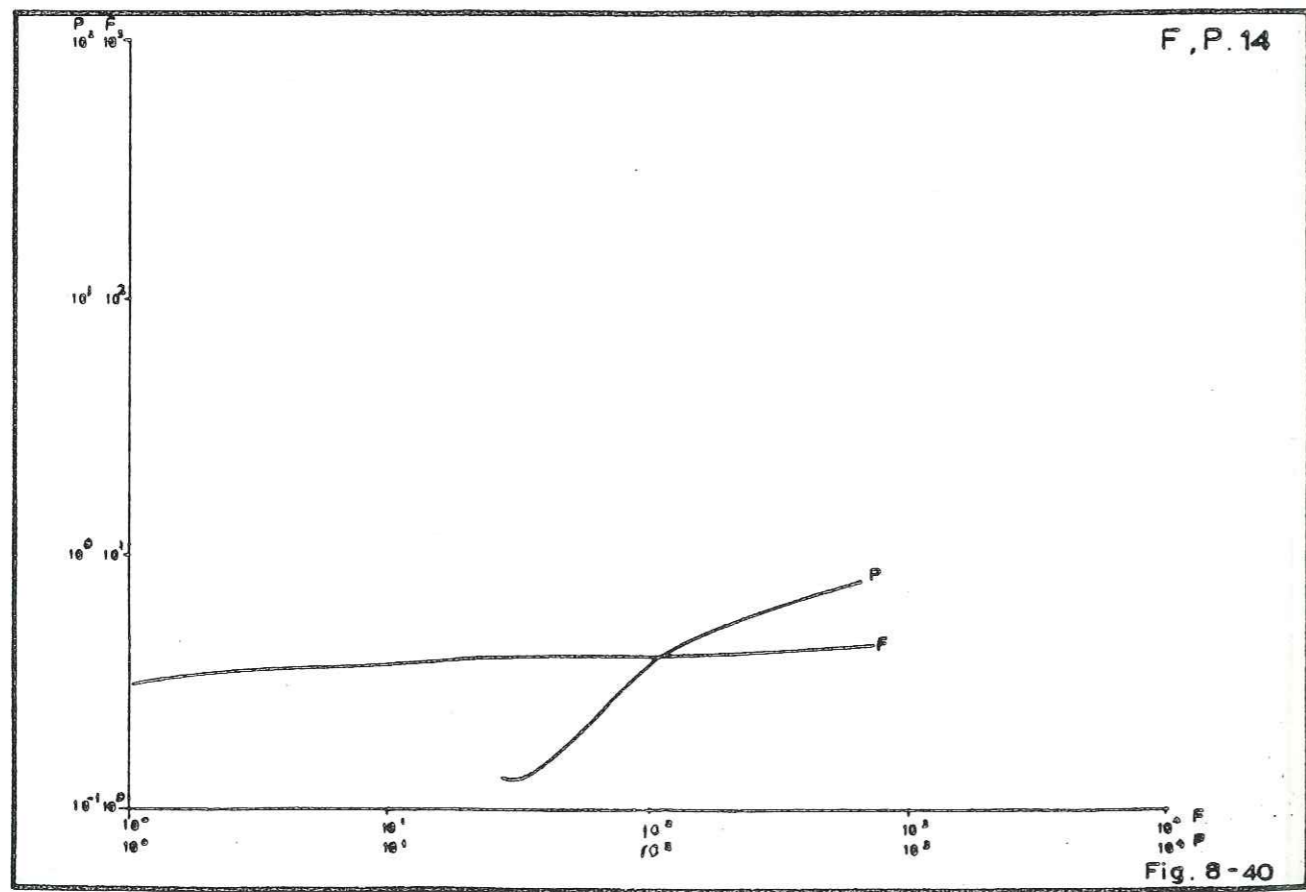
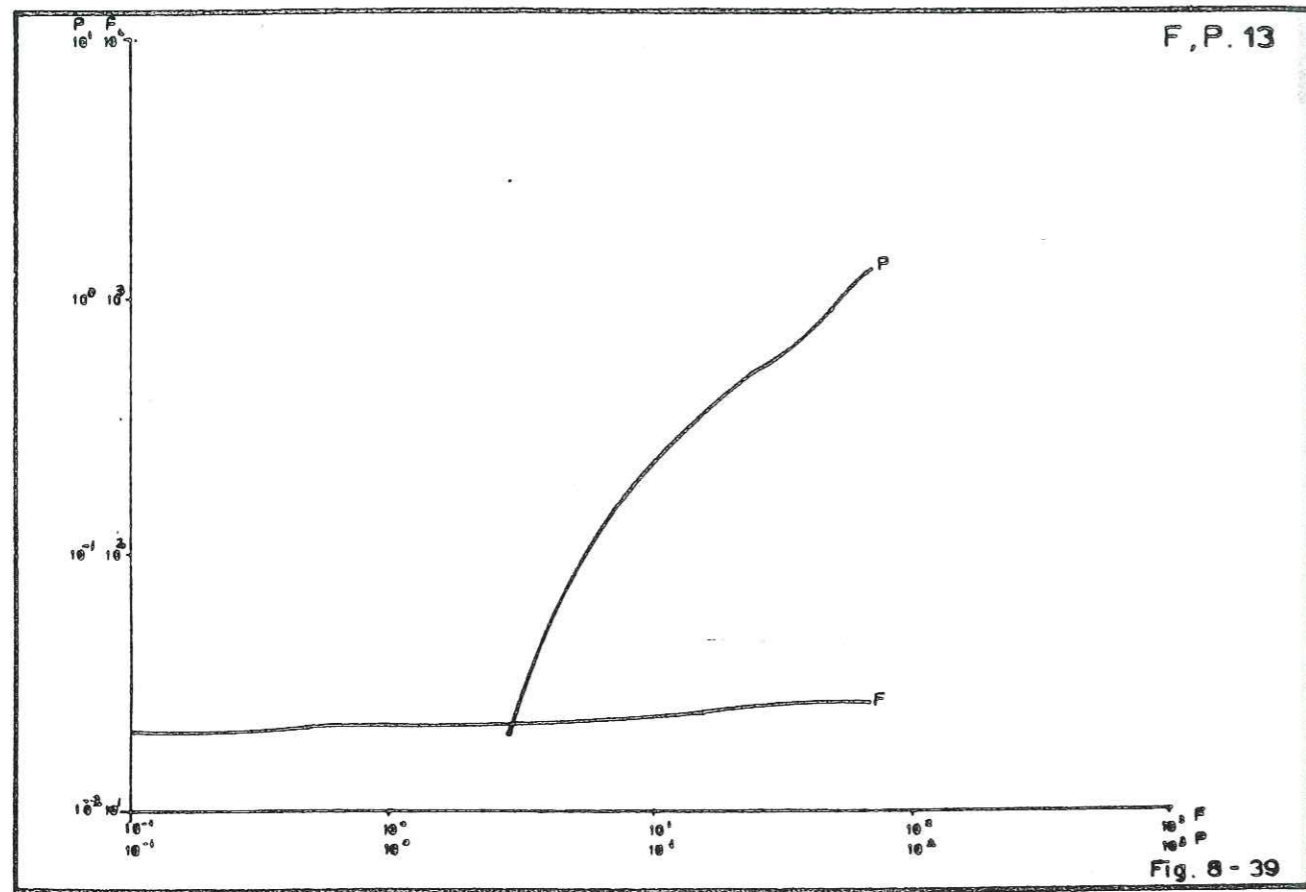




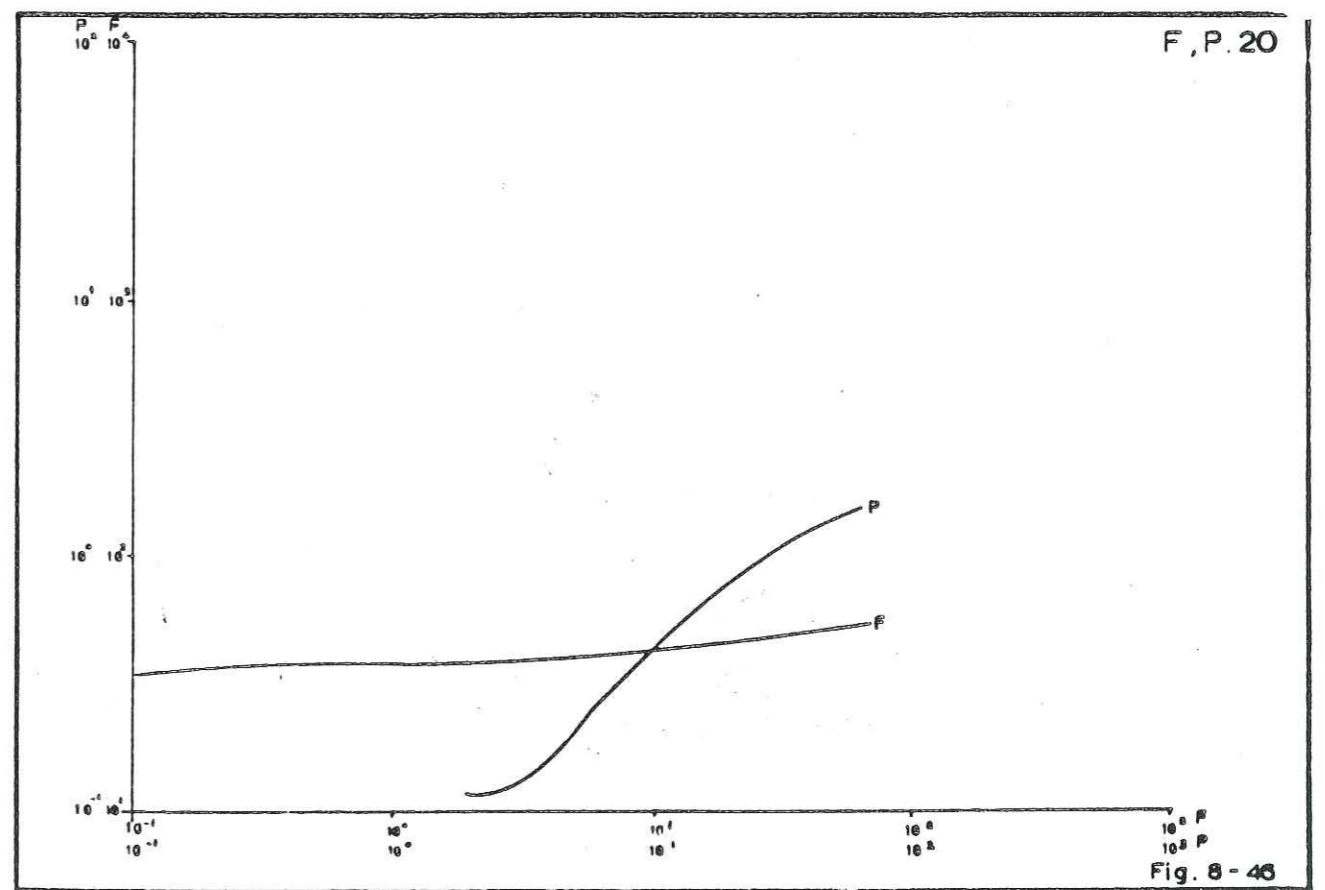
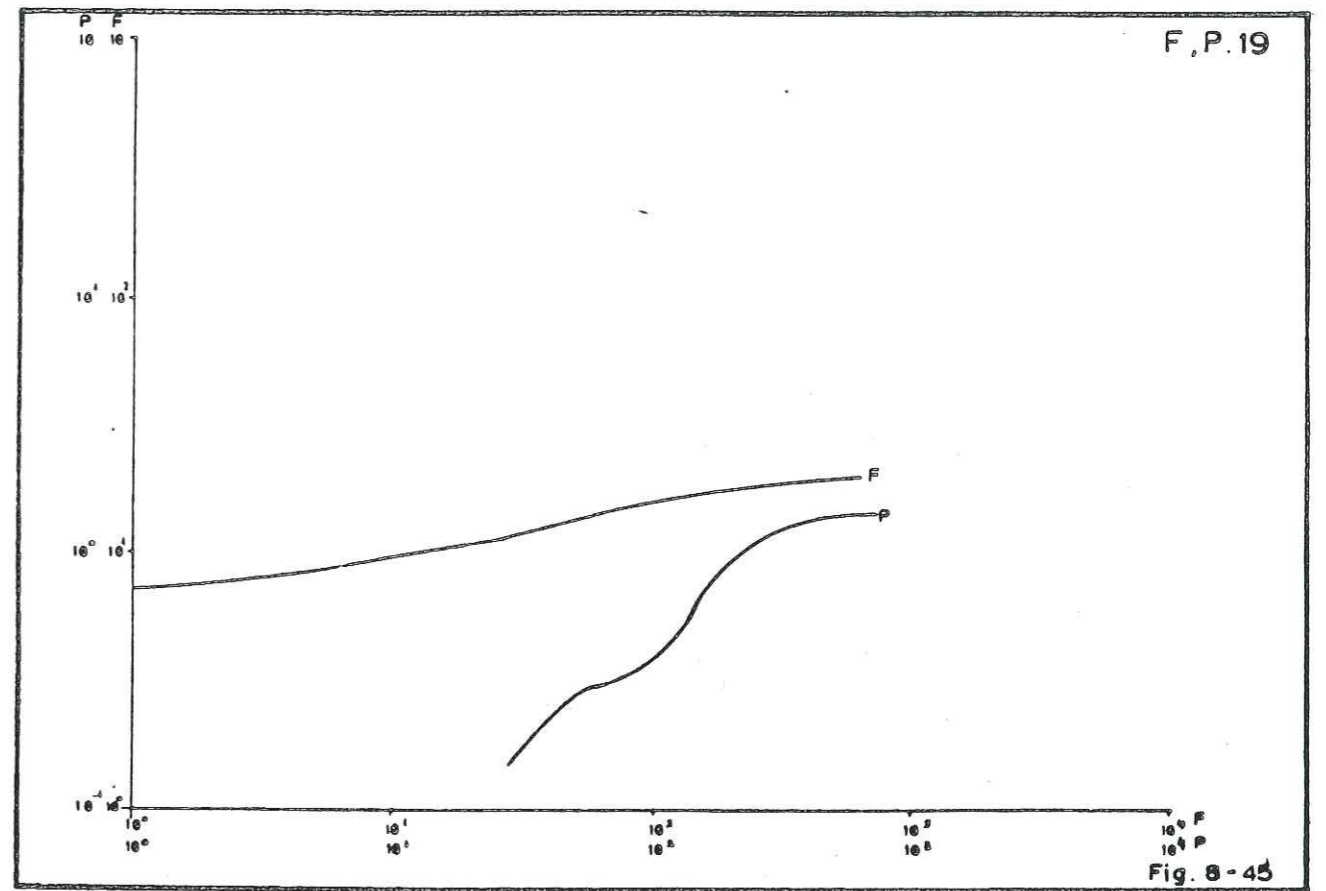
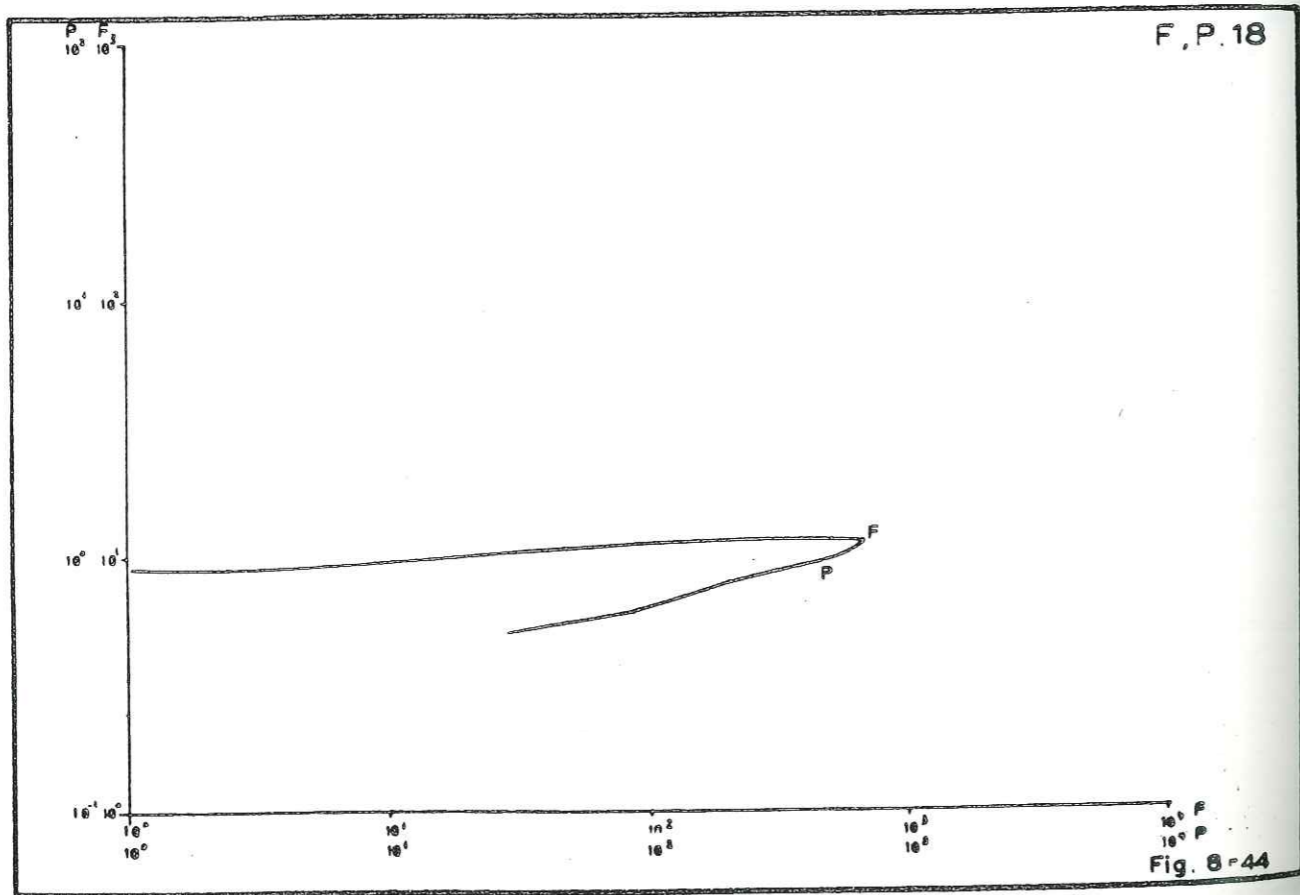
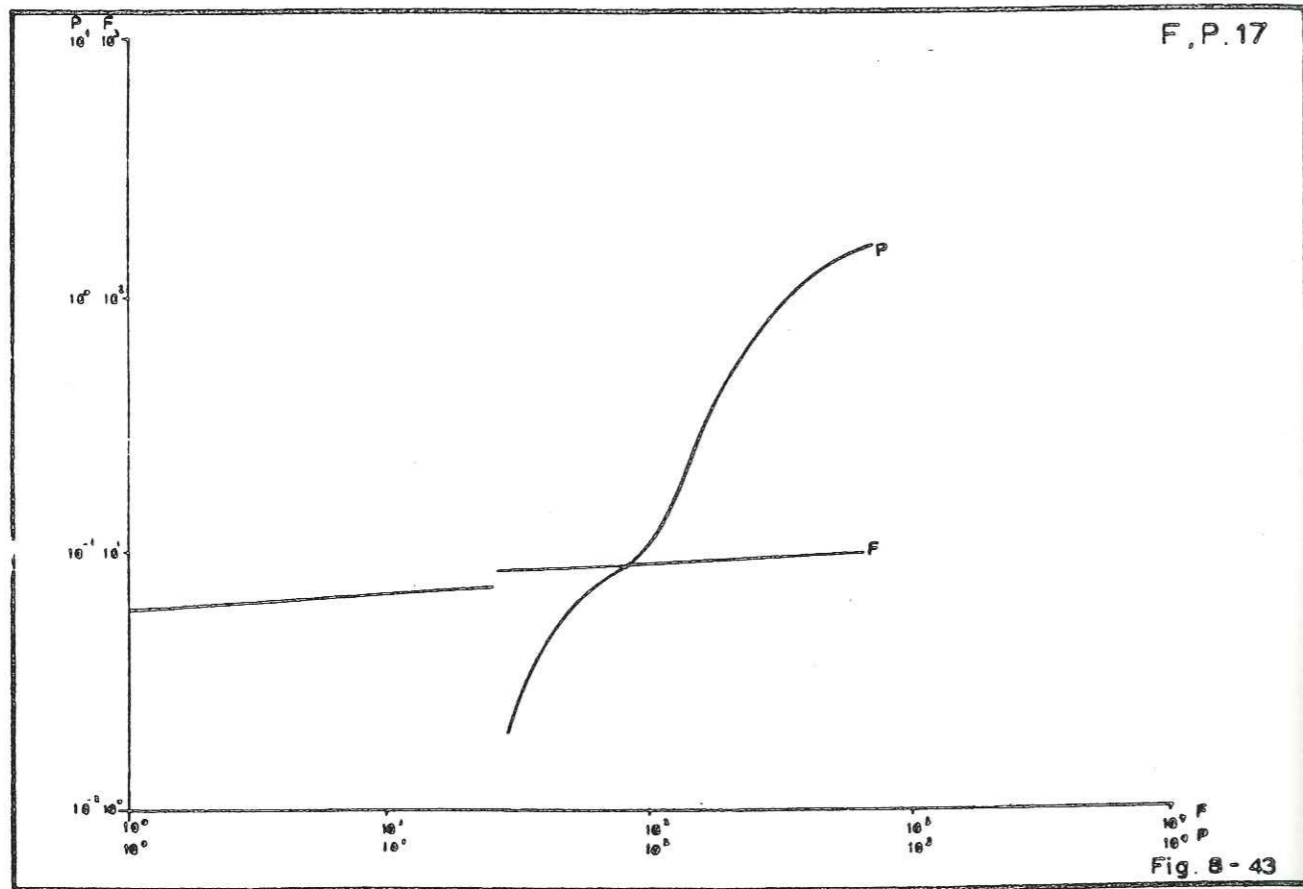














### 8.6. QUELQUES NOTES SUR L'APPLICATION DES METHODES DES ESSAIS DE POMPAGE

Si on compare les valeurs de la Transmissivité, obtenues par les méthodes qui ne tiennent pas compte de la drainance, on peut faire les remarques suivants:

- Les valeurs obtenues par la méthode de Hantush-Jacob sont les plus faibles pour la plupart des forages (17/19-89.5%) et en ce qui concerne les forages qui correspondent aux systèmes semi-captives typiques, elles sont toujours les plus faibles (12/12-100%). On parle ici des valeurs obtenues par les deux variantes de la méthode.
- Les valeurs obtenues d'après le rabattement dans les piézomètres et la remontée dans les forages (méthode COOPER-JACOB) sont presque toujours les valeurs les plus élevées (16/19-84.2%). Si on remplace, pour le forage F<sub>8</sub>, la valeur moyenne par celle prédominante, le pourcentage s'élève (17/19-89.5%).
- Les valeurs obtenues d'après le rabattement dans les forages (méthode COOPER-JACOB) sont, en général, à mi-distance des précédentes.

On peut considérer les valeurs élevées, comme des valeurs non réelles, selon l'état lithologique, qui ne permet pas de valeurs de l'ordre de grandeur  $10^{-1} \text{m}^2/\text{s}$  (F<sub>1</sub>, F<sub>3</sub>, F<sub>4</sub>, F<sub>9</sub> etc.). Ensuite, et ceci est le plus important, la plupart des valeurs élevées ne correspond pas au critère  $u = \frac{x^2 S}{4Tt}$ , dont la valeur doit être plus faible que 0.01 pour que la méthode COOPER-JACOB soit applicable. Pour que la valeur de  $u$  soit plus faible que 0.01, le temps doit être long et (ou) la distance  $x$  petite. Le temps de pompage (720 min) peut être supposé suffisant pour les conditions considérées et plus encore si on tient compte que les dernières mesures de rabattement correspondent au régime permanent obtenu, soit dans les forages, soit dans les piézomètres. La distance

( $x$ ) qui intervient directement (S) ou indirectement (T), est aussi acceptée pour des nappes captives ou semi-captives, dans l'ordre de grandeur utilisée. Mais ici on doit tenir compte de la structure sédimentaire irrégulière du delta. Si on compare les colonnes lithologiques des forages et des piézomètres satellites, on trouve des différences importantes ou très importantes. Ce changement rapide s'explique par la grande hétérogénéité et la dispersion des sédiments dans la région du delta.

Dans notre cas, la lithologie exprimée par les forages ne correspond, presque jamais, à celle exprimée par les piézomètres, sauf dans les cas des forages F<sub>10</sub> et F<sub>12</sub> (distances forage-piézomètre: 36.2m et 31.4m), où les différences ne sont pas énormes. Au contraire, par exemple, le forage F<sub>9</sub> présente une lithologie tout à fait différente de celle exprimée par le piézomètre, qui se trouve à une distance de 20m.

Le résultat de tout cela est que, les réactions des nappes au niveau du forage, pendant le pompage ou après, n'arrivent pas au niveau du piézomètre, ou elles arrivent émoussées, unifiées et, de toute façon différentes des réactions originelles, à cause de la variabilité de l'épaisseur et de la charge des formations, entre le forage et le piézomètre. Donc, il aurait fallu que les piézomètres soient installés beaucoup plus près des forages.

On peut encore ajouter une autre remarque aussi importante. Les piézomètres sont beaucoup plus profonds que les forages, donc ils ont pénétré des nappes aquifères plus profondes, avec une charge plus élevée que celle des forages et le niveau piézométrique n'est plus représentatif pour une profondeur moyenne de 150m, même si les piézomètres sont crépinés jusqu'à la même profondeur que les forages correspondants.

Pour les valeurs obtenues par les mesure de la remontée dans les forages, c'est surtout le débit retardé des formations semi-perméables (supérieures ou intermédiaires), qui provoque un amortissement au



rythme total de la remontée. Ceci est facilement visible dans les courbes de la remontée ( $F_1, F_4, F_8, F_{19}$ ), du rabattement dans les forages ( $F_7, F_{14}$ ) et du rabattement dans les piézomètres ( $F_1, F_{14}$ ). Pour les autres forages, une coïncidence probable du temps du débit retardé et du temps de progression ou de diminution du rayon d'action dans un milieu différent, n'a pas permis la formation d'une courbe typique de débit retardé.

Après tout ceci, il est facile de voir pourquoi les résultats obtenus par les mesures dans les forages, selon la méthode de COOPER-JACOB, sont plus proches de la réalité.

Il faut encore ajouter que le rabattement corrigé ( $\Delta' = \Delta - \frac{\Delta^2}{2H}$  pour les forages  $F_{13}$  et  $F_{16}$ , n'a pas changé les résultats, donc la méthode est encore valable, même s'il s'agit des courbes caractéristiques des nappes semi-libres et de rabattement important.

Dans la méthode de HANTUSH-JACOB, même si on utilise les piézomètres avec leurs défauts, il y a une différence importante. Cette méthode ne tient pas compte des réactions des nappes continues pendant le pompage, mais du rabattement total obtenu, en régime permanent. Donc l'amortissement et la différenciation des réactions, n'interviennent pas beaucoup ici.

Pour un autre contrôle des valeurs de la transmissivité, nous avons essayé d'appliquer la méthode proposée par BERKALOFF, concernant les courbes brisées avec des parties horizontales. Nous avons appliqué cette méthode pour quelques forages et surtout sur la courbe du piézomètre du forage  $F_1$ , qui présente une forme tellement typique, nécessitée par la méthode de BERKALOFF. Les valeurs obtenues étaient aussi non réelles ( $2.07 \cdot 10^{-1} \text{m}^2/\text{s}$ ,  $1.20 \cdot 10^{-1} \text{m}^2/\text{s}$ ) et, seulement après 8 heures de pompage, les valeurs obtenues étaient plus proches de la réalité ( $6.14 \cdot 10^{-3} \text{m}^2/\text{s}$ ,  $5.80 \cdot 10^{-3} \text{m}^2/\text{s}$ ), mais quand même, encore exagérées.

La méthode de BOULTON est proposée pour une nappe semi-captive typique, c'est-à-dire pour une formation aquifère crépinée, qui se trou-

ve au dessous d'une couche semi-perméable drainante. Pour la plupart des forages, la courbe expérimentale ne présente pas une coïncidence typique avec les courbes prototypes, ou coïncide seulement en ce qui concerne la partie A ou la partie B. Ceci arrive pour deux raisons, qui provoquent une déviation avec le comportement typique d'une nappe semi-captive.

- (a) Dans chaque forage il y a plusieurs formations aquifères avec leurs couches semi-perméables au dessus. Il est évident que les couches drainantes ne présentent pas simultanément le phénomène de drainance, à cause de leurs caractéristiques lithologiques et hydrodynamiques différentes et à cause de leur situation à diverses profondeurs, surtout par rapport à la profondeur d'installation de la pompe. Donc, la courbe expérimentale n'est que la résultante de l'expression multiple du phénomène de la drainance.
- (b) Plusieurs couches semi-perméables sont crépinées. Par conséquent un volume d'eau, mobilisée dans ces couches, est dirigé directement dans le tubage, sans l'intervention de la formation aquifère principale. Ceci modifie la valeur du facteur d'égouttement, ainsi que la valeur de  $x/B$ . Or, la forme de la courbe expérimentale ne présente pas le palier de la drainance typique et elle se dirige vers la forme d'une courbe, qui correspond à une nappe captive ou libre.

Tout ce qui se produit dans les forages est reflété directement ou indirectement dans les piézomètres, avec les défauts supplémentaires, exprimés dans l'analyse de l'application de la méthode de COOPER-JACOB, qui influencent toujours le rabattement observé dans les piézomètres.

Sous ces conditions spéciales, on ne peut pas préciser le comportement de chaque système de nappes pénétrées par chaque forage. Dans les mêmes conditions, la différence qui résulte, exprimée en valeurs de Transmissivité, n'est pas importante et par conséquent du point de vue théorique l'application de cette méthode est acceptée.



Forage	Profondeur (m)	altitude de la surface (m)	débit constant de pompage (m <sup>3</sup> /h)	épaisseur totale de couches aquifères (m)	longueur totale des crépines (m)	rabattement dans les forages (m) total	DEBIT SPECIFIQUE (m <sup>2</sup> /s)	T (m <sup>2</sup> /s)					BOULTON	LOGAN (Simplifié) T=1.22Q/A <sup>2</sup> sm	DONNEES DE PIEZOMETRES		
								COOPER-JAKOB (piézométrés)	penetree (forages) T=Q/2.23Q	rabattement (forages) T=Q/2.23Q (x <sub>2</sub> =0.2m)	HANTUSH-JAKOB T=0.183Q.21log(x <sub>2</sub> ^2/4.54m)	profondeur (m)			rabattement total (m)	distance de forage (m)	
1	140	12.0	180	41	59	4.02	1.24.10 <sup>-1</sup>	1.23.10 <sup>-1</sup>	4.19.10 <sup>-2</sup>	1.82.10 <sup>-2</sup>	1.19.10 <sup>-2</sup>	1.19.10 <sup>-2</sup>	8.29.10 <sup>-3</sup>	1.60.10 <sup>-2</sup>	150	0.17	63.7
2	130	12.0	180	43	48	2.75	1.82.10 <sup>-2</sup>	1.51.10 <sup>-2</sup>	1.43.10 <sup>-3</sup>	3.51.10 <sup>-2</sup>	1.67.10 <sup>-2</sup>	2.60.10 <sup>-2</sup>	2.34.10 <sup>-4</sup>	2.29.10 <sup>-2</sup>	135	1.06	50.0
3	160	15.5	180	73	48	4.75	1.05.10 <sup>-2</sup>	1.23.10 <sup>-1</sup>	6.07.10 <sup>-2</sup>	1.44.10 <sup>-2</sup>	1.02.10 <sup>-2</sup>	1.01.10 <sup>-2</sup>	-	1.33.10 <sup>-2</sup>	145	0.17	66.0
4	160	2.9	180	40	41	2.30	2.17.10 <sup>-2</sup>	5.55.10 <sup>-2</sup>	8.60.10 <sup>-2</sup>	4.20.10 <sup>-2</sup>	3.66.10 <sup>-2</sup>	3.99.10 <sup>-2</sup>	7.06.10 <sup>-3</sup>	2.73.10 <sup>-2</sup>	160	0.99	144.6
5	157	3.0	180	44	63	0.59	8.48.10 <sup>-2</sup>	3.53.10 <sup>-2</sup>	4.75.10 <sup>-2</sup>	4.75.10 <sup>-2</sup>	2.82.10 <sup>-2</sup>	2.72.10 <sup>-2</sup>	1.53.10 <sup>-3</sup>	1.04.10 <sup>-1</sup>	290	1.15	98.5
6	180	3.5	180	67	48	2.10	2.38.10 <sup>-2</sup>	4.58.10 <sup>-2</sup>	1.54.10 <sup>-2</sup>	1.54.10 <sup>-2</sup>	2.82.10 <sup>-2</sup>	2.72.10 <sup>-2</sup>	8.65.10 <sup>-4</sup>	2.95.10 <sup>-2</sup>	166	0.43	60.4
7	128	4.5	180	43	27	6.53	7.66.10 <sup>-3</sup>	2.66.10 <sup>-2</sup>	4.12.10 <sup>-2</sup>	1.70.10 <sup>-2</sup>	7.79.10 <sup>-3</sup>	7.42.10 <sup>-3</sup>	1.01.10 <sup>-2</sup>	1.01.10 <sup>-2</sup>	130	0.47	57.3
8	192	3.5	180	98	75	3.38	1.48.10 <sup>-2</sup>	1.87.10 <sup>-2</sup>	1.98.10 <sup>-2</sup>	3.54.10 <sup>-2</sup>	1.47.10 <sup>-2</sup>	1.47.10 <sup>-2</sup>	-	1.84.10 <sup>-2</sup>	192	0.13	80.1
9	164	2.5	180	46	45	3.08	1.62.10 <sup>-2</sup>	4.58.10 <sup>-2</sup>	8.60.10 <sup>-2</sup>	2.77.10 <sup>-2</sup>	1.59.10 <sup>-2</sup>	1.55.10 <sup>-2</sup>	5.85.10 <sup>-3</sup>	2.05.10 <sup>-2</sup>	164	0.72	20.0
10	135	2.0	180	36	33	4.92	1.02.10 <sup>-2</sup>	2.23.10 <sup>-2</sup>	1.01.10 <sup>-2</sup>	1.28.10 <sup>-2</sup>	1.02.10 <sup>-2</sup>	1.01.10 <sup>-2</sup>	-	1.33.10 <sup>-2</sup>	136	0.81	36.2
11	162	12.5	120	48	35	10.58	3.15.10 <sup>-3</sup>	1.86.10 <sup>-2</sup>	6.49.10 <sup>-3</sup>	7.52.10 <sup>-3</sup>	3.09.10 <sup>-3</sup>	3.07.10 <sup>-3</sup>	1.85.10 <sup>-3</sup>	4.32.10 <sup>-3</sup>	150	0.52	68.5
12	181	8.5	150	30	32	22.80	1.83.10 <sup>-3</sup>	9.72.10 <sup>-3</sup>	5.71.10 <sup>-3</sup>	1.01.10 <sup>-2</sup>	1.79.10 <sup>-3</sup>	1.78.10 <sup>-3</sup>	4.25.10 <sup>-4</sup>	3.60.10 <sup>-3</sup>	181	4.02	31.4
13	185	11.0	80	27	45	27.87	7.97.10 <sup>-4</sup>	7.80.10 <sup>-3</sup>	1.14.10 <sup>-3</sup>	4.73.10 <sup>-2</sup>	7.11.10 <sup>-4</sup>	7.10.10 <sup>-4</sup>	1.92.10 <sup>-2</sup>	2.01.10 <sup>-3</sup>	185	1.28	41.9
14	127	8.0	180	33	37	4.57	1.09.10 <sup>-2</sup>	1.84.10 <sup>-2</sup>	1.08.10 <sup>-2</sup>	2.08.10 <sup>-2</sup>	6.91.10 <sup>-3</sup>	1.18.10 <sup>-2</sup>	-	1.43.10 <sup>-2</sup>	150	0.84	50.0
15	183	4.5	130	29	33	4.92	7.34.10 <sup>-3</sup>	1.76.10 <sup>-2</sup>	1.01.10 <sup>-2</sup>	1.01.10 <sup>-2</sup>	4.90.10 <sup>-3</sup>	8.17.10 <sup>-3</sup>	1.61.10 <sup>-3</sup>	9.78.10 <sup>-3</sup>	174	0.84	66.7
16	150	6.5	150	29	51	13.83	3.01.10 <sup>-3</sup>	1.26.10 <sup>-2</sup>	5.33.10 <sup>-3</sup>	4.37.10 <sup>-3</sup>	1.94.10 <sup>-3</sup>	3.35.10 <sup>-3</sup>	-	4.83.10 <sup>-3</sup>	147	3.05	46.3
17	175	3.0	180	84	72	10.00	5.00.10 <sup>-3</sup>	2.53.10 <sup>-2</sup>	4.69.10 <sup>-3</sup>	8.68.10 <sup>-3</sup>	2.93.10 <sup>-3</sup>	5.12.10 <sup>-3</sup>	2.75.10 <sup>-3</sup>	6.49.10 <sup>-3</sup>	300	1.52	47.0
18	127	3.0	180	36	37	10.99	4.55.10 <sup>-3</sup>	2.46.10 <sup>-2</sup>	7.48.10 <sup>-3</sup>	1.10.10 <sup>-2</sup>	2.75.10 <sup>-3</sup>	4.63.10 <sup>-3</sup>	3.46.10 <sup>-3</sup>	6.55.10 <sup>-3</sup>	150	1.15	61.5
19	175	3.0	180	40	35	20.72	2.41.10 <sup>-3</sup>	1.31.10 <sup>-2</sup>	4.77.10 <sup>-3</sup>	1.78.10 <sup>-3</sup>	1.26.10 <sup>-3</sup>	2.21.10 <sup>-3</sup>	5.85.10 <sup>-4</sup>	3.97.10 <sup>-3</sup>	300	1.45	42.1
20	184	8.5	60	40	84	40.62	4.10.10 <sup>-4</sup>	3.37.10 <sup>-3</sup>	1.22.10 <sup>-3</sup>	2.10.10 <sup>-3</sup>	2.10.10 <sup>-4</sup>	3.62.10 <sup>-4</sup>	1.95.10 <sup>-3</sup>	1.02.10 <sup>-3</sup>	300	1.55	45.0

### 8.7. LES PERTES DE CHARGE DANS LES FORAGES

Le rabattement total mesuré dans un forage, pendant le pompage est dû à l'abaissement du niveau phréatique de la nappe, mais aussi au tubage, crépines, remplissage de graviers, c'est-à-dire, à un ensemble de facteurs appelé "effet de puits".

Pour les pertes de charge dans le tube du forage l'estimation est relativement plus simple, à l'aide de la formule des conduites et des abaques donnant les valeurs des coefficients correspondants (KOCH, 1960). Les pertes de charge dues aux crépines sont les résultats de plusieurs facteurs. On peut distinguer des pertes de charge au passage des fentes et aussi les jets d'adduction des fentes, d'une certaine vitesse, qui vont rencontrer la direction générale d'écoulement à l'intérieur des crépines, provoquant un freinage et donc une perte de charge supplémentaire (NEYRPIC, 1952).

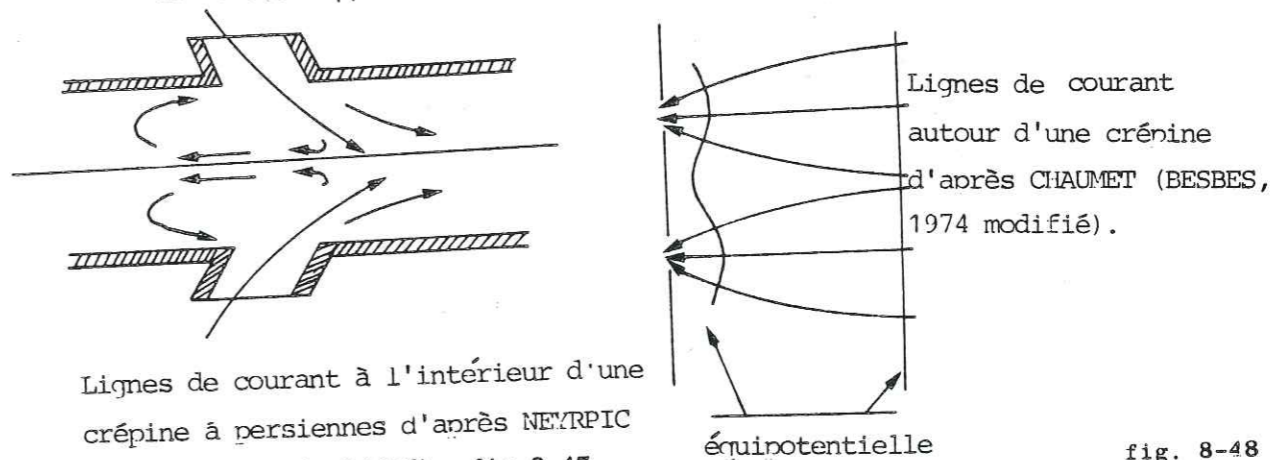
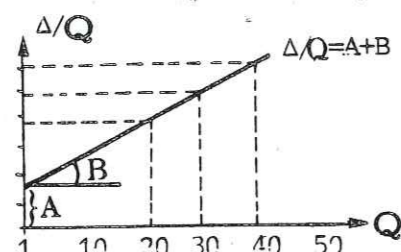


fig. 8-48

A l'entrée des fentes on peut considérer les pertes de charge comme analogue à une pénétration partielle d'un puits, ayant toujours une grandeur importante, malgré une densité élevée des fentes (CHAUMET, 1968). Enfin, à la hauteur des nappes de faible productivité, la crépine se comporte comme une conduite à forte rugosité vis-à-vis de l'écoulement vertical, et les pertes de charge peuvent être calculées de la même façon que pour les conduites (BESBES, 1974).



En ce qui concerne les pertes de charge dans la formation elle-même, elles s'expriment par le rabattement donné par des formules théoriques, selon la catégorie de la nappe et le régime de pompage. Si on a un pompage à paliers, on peut estimer les pertes de charge d'après le rabattement spécifique ( $\Delta=AQ+BQ^n$ , AQ étant le facteur dû à la nappe,  $BQ^n$  le facteur dû à l'équipement du forage et la puissance n étant, en générale, égale à 2).



BESBES (1974) a introduit des méthodes d'estimation des pertes de charge, ainsi qu'une méthode théorique pour l'estimation du facteur B.

- Pour la courbe d'abaissement, à partir d'un temps  $t_0$  ( $t_0 = \frac{r^2 S}{2.25T}$ ) on trace une droite parallèle à la droite expérimentale. La distance verticale entre les deux droites est égale à  $\Delta H$ .
- Pour les cas de courbes d'abaissement et de remontée dans un diagramme unique, à la même échelle, on trace deux droites parallèles moyennes pour le rabattement et la remontée et leur distance verticale est égale à  $\Delta - \Delta'$  ( $\Delta - \Delta' = \frac{0.183Q}{T} \log \frac{2.25T}{x^2 S} + \Delta H$ ).
- Pour la courbe de remontée on prolonge la partie droite de la courbe (la post-production non considérée) vers les valeurs faibles de  $t'$  et on trouve les valeurs de  $t'$  et  $\Delta'$  correspondantes. Après on calcule la valeur de  $\Delta H$  selon la formule précédente.

Nous avons essayé d'appliquer les méthodes proposées par BESBES. En ce qui concerne la courbe d'abaissement dans les forages (c'est la plus intéressante pour notre cas, puisque c'est le rabattement dans les forages qui participe à l'estimation du débit spécifique), la méthode considérée n'est pas applicable. D'après l'élaboration des données nous sommes arrivés à des résultats non réels, ex: le rabattement dans les forages apparaît être plus faible que celui dans les

piézomètres. Actuellement ceci arrive dans le cas du forage F<sub>5</sub> et est dû aux fausses mesures. Pour les autres forages, à notre avis, il s'agit d'une superestimation du temps  $t_0$  ( $t_0 = \frac{x^2 S}{2.25T}$ ). Puisque le coefficient d'emmagasinement et la Transmissivité restent constants (valeur moyenne), c'est la distance x qui provoque les mauvais résultats. Dans la particularité lithologique de la région considérée, le rabattement obtenu dans les piézomètres, ne correspond pas à un point de la surface du cône d'action du forage, pour les mêmes raisons exprimées sur les difficultés d'estimation de la Transmissivité à partir du rabattement dans les piézomètres. Il faut, donc, considérer une distance x limitée, dont l'estimation est un problème très complexe.

Des essais de pompage par paliers n'étant pas disponibles, on ne peut pas appliquer les méthodes classiques pour l'estimation des paramètres A et B de l'équation bien connue  $S = AQ + BQ^2$ .

D'autre part, nous disposons des données qualitatives, ainsi que des résultats de forages analogues dans cette région, qu'on peut utiliser pour exprimer les pertes de charge, dans les forages, d'une façon plutôt qualitative.

D'abord, tous les forages ont les mêmes caractéristiques techniques (diamètre du forage, isolation de la nappe phréatique, foration en rotation à la boue identique) et ils sont uniformément équipés (diamètre du tubage, granulométrie du filtre des graviers, sorte des crépines, diamètre de la pompe). Il faut ajouter ici que la durée du pompage préliminaire ainsi que celle du pompage final étaient les mêmes pour tous les forages et les pompages étaient réalisés de la même façon (soupape, air-lift, pompe). Donc, nous avons estimé que les pertes de charge dues aux facteurs précédents auront le même ordre de grandeur. Il reste encore le pourcentage de pertes de charge, dû au comportement des formations pénétrées, durant le pompage (variabilité des charges, drainance etc.). D'autres forages analogues dans la même région ont présenté une perte de charge de 10% et parfois de 20% du



rabattement total. Le changement de la valeur du débit spécifique, même pour des pourcentages plus élevés n'est pas très important de même que la valeur de la Transmissivité ainsi estimée.

Au contraire, les variations de la profondeur des forages et de la profondeur d'installation des crépines et de la pompe et aussi à l'épaisseur totale des formations aquifères provoquent une variabilité des pertes de charge. Donc, on pourrait considérer un coefficient de Sécurité (dont la valeur est une question de conditions locales) pour les valeurs de la Transmissivité estimées.

Logan a montré aussi que pour un pompage de durée courte le facteur  $R/r$  (Dupuit:  $\frac{\Delta}{Q} = \frac{1}{2\pi T} \ln R/r$ ,  $\Delta = AQ+BQ^2$  et  $A = \frac{1}{2\pi T} \ln R/r$ ) est compris entre les valeurs  $10^3$  et  $10^5$ , donc  $\log R/r$  est compris entre les valeurs 3 et 5. Si on transforme le  $\ln R/r$  à  $\log R/r$ , on aura  $A = \frac{0.37}{T} \log R/r$ , donc  $0.37 \log R/r$  est compris entre 1.1 et 1.8. L'erreur introduite n'est pas considérable. Pour les valeurs 1.1 et 1.8 on a  $T = \frac{0.37 \log R/r}{A}$  et en général  $T \approx \frac{1.22}{A}$  et  $A \approx \frac{1.22}{T}$

Pour les forages considérés on peut estimer A, puis A·Q donc le rabattement dû au terrain.

F	1.22/T	Q m <sup>3</sup> /s	A·Q	Δ obs.	Δ obs. A·Q	F	1.22/T	Q m <sup>3</sup> /s	A·Q	Δ obs.	Δ obs. A·Q
1	101.66667	0.05	5.0833335	4.02	Δ < AQ	11	393.54839	0.034	13.380645	10.58	Δ < AQ
2	71.764706	0.05	3.5882353	2.75	Δ < AQ	12	677.77778	0.04	27.111111	22.80	Δ < AQ
3	122.00000	0.05	6.1	4.75	Δ < AQ	13	1718.3099	0.022	37.802818	27.87	Δ < AQ
4	32.972973	0.05	1.6486487	2.30	0.65	14	176.81159	0.05	8.8405795	4.57	Δ < AQ
5	11.090909	0.05	0.5545454	0.59	0.03	15	152.5	0.036	5.49	4.92	Δ < AQ
6	43.571429	0.05	2.1785715	2.10	Δ < AQ	16	610.0	0.04	24.4	13.83	Δ < AQ
7	156.41026	0.05	7.820513	6.53	Δ < AQ	17	244.0	0.05	12.2	10.00	Δ < AQ
8	81.333333	0.05	4.0666667	3.38	Δ < AQ	18	305.0	0.05	15.25	10.99	Δ < AQ
9	76.25	0.05	3.8125	3.08	Δ < AQ	19	983.46154	0.05	46.923077	20.72	Δ < AQ
10	122.0	0.05	6.1	4.92	Δ < AQ	20	3388.8889	0.017	57.611111	40.62	Δ < AQ

Tandis que cette méthode proposée par Logan est approximative, il arrive que pour les forages du Nestos, le rabattement observé soit plus faible (souvent énormément) que celui estimé par cette méthode. C'est un indice plutôt quantitatif que, même s'il existe des pertes de charge dans les forages, elles doivent être très faibles. Les forages 4 et 5 présentent des pertes de charge de l'ordre de grandeur 28% et 5%.

Il est, donc, évident que la participation des pertes de charge, au rabattement obtenu par le pompage, est très faible. Par conséquent les pertes de charge n'influencent pas l'estimation de la Transmissivité à partir des mesures dans les forages eux-mêmes, ainsi que, l'estimation du Débit Spécifique (des forages).

Il faut encore ajouter que l'existence des pertes de charge conduit à une sous-estimation du Débit Spécifique donc, à une sous-estimation de la Transmissivité. Ceci veut dire qu'on est toujours du côté de la sécurité.



## 8.8. CORRELATION ENTRE LE DEBIT SPECIFIQUE ET LA TRANSMISSIVITE- REPRESENTATION CARTOGRAPHIQUE DES TRANSMISSIVITES

### 8.8.1. GENERALITES

La relation entre le Débit Spécifique des forages ( $q$ ) et la Transmissivité ( $T$ ) est évidente, puisque c'est la Transmissivité d'une nappe qui détermine le rabattement dans un puits pompé à un débit donné. Pour les nappes captives et pour le régime d'équilibre le débit spécifique n'est pas sous l'influence du temps, d'après le formule de Dupuit

$$q = \frac{Q}{\Delta} = \frac{2\pi}{\ln R/r} T, \quad R \text{ étant le rayon d'action du forage, } r \text{ le diamètre}$$

du forage et  $\Delta$  le rabattement correspondant au débit  $Q$  du pompage. Comme le facteur  $\frac{2\pi}{\ln R/r}$  est constant, on a une relation générale  $q = a T$ .

Pour le régime de non équilibre (rabattement en fonction du temps) la simplification donnée par COOPER et JACOB exprime

$$q = \frac{Q}{\Delta} \approx \frac{4\pi T}{2.3 \log 2.25 T t / r^2 S}$$

Cette relation est constante pour chaque débit et pour le même temps de pompage. Les pertes de charge dues aux crépines et au tubage peuvent éloigner cette relation de la réalité et on doit faire des corrections nécessaires. Plusieurs auteurs ont essayé d'estimer la Transmissivité d'après la valeur du débit spécifique. Comme tous acceptent que la valeur du débit spécifique ne change pas beaucoup par rapport à  $\ln R/x$ , ils ont essayé de déterminer un coefficient de corrélation général, dans une certaine région, pour une nappe captive. On peut préciser:

- BROWN, KONOPLYAMTSEV et al, 1972.  $T = 1.6q$  d'après l'équation de Dupuit avec  $R = 3\text{km}$  (valeur qui se présente souvent pour les nappes captives) et  $x = 0.3\text{m}$ .
- ASTIE, BOURGEOIS et TRUPIN, 1969.  $T \approx 3.5q$  pour une nappe captive de la région de la Gironde.

- Pour des nappes captives on a proposé la relation  $T \approx q$  considérant dans l'équation de Dupuit, que  $2\pi/\ln R/x \approx 1$
- Sur ce dernier point, TENENBAUM et GRINBAUM ont proposé un coefficient correctif de la corrélation.
- Encore POLLAC (1967), JETEL (1974), JETEL-KRASNY (1968), ASTIE (1969) etc., ont essayé des corrélations analogues.
- MARINOS P. et STOURNARAS G. (1975) ont essayé d'exprimer une corrélation correspondante pour le cas de puits incomplets et de rabattement important dans une nappe libre et hétérogène.

D'après un "débit spécifique corrigé"  $q'$ , ils sont arrivés, pour la plaine alluviale de Hora (île de Samos, Grèce), à la relation  $T = 0.20q'$ . La nappe aquifère se compose d'un ensemble très hétérogène d'argiles sableuses, sables, argiles graveleuses et galets, avec une prédominance importante de la partie argileuse.

Comme dans cette étude nous avons envisagé l'ensemble des nappes aquifères profondes du delta du Nestos et nous nous sommes occupés de son comportement uniforme, nous avons essayé de mettre en corrélation les valeurs moyennes de Transmissivité avec celles du débit spécifique (corrélation simple-linéaire). Cette corrélation s'est faite pour deux raisons. D'abord pour contrôler les valeurs de Transmissivité obtenues par le pompage (des valeurs acceptées si le coefficient de corrélation est suffisant) et, ensuite, pour essayer une représentation cartographique des Transmissivités, déduites des débits spécifiques.

Donc, nous avons mis en corrélation les valeurs du débit spécifique ( $q$ ) avec chaque série de valeurs de Transmissivité

$$r = \frac{1/n \sum x_i y_i}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum x_i^2} \sqrt{\frac{1}{n} \sum y_i^2}} \quad a = \frac{\sum x_i y_i}{\sum x_i^2}$$



$\beta =$  presque toujours négligeable,  $x_i = X_i - \bar{X}$ ,  $y = Y_i - \bar{Y}$ . Equation générale  $y = ax + \beta$

8.8.2. LA CORRELATION POUR LE DELTA DU NESTOS

Les résultats de la corrélation linéaire de chaque valeur de la Transmissivité avec le Débit Spécifique des forages figurent au tableau suivant:

x	y	r	a	forages non considérés
q (m <sup>2</sup> /S)	T̄ (m <sup>2</sup> /S) Cooper-Jacob, rabattement piézomètres	0.73	1.56	3,5,1
"	" " " remontée forages	0.76	3.24	2,5
"	" " " rabattement forages	0.80	1.29	5
"	" Hantush-Jacob ( $T = \frac{0.23Q}{2\pi\Delta_{ms}}$ )	0.94	1.29	5
"	" " " ( $T = \frac{0.183Q}{\Delta_2 - \Delta_1} 2 \log \frac{x_2}{x_1}$ )	0.91	1.32	5
"	" Boulton (les conditions Theis incluses)	0.42		3,6,10,14,16
"	" " " " non incluses)	0.74	0.03	3,6,9,10,13,14,16,17

D'après ce deuxième contrôle, les valeurs, de la Transmissivité, acceptées sont celles estimées par la méthode de Hantush-Jacob ( $r=0.94,0.91$ ).

Puisque la profondeur des forages diffère et par conséquent ils n'exploitent pas la même épaisseur des nappes aquifères, nous avons essayé de mettre en corrélation les valeurs de T, non plus avec celles de q, mais avec les valeurs de q' (des valeurs de q divisées par l'épaisseur totale des couches crépinées multipliées par 10<sup>3</sup> pour les raisons de commodité numérique). Les résultats de cette corrélation figurent au tableau suivant:

q	y	r	a	forages non considérés
q' (m <sup>2</sup> /S)	T̄ (m <sup>2</sup> /S) Cooper-Jacob, rabattement piézomètres	0.41	1.51	3,5
"	" " " remontée forages	0.72	2.75	2,5,12
"	" " " rabattement forages	0.73	1.07	5
"	" Hanstush-Jacob ( $T = \frac{0.23}{2\pi\Delta_{sm}}$ , $x_2 = 0.20cm$ )	0.85	1.07	5
"	" " " ( $T = \frac{0.183Q}{\Delta_2 - \Delta_1} 2 \log \frac{x_2}{x_1}$ , $x_2 = 0.20cm$ )	0.92	1.34	5
"	" Boulton (les conditions Theis incluses)	0.43		3,6,10,14,16
"	" " " " non incluses)	0.42		3,6,9,10,13,14,16,17

La corrélation est maintenant plus faible, ceci étant le résultat du mauvais placement des crépines dans quelques forages (F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub>, F<sub>6</sub>, F<sub>13</sub>, F<sub>14</sub>, F<sub>15</sub>) et des conditions limites de la réalisation pour quelques forages (F<sub>14</sub>: surtout une couche aquifère, F<sub>7</sub>, F<sub>10</sub>, F<sub>11</sub>: épaisseur importante des couches semi-perméables). Malgré tout ceci, on peut vérifier que les valeurs de Transmissivité acceptées sont celles obtenues d'après la méthode de Hantush-Jacob, et que les résultats obtenus d'après les mesures de rabattement dans les forages sont plus proches de la réalité que ceux des mesures réalisées dans les piézomètres (méthodes COOPER-JACOB). La mauvaise corrélation, en ce qui concerne la méthode de BOULTON, est due aux conditions nécessaires à son application (régime non équilibré). Ceci inclut le mêmes défauts que nous avons déjà exprimés sur l'application de la méthode de COOPER-JACOB (différentiation des réactions de la nappe au niveau du piézomètre par rapport aux réactions au niveau du forage).

Enfin, en utilisant la méthode simplifiée de Logan ( $T = \frac{1.22Q}{\Delta_m}$ ), nous avons obtenu, une autre série de valeurs de la Transmissivité, qui sont toujours à mi-distance des autres, donc assez proches des valeurs réelles (pour Logan  $T = 1.22q$ ,  $r = 1$ , même si on utilise  $\Delta' = \frac{\Delta^2}{2H}$ ).

Une autre étude qui peut, peut être, fournir des données intéressantes,



est celle proposée par JETEL. D'après JETEL, la représentativité d'un modèle de système d'aquifères, dépend de la densité des données primaires. En même temps ce modèle doit correspondre aux lois de répartition des paramètres dans le milieu naturel. JETEL propose l'utilisation des paramètres approximatifs logarithmiques (index de Perméabilité Z et index de Transmissivité Y), qui peuvent être calculés même dans le cas de puits où la qualité des données de pompage ne suffit pas pour un calcul des paramètres hydrauliques stricts. Le calcul de ces paramètres permet sous certaines conditions, une analyse statistique approfondie, surtout pour le choix des principes optimaux de l'extrapolation.

Après la corrélation entre le débit spécifique et la Transmissivité, nous avons considéré, comme valeurs de T représentatives, celles qui proviennent de la méthode modifiée de HANTUSH-JACOB (variante

$T = \frac{0.23Q}{2\pi\Delta sm}$ ), peu corrigées selon les résultats obtenus d'après la deuxième variante ( $T = \frac{0.183Q}{\Delta_2 - \Delta_1} \cdot 2 \log \frac{x_2}{x_1}$ ). Ensuite nous avons estimé, à

partir des valeurs de la Transmissivité, les valeurs correspondantes du Coefficient d'Emmagasinement, selon la simplification de COOPER-JACOB ( $S = \frac{2.25 T t_0}{x^2}$ ). Donc nous avons établi le tableau suivant.

Avec les valeurs de T, nous avons essayé une représentation cartographique (fig. 8-49). La solution du problème qui se pose (sans l'intervention du Coefficient de Sécurité), de prévoir la Transmissivité en connaissant le débit spécifique, est illustrée dans la figure 8-50.

Nous considérons, donc, comme valable, pour la région du delta du Nestos et pour une profondeur moyenne considérée de 150m, la relation  $T = 1.3q$ .

D'après la représentation cartographique on peut observer que les régions distinguées sont celles supposées par l'étude lithologique des forages, l'anomalie dans la partie Est étant le résultat des apports du bassin voisin.

forage	q (m <sup>2</sup> /s)	T (m <sup>2</sup> /s)	S
1	1.24 .10 <sup>-2</sup>	1.20 .10 <sup>-2</sup>	4.00 .10 <sup>-2</sup>
2	1.82 .10 <sup>-2</sup>	1.70 .10 <sup>-2</sup>	5.70 .10 <sup>-2</sup>
3	1.05 .10 <sup>-2</sup>	1.00 .10 <sup>-2</sup>	1.30 .10 <sup>-2</sup>
4	2.17 .10 <sup>-2</sup>	3.70 .10 <sup>-2</sup>	1.20 .10 <sup>-2</sup>
5	8.48 .10 <sup>-2</sup>	1.10 .10 <sup>-1</sup>	1.55 .10 <sup>-2</sup>
6	2.38 .10 <sup>-2</sup>	2.80 .10 <sup>-2</sup>	2.80 .10 <sup>-1</sup>
7	7.66 .10 <sup>-3</sup>	7.80 .10 <sup>-3</sup>	2.00 .10 <sup>-2</sup>
8	1.48 .10 <sup>-2</sup>	1.50 .10 <sup>-2</sup>	1.40 .10 <sup>-2</sup>
9	1.62 .10 <sup>-2</sup>	1.60 .10 <sup>-2</sup>	1.20 .10 <sup>-3</sup>
10	1.02 .10 <sup>-2</sup>	1.00 .10 <sup>-2</sup>	2.20 .10 <sup>-2</sup>
11	3.15 .10 <sup>-3</sup>	3.10 .10 <sup>-3</sup>	9.80 .10 <sup>-3</sup>
12	1.83 .10 <sup>-3</sup>	1.80 .10 <sup>-3</sup>	5.55 .10 <sup>-3</sup>
13	7.97 .10 <sup>-4</sup>	7.10 .10 <sup>-4</sup>	5.60 .10 <sup>-3</sup>
14	1.09 .10 <sup>-2</sup>	6.90 .10 <sup>-3</sup>	7.75 .10 <sup>-3</sup>
15	7.34 .10 <sup>-3</sup>	8.00 .10 <sup>-3</sup>	4.05 .10 <sup>-3</sup>
16	3.01 .10 <sup>-3</sup>	2.00 .10 <sup>-3</sup>	1.35 .10 <sup>-3</sup>
17	5.00 .10 <sup>-3</sup>	5.00 .10 <sup>-3</sup>	2.80 .10 <sup>-2</sup>
18	4.55 .10 <sup>-3</sup>	4.00 .10 <sup>-3</sup>	1.00 .10 <sup>-3</sup>
19	2.41 .10 <sup>-3</sup>	1.30 .10 <sup>-3</sup>	3.50 .10 <sup>-3</sup>
20	4.10 .10 <sup>-4</sup>	3.60 .10 <sup>-4</sup>	1.30 .10 <sup>-3</sup>

Pour la solution graphique et la représentation cartographique, nous avons aussi utilisé des données d'autres forages de la région.



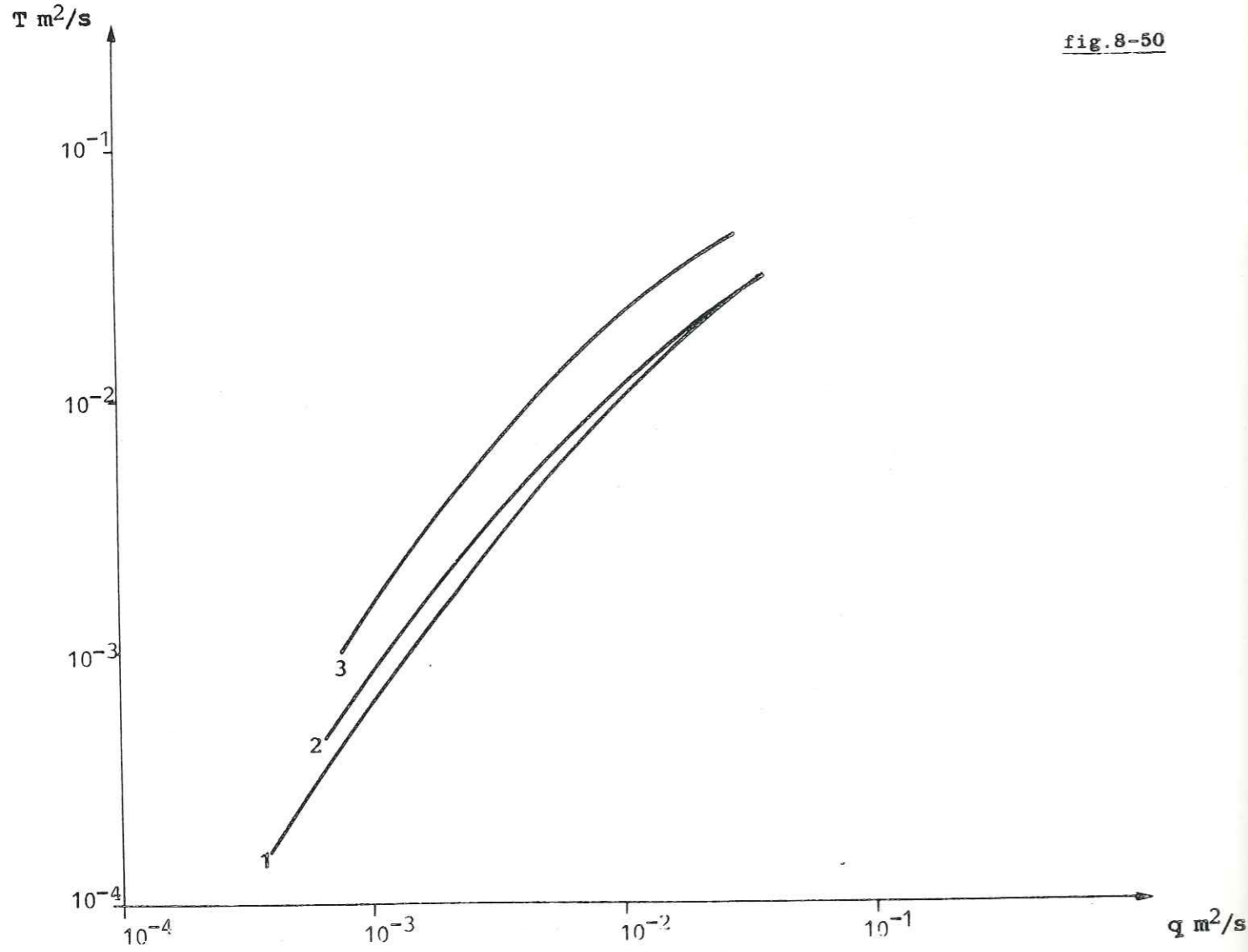


fig.8-50

Corrélation entre le débit spécifique (q) et la Transmissivité (T), valable pour la région du delta du Nestos (profondeur moyenne considérée: 150m).

- 1: des valeurs de T, estimées par Hantush-Jacob ( $T = \frac{0.23Q}{2\pi\Delta sm}$ )
- 2: des valeurs de T, estimées par Hantush-Jacob ( $T = \frac{0.183Q}{\Delta_2 - \Delta_1} 2 \log \frac{x_2}{x_1}$ )
- 3: des valeurs de T, estimées par Cooper-Jacob ( $T = \frac{0.183Q}{\Delta}$  - rabattement dans les forages)

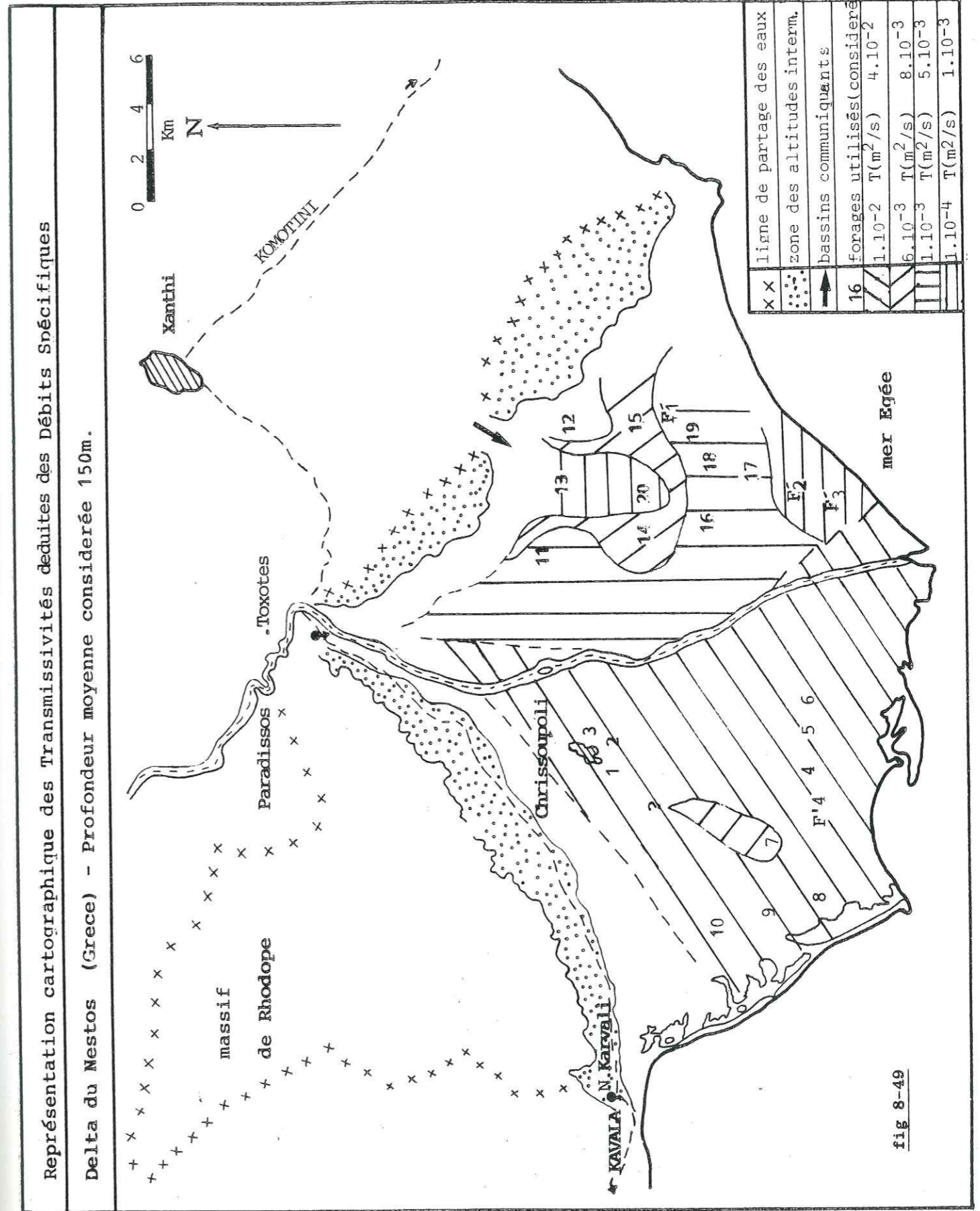
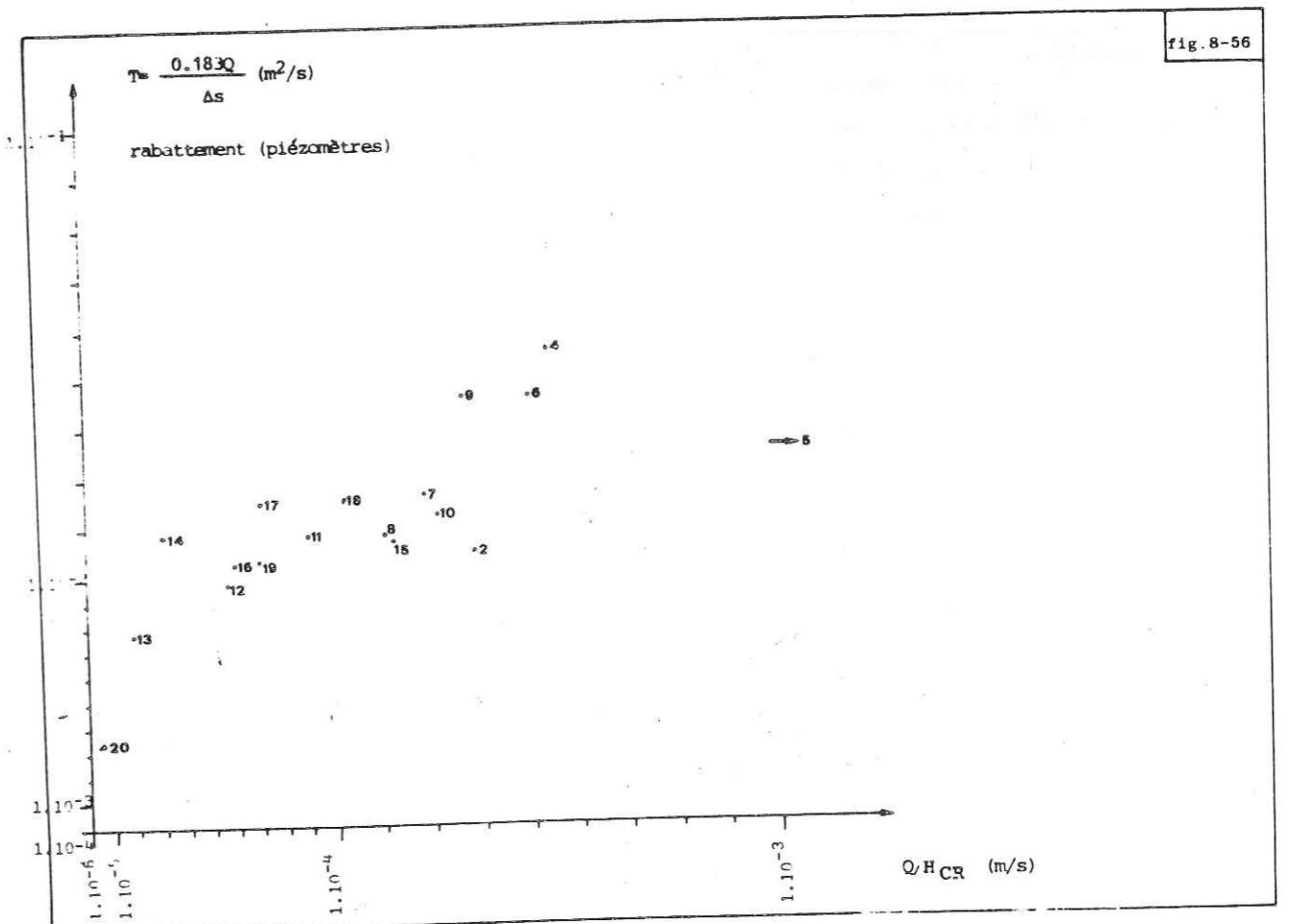
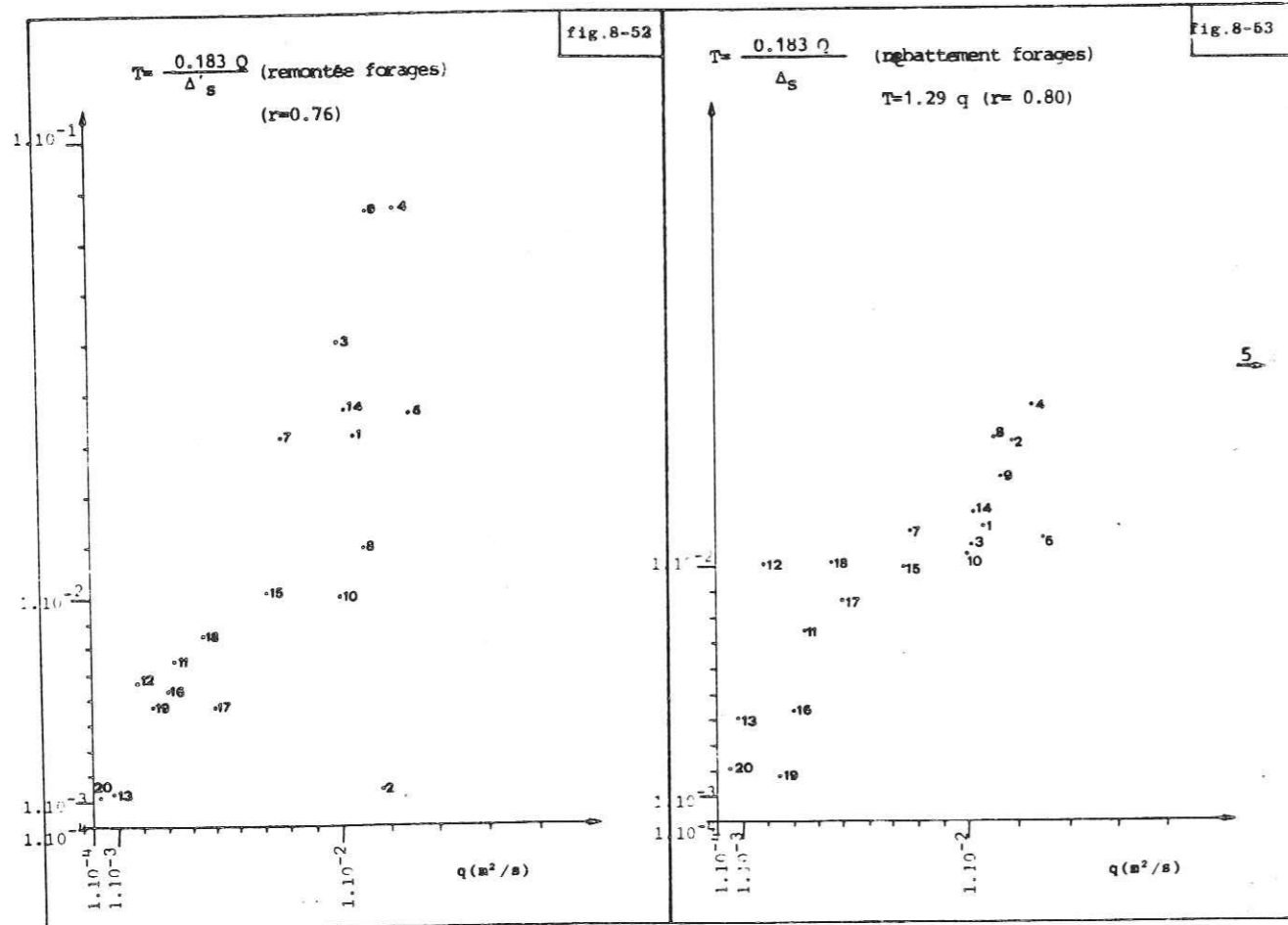
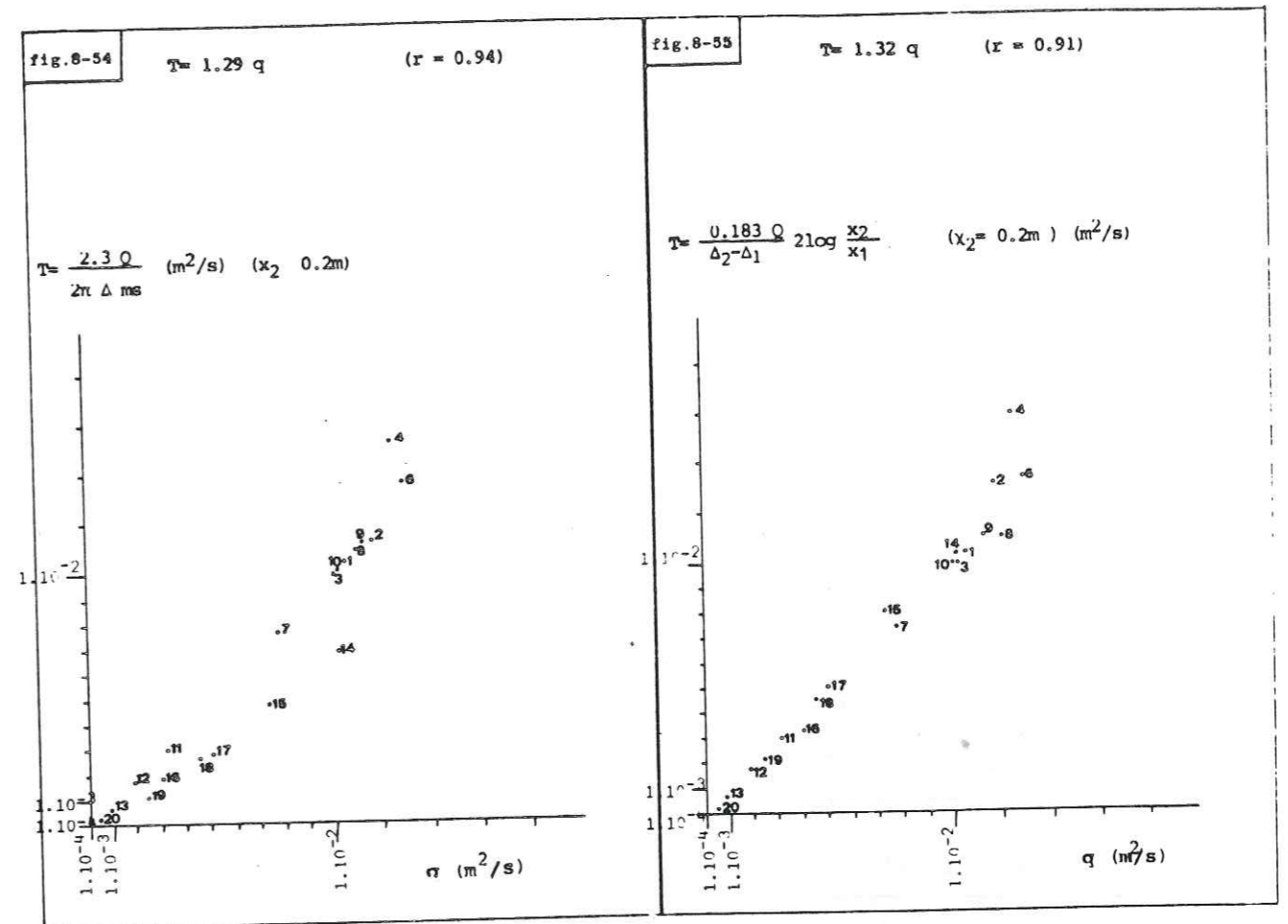
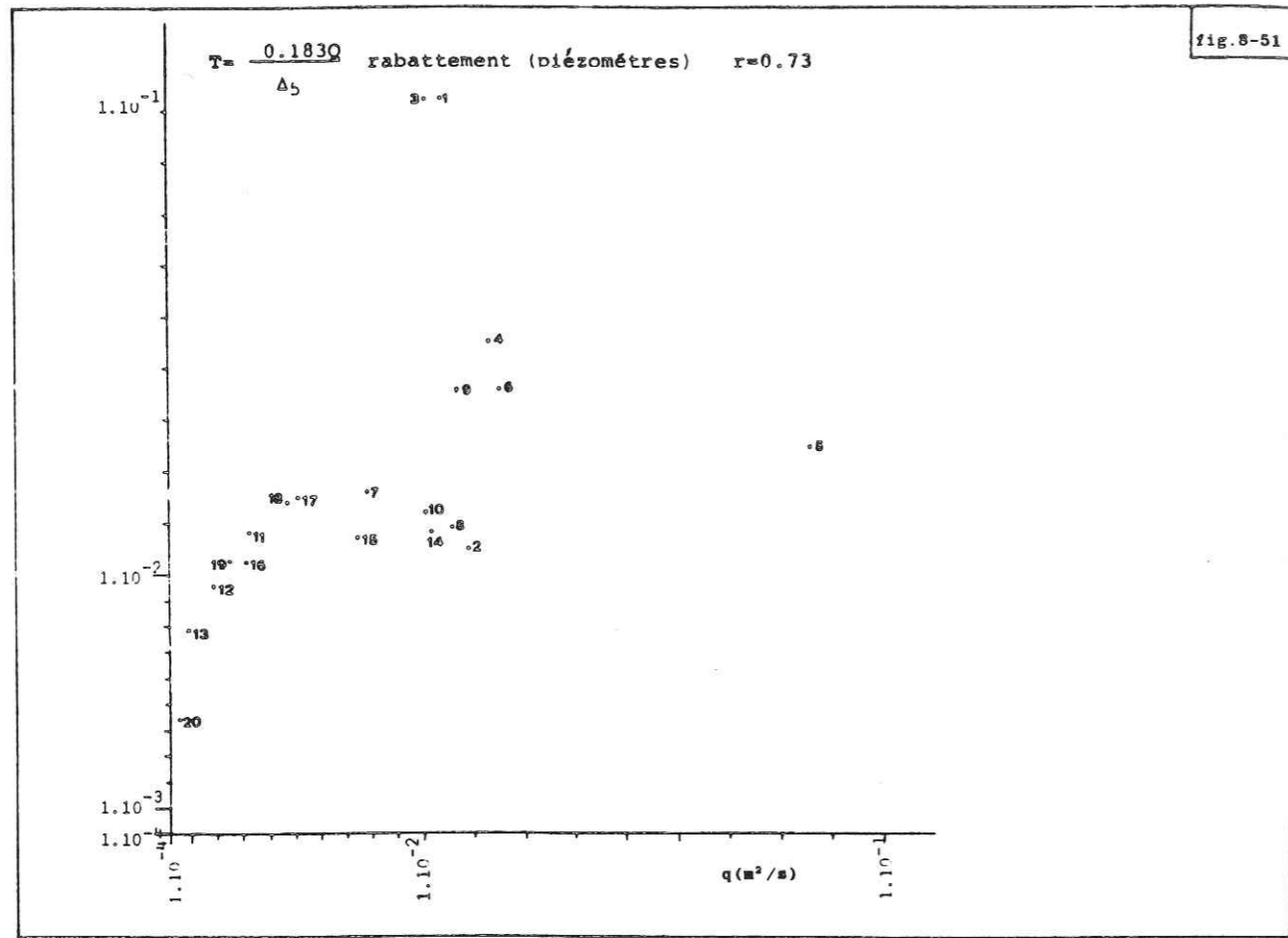
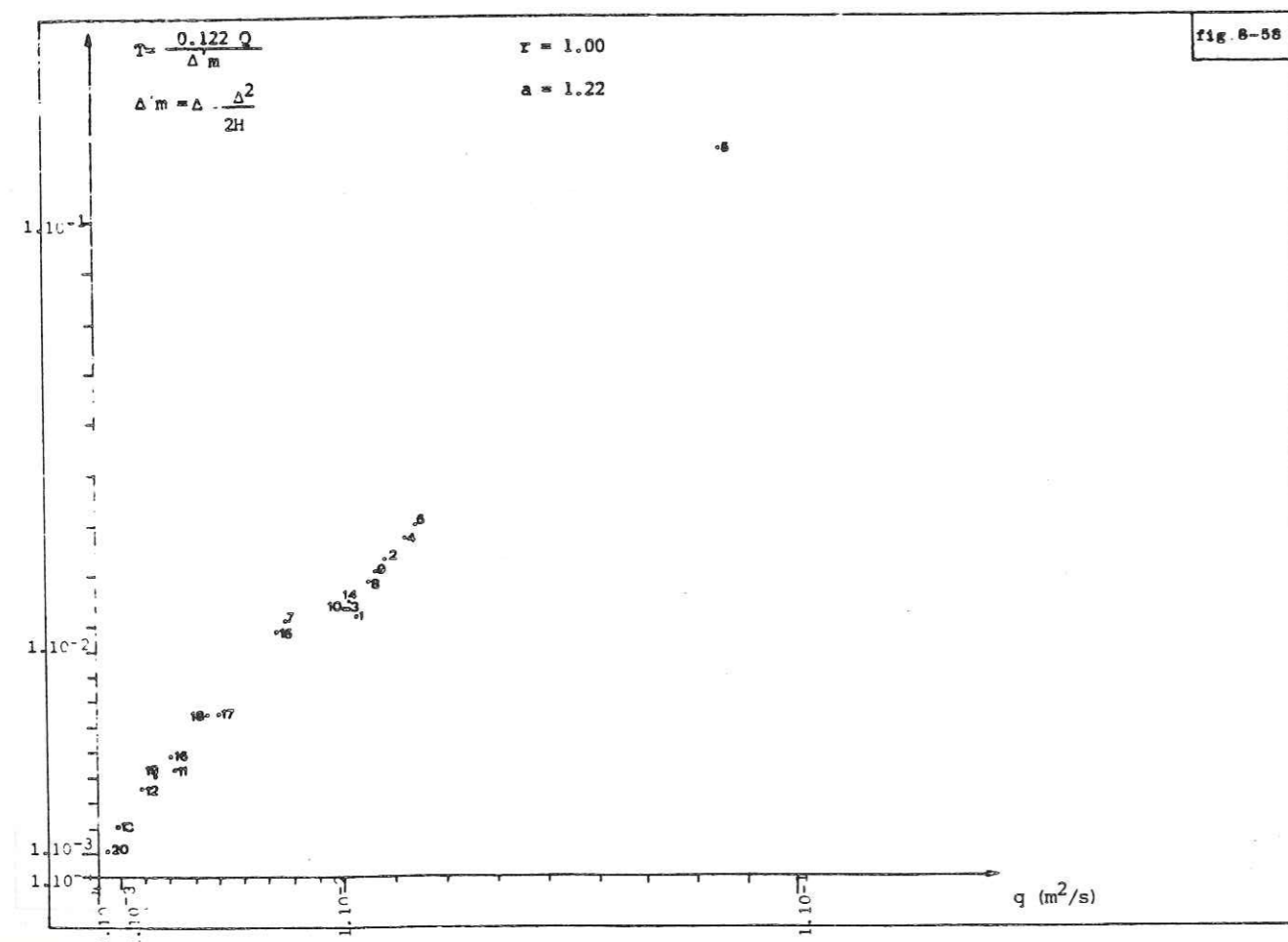
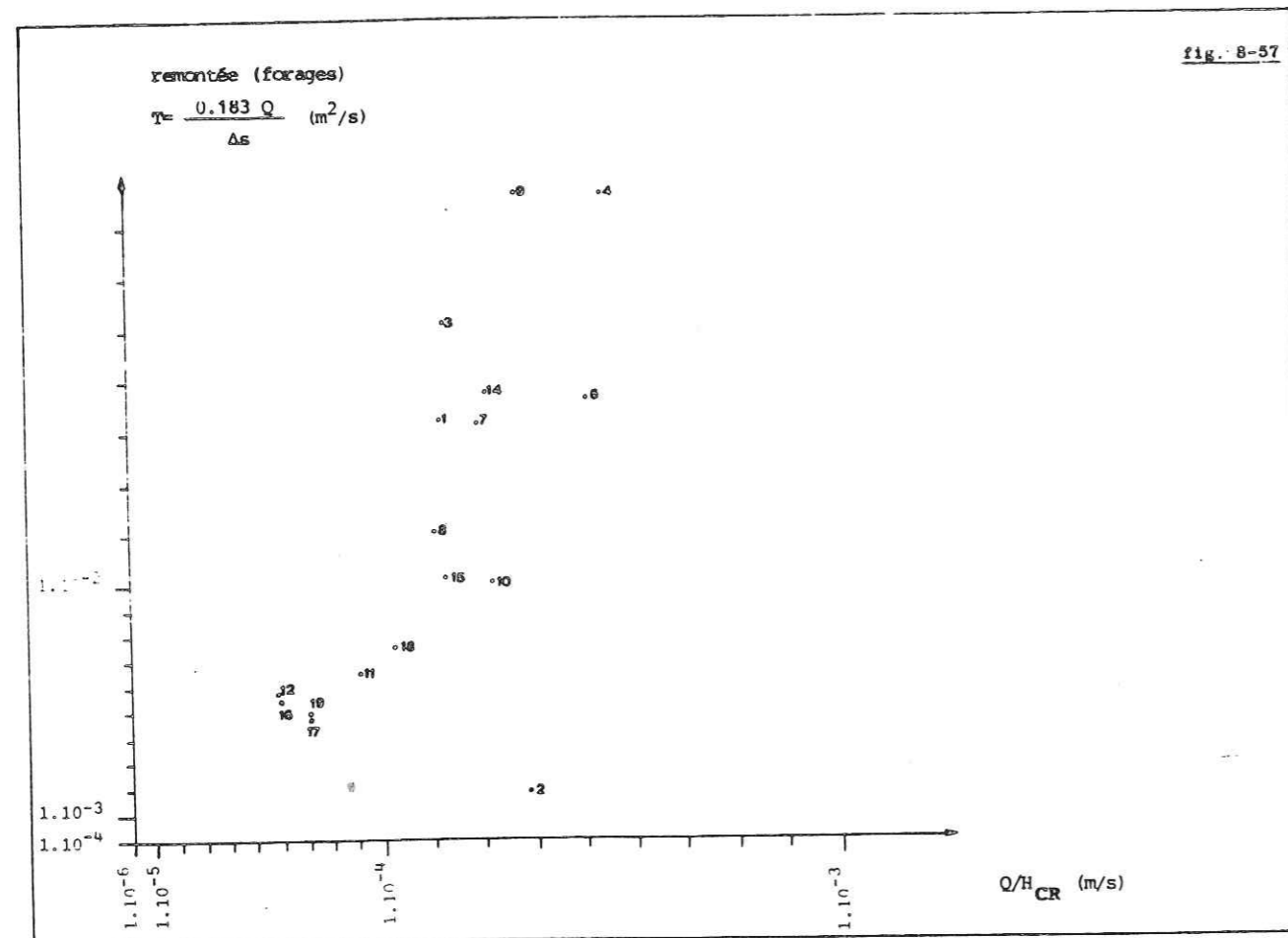


fig 8-49









## CONCLUSIONS - FAITS NOUVEAUX

Cette étude concerne le delta du Nestos, qui forme la limite entre le département de Macédoine et celui de Thrace (Grèce du Nord). Elle peut concerner aussi, en général, les deltas de cette catégorie.

Du point de vue hydrologique, la région du delta est caractérisée par des précipitations médiocres, un ruissellement (sauf celui du Nestos) limité et une évapotranspiration élevée. Le bassin du delta (sous-bassin du bassin versant majeur du Nestos), reçoit des apports en eau, superficiels et souterrains, depuis le bassin voisin de Xanthi, par la "fenêtre" qui se trouve au NE de la plaine deltaïque, entre les villages de Melissa et Kypseli.

L'évolution géotectonique de la région du delta a suivi un processus bien connu depuis les recherches pétrolières. Ce processus commence à l'Eocène, qui est marqué par le paroxysme d'une phase tectonique, suivie par une transgression générale. A la limite Oligocène-Miocène, se produit une phase de compression et de compaction, suivie par la phase de décompression qui a donné les systèmes de grandes failles. Pendant cette phase se forment les bassins du Nestos et du Prinos, qui sont les premiers récepteurs des sédiments. L'émersion de la région et sa stabilisation commencent au début du Pliocène, après la régression progressive de la mer.

Les conditions géologiques de la région du delta et de la région environnante sont celles de la zone géotectonique du Rhodope, dans laquelle se trouve la région d'étude. La formation qui prédomine est le socle cristallin et cristallophyllien. La zone du Rhodope, pendant le cycle d'orogénèse alpine, se comportait comme un môle. Les formations métamorphiques sont accompagnées d'intrusions magmatiques et sont suivies des formations les plus récentes. La tectonique joue un rôle déterminant puisque c'est la faille majeure de direction générale E-O et le horst de la région d'Avdhira qui composent les limites du delta.



Parmi les formations perméables, les nappes aquifères principales concernent les sédiments détritiques de la plaine deltaïque, les marbres du massif du Rhodope et les sédiments du Tertiaire aux bordures du delta. Ces derniers jouent un rôle de transition hydrogéologique vers le delta. D'après les forages exécutés ainsi que les sondages électriques réalisés, pour une profondeur moyenne considérée de 150m, on trouve une différenciation entre les sédiments de la partie Est et de la partie Ouest du delta. Les différences principales sont les suivantes:

- les changements lithologiques sont plus nombreux et plus rapides dans la partie Ouest que dans la partie Est.
- les galets, matériaux des lits actifs de la rivière, se trouvent seulement dans la partie Ouest, au moins pour la profondeur moyenne considérée.
- les argiles pures manquent dans la partie Ouest tandis qu'elles sont nombreuses et bien distinguées dans la partie Est.

On peut, donc, considérer que, pendant le dernier stade de l'évolution du delta, l'écoulement du Nestos s'effectuait plus à l'Ouest qu'aujourd'hui et que cet écoulement se déplaçait de plus en plus vers l'Est. Ceci est vérifié aussi par les autres moyens utilisés (analyse géomorphologique du delta etc.). La granulométrie des sédiments en profondeur présente une grande variabilité. Cette variabilité dans la partie Est, intervient horizontalement tandis que dans la partie Ouest elle est verticale et horizontale. Ceci est déterminant pour la formation des systèmes de nappes aquifères. Les sondages électriques et les analyses minéralogiques des sédiments ont vérifié et complété les recherches géologiques.

L'analyse des conditions géomorphologiques et de l'évolution finale du delta, complètent la connaissance de la structure et des particularités du delta. D'après la classification qualitative, le delta du Nestos semble être un delta de type Rhône, dont la formation est surtout influencée par l'action fluviale et l'action de la houle. Après l'aménagement de la rivière commence la phase de destruction du delta. Sur les facteurs divers qui ont déterminé la forme et la structure finale du

delta, on peut préciser:

- en ce qui concerne les lignes des côtes du delta, qu'avant l'aménagement de la rivière, les changements les plus récents ne concernaient que les côtes occidentales. Après aménagement, ils sont observés dans la même région-partie active du delta.
- que les barrages naturels des îles Thassopoula (à l'échelle locale) et Thassos (à l'échelle générale), n'ont pas permis la formation des profils sous-marins typiques, sauf dans le cas des côtes orientales, qui se trouvent en dehors du rayon d'action de ces îles.
- l'effet de la houle a donné trois types de côtes. Des barrières sur les côtes occidentales, une seule grande barrière sur les côtes centrales et des côtes linéaires dans la partie Est du delta.
- le transport des sédiments et la formation de la plate-forme sous-marine sont influencés par la présence des îles Thassos et Thassopoula.
- L'analyse morphométrique quantitative du delta, basée sur des méthodes proposées pour l'ensemble des deltas et adaptées aux particularités du delta du Nestos, exprime le régime de l'évolution du delta et de sa structure et conduit à des résultats importants dans le domaine hydrogéologique. La courbe caractéristique obtenue, présente une forme droite pour les côtes orientales et une convexité pour les côtes occidentales (indication quantitative d'un régime différent des deux parties du delta). L'index "B" de la distribution du volume des sédiments présente une valeur moyenne de 0.34. La pente générale des talus sous-marins, estimée par cette analyse conduit à la valeur  $HI = 0.37$  pour les côtes orientales (concavité),  $HI = 0.61$  pour les côtes centrales (convexité) et  $HI = 0.72$  pour les côtes occidentales (convexité).

L'analyse morphométrique du delta confirme la formation de la région, sous l'influence des divers facteurs et peut être utilisée pour la connaissance des conditions hydrogéologiques, avant la réalisation



des recherches hydrogéologiques précises. Ceci est important dans le cas de régions où le réseau hydrographique n'est plus actif ou dans les régions des deltas dont les conditions d'évolutions sont mal connues.

Quelques analyses minéralogiques fournissent des données sur la distribution des sédiments dans la plaine deltaïque.

La détermination des fossiles provenant des forages exécutés, la localisation de leurs concentrations et la corrélation avec d'autres régions, fournissent des données sur les conditions paléoécologiques de la région du delta, et plus précisément:

- l'âge Plio-Quaternaire
- une température plus élevée que la température actuelle
- une profondeur entre 10-50m.
- un milieu franchement marin et non fermé sans aucune trace de milieux dessalés proches
- un substratum meuble-sables grossiers
- une taphonomie qui correspond aux thanatocénoses ou, plus vraisemblablement aux thaphocénoses.

Les marbres qui se trouvent aux bordures NO du delta donnent une série de sources karstiques. Les sources principales se localisent dans la région de Paradissos-Toxotes qui n'est pas la région d'altitude la plus basse du contact entre les marbres et les sédiments plus récents. Cette altitude correspond à la région des sources Nea Karvali. La karstification des marbres semble être uniforme et étendue, selon les moyens utilisés et plus précisément:

- les formes karstiques à la surface et l'apparition des sources
- la comparaison des analyses chimiques et isotopiques des eaux des sources
- les conditions hydrodynamiques déterminées à partir de la comparaison des fluctuations du débit des sources, la comparaison des ces fluctuations avec celle des précipitations locales et générales et l'analyse des courbes de tarissement

- l'orientation de la fracturation des marbres qui facilite l'écoulement souterrain.

En ce qui concerne la plaine deltaïque elle-même, en dehors de la nappe superficielle phréatique, il y a un système de nappes profondes dont le comportement hydrodynamique varie entre captive, semi-captive et libre aux points et aux profondeurs diverses du delta. Les intercalations argilo-marneuses dans l'ensemble perméable provoquent l'apparition d'un artésianisme phréatique. L'utilisation des analyses isotopiques montre que les nappes profondes (au moins pour les forages considérés) se composent d'eaux anciennes et sont alimentées par les marbres et la rivière.

Les conditions piézométriques de la nappe phréatique sont, en général, normales, sauf le cas d'artésianisme phréatique et le cas où cette nappe n'est que l'extrémité vers la surface du système des nappes profondes. Pour qu'on puisse distinguer les écoulements souterrains (la corrélation directe n'étant pas efficace, à cause de la grande hétérogénéité), nous avons considéré l'ensemble des écoulements souterrains en utilisant les épaisseurs cumulatives des couches perméables aquifères. Les schémas obtenus présentent les axes d'écoulement souterrain d'une façon spectaculaire.

La qualité de l'eau du Nestos ne varie pas beaucoup au cours d'une année hydrologique. D'après des analyses chimiques des eaux phréatiques et profondes de la plaine deltaïque, nous avons pu établir les cartes diverses et exprimer les règles générales qui caractérisent les modifications de la qualité de ces eaux, ainsi que les modifications de l'intrusion marine. En plus des cartes conventionnelles, nous avons procédé à l'établissement des cartes Ca/Mg et I.e.b. pour mieux connaître le régime hydrochimique de la région.

Des essais de pompage ont été réalisés. L'analyse et l'élaboration des mesures de pompage se heurtaient à deux difficultés. D'abord l'anisotropie et l'hétérogénéité du delta éloignent le régime sédimentologique existant de celui demandé par les méthodes des essais de pompage. Ensuite, les forages exploitent toutes les couches aquifères pénétrées et parfois même des couches semi-perméables drainantes.



Pour l'estimation des paramètres hydrauliques nous avons utilisé diverses méthodes.

Selon la méthode proposée par Cooper et Jacob, nous avons obtenu trois séries de valeurs de Transmissivité pour trois séries de mesures (rabattement dans les forages et dans les piézomètres et remontée dans les forages). Les valeurs obtenues sont considérées sous divers critères, lithologiques, techniques et hydrodynamiques. Sous les mêmes critères sont considérées les valeurs obtenues par les deux variantes de la méthode Hantush-Jacob et par celle proposée par Boulton. Les limites d'application de ces méthodes et le régime donné conduisent aux résultats dus à la variabilité de la charge hydraulique entre le forage pompé et le piézomètre de mesure à la distance forage-piézomètre, au régime d'apparition de la drainance et à l'équipement des forages. Le changement rapide de la lithologie entre le forage et le piézomètre, fait que les réactions de la nappe au niveau du forage, pendant le pompage, n'arrivent pas au niveau du piézomètre ou bien elles arrivent é-moussées et de toute façon différentes des réactions originelles. Cette lithologie irrégulière associée au mauvais équipement de quelques forages ont éloigné la courbe de pompage de la forme normale. C'est pourquoi les méthodes basées sur le rabattement total obtenu (régime permanent) fournissent les plus réelles valeurs de la Transmissivité. Dans les mêmes conditions la méthode de Boulton ne peut par fournir des résultats acceptables en ajoutant ici le mauvais équipement des quelques forages, qui ne permet pas l'apparition typique de la drainance. De toute façon, surtout pour la partie Ouest du delta, la caractérisation du comportement d'un système de nappes aquifères comme captive, semi-captive ou libre, ne concerne qu'une région limitée autour du forage considéré. En ce qui concerne la drainance, il est évident que les diverses couches drainantes, pénétrées par les forages ne présentent pas simultanément ce phénomène à cause de leurs caractéristiques lithologiques et leur position par rapport à la profondeur d'installation de la pompe.

L'estimation des pertes de charge dans les forages n'était pas efficace, puisqu'il manque le pompage par paliers. Les indices qualitatifs et l'

application d'autres méthodes confirment que les pertes de charges ne sont pas importantes. De ceci il résulte que le Débit Spécifique estimé est accepté en ce qui concerne sa valeur numérique.

Pour la représentation cartographique de la Transmissivité déduite du Débit Spécifique nous avons mis en corrélation les valeurs de  $q$  avec chaque série des valeurs de  $T$ . La valeur du coefficient de corrélation sert de critère pour les valeurs de  $T$ . Ces corrélations ainsi que celle entre  $T$  et  $q$ , divisé par l'épaisseur des couches aquifères crépinées permettent la représentation cartographique de  $T$  dans la plaine deltaïque et pour une profondeur moyenne considérée de 150m.

Au terme de ces conclusions nous voudrions préciser trois points fondamentaux, à notre avis:

- (i) L'anarchie apparente de la distribution des sédiments d'un delta de type donné peut s'exprimer par des règles en fonction des particularités de chaque région et on peut donc définir le cadre hydrogéologique pour cette région.
- (ii) L'analyse géomorphologique d'un delta peut conduire à des résultats hydrogéologiques même avant la réalisation des travaux de recherches et même pour des régions où les conditions géologiques sont mal connues.
- (iii) Dans le cas d'un delta on ne peut pas appliquer les méthodes d'essais de pompage sans critiquer les résultats obtenus surtout en utilisant des forages d'exploitation (et des forages expérimentaux) dont l'équipement même correct, n'est pas celui demandé par les méthodes d'estimation des paramètres hydrauliques.



Au terme de ce mémoire, nous voudrions insister sur l'importance des ressources en eau que l'on peut exploiter dans les deltas comparables à celui du Nestos et qui sont nombreux sur tout le pourtour de la Méditerranée. Si nous n'avons pu résoudre tous les problèmes posés par la région que nous avons étudié et établir un véritable bilan hydrogéologique, faute de connaître le volume exact des apports inapparents depuis les marbres karstifiés ou les gneiss fissurés et celui des pertes vers la mer, nous espérons avoir montré l'intérêt des études morphométriques, sédimentologiques, hydrochimiques et hydrogéologiques pour la compréhension du comportement hydrogéologique des systèmes aquifères hétérogènes que sont les deltas comme celui du Nestos.

## BIBLIOGRAPHIE

- ALLEN G.P., LAURIER D., THOUVENIN J. (1979). Etude sédimentologique du delta du Mahakam. *Notes et Mémoires, TOTAL, n° 15.*
- ASTIE H., BOURGEOIS M., TRUPIN G. (1969). Représentation cartographique des Transmissivités déterminées en régime transitoire ou déduites du Débit Spécifique. *Bull. B.R.G.M. (2) Sect. III, n° 1, 33-42, 3f, 2p.*
- BABUSHKIN V.D., BOECKER T., BOREVSKY B.V., KOVALEVSKY V.S. (1975). Regime of subterranean water flows in karst régions. *Hydrog. of karstic terrains, I.U.G.S. s.B., n° 3, 69-78.*
- BAETZ, GOUVERNET, DE MARSILY, POTIE. Comportement hydraulique d'un matériel alluvial hétérogène. Vallée de la Môle (Var.).
- BATES C.C. (1953). Rational theory of Delta formation. *Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol. v 37, 2119-2162.*
- BESBES M. (1971). Les pertes de charge dans les forages. Application à la détermination des transmissivités par essais de pompage de courte durée. *Res. en eau en Tunisie, Div. res. en eau (Tunis), n°1, 15-100.*
- BESBES M. (1974). Analyse des pertes de charge dans les forages d'eau. *Bull. B.R.G.M. (2) Sect. III, n° 3, 261-270, 7 fig.*
- BONHOMME J. (1981-82). Cours Hydrodynamique souterraine. *D.E.A. Géologie Appliquée, Grenoble.*
- BOUWER H. (1978). Groundwater Hydrology. *Mc.Crow Hill.*
- BRAUN E.v. (1968). Die mesozoischen Hüllgesteine der SE-Rhodopen in Westhrazien (Griechenland). *Geol. JB, 85, 565-584, 3 Tfn.*
- BROWN R.H., KONOPLYANTSEV A.A., INESON J., KOVALEVSKY V.S. (1972). Ground water studies. An international guide for research and practice. *UNESCO studies and reports in hydrology 7, p.61, Paris.*
- CERULLI-IRRELI S. (1907). Fauna malacologica mariana. *Pal. Ital. XIII, Testo e Tavde, Pisa.*
- COLEMAN J.M., WRIGHT L.D. (1975). Modern river deltas: variability of processes and sand bodies. *Deltas 99-149, Houston Geolog. Soc. ed M. L. Broussard.*
- COLEMAN J.M., (1976). Deltas: processes of deposition and models for exploration. *Continuing Education Publication Company Inc., Champaign.*



- COOPER H.H., JACOB C.E. (1946). A generalised graphical method for evaluating formation constants and summarising well field history. *Am. Geoph. Un. Trans. vol. 27, 526-534.*
- CRICKMAY C.H., BATES C.C. (1955). Discussion of delta formation. *Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol. v 39, 107-114.*
- DAVIS S.N., DE WIEST R.J.M. (1966) *Hydrogeology. J. Wiley and sons, N. York.*
- DE GLEE G.J. (1951). Borekeningsmethoden voor de winning van grondwater. *Drinkwatervoorziening, 3e Vacantie cursus, 38-80, Moorman's periodieke pers, The Hague (The Netherlands).*
- DE WIEST R.J.M. (1965). *Geohydrology. J. Wiley and sons, N. York.*
- DIAMANTIS J., MARINOS P. (1983). L'évolution et l'alimentation des nappes aquifères de la plaine Xanthi-Vistonida. *Bull. Soc. Geol. Crèce, 1983.*
- DIMITROULAS CH., LEONTIADIS J. (1973). L'utilisation des isotopes naturels sur l'étude de circulation des eaux dans la nature. *C.H.E.A., C.E.N. DEMOCRITE, Athènes.*
- DOUNAS A., ORPHANOS G. (1965). Sur la reconnaissance hydrogéologique de la région de Thrace. *I.R.G.M., N°1250, Athènes.*
- ERÜNAL-ERENTÖZ L. (1958). Mollusques de Néogène des Bassins de Karaman, Adana et Hatay (Turquie). *Thèse, Ankara.*
- FERRIS J.G., KNOWLES D.B., BROWN R.H., STALLMEN R.W. (1962). Theory of aquifer tests. *Geological Survey water supply paper, 15-36-E, Washington.*
- FORKASIEWICZ J. (1970). Programmation des pompages d'essais appliqués à l'évaluation des paramètres des couches aquifères. *Bull B.R.G.M. III, n° 1, 59-66.*
- FORKASIEWICZ J. (1972). Interprétation des données de pompages d'essai pour l'évaluation des paramètres des aquifères. (aide-mémoire). *B.R.G.M., 2ème éd. revue et complétée, tirage 1977.*
- FRAZIER D.E. (1967). Recent deltaic deposits of the Mississippi River. Their development and Chronology. *Gulf. Coast. Ass. Geol. Soc. Trans. v 17, 287-315.*

- GALLOWAY W.E. (1975). Process framework for describing the morphologic and stratigraphic evolution of deltaic depositional system. *Deltas, 87-98, Houston Geolog. Soc. ed M.L. Broussard.*
- GURLIFFT D. (1953). Die morpho-tectonischen Einheiten West Thrakiens. *Ann. Geol. Pays Hell., 5, 230-235.*
- HANTUSH M.S., JACOB C.E. (1955). Non steady radial flow in an infinite leaky aquifer. *Am. Geoph. Union Trans., v. 38, 95-100.*
- HANTUSH M.S., (1964). *Hydraulics of wells, advance in hydroscience. ed. by VEN TE SHOW, Academic Press, vol. 1.*
- IL NUOVO CASTORO S.p.A.-FIRENTZE (1965). *Etude du barrage de Semeli. Athènes 1965.*
- JACOBSHAGEN V., DÜRR S., KOCKEL F., KOPP K.O., KOWALCZYK G., BERKHEMER H., BUTTNER D. (1978). Structure and geodynamic evolution of the Aegean region. *Alps, Hellenides, 537-564.*
- JETEL J., KRASNY J. (1968). Approximative aquifer characteristics in regional hydrogeological study. *Vestnik Ustr. eist. géol., 43, 459-461, Prague.*
- JETEL J. (1974). Complètement régional de l'information sur les paramètres pétrophysiques en vue de l'élaboration des modèles des systèmes aquifères. *Ass. Int. Hydrog., Memoires X. 199-203, Réunion de Montpellier.*
- JHONSON DIVISION UNIVERSAL OIL PRODUCTS Co (1972). *Ground water and wells. St. Paul, Minnesota, USA.*
- KISKYRAS D. (1964). Quelques opinions sur le volcanisme et la tectonique de l'Egée. *Bull. Soc. Géol. Gr., 6, 84-112.*
- KOJUMDGIEVA E., STRACHIMIROV B. (1960). Les fossiles de Bulgarie. *Acad. Scienc. Bulg. VII, Sofia.*
- KOPP K.O. (1961). *Geologie Thrakiens. I.N. Jb. Geol. Palaeont. Abh., 112, 3, 325-382.*
- KOURIS CH., TSAILA-MONOPOLI S., CHORIANOPOULOU P. (1980). Carte géologique de la Grèce 1:50.000. Feuille "Avdhira-Messi". *I.R.G.M. Athènes.*
- KOURIS CH. (1982). Carte géologique de la Grèce 1:50.000. Feuille "Chrysoupoli". *I.R.G.M. Athènes.*



- KOUSPARIS D. (1979). Seismic stratigraphy and basin development Nestos delta area, Northeastern, Greece. *Ph. D. Univ. Tulsa.*
- KRONBERG P. (1970). Carte géologique de la Grèce 1:50.000. Feuille "Lekani". *I.R.G.M. Athènes.*
- KRONBERG P., MEYER W., PILGER A. (1970) Geologie der Rila-Rhodope Masse zwischen Strimon und Nestos (Nordgriechenland). *Beih. geol. Jb.*, 88, 133-180.
- KRONBERG P., ELTGEN H. (1973). Carte géologique de la Grèce 1:50.000. Feuille "Xanthi". *I.R.G.M. Athènes.*
- KRONBERG P., RAITH M. (1977). Tectonics and metamorphism of the Rhodope crystalline complex in Eastern Greek Macedonia and parts of Western Thrace. *N. Jb. Geol. Palaeont. Mh., H., II*, 697-704.
- KRUSEMAN G.P., DE RIDDER N.A. (1970). Analysis and evaluation of pumping test data. *Intern. Inst. for land reclamation and improvement, Wageningen, the Netherlands.*
- LALECHOS N., SAVOYAT E. (1977). La sédimentation néogène dans le fossé nord égéen. *VI Coll. Geology of the Aegean Region, II*, 591-603.
- LEBLANC R.J. (1975). Significant studies of modern and ancient deltaic sediments. *Deltas, pp 13-85, Houston Geolog. Soc., ed. M.L. Broussard.*
- LEONTIADIS J. (1980). Recherches hydrologiques et isotopiques dans la région de Kalamos (Attique, Grèce)-bassin d'Assopos. *DEMO 80/6 G, C.H.E.A., C.E.N. DEMOCRITE, Athènes.*
- LEVEQUE P. (1969). Etude à l'aide du tritium, du karst des lacs Yliki et Paralimni (Béotie, Grèce). *C.R. Acad. Sc. Paris t 268, Série D*, 1686-1689.
- LEVEQUE P. (1969). Emploi des traceurs radioactifs naturels et artificiels en Hydrologie souterraine. *La Houille Blanche*, 8, 833-848.
- LEVEQUE P., CROS J.Cl., MAURIN C., SEVERAC J. (1972). Utilisation de tritium et des télédétections  $\gamma$  et infrarouge dans l'étude hydrologique de la région de Xanthi-Komotini en Thrace orientale (Grèce septentrionale). *C.R. Acad. Sc. Paris, t. 274, Série D*, 2447-2450.
- LOGAN J. (1964). Estimating transmissibility from routine production tests of waterwells. *Groundwater, V. 2, N°1*, 35-37.
- MALATESTA A. (1960). Malacofauna pleistocenica di Grammichele (Sicilia). *Mem. Serv. descr. Cart. Geol. d'Italia, XII*, Roma.

- MANGIN A. (1970). Contribution à l'étude des aquifères karstiques à partie de l'analyse des courbes de décrue et tarissement. *Ann. Spél.*, t. 25, fasc. 3, 581-610.
- MARATOS G., ANDRONOPOULOS B. (1965). Données nouvelles sur l'âge des phyllites du Rhodope. *Bull. Soc. Geol. Grèce*, 6, 1, 113-132.
- MARINOS P. (1969). Etudes géologiques d'aménagements hydrauliques dans le Lauragais. Etudes Hydrogéologiques en Camargue. *Thèse Doct. Ing. Univ. Grenoble.*
- MARINOS P. (1973). Sur la décroissance du débit des sources. Emploi d'une autre formule de tarissement et de prévision. *Ann. Geol. Pays Hell.* 25, 333-349.
- MARINOS P. (1974). Unusual methods calculating Transmissivity and about a new method based on springs discharge measurements. *Ann. Géol. de Pays Helléniques*, v. 26, 367-401, 9 fig.
- MARINOS P., STOURNARAS G. (1975). Possibilité de représentation cartographique des Transmissivités déduites de Débits Spécifiques. Le cas des puits incomplets et de rabattement important dans une nappe libre hétérogène. *Ann. Géol. de Pays Helléniques*, v. 27, 180-196, 9 fig., 1p.
- MARINOS P., DIAMANTIS J., STOURNARAS G. (1981). Les eaux souterraines dans la région de Komotini (Thrace, Grèce). Un cas des sources phréatiques, d'artésianisme phréatique et d'intercommunication de nappes phréatiques et profondes. *Ann. Géol. de Pays Helléniques*, v. 31/2.
- MICHEL R. (1978). Géologie générale. *Inst. Nat. Pol Grenoble.*
- MOORE D. (1966). Deltaic sedimentation Earth. *Science Reviews*, v1, 87-104.
- MUSCAT M. (1937). The flow of homogeneous fluids through porous media. *Mc Grow Hill.*
- NOUSSINANOS TH., LIVADAS G. et al (1976). Etude géologique du bassin Xanthi-Komotini. *Rapport EPP, Athènes (non publié).*
- ONORATINI G., CHAMLEY H., FONTON (DE) M.E. (1973). Note préliminaire sur la signification paléoclimatique des minéraux argileux dans le remplissage de l'abri Cornille (B.-du-Rh). *C.R. somm. S.G.F.*, 59-61.
- PALOC H. (1975). Karsts anciens et eaux actuelles. *Mém. 12 th. Congr. I.A.H.*, 229-238.



- PARENZAN P. (1976). Carta d'identita delle conchiglie del Mediterraneo. I. Gastropodi, II. Bivalvi. *Bios Taras Editrice, Taras*.
- POLLAK Z. (1967). Possibility to use simplified method of estimation of transmissibility and coefficient of permeability according to unit specific yield. *Assoc. Int. Hydrog., Memoires VIII, 481-485, Réunion d'Istanbul*.
- POLUBARINOVA-COCHINA P.Y. (1962). Theory of ground water movement. Translated from Russian. *Princeton Univ. Press, Princeton*.
- REVELLE R. (1941). Criteria for recognition of sea water in ground waters. *Trans. Amer. Geoph. Union, v. 22, 593-597*.
- RICHARDS L.A. (ed. 1954). Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. *Agr. Handb. 60, U.S., Dept. Agr., Washington, D C, 160p*.
- SARROT-REYNAULD J. (1965). Style tectonique et morphologique de la bordure occidentale de la chaîne de Belledone au Sud d'Allevard. *Trav. Lab. Geol. Grenoble, t 41, 7-31*.
- SARROT-REYNAULD J. (1981-82). Cours Hydrogéologie. *D.E.A. Géologie Appliquée, Grenoble*.
- SARROT-REYNAULD S., SARROT-REYNAULD J. (1981). Circulation des eaux dans les roches fissurées. Hydrogéologie du massif des Grandes-Rous-ses (Alpes françaises). *C.R. 106<sup>e</sup> Congr. nat. des Soc. Sav., Perpignan, sc. fasc. III, 135-146*.
- SAVADOGO A.N., SARROT-REYNAULD J. (1981). Apports des analyses chimiques et isotopiques à la connaissance du mode de recharge des nappes aquifères. Alimentation des nappes en Haute-Volta. *C.R. 106<sup>e</sup> Congr. nat. des Soc. Sav., Perpignan, sc. fasc. III, 123-134*.
- SCHNEEBELI G. (1966). Hydraulique souterraine. *Eyrolles, Paris*.
- SCHOELLER H. (1962). Les eaux souterraines. *Masson et cie éd. Paris*.
- SCHOELLER H. (1969). L'acide carbonique des eaux souterraines. *Bull. B.R.G.M. (2), III, 1, 1-32*.
- SCRUTTON P.C. (1960). Delta building and the deltaic sequence. *Recent sediments of the north west gulf of Mexico, F.P. SHEPARD et al eds.-Am. Ass. Petrol Geol. Publ.*

- SIDIROPOULOS D. (1980). Geologie der Griechischen Tertiaerbecken Nestos-Prinos und Xanthi-Komotini. *Geolog. Inst. der Univ. Jn. Koeln, Sonderveroeffentlichungen, N° 39*.
- STOURNARAS G. (1980). Rapport sur les possibilités d'alimentation de la zone industrielle de Kavala, avec les eaux souterraines de la région. *Régions Industrielles de la Banque Hellénique d'évolution industrielle-VIPETVA, Athènes (non publié)*.
- STOURNARAS G. (1982). Etude Hydrogéologique, hydrodynamique et hydrochimique de la région du delta du Nestos (Grèce). Etude préliminaire. *Mém. D.E.A. Geol. Appl. Opt. Hydrog. Univ. Grenoble*.
- THEIS C.V. (1935). The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground water storage. *Trans. Amer. Geoph. Union, 16, 519-524*.
- THEIS C.V. (1963) Estimating the transmissibility of a water table aquifer from the specific capacity of a well. *U.S. Geol. Surv. Water Supply Paper, 1536-1, 332-336*.
- TODD D.K. (1959). Ground Water Hydrology. *J. Wiley and Sons, N.York*.
- TRIKKALINOS J. (1955). Über die Wechselbeziehungen zwischen tektonischen Bau und den Erdbeben in Griechenland. *Ann. Géol. Pays Hell. 6, 33-41, 3 Tf.*
- VACHAUD G. (1975). Hydrodynamique en milieu poreux. *Inst. Nat. Pol. Grenoble*.
- VAFIADHIS P. (1977). La technique des forages. *Salonique*.
- VAN STRAATEN L.M.J.U. (1961). Some recent advances in the study of deltaic sedimentation. *Geol. Journal, Vol. 2, 411-442*.
- VERGIS S. (1981). Recherche hydrologique du bassin et du delta du Nestos (rap. non publié). *I.R.G.M.*
- VERGIS S. (1981). Elements hydrologiques et hydrogéologiques du bassin et du delta du Nestos. *I.R.G.M.*
- WALTON W.C. (1970). Ground water resource evaluation. *Mc Grow Hill*.
- WILCOX L.V. (1948). The quality of water for irrigation use. *U.S. Dept. Agr. Tech. Bull. 962, Washington D.C., 40p*.



WRIGHT L.D., COLEMAN J.M. (1972). River Delta morphology. Wave, climate and the role of subaqueous profile. *Science*, v. 176, 282-284.

WRIGHT L.D., COLEMAN J.M. (1973). Variations in morphology of major river deltas as functions of ocean wave and river discharge regimes. *Am. Ass. Petrol. Geol. Bull.*, 47, 370-398.

WRIGHT L.D. (1977). Sediment transport and deposition of river mouths. A synthesis. *Bull. Geol. Soc. Am.* v 88, 857-868.

ZAMANKHAN M., SARROT-REYNAULD J. (1978). Phénomènes karstiques, âge et mode de circulation des eaux dans les calcaires Asmari-Djahrom de la région de Chiraz (Iran). *C.R. 103<sup>e</sup> Cong. nat. des Soc. Sav., Nancy*, sc. fasc. IV, 165-176.

## APPENDICE



I

ANALYSES CHIMIQUES  
DES EAUX SOUTERRAINES

(NAPPE PHRÉATIQUE)



PARTIE OUEST - OCTOBRE

N° du puits	P H		Condit.électr. $\mu\text{mhos/cm}$ 25°C	Dureté			ions en meq/l							Na rest.	S.A.R.	C - S
	valeur	°C		T	P	TL	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>			
1	7.45	20.0	1200	4.5	0.0	4.5	4.50	7.00	0.66	0.90	0.70	10.43	0.13	5.4	11.6	C <sub>3</sub> -S <sub>2</sub>
2	7.80	20.0	1156	7.3	0.0	7.3	3.80	7.80	0.86	1.70	0.90	9.74	0.12	5.2	8.6	C <sub>3</sub> -S <sub>2</sub>
3	7.80	20.0	868	5.0	0.0	5.0	1.70	7.00	trac.	1.35	0.45	7.30	0.10	5.7	7.7	C <sub>3</sub> -S <sub>2</sub>
4	7.50	18.0	881	5.0	0.0	5.0	1.40	7.60	0.57	1.15	0.65	7.65	0.12	5.8	8.5	C <sub>3</sub> -S <sub>2</sub>
5	7.95	20.0	878	4.3	0.0	4.3	1.70	7.90	trac.	0.94	0.60	7.88	0.18	6.36	9.2	C <sub>3</sub> -S <sub>2</sub>
6	7.65	20.5	930	3.6	0.0	3.6	1.90	8.20	0.10	0.95	0.35	8.61	0.29	6.9	9.0	C <sub>3</sub> -S <sub>1</sub>
8	7.65	18.0	1034	3.4	0.0	3.4	0.80	8.70	2.00	0.90	0.60	9.88	0.12	7.2	8.0	C <sub>3</sub> -S <sub>2</sub>
11	7.25	20.0	2224	16.0	0.0	16.0	10.50	10.10	trac.	3.80	1.90	14.60	0.30	4.4	10.7	C <sub>3</sub> -S <sub>2</sub>
12	7.40	18.0	1833	19.0	0.0	19.0	10.60	7.90	0.24	4.60	2.20	11.82	0.12	1.1	6.4	C <sub>3</sub> -S <sub>1</sub>
15	6.95	20.5	515	11.5	0.0	11.5	1.15	4.20	0.15	2.80	1.30	1.20	0.20	0.10	0.85	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>
22	7.60	18.0	1487	21.6	0.0	21.6	5.60	9.52	trac.	5.00	2.70	6.96	0.46	2.0	3.55	C <sub>3</sub> -S <sub>1</sub>
25	7.40	20.0	1968	13.2	0.0	13.2	10.80	9.10	2.86	2.05	1.05	15.04	0.15	4.4	9.8	C <sub>3</sub> -S <sub>2</sub>
26	7.30	10.5	1650	15.8	0.0	15.8	8.90	7.90	0.76	2.70	2.95	11.79	0.12	2.25	7.0	C <sub>3</sub> -S <sub>2</sub>
27	7.30	20.0	1423	12.7	0.0	12.7	6.80	7.60	trac.	1.78	2.75	9.44	0.43	3.07	6.25	C <sub>3</sub> -S <sub>2</sub>
29	7.25	20.0	261	6.2	0.4	6.6	0.50	2.20	0.21	1.80	0.55	0.50	0.06	0.0	0.46	C <sub>1</sub> -S <sub>1</sub>
30	7.30	18.0	874	10.5	0.0	10.5	1.25	8.65	trac.	2.70	1.05	6.31	0.14	5.2	4.7	C <sub>3</sub> -S <sub>1</sub>
33	8.10	18.0	823	1.5	0.0	1.5	1.90	6.90	trac.	0.35	0.20	8.14	0.12	6.35	15.7	C <sub>3</sub> -S <sub>3</sub>
39	7.50	20.0	395	10.9	2.3	13.2	0.60	3.90	0.29	3.80	0.90	0.17	0.02	0.0	0.11	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>
34																
37																
38	7.15	20.0	405	11.3	0.5	11.8	0.30	4.05	0.42	3.00	1.20	0.52	0.05	0.00	0.36	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>
41	7.35	20.0	328	6.7	0.0	6.7	0.45	3.20	0.03	1.60	0.80	1.17	0.11	0.8	1.06	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>
44	7.30	20.0	533	13.7	2.5	16.2	0.75	4.90	0.45	3.35	1.45	1.22	0.08	0.0	0.79	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>
49	7.00	20.5	12760	33.7	67.2	100.5	131.67	11.90	18.80	12.00	23.90	123.91	2.56	0.0	27.70	C <sub>4</sub> -S <sub>1</sub>
50	7.00	18.0	5171	8.1	101.7	109.8	50.00	2.90	3.91	21.80	17.40	16.96	0.65	0.0	3.83	C <sub>4</sub> -S <sub>2</sub>
51	7.15	20.0	3936	15.4	0.0	15.4	28.50	13.70	trac.	1.80	3.70	36.27	0.43	8.2	21.80	C <sub>4</sub> -S <sub>4</sub>
54	7.15	20.0	451	9.5	0.0	9.5	0.50	3.40	0.32	2.50	0.90	0.76	0.06	0.0	0.58	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>
55	6.80	20.0	334	9.0	0.0	9.0	0.40	3.20	0.05	2.50	0.70	0.33	0.12	0.0	0.26	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>
56	7.30	20.0	667	10.4	0.0	10.4	0.80	5.60	0.99	2.50	1.20	3.60	0.09	1.9	2.65	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>
58	7.35	20.0	693	8.4	0.0	8.4	1.45	6.00	-	1.80	1.20	4.28	0.17	3.0	1.90	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>
63	7.55	20.55	575	11.5	5.0	16.5	1.10	4.10	1.14	4.80	1.20	0.70	0.04	0.0	0.40	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>
64	7.80	18.0	1222	7.3	0.0	7.3	4.80	8.00	0.12	1.60	1.00	10.14	0.18	5.4	8.90	C <sub>3</sub> -S <sub>2</sub>
66	7.45	20.0	515	10.9	2.3	13.2	0.40	3.90	1.00	3.30	1.40	0.78	0.15	0.0	0.50	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>
67	7.70	18.0	1340	9.1	0.0	9.1	5.20	8.00	1.23	2.20	1.05	11.04	0.14	4.75	8.60	C <sub>3</sub> -S <sub>2</sub>
68	7.90	18.0	988	4.2	0.0	4.2	1.20	8.00	0.00	1.24	0.25	7.57	0.14	6.51	8.80	C <sub>3</sub> -S <sub>2</sub>
69	7.70	20.5	915	8.8	0.0	8.8	2.10	6.60	1.29	2.10	1.05	6.78	0.06	3.45	5.30	C <sub>3</sub> -S <sub>1</sub>
71	8.20	18.0	1024	2.9	0.0	2.9	1.00	8.80	trac.	0.85	0.20	8.42	0.33	7.75	11.50	C <sub>3</sub> -S <sub>2</sub>
76	7.55	20.5	2365	15.8	0.0	15.8	10.70	15.20	trac.	1.70	3.95	19.60	0.65	9.75	11.70	C <sub>4</sub> -S <sub>2</sub>
77	8.00	18.0	917	3.6	0.0	3.6	0.70	8.55	trac.	1.00	0.34	7.62	0.29	7.21	9.30	C <sub>3</sub> -S <sub>2</sub>
78	20.50	20.5	880	5.5	0.0	5.5	1.10	8.10	trac.	1.20	0.65	6.95	0.30	6.15	6.95	C <sub>3</sub> -S <sub>1</sub>
79	7.40	20.5	803	21.3	0.8	22.1	1.10	7.60	1.50	4.35	3.55	2.15	0.15	0.0	1.10	C <sub>3</sub> -S <sub>1</sub>
81	7.40	20.5	430	9.8	1.1	10.9	0.60	3.50	0.92	2.60	1.30	1.00	0.12	0.0	0.71	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>
84	8.0	20.5	572	9.6	0.0	9.6	1.10	4.80	trac.	2.47	0.95	2.57	0.11	1.58	1.95	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>
86																
87	7.25	20.5	430	11.2	1.3	12.5	0.30	4.00	1.38	2.70	1.75	1.13	0.10	0.0	0.75	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>
89	8.30	18.0	1839	10.1	0.0	10.1	1.20	16.85	1.50	1.85	1.75	15.67	0.28	4.37	11.60	C <sub>3</sub> -S <sub>2</sub>
93	7.55	20.0	1746	10.9	0.0	10.9	10.15	6.60	1.30	2.50	1.40	14.07	0.08	2.7	10.00	C <sub>3</sub> -S <sub>2</sub>
95	7.70	20.5	1007	5.5	0.0	5.5	2.90	7.00	0.25	1.20	0.75	8.12	0.08	5.05	5.80	C <sub>3</sub> -S <sub>1</sub>
97																
100	7.50	20.5	658	14.6	0.0	14.6	1.10	5.80	0.81	2.80	2.40	2.48	0.03	0.60	1.50	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>
103	7.70	18.0	670	8.4	0.0	8.4	1.20	5.85	0.11	1.60	1.40	3.79	0.37	2.85	3.10	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>
105																
106	7.50	20.5	650	16.2	4.0	20.2	0.60	5.90	1.71	5.00	2.20	0.97	0.04	0.0	0.50	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>
142	7.25	19.5	429	12.04	0.28	12.32	0.40	4.30	trac.	4.10	0.30	0.29	0.01	0.0	0.24	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>
151	7.35	19.5	415.9	12.04	0.28	12.32	0.30	4.30	trac.	3.50	0.90	0.18	0.02	0.0	0.15	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>
154	7.05	19.5	1101.5	20.3	0.0	20.3	2.50	7.60	0.56	5.55	1.70	2.83	0.58	0.35	0.32	C <sub>3</sub> -S <sub>1</sub>
155																C - S <sub>1</sub>
157	7.35	19.5	420.9	11.90	0.14	12.04	0.35	4.25	trac.	3.60	0.70	0.28	0.02	0.0	0.23	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>
159	7.15	19.5	665.4	13.58	1.24	15.28	1.05	4.85	0.63	4.90	0.75	0.80	0.08	0.0	0.44	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>
160	7.10	19.5	852	16.38	2.38	18.76	1.75	5.85	1.11	5.40	1.30	1.85	0.16	0.0	1.02	C <sub>3</sub> -S <sub>1</sub>
163	7.40	19.5	573.2	13.02	0.0	13.02	0.55	5.35	trac.	4.10	0.55	1.20	0.05	0.7	0.79	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>
165	7.45	19.5	415.8	11.76	0.14	11.90	0.35	4.20	trac.	3.60	0.65	0.27	0.03	0.0	0.18	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>
175	7.35	19.5	406.1	12.04	0.0	12.04	0.30	4.25	trac.	3.55	0.75	0.22	0.03	0.35	0.15	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>
176	7.35	19.5	406.8	11.90	0.4	12.30	0.35	4.25	trac.	3.50	0.88	0.20	0.02	0.22	0.14	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>



N°du puits	P H		Condit.électr. µmhos/cm 25°C	Dureté			ions en meq/l								Na rest.	S.A.R.	C - S
	valeur	températ. °C		T	P	TL	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>				
1	7.65	14.5	11.75	4.3	0.0	4.3	4.6	6.75	1.50	1.20	0.35	11.18	0.12	5.20	12.9	C <sub>3</sub> S <sub>3</sub>	
2	7.60	14.5	11.56	6.7	0.0	6.7	3.8	7.55	1.94	1.60	0.80	10.80	0.09	5.15	9.8	C <sub>3</sub> S <sub>2</sub>	
3	7.80	14.5	8.43	4.48	0.0	4.48	1.7	7.30	1.04	1.30	0.30	8.35	0.10	5.70	11.1	C <sub>3</sub> S <sub>2</sub>	
4	7.70	14.5	824	4.0	0.0	4.0	1.5	7.30	1.12	1.10	0.35	8.35	6.82	15.85	10.0	C <sub>3</sub> S <sub>2</sub>	
5	7.80	14.5	870	3.6	0.0	3.6	2.3	7.75	1.87	1.10	0.20	10.43	0.19	6.45	13.0	C <sub>3</sub> S <sub>2</sub>	
6	7.80	14.5	913	3.4	0.0	3.4	1.85	8.30	0.98	0.90	0.30	0.74	0.19	7.10	12.4	C <sub>3</sub> S <sub>2</sub>	
8	7.70	14.5	1022	3.7	0.0	3.7	2.6	8.50	1.29	1.10	0.20	10.96	0.13	7.20	13.5	C <sub>3</sub> S <sub>2</sub>	
11	7.40	14.5	1443	15.1	0.0	15.1	12.0	10.00	0.58	4.00	1.40	16.96	0.22	4.60	10.3	C <sub>3</sub> S <sub>2</sub>	
12	7.40	14.5	1775	18.2	0.0	18.2	10.7	7.60	0.07	4.90	1.60	11.74	0.13	1.20	6.5	C <sub>3</sub> S <sub>2</sub>	
15	7.20	14.5	443	9.8	0.0	9.8	0.9	3.55	0.28	2.70	0.80	1.13	0.12	0.05	0.6	C <sub>3</sub> S <sub>1</sub>	
22	7.55	14.5	1303	16.9	0.0	16.9	5.6	7.50	0.72	3.60	2.45	7.30	0.49	1.45	4.1	C <sub>3</sub> S <sub>1</sub>	
25	7.70	14.5	1916	12.0	0.0	12.0	10.8	8.95	0.19	2.70	1.60	15.50	0.14	4.65	10.6	C <sub>3</sub> S <sub>2</sub>	
26	7.90	14.5	1636	15.1	0.0	15.1	9.0	7.70	0.58	3.20	2.20	11.75	0.13	2.30	7.1	C <sub>3</sub> S <sub>2</sub>	
27	7.20	14.5	1328	14.0	0.0	14.0	6.0	7.90	0.40	3.00	2.00	8.73	1.43	2.90	5.7	C <sub>3</sub> S <sub>1</sub>	
29	7.20	14.5	409	10.9	0.0	10.9	0.6	3.90	0.07	3.00	0.90	0.57	0.10	0.00	4.1	C <sub>3</sub> S <sub>1</sub>	
30	7.20	14.5	702	14.0	2.0	11.0	2.5	5.00	0.25	3.60	2.10	1.93	0.12	0.00	0.84	C <sub>3</sub> S <sub>1</sub>	
33	7.80	14.5	792	1.3	0.0	1.3	1.8	6.80	0.88	0.35	0.01	9.00	0.12	6.44	20.0	C <sub>3</sub> S <sub>4</sub>	
34	7.60	14.5	1864	6.7	0.0	6.7	10.1	9.05	0.75	0.90	1.50	16.79	0.54	6.65	15.3	C <sub>3</sub> S <sub>3</sub>	
37	7.70	14.5	2171	16.0	0.0	16.0	0.4	11.70	2.30	3.20	2.50	13.29	0.41	6.00	7.5	C <sub>3</sub> S <sub>2</sub>	
38	7.50	14.5	383	9.5	2.0	11.5	0.4	3.40	0.82	3.00	1.10	0.48	0.04	0.00	0.24	C <sub>3</sub> S <sub>1</sub>	
39	7.50	14.5	613	12.4	3.3	15.7	1.4	4.45	1.00	4.90	0.70	1.35	0.01	0.00	0.7	C <sub>3</sub> S <sub>1</sub>	
41	7.60	14.5	396	7.3	0.0	7.3	0.5	3.35	1.25	1.90	0.90	2.35	0.15	0.75	2.0	C <sub>3</sub> S <sub>1</sub>	
44	7.10	14.5	505	12.0	0.6	12.6	0.85	4.30	0.76	3.20	1.30	1.35	0.06	0.00	0.9	C <sub>3</sub> S <sub>1</sub>	
49	7.05	14.5	9465	35.3	8.4	43.7	92.5	12.60	5.60	6.60	9.00	93.23	1.87	0.00	12.0	C <sub>3</sub> S <sub>4</sub>	
51	7.35	14.5	3824	14.8	0.0	14.8	28.25	13.30	1.13	1.20	4.10	36.96	0.42	8.00	22.8	C <sub>3</sub> S <sub>4</sub>	
54	7.80	14.5	380	8.8	1.8	10.6	0.5	3.15	1.22	2.70	1.10	1.00	0.07	0.00	0.7	C <sub>2</sub> S <sub>1</sub>	
55	6.90	14.5	322	7.6	0.1	7.7	0.5	2.70	0.15	2.25	0.50	0.43	0.17	0.00	0.4	C <sub>2</sub> S <sub>1</sub>	
56	7.40	14.5	1098	21.8	0.0	21.8	3.55	8.10	1.32	5.60	2.20	4.48	0.69	0.30	2.3	C <sub>3</sub> S <sub>1</sub>	
58	7.40	14.5	858	8.1	0.0	8.1	3.60	5.90	0.41	1.60	1.30	6.78	0.23	3.00	5.7	C <sub>3</sub> S <sub>1</sub>	
63	7.40	14.5	909	10.6	0.0	10.6	3.80	5.95	0.16	2.20	1.60	5.91	0.20	2.15	4.4	C <sub>3</sub> S <sub>1</sub>	
64	7.40	14.5	1199	6.4	0.0	6.4	4.95	7.80	1.56	1.70	0.60	11.85	0.16	5.50	11.3	C <sub>3</sub> S <sub>2</sub>	
66	7.60	14.5	394	8.7	1.1	9.8	0.45	3.10	0.95	2.53	1.00	0.91	0.12	0.00	0.7	C <sub>2</sub> S <sub>1</sub>	
67	7.70	14.5	1313	9.2	0.0	9.2	5.80	7.55	0.96	2.20	1.10	10.86	0.15	4.25	8.5	C <sub>3</sub> S <sub>2</sub>	
68	7.85	14.5	808	2.8	0.0	2.8	1.35	7.45	1.20	1.00	0.00	8.86	0.14	6.45	12.5	C <sub>3</sub> S <sub>2</sub>	
69	7.70	14.5	896	7.0	0.0	7.8	2.10	6.45	1.84	1.90	0.60	7.83	0.06	3.95	5.0	C <sub>3</sub> S <sub>1</sub>	
71	8.20	14.5	852	1.1	0.0	1.1	1.25	8.05	1.55	0.40	0.00	10.17	0.25	7.65	22.0	C <sub>3</sub> S <sub>4</sub>	
76	7.60	14.5	2587	14.8	0.0	14.8	12.50	15.95	0.15	2.00	3.30	22.57	0.73	10.65	13.8	C <sub>4</sub> S <sub>3</sub>	
77	8.00	14.5	820	1.1	0.0	1.1	1.10	7.95	1.02	0.40	0.00	9.39	0.28	7.55	20.9	C <sub>3</sub> S <sub>4</sub>	
78	7.80	14.5	820	4.5	0.0	4.5	1.10	7.85	1.37	0.60	1.00	8.43	0.29	6.25	9.4	C <sub>3</sub> S <sub>2</sub>	
79	7.45	14.5	808	19.6	0.0	19.0	1.10	7.75	1.02	4.80	2.20	2.52	0.15	0.50	1.3	C <sub>3</sub> S <sub>1</sub>	
81	7.50	14.5	694	13.6	4.6	18.2	0.80	4.85	1.91	5.50	1.00	1.10	0.05	0.00	0.61	C <sub>3</sub> S <sub>1</sub>	
84	7.15	14.5	1328	22.7	0.0	22.7	2.65	9.55	2.44	4.90	3.20	6.45	0.09	1.45	3.20	C <sub>3</sub> S <sub>1</sub>	
86	7.30	14.5	1047	21.6	0.0	21.6	3.50	7.70	0.16	6.20	1.50	3.27	0.39	0.00	1.76	C <sub>3</sub> S <sub>1</sub>	
89	7.55	14.0	1979	17.6	0.0	17.6	1.80	21.05	3.26	0.04	3.50	2.80	19.57	14.28	14.75	C <sub>3</sub> S <sub>2</sub>	
93	7.65	14.0	1762	10.6	0.0	10.6	10.60	6.60	1.64	2.60	1.20	15.00	0.08	2.80	7.70	C <sub>3</sub> S <sub>2</sub>	
97	7.55	14.0	753	11.5	0.0	11.5	1.00	6.95	0.18	2.50	1.60	4.06	0.07	2.85	2.90	C <sub>2</sub> S <sub>1</sub>	
100	7.85	14.0	728	14.8	0.0	14.8	1.10	0.20	6.60	1.06	3.00	2.30	3.74	1.30	2.30	C <sub>2</sub> S <sub>1</sub>	
103	7.50	14.0	626	9.8	0.0	9.8	1.40	5.60	0.93	1.50	2.00	4.13	0.33	2.10	3.10	C <sub>2</sub> S <sub>1</sub>	
105	7.10	14.0	572	12.9	2.2	15.1	0.70	4.60	1.29	4.03	4.10	1.20	0.02	0.00	0.70	C <sub>2</sub> S <sub>1</sub>	
106	7.50	14.0	581	14.3	8.0	14.3	0.65	5.35	0.10	4.80	0.30	0.97	0.03	0.25	0.60	C <sub>2</sub> S <sub>1</sub>	
142	7.60	14.0	421	11.8	1.4	13.2	0.40	4.20	0.25	4.30	0.40	0.22	0.01	0.00	0.14	C <sub>2</sub> S <sub>1</sub>	
155	7.40	14.0	753	15.5	3.8	19.3	1.60	5.55	1.29	0.09	5.90	1.00	1.57	0.00	0.85	C <sub>2</sub> S <sub>1</sub>	
157	7.00	14.0	805	15.5	3.8	19.3	1.75	5.55	1.80	6.00	0.90	2.26	0.05	0.00	1.20	C <sub>3</sub> S <sub>1</sub>	
159	7.10	14.0	626	12.7	4.4	17.1	0.90	4.55	1.44	5.40	0.70	0.78	0.09	0.00	0.40	C <sub>2</sub> S <sub>1</sub>	
163	7.20	14.0	444	7.8	4.2	12.0	1.00	2.80	0.83	3.80	0.50	0.28	0.18	0.00	0.20	C <sub>2</sub> S <sub>1</sub>	
175	7.30	14.0	396	11.3	1.3	12.6	0.45	4.05	0.17	3.80	0.70	0.17	0.02	0.00	0.10	C <sub>2</sub> S <sub>1</sub>	
176	7.40	14.0	373	10.6	1.7	12.3	0.30	3.80	0.46	3.80	0.60	0.17	0.01	0.00	0.10	C <sub>2</sub> S <sub>1</sub>	

N° du puits	P H		Condit.électr. µmhos/cm 25°C	Dureté			ions en meq/l								Na rest.	S.A.R.	C - S
	valeur	tempér. °C		T	P	TL	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>				
251	7.6	18.0	529	14.3	0.0	14.3	0.70	5.10	0.24	3.50	1.60	0.91	0.03	0.0	0.57	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>	
255	7.5	18.0	499	13.3	0.1	13.4	0.65	4.75	0.27	3.40	1.40	0.84	0.03	0.0	0.54	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>	
258	7.25	18.0	881	17.1	0.8	17.9	1.90	6.10	1.27	4.50	1.90	0.61	0.26	0.0	1.45	C <sub>3</sub> -S <sub>1</sub>	
259	6.95	18.0	1022	16.9	1.0	17.9	4.70	6.05	trac.	3.55	2.85	4.02	0.33	0.0	2.23	C <sub>3</sub> -S <sub>1</sub>	
260	7.4	18.5	1022	7.6	0.0	7.6	6.90	5.80	1.03	1.70	1.00	11.00	0.03	3.1	9.50	C <sub>3</sub> -S <sub>2</sub>	
262	6.8	18.5	357	5.4	3.3	8.7	2.00	1.92	0.08	1.90	1.20	0.86	0.04	0.0	0.70	C <sub>3</sub> -S <sub>1</sub>	
264	7.7	18.5	928	15.7	3.6	19.3	1.90	5.60	2.44	4.85	2.03	2.09	0.95	0.0	1.13	C <sub>3</sub> -S <sub>1</sub>	
265	6.9	18.0	552	14.0	0.3	14.3	1.30	5.00	0.08	3.75	1.35	1.38	0.06	0.0	0.86	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>	
266	7.1	18.5	376	9.5	0.0	9.5	0.80	3.45	0.05	2.60	0.80	0.86	0.04	0.05	0.66	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>	
269	7.1	18.5	1739	19.7	15.3	35.0	6.30	7.05	4.20	8.00	4.50	7.83	0.79	0.0	3.13	C <sub>3</sub> -S <sub>1</sub>	
270	7.3	18.5	294	6.7	0.6	7.3	0.90	2.40	0.04	1.80	0.80	0.70	0.04	0.0	0.61	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>	
274	7.2	18.5	411	6.7	0.9	7.6	1.55	2.40	0.34	1.95	0.75	0.80	0.79	0.0	0.69	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>	
279	7.1	18.5	494	14.6	0.0	14.6	0.95	5.20	trac.	3.90	1.30	0.91	0.04	0.0	0.98	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>	
298	6.75	18.5	165	2.5	1.0	3.5	0.50	0.90	0.35	0.85	0.40	0.46	0.04	0.0	0.58	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>	
299	6.6	18.5	607	13													



N° du puits	P H		Condit.élect µmhos/cm 25°C	D u r e t é			ions en meq/l							Na rest.	S.A.R.	C - S
	valeur	tempér. °C		T	P	TL	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>			
251	7.4	14.5	504	13.7	0.0	13.7	0.85	4.95	0.00	3.30	1.60	0.89	0.02	0.05	0.60	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>
255	7.2	15.0	485	12.5	1.2	13.7	0.80	271.45	24.48	3.30	1.60	0.83	0.03	0.00	0.60	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>
258	7.4	15.0	730	12.3	0.3	12.6	2.50	4.40	0.19	2.90	1.60	2.46	0.13	0.00	1.60	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>
259	7.2	15.0	1098	15.8	0.2	16.0	3.85	5.65	1.64	3.60	2.10	5.22	0.22	0.00	3.10	C <sub>3</sub> -S <sub>1</sub>
260	7.5	15.0	1303	6.6	1.2	7.8	6.30	2.35	3.32	1.80	1.00	9.13	0.04	0.00	6.60	C <sub>3</sub> -S <sub>2</sub>
262	6.8	15.0	894	6.7	4.5	11.2	1.95	2.40	3.34	2.80	1.20	0.98	2.71	0.00	0.70	C <sub>3</sub> -S <sub>1</sub>
264	7.2	15.0	1379	12.6	17.1	29.7	6.55	4.50	4.05	7.80	2.80	4.35	0.15	0.00	1.90	C <sub>3</sub> -S <sub>1</sub>
265	7.3	15.0	524	12.6	0.8	13.4	1.05	4.50	0.15	3.90	0.90	0.85	0.05	0.00	0.54	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>
269	6.95	15.0	1813	22.4	17.1	39.5	6.30	8.00	4.35	9.80	4.30	3.91	0.66	0.00	1.47	C <sub>3</sub> -S <sub>1</sub>
270	7.15	15.0	472	9.8	1.7	11.5	1.05	3.50	0.78	2.90	1.20	1.20	0.03	0.00	0.80	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>
274	7.5	15.0	498	6.8	2.2	9.0	1.25	2.45	1.10	2.40	0.80	0.72	0.88	0.00	0.57	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>
279	7.1	15.0	492	13.7	0.0	13.7	0.50	5.05	0.17	3.80	1.10	0.78	0.04	0.15	0.50	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>
238	7.35	15.0	879	11.6	2.1	13.7	0.85	4.15	0.66	3.50	1.40	0.72	0.04	0.00	0.45	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>
299	7.05	15.0	266	5.3	0.0	5.3	0.55	2.40	0.14	1.60	0.30	0.81	0.38	0.50	1.00	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>
308	7.25	15.0	444	4.6	4.6	9.2	1.05	1.65	2.41	1.80	1.30	1.84	0.17	0.00	1.20	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>
316	7.7	15.0	2209	6.4	0.0	6.4	12.50	8.25	1.71	1.10	1.20	19.78	0.38	5.95	18.70	C <sub>3</sub> -S <sub>4</sub>
317	7.6	15.0	970	7.0	0.0	7.0	3.50	5.80	0.83	1.40	1.10	7.39	0.24	3.30	6.60	C <sub>3</sub> -S <sub>2</sub>
323	7.5	15.0	2746	20.2	5.3	25.5	19.90	7.20	0.04	4.50	4.60	16.34	1.74	0.00	7.60	C <sub>4</sub> -S <sub>2</sub>
325	7.7	15.0	958	12.3	0.0	12.3	4.05	5.30	0.34	2.80	1.60	5.22	0.07	0.90	3.50	C <sub>3</sub> -S <sub>1</sub>
328	7.55	16.5	1084	12.6	5.3	17.9	5.35	4.50	1.44	4.20	2.20	4.82	0.07	0.00	2.70	C <sub>3</sub> -S <sub>1</sub>
336	7.6	16.5	1926	12.3	0.0	12.3	13.20	6.40	0.88	2.70	1.70	15.91	0.17	2.00	10.80	C <sub>3</sub> -S <sub>2</sub>
343	7.2	16.5	782	8.1	0.0	8.1	4.45	3.25	0.11	1.90	1.00	4.80	0.11	0.35	4.00	C <sub>3</sub> -S <sub>1</sub>
347	7.15	16.5	355	9.9	0.5	10.4	0.50	3.55	2.90	0.80	0.41	0.05	0.00	0.00	0.30	C <sub>3</sub> -S <sub>1</sub>
350	7.3	16.5	379	10.1	1.7	11.8	0.35	3.60	0.77	3.30	0.90	0.47	0.05	0.00	0.30	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>
353	7.3	16.5	380	10.0	2.0	12.0	0.35	3.60	1.43	3.70	0.60	0.97	0.11	0.00	0.70	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>
355	7.2	16.5	385	9.7	1.2	10.9	0.40	3.45	0.57	3.20	0.70	0.47	0.05	0.00	0.30	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>
360	7.6	16.5	616	13.1	0.0	13.1	0.85	4.75	0.19	3.50	1.18	1.07	0.04	0.07	0.50	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>
361	7.0	16.5	976,9	17.08	0.14	17.22	2.30	6.10	0.65	4.10	2.05	2.78	0.12	0.00	1.10	C <sub>2</sub> -S <sub>3</sub>
362	7.8	16.5	984,5	1.20	0.0	1.20	1.10	7.60	0.99	0.38	0.05	9.15	0.11	7.17	19.90	C <sub>2</sub> -S <sub>3</sub>
364	8.1	16.5	1142,3	6.63	0.0	6.63	2.05	0.40	7.25	0.77	0.32	0.12	9.01	6.81	20.00	C <sub>3</sub> -S <sub>3</sub>
366	7.5	16.5	759	12.68	0.0	12.68	1.15	5.25	3.86	4.53	1.08	4.57	0.08	0.00	1.60	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>
367	7.6	16.5	631	9.35	0.0	9.35	1.05	4.55	0.77	1.62	1.72	2.80	0.23	1.21	2.60	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>
373	7.35	16.5	916,8	13.58	0.0	13.58	0.80	6.45	0.81	3.34	1.51	3.04	0.17	1.60	2.00	C <sub>3</sub> -S <sub>1</sub>
376	7.35	16.5	571	11.17	0.0	11.17	0.40	4.80	3.13	0.86	1.08	0.13	0.81	1.10	1.10	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>
385	7.5	16.5	683	13.3	3.33	16.63	0.50	4.75	1.36	3.78	2.16	0.64	0.03	0.00	0.36	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>
395	7.05	16.5	624	10.56	0.0	10.56	0.95	4.60	trac	3.02	0.86	1.62	0.05	0.72	1.60	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>
403	7.1	16.5	699	11.48	0.0	11.48	0.80	5.05	0.77	3.24	0.86	2.47	5.05	0.95	2.40	C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>
407	7.4	16.5	2630	11.14	0.0	11.14	11.00	11.50	trac	1.18	0.80	18.36	0.16	7.52	18.20	C <sub>4</sub> -S <sub>4</sub>
408																

## II

### MESURES DES ESSAIS DE POMPAGE

t : temps de pompage  
 $\Delta_f$  : rabattement dans le forage  
 $\Delta_p$  : rabattement dans le piézomètre  
t' : temps de la remontée  
 $\Delta'_f$  : remontée dans le forage



F<sub>1</sub> : Q= 180 m<sup>3</sup>/h

t	Δ <sub>f</sub>	Δ <sub>p</sub>	t'	Δ' <sub>f</sub>	t	Δ <sub>f</sub>	Δ <sub>p</sub>	t'	Δ' <sub>f</sub>
1'	2.75	0.00	1'	0.73	80'	3.62		80'	0.06
2'	2.97		2'	0.53	90'	3.63	0.11	90'	0.03
3'	3.06		3'	0.50	100'	3.65		100'	0.02
4'	3.10		4'	0.45	110'	3.66		110'	0.02
5'	3.17		5'	0.42	120'	3.67	0.11	120'	0.01
6'	3.25		6'	0.41	135'	3.69			
7'	3.27		7'	0.40	150'	3.70	0.11		
8'	3.29		8'	0.38	165'	3.71			
9'	3.30		9'	0.37	180'	3.73	0.11		
10'	3.32		10'	0.35	210'	3.74	0.12		
12'	3.33		12'	0.34	240'	3.76	0.12		
14'	3.35		14'	0.32	270'	3.77	0.13		
16'	3.37		16'	0.31	300'	3.78	0.13		
18'	3.38		18'	0.31	330'	3.80	0.13		
20'	3.40		20'	0.30	360'	3.81	0.13		
22'	3.43		22'	0.30	390'	3.83	0.13		
24'	3.44		24'	0.29	420'	3.85	0.13		
26'	3.45		26'	0.29	450'	3.86	0.13		
28'	3.47		28'	0.20	480'	3.87	0.13		
30'	3.48	0.07	30'	0.29	510'	3.90	0.14		
35'	3.50		35'	0.25	540'	3.92	0.14		
40'	3.52		40'	0.23	570'	3.93	0.14		
45'	3.55		45'	0.20	600'	3.95	0.14		
50'	3.57		50'	0.16	630'	3.98	0.15		
55'	3.58		55'	0.12	660'	3.99	0.16		
60'	3.59	0.09	60'	0.09	690'	4.00	0.17		
70'	3.61		70'	0.08	720'	4.02	0.17		

F<sub>2</sub> : Q= 180 m<sup>3</sup>/h

t	Δ <sub>f</sub>	Δ <sub>p</sub>	t'	Δ' <sub>f</sub>	t	Δ <sub>f</sub>	Δ <sub>p</sub>	t'	Δ' <sub>f</sub>
1'	1.16		1'	1.70	80'	1.80		90'	6.55
2'	1.17		2'	1.69	90'	1.87	0.21	100'	6.55
3'	1.20		3'	1.68	100'	1.90		110'	6.55
4'	1.22		4'	1.60	110'	1.95		12'	6.50
5'	1.23		5'	1.23	120'	2.00	0.25		
6'	1.24		6'	0.68	150'	2.04	0.33		
7'	1.26		7'	0.01	180'	2.12	0.41		
8'	1.28		8'	0.01	210'	2.17	0.48		
9'	1.29		9'	0.01	240'	2.22	0.54		
10'	1.32		10'	0.01	270'	2.30	0.61		
12'	1.33		12'	0.01	300'	2.34	0.70		
14'	1.36		14'	0.01	330'	2.38	0.74		
16'	1.37		16'	0.01	360'	2.42	0.80		
18'	1.40		18'	0.01	390'	2.45	0.87		
20'	1.41		20'	0.00	420'	2.55	0.90		
22'	1.47		22'	0.00	450'	2.60	0.94		
24'	1.48		24'	0.00	480'	2.65	0.98		
26'	1.50		26'	0.00	510'	2.68	0.99		
28'	1.52		28'	0.00	540'	2.70	1.00		
30'	1.56	0.05	30'	0.00	570'	2.70	1.02		
35'	1.57		35'	0.00	600'	2.71	1.04		
40'	1.60		40'	0.00	630'	2.73	1.05		
45'	1.63		45'	0.00	660'	2.74	1.06		
50'	1.65		50'	0.00	690'	2.74	1.06		
55'	1.70		60'	0.00	720'	2.75	1.06		
60'	1.72	0.10	70'	0.00					
70'	1.77		80'	0.00					



F<sub>3</sub> : Q= 180 m<sup>3</sup>/h

t	Δ <sub>f</sub>	t <sub>p</sub>	Δ <sub>p</sub>	t'	Δ' <sub>f</sub>	t	Δ <sub>f</sub>	t'	Δ' <sub>f</sub>
1'	2.86	30'	0.02	1'	0.76	70'	4.07	70'	0.16
2'	2.98	60'	0.03	2'	0.46	80'	4.15	80'	0.15
3'	3.09	90'	0.04	3'	0.44	90'	4.15	90'	0.15
4'	3.14	120'	0.05	4'	0.41	100'	4.16	100'	0.15
5'	3.22	150'	0.08	5'	0.38	110'	4.17	110'	0.14
6'	3.28	180'	0.09	6'	0.37	120'	4.17	120'	0.13
7'	3.32	210'	0.10	7'	0.36	150'	4.18		
8'	3.36	240'	0.11	8'	0.34	180'	4.24		
9'	3.38	270'	0.13	9'	0.33	210'	4.28		
10'	3.41	300'	0.13	10'	0.31	240'	4.36		
12'	3.43	330'	0.13	12'	0.30	270'	4.46		
14'	3.46	360'	0.14	14'	0.28	300'	4.50'		
16'	3.56	390'	0.14	16'	0.27	330'	4.51		
18'	3.64	420'	0.14	18'	0.25	360'	4.52		
20'	3.69	450'	0.15	20'	0.24	390'	4.53		
22'	3.76	480'	0.15	22'	0.23	420'	4.54		
24'	3.80	510'	0.15	24'	0.22	450'	4.56		
26'	3.85	540'	0.15	26'	0.22	480'	4.58		
28'	3.88	570'	0.16	28'	0.21	510'	4.61		
30'	3.92	600'	0.16	30'	0.20	530'	4.62		
35'	3.96	630'	0.16	35'	0.20	560'	4.64		
40'	3.97	660'	0.16	40'	0.19	590'	4.66		
45'	3.98	690'	0.16	45'	0.18	620'	4.68		
50'	4.00	720'	0.17	50'	0.17	650'	4.71		
55'	4.00			55'	0.17	680'	4.74		
60'	4.01			60'	0.16	710'	4.75		

F<sub>4</sub> : Q= 180 m<sup>3</sup>/h

t	Δ <sub>f</sub>	Δ <sub>p</sub>	t'	Δ' <sub>f</sub>	t	Δ <sub>f</sub>	Δ <sub>p</sub>	t'	Δ' <sub>f</sub>
1'	1.66		1'	0.88	80'	2.07		90'	0.20
2'	1.83		2'	0.75	90'	2.07	0.81	100'	0.17
3'	1.85		3'	0.75	100'	2.08		110'	0.10
4'	1.88		4'	0.73	110'	2.08		120'	0.05
5'	1.90		5'	0.73	120'	2.09	0.35		
6'	1.91		6'	0.77	135'	2.09			
7'	1.92		7'	0.68	150'	2.11	0.39		
8'	1.93		8'	0.65	165'	2.12			
9'	1.93		9'	0.63	180'	2.12	0.42		
10'	1.94		10'	0.61	210'	2.13	0.48		
12'	1.94		12'	0.60	240'	2.14	0.49		
14'	1.95		14'	0.55	270'	2.15	0.55		
16'	1.95		16'	0.53	300'	2.16	0.59		
18'	1.95		18'	0.52	330'	2.17	0.63		
20'	1.97		20'	0.50	360'	2.18	0.70		
22'	1.98		22'	0.49	390'	2.18	0.73		
24'	1.99		24'	0.45	420'	2.22	0.75		
26'	2.00		26'	0.40	450'	2.22	0.82		
28'	2.00		28'	0.40	480'	2.23	0.83		
30'	2.01	0.78	30'	0.39	510	2.24	0.80		
35'	2.02		35'	0.33	540'	2.24	0.91		
40'	2.02		40'	0.32	570'	2.25	0.93		
45'	2.03		50'	0.30	600'	2.26	0.95		
50'	2.04		55'	0.29	630'	2.27	0.97		
55'	2.05		60'	0.28	660'	2.28	0.98		
60'	2.06	0.29	70'	0.26	690'	2.30	0.98		
70'	2.07		80'	0.24	720'	2.30	0.99		

F<sub>5</sub> : Q= 180 m<sup>3</sup>/h

t	Δ <sub>f</sub>	t <sub>p</sub>	Δ <sub>p</sub>	t'	Δ' <sub>f</sub>	t	Δ <sub>f</sub>	t'
1'	0.00	30'	0.62	1'	0.80	80'	0.42	110'
2'	0.18	60'	0.64	2'	0.82	90'	0.42	120'
3'	0.20	90'	0.65	3'	0.87	100'	0.42	
4'	0.23	120'	0.69	4'	0.90	110'	0.43	
5'	0.25	150'	0.70	5'	0.92	120'	0.44	
6'	0.26	180'	0.72	6'	0.94	135'	0.44	
7'	0.27	210'	0.75	7'	0.95	150'	0.46	
8'	0.28	240'	0.80	8'	0.97	165'	0.47	
9'	0.29	270'	0.82	9'	-1.00	180'	0.47	
10'	0.30	300'	0.84	10'	1.02	210'	0.48	
12'	0.31	330'	0.87	12'	1.05	240'	0.49	
14'	0.31	360'	0.90	14'	1.07	270'	0.50	
16'	0.32	390'	0.92	16'		300'	0.51	
18'	0.33	410'	0.94	18'		330'	0.52	
20'	0.33	440'	0.95	20'		360'	0.53	
22'	0.34	470'	0.96	22'		390'	0.54	
24'	0.35	500'	0.98	24'		420'	0.55	
26'	0.36	530'	0.99	26'		450'	0.56	
28'	0.36	560'	1.01	28'		480'	0.57	
30'	0.37	590'	1.07	30'		510'	0.58	
35'	0.37	620'	1.09	40'		540'	0.59	
40'	0.38	650'	1.12	50'		570'	0.59	
45'	0.39	680'	1.14	60'		600'	0.59	
50'	0.40	710'	1.15	70'		630'	0.59	
55'	0.40			80'		660'	0.58	
60'	0.41			90'		690'	0.58	
70'	0.42			100'		720'	0.59	

F<sub>6</sub> : Q= 120 m<sup>3</sup>/h

t	Δ	Δ <sub>p</sub>	t'	Δ' <sub>f</sub>	t	Δ <sub>f</sub>	Δ <sub>p</sub>	t'	Δ <sub>f</sub>
1'	0.00		1'	0.43	80'	1.47		110'	0.02
2'	0.10		2'	0.38	90'	1.49	0.30	120'	0.00
3'	0.12		3'	0.35	100'	1.54			
4'	0.15		4'	0.32	110'	1.60			
5'	0.20		5'	0.30	120'	1.67	0.31		
6'	0.24		6'	0.28	135'	1.72			
7'	0.29		7'	0.27	150'	1.79	0.32		
8'	0.32		8'	0.26	165'	1.80			
9'	0.40		9'	0.25	180'	1.97	0.36		
10'	0.48		10'	0.24	210'	1.87	0.37		
12'	0.50		12'	0.23	240'	1.89	0.39		
14'	0.55		14'	0.22	270'	1.90	0.40		
16'	0.61		16'	0.21	300'	1.91	0.40		
18'	0.68		18'	0.20	330'	1.92	0.40		
20'	0.75		20'	0.20	360'	1.94	0.41		
22'	0.83		22'	0.19	390'	1.96	0.41		
24'	0.89		24'	0.19	420'	1.97	0.41		
26'	0.95		26'	0.19	450'	1.98	0.41		
28'	1.18		28'	0.18	480'	1.99	0.41		
30'	1.25	0.24	30'	0.18	510'	2.00	0.42		
35'	1.26		40'	0.16	540'	2.01	0.42		
40'	1.27		50'	0.16	570'	2.03	0.42		
45'	1.31		60'	0.14	600'	2.05	0.42		
50'	1.35		70'	0.14	630'	2.06	0.42		
55'	1.40		80'	0.12	660'	2.07	0.42		
60'	1.42	0.25	90'	0.11	690'	2.08	0.43		
70'	1.44		100'	0.10	720'	2.10	0.43		



F<sub>7</sub> : Q= 180 m<sup>3</sup>/h

t	Δ <sub>f</sub>	Δ <sub>p</sub>	t'	Δ' <sub>f</sub>	t	Δ <sub>f</sub>	Δ <sub>p</sub>	t'	Δ' <sub>f</sub>
1'	4.31		1'	0.96	70'	5.26		70'	0.15
2'	4.35		2'	0.94	80'	5.29		80'	0.14
3'	4.45		3'	0.70	90'	5.32	0.14	90'	0.12
4'	4.47		4'	0.58	100'	5.36		100'	0.08
5'	4.53		5'	0.56	110'	5.43		110'	0.05
6'	4.59		6'	0.51	120'	5.49	0.25	120'	0.03
7'	4.67		7'	0.45	150'	5.53	0.28		
8'	4.70		8'	0.43	180'	5.56	0.30		
9'	4.73		9'	0.38	210'	5.57	0.31		
10'	4.75		10'	0.37	240'	5.58	0.33		
12'	4.78		12'	0.35	270'	5.59	0.34		
14'	4.81		14'	0.34	300'	5.59	0.36		
16'	4.82		16'	0.32	330'	5.61	0.37		
18'	4.85		18'	0.29	360'	5.62	0.40		
20'	4.89		20'	0.28	390'	5.67	0.43		
22'	4.92		22'	0.27	420'	5.71	0.43		
24'	4.95		24'	0.26	450'	5.75	0.44		
26'	4.97		26'	0.24	480'	5.80	0.45		
28'	4.99		28'	0.23	510'	5.83	0.46		
30'	5.02	0.03	30'	0.22	540'	5.85	0.46		
35'	5.04		35'	0.21	570'	5.86	0.46		
40'	5.07		40'	0.20	600'	5.87	0.46		
45'	5.12		45'	0.19	630'	5.89	0.45		
50'	5.15		50'	0.18	660'	5.90	0.47		
55'	5.21		55'	0.17	690'	5.90	0.47		
60'	5.28	0.07	60'	0.16	720'	5.91	0.47		

F<sub>8</sub> : Q= 180 m<sup>3</sup>/h

t	Δ <sub>f</sub>	Δ <sub>p</sub>	t'	Δ' <sub>f</sub>	t	Δ <sub>f</sub>	Δ <sub>p</sub>	t'	Δ' <sub>f</sub>
1'	2.98		1'	1.25	70'	3.55		70'	0.14
2'	2.99		2'	1.20	80'	3.56		80'	0.10
3'	3.02		3'	1.14	90'	3.57	0.00	90'	0.08
4'	3.05		4'	1.12	100'	3.58		100'	0.06
5'	3.07		5'	1.10	110'	3.58		110'	0.00
6'	3.09		6'	1.05	120'	3.50	0.00	120'	0.00
7'	3.10		7'	1.03	150'	3.47	0.05		
8'	3.11		8'	0.91	180'	3.47	0.08		
9'	3.13		9'	0.88	210'	3.45	0.10		
10'	3.14		10'	0.86	240'	3.42	0.13		
12'	3.17		12'	0.83	270'	3.39	0.13		
14'	3.20		14'	0.80	300'	3.36	0.15		
16'	3.22		16'	0.78	330'	3.37	0.15		
18'	3.25		18'	0.70	360'	3.39	0.15		
20'	3.27		20'	0.68	390'	3.40	0.10		
22'	3.29		22'	0.66	420'	3.39	0.10		
24'	3.30		24'	0.66	450'	3.38	0.10		
26'	3.32		26'	0.50	480'	3.38	0.11		
28'	3.35		28'	0.49	510'	3.39	0.12		
30'	3.37	0.00	30'	0.40	540'	3.40	0.14		
35'	3.40		35'	0.35	570'	3.40	0.14		
40'	3.43		40'	0.30	600'	3.39	0.14		
45'	3.46		45'	0.28	630'	3.83	0.12		
50'	3.48		50'	0.20	660'	3.40	0.12		
55'	3.50		55'	0.18	690'	3.39	0.13		
60'	3.53	0.00	60'	0.16	720'	3.38	0.13		

F<sub>9</sub> : Q= 180 m<sup>3</sup>/h

t	Δ <sub>f</sub>	Δ <sub>p</sub>	t'	Δ' <sub>f</sub>	t	Δ <sub>f</sub>	Δ <sub>p</sub>	t'	Δ' <sub>f</sub>
1'	2.20		1'	0.38	70'	2.76		70'	0.14
2'	2.30		2'	0.33	80'	2.79		80'	0.13
3'	2.34		3'	0.30	90'	2.80	0.56	90'	0.13
4'	2.38		4'	0.28	100'	2.82		100'	0.13
5'	2.40		5'	0.27	110'	2.83		110'	0.13
6'	2.41		6'	0.25	120'	2.86	0.59	120'	0.13
7'	2.43		7'	0.24	150'	2.88	0.61		
8'	2.44		8'	0.23	180'	2.93	0.62		
9'	2.47		9'	0.22	210'	2.93	0.61		
10'	2.49		10'	0.22	240'	2.94	0.63		
12'	2.53		12'	0.21	270'	2.95	0.64		
14'	2.55		14'	0.19	300'	2.97	0.65		
16'	2.57		16'	0.18	330'	2.99	0.66		
18'	2.58		18'	0.18	360'	3.01	0.68		
20'	2.59		20'	0.17	390'	3.02	0.69		
22'	2.60		22'	0.17	420'	3.03	0.70		
24'	2.62		24'	0.17	450'	3.04	0.71		
26'	2.63		26'	0.16	480'	3.04	0.71		
28'	2.64		28'	0.16	510'	3.04	0.71		
30'	2.65	0.46	30'	0.16	540'	3.05	0.71		
35'	2.66		35'	0.15	570'	3.06	0.71		
40'	2.67		40'	0.15	600'	3.06	0.72		
45'	2.69		45'	0.14	630'	3.07	0.72		
50'	2.71		50'	0.14	660'	3.08	0.72		
55'	2.72		55'	0.14	690'	3.08	0.72		
60'	2.74	0.52	60'	0.14	720'	3.08	0.72		

F<sub>10</sub> : Q= 180 m<sup>3</sup>/h

t	Δ <sub>f</sub>	Δ <sub>p</sub>	t'	Δ' <sub>f</sub>	t	Δ <sub>f</sub>	Δ <sub>p</sub>	t'	Δ' <sub>f</sub>
1'	2.00		1'	1.51	80'	4.45		110'	0.03
2'	2.53		2'	1.26	90'	4.48	0.41	120'	0.04
3'	2.90		3'	1.03	100'	4.51			
4'	3.13		4'	0.86	110'	4.53			
5'	3.29		5'	0.73	120'	4.56	0.42		
6'	3.35		6'	0.64	135'	4.59			
7'	3.46		7'	0.50	150'	4.61	0.45		
8'	3.52		8'	0.46	165'	4.63			
9'	3.61		9'	0.43	180'	4.64	0.47		
10'	3.71		10'	0.37	210'	4.66	0.50		
12'	3.80		12'	0.33	240'	4.67	0.54		
14'	3.88		14'	0.29	270'	4.68	0.55		
16'	3.94		16'	0.26	300'	4.71	0.59		
18'	4.00		18'	0.24	330'	4.73	0.61		
20'	4.05		20'	0.21	360'	4.74	0.64		
22'	4.11		22'	0.20	390'	4.75	0.65		
24'	4.16		24'	0.18	420'	4.77	0.66		
26'	4.20		26'	0.16	450'	4.79	0.69		
28'	4.24		28'	0.13	480'	4.80	0.70		
30'	4.27	0.24	30'	0.11	510'	4.81	0.71		
35'	4.31		40'	0.09	540'	4.83	0.73		
40'	4.34		50'	0.06	570'	4.84	0.75		
45'	4.37		60'	0.05	600'	4.85	0.77		
50'	4.39		70'	0.03	630'	4.87	0.76		
55'	4.41		80'	0.01	660'	4.88	0.79		
60'	4.42	0.38	90'	0.00	690'	4.91	0.80		
70'	4.44		100'	0.02	720'	4.92	0.81		



F<sub>11</sub> : Q= 120 m<sup>3</sup>/h

t	Δ <sub>f</sub>	Δ <sub>p</sub>	t'	Δ' <sub>f</sub>	t	Δ <sub>f</sub>	Δ <sub>p</sub>	t'	Δ' <sub>f</sub>
1'	8.20		1'	4.20	70'	9.75		70'	1.78
2'	7.76		2'	3.94	80'	9.80		80'	1.76
3'	8.45		3'	3.74	90'	9.85	0.07	90'	1.74
4'	8.53		4'	3.48	100'	9.88		100'	1.73
5'	8.60		5'	3.39	110'	9.94		110'	1.73
6'	8.66		6'	3.24	120'	9.99	0.09	120'	1.71
7'	8.73		7'	3.10	150'	10.02	0.11		
8'	8.80		8'	2.85	180'	10.06	0.13		
9'	8.88		9'	2.74	210'	10.12	0.15		
10'	8.94		10'	2.69	240'	10.15	0.18		
12'	9.00		12'	2.62	270'	10.18	0.19		
14'	9.02		14'	2.51	300'	10.20	0.22		
16'	9.08		16'	2.44	330'	10.22	0.25		
18'	9.12		18'	2.40	360'	10.24	0.27		
20'	9.15		20'	2.31	390'	10.30	0.30		
22'	9.20		22'	2.23	420'	10.35	0.32		
24'	9.23		24'	2.17	450'	10.40	0.35		
26'	9.28		26'	2.13	480'	10.43	0.38		
28'	9.31		28'	2.10	510'	10.44	0.40		
30'	9.40	0.02	30'	2.07	540'	10.47	0.43		
35'	9.45		35'	2.05	570'	10.49	0.47		
40'	9.51		40'	2.03	600'	10.51	0.49		
45'	9.55		45'	2.00	630'	10.53	0.49		
50'	9.63		50'	1.93	660'	10.54	0.50		
55'	9.68		55'	1.89	690'	10.57	0.52		
60'	9.70	0.04	60'	1.84	720'	10.58	0.52		

F<sub>12</sub> : Q= 150 m<sup>3</sup>/h

t	Δ <sub>f</sub>	Δ <sub>p</sub>	t'	Δ' <sub>f</sub>	t	Δ <sub>f</sub>	Δ <sub>p</sub>	t'	Δ' <sub>f</sub>
1'	21.01		1'	6.18	70'	22.06		70'	2.54
2'	21.05		2'	5.74	80'	22.09		80'	2.50
3'	21.07		3'	5.00	90'	22.14	1.95	90'	2.46
4'	21.14		4'	4.77	100'	22.16		100'	2.42
5'	21.20		5'	4.42	110'	22.17		110'	2.38
6'	21.22		6'	4.20	120'	22.20	1.99	120'	2.34
7'	21.25		7'	4.09	150'	22.25	2.08		
8'	21.27		8'	3.90	180'	22.28	2.14		
9'	21.31		9'	3.77	210'	22.30	2.18		
10'	21.35		10'	3.51	240'	22.32	2.24		
12'	21.39		12'	3.40	270'	22.35	2.35		
14'	21.43		14'	3.32	300'	22.38	2.39		
16'	21.48		16'	3.20	330'	22.40	2.47		
18'	21.52		18'	3.11	360'	22.42	2.53		
20'	21.55		20'	3.07	390'	22.45	2.60		
22'	21.58		22'	2.99	420'	22.47	2.67		
24'	21.61		24'	2.90	450'	22.51	2.80		
26'	21.65		26'	2.82	480'	22.56	2.86		
28'	21.68		28'	2.86	510'	22.59	2.93		
30'	21.71	1.77	30'	2.83	540'	22.62	2.99		
35'	21.76		35'	2.80	570'	22.67	3.01		
40'	21.79		40'	2.75	600'	22.71	3.05		
45'	21.85		45'	2.70	630'	22.75	3.06		
50'	21.89		50'	2.66	660'	22.77	3.09		
55'	21.98		55'	2.60	690'	22.79	4.00		
60'	22.03	1.90	60'	2.57	720'	22.80	4.02		

F<sub>13</sub> : Q= 80m<sup>3</sup>/h

t	Δ <sub>f</sub>	Δ <sub>p</sub>	t'	Δ' <sub>f</sub>	t	Δ <sub>f</sub>	Δ <sub>p</sub>	t'	Δ' <sub>f</sub>
1'	20.92		1'	12.22	70'	22.61		70'	3.28
2'	21.00		2'	11.34	80'	22.98		80'	3.22
3'	21.03		3'	10.78	90'	23.25	0.20	90'	3.05
4'	21.07		4'	10.35	100'	23.49		100'	3.02
5'	21.12		5'	9.85	110'	23.75		110'	2.97
6'			6'	8.25	120'	24.08	0.25	120'	2.94
7'	21.20		7'	7.89	150'	24.49	0.32		
8'	21.32		8'	7.33	180'	24.97	0.39		
9'	21.38		9'	7.02	210'	25.38	0.45		
10'	21.45		10'	6.47	240'	25.84	0.51		
12'	21.52		12'	6.25	270'	26.12	0.54		
14'	21.57		14'	5.92	300'	26.23	0.58		
16'	21.61		16'	5.63	330'	26.37	0.60		
18'	21.65		18'	5.34	360'	26.62	0.62		
20'	21.72		20'	5.13	390'		0.65		
22'	21.74		22'	4.94	420'		0.72		
24'	21.80		24'	4.67	450'	26.87	0.77		
26'	21.83		26'	4.46	480'	27.05	0.83		
28'	21.88		28'	4.24	510'	27.22	0.89		
30'	22.00	0.02	30'	3.99	540'	27.27	0.95		
35'	22.07		35'	3.87	570'	27.35	1.04		
40'	22.15		40'	3.73	600'	27.47	1.07		
45'	22.21		45'	3.55	630'	27.76	1.17		
50'	22.32		50'	3.47	660'	27.82	1.21		
55'	22.41		55'	3.38	690'	27.85	1.25		
60'	22.49	0.11	60'	3.34	720'	27.87	1.28		

F<sub>14</sub>: Q= 180 m<sup>3</sup>/h

t	Δ <sub>f</sub>	Δ <sub>p</sub>	t'	Δ' <sub>f</sub>	t	Δ <sub>f</sub>	Δ <sub>p</sub>	t'	Δ' <sub>f</sub>
1'	3.20		1'	0.94	60'	4.12		80'	0.33
2'	3.62		2'	0.80	90'	4.14	0.31	90'	0.32
3'			3'	0.78	100'	4.15		100'	0.31
4'			4'	0.75	110'	4.16		110'	0.30
5'	3.63		5'	0.72	120'	4.17	0.40	120'	0.29
6'	3.67		6'	0.70	135'	4.19			
7'	3.69		7'	0.67	150'	4.20	0.48		
8'	3.74		8'	0.66	165'	4.22			
9'	3.75		9'	0.64	180'	4.23	0.51		
10'	3.77		10'	0.63	210'	4.25	0.54		
12'	3.81		12'	0.59	240'	4.27	0.56		
14'	3.85		14'	0.56	270'	4.28	0.58		
16'	3.90		16'	0.54	300'	4.31	0.60		
18'	3.91		18'	0.52	330'	4.34	0.62		
20'	3.94		20'	0.51	360'	4.35	0.65		
22'	3.96		22'	0.49	390'	4.38	0.68		
24'	3.98		24'	0.47	420'	4.41	0.70		
26'	3.99		26'	0.46	450'	4.43	0.72		
28'	4.00		28'	0.45	480'	4.45	0.73		
30'	4.01	0.14	30'	0.44	510'	4.47	0.74		
35'	4.03		35'	0.42	540'	4.48	0.75		
40'	4.04		40'	0.41	570'	4.50	0.77		
45'	4.05		45'	0.40	600'	4.51	0.78		
50'	4.06		50'	0.38	630'	4.53	0.80		
55'	4.08		55'	0.37	660'	4.54	0.81		
60'	4.09	0.23	60'	0.36	690'	4.55	0.83		
70'	4.10		70'	0.34	720'	4.57	0.84		



F<sub>15</sub> : Q= 130 m<sup>3</sup>/h

t	Δ <sub>f</sub>	Δ <sub>p</sub>	t'	Δ' <sub>f</sub>	t	Δ <sub>f</sub>	Δ <sub>p</sub>	t'	Δ' <sub>f</sub>
1'	2.00		1'	1.51	80'	4.45		110'	0.00
2'	2.53		2'	1.26	90'	4.48	0.41	120'	0.00
3'	2.		3'	1.03	100'	4.51			
4'	3.12		4'	0.86	110'	4.53			
5'	3.28		5'	0.73	120'	4.56	0.42		
6'	3.35		6'	0.64	135'	4.59			
7'	3.46		7'	0.51	150'	4.61	0.45		
8'	3.52		8'	0.46	165'	4.63			
9'	3.65		9'	0.43	180'	4.64	0.47		
10'	3.71		10'	0.37	210'	4.66	0.50		
12'	3.80		12'	0.33	240'	4.67	0.54		
14'	3.88		14'	0.29	270'	4.68	0.55		
16'	3.94		16'	0.26	300'	4.71	0.59		
18'	4.00		18'	0.24	330'	4.73	0.61		
20'	4.05		20'	0.21	360'	4.74	0.64		
22'	4.11		22'	0.20	390'	4.75	0.65		
24'	4.16		24'	0.18	420'	4.77	0.66		
26'	4.20		26'	0.16	450'	4.79	0.69		
28'	4.24		28'	0.13	480'	4.80	0.70		
30'	4.27	0.24	30'	0.11	510'	4.81	0.71		
35'	4.31		40'	0.09	540'	4.83	0.73		
40'	4.34		50'	0.06	570'	4.84	0.75		
45'	4.37		60'	0.05	600'	4.85	0.77		
50'	4.38		70'	0.03	630'	4.87	0.78		
55'	4.41		80'	0.01	660'	4.88	0.81		
60'	4.42	0.38	90'	0.00	690'	4.91	0.83		
70'	4.44		100'	0.00	720'	4.92	0.84		

F<sub>16</sub> : Q=150 m<sup>3</sup>/h

t	Δ <sub>f</sub>	Δ <sub>p</sub>	t'	Δ' <sub>f</sub>	t	Δ <sub>f</sub>	Δ <sub>p</sub>	t'	Δ' <sub>f</sub>
1'	7.90		1'	4.90	70'	11.07		90'	2.07
2'	8.25		2'	4.65	80'	11.13		100'	1.40
3'	8.33		3'	4.50	90'	11.25	0.25	110'	0.95
4'	8.39		4'	4.41	100'	11.40		120'	0.65
5'	8.45		5'	4.35	110'	11.57			
6'	8.50		6'	4.29	120'	11.65			
7'	8.57		7'	4.25	150'	11.80	0.45		
8'	8.65		8'	4.21	180'	12.05	0.62		
9'	8.67		9'	4.13	210'	12.27	0.65		
10'	8.70		10'	4.07	240'	12.40	0.70		
12'	8.77		12'	3.97	270'	12.55	0.80		
14'	8.84		14'	3.91	300'	12.67	1.00		
16'	8.95		16'	3.85	330'	13.00	1.10		
18'	9.01		18'	3.81	360'	13.05	1.15		
20'	9.03		20'	3.75	390'	13.10	1.35		
22'	9.12		22'	3.70	420'	13.15	1.50		
24'	9.18		24'	3.65	450'	13.23	2.10		
26'	9.33		26'	3.60	480'	13.30	2.10		
28'	9.47		28'	3.52	510'	13.55	2.25		
30'	9.70	0.12	30'	3.45	540'	13.57	2.32		
35'	9.80		35'	3.25	570'	13.60	2.45		
40'	10.05		40'	3.07	600'	13.65	2.55		
45'	10.20		50'	3.00	630'	13.67	2.70		
50'	10.60		60'	2.95	660'	13.72	2.88		
55'	10.67		70'	2.85	690'	13.77	2.95		
60'	10.80	0.17	80'	2.65	720'	13.83	3.05		

F<sub>17</sub> : Q= 180 m<sup>3</sup>/h

t	Δ <sub>f</sub>	Δ <sub>p</sub>	t'	Δ' <sub>f</sub>	t	Δ <sub>f</sub>	Δ <sub>p</sub>	t'	Δ' <sub>f</sub>
1'	6.15	0.00	1'	5.45	70'	9.08		70'	0.92
2'	6.35		2'	3.68	80'	9.10		80'	0.85
3'	6.58		3'	3.47	90'	9.15	0.08	90'	0.70
4'	6.65		4'	3.35	100'	9.20		100'	0.35
5'	6.73		5'	3.25	110'	9.25		110'	0.25
6'	6.84		6'	2.80	120'	9.30	0.12	120'	0.10
7'	6.90		7'	2.65	150'	9.35	0.22		
8'	6.95		8'	2.52	180'	9.42	0.25		
9'	6.98		9'	2.35	210'	9.45	0.32		
10'	7.02		10'	2.30	240'	9.60	0.50		
12'	7.10		12'	2.28	270'	9.62	0.58		
14'	7.18		14'	2.17	300'	9.63	0.70		
16'	7.23		16'	2.13	330'	9.65	0.72		
18'	7.28		18'	2.00	360'	9.70	0.82		
20'	7.30		20'	1.95	390'	9.72	0.90		
22'	7.35		22'	1.75	420'	9.73	1.08		
24'	7.39		24'	1.60	450'	9.78	1.15		
26'	7.50		26'	1.59	480'	9.82	1.12		
28'	8.52		28'	1.50	510'	9.85	1.20		
30'	8.58	0.02	30'	1.44	540'	9.92	1.22		
35'	8.66		35'	1.42	570'	9.97	1.30		
40'	8.75		40'	1.40	600'		1.34		
45'	8.85		45'	1.33	630'	9.98	1.42		
50'	8.90		50'	1.30	660'	10.00	1.48		
55'	9.00		55'	1.20	690'	10.02	1.49		
60'	9.02	0.08	60'	1.01	720'	10.00	1.52		

F<sub>18</sub> : Q= 180 m<sup>3</sup>/h

t	Δ <sub>f</sub>	Δ <sub>p</sub>	t'	Δ' <sub>f</sub>	t	Δ <sub>f</sub>	Δ <sub>p</sub>	t'	Δ' <sub>f</sub>
1'	8.96		1'	4.37	70'	10.22		70'	1.44
2'	9.05		2'	3.71	80'	10.27		80'	1.32
3'	9.10		3'	3.29	90'	10.33	0.62	90'	1.30
4'	9.17		4'	2.97	100'	10.38		100'	1.27
5'	9.20		5'	2.61	110'	10.43		110'	1.25
6'	9.23		6'	2.46	120'	10.47	0.62	120'	1.20
7'	9.27		7'	2.33	150'	10.51	0.68		
8'	9.33		8'	2.29	180'	10.58	0.72		
9'	9.37		9'	2.21	210'	10.61	0.79		
10'	9.41		10'	2.17	240'	10.67	0.79		
12'	9.45		12'	2.12	270'	10.71	0.81		
14'	9.49		14'	2.07	300'	10.77	0.83		
16'	9.55		16'	2.03	330'	10.79	0.84		
18'	9.59		18'	2.00	360'	10.81	0.86		
20'	9.62		20'	1.97	390'	10.83	0.88		
22'	9.66		22'	1.93	420'	10.86	0.89		
24'	9.70		24'	1.89	450'	10.88	0.90		
26'	9.74		26'	1.85	480'	10.90	0.91		
28'	9.79		28'	1.79	510'	10.91	0.92		
30'	9.83	0.51	30'	1.75	540'	10.93	0.94		
35'	9.87		35'	1.62	570'	10.95	0.97		
40'	9.92		40'	1.60	600'	10.97	0.99		
45'	9.96		45'	1.57	630'	10.98	1.07		
50'	10.02		50'	1.50	660'	10.98	1.09		
55'	10.10		55'	1.48	690'	10.99	1.12		
60'	10.14	0.60	60'	1.45	720'	10.99	1.15		



F<sub>19</sub> : Q=180 m<sup>3</sup>/h

t	Δ <sub>f</sub>	Δ <sub>p</sub>	t'	Δ' <sub>f</sub>	t	Δ <sub>f</sub>	Δ <sub>p</sub>	t'	Δ' <sub>f</sub>
1'	7.20		1'	6.80	80'	14.90		110'	0.20
2'	7.80		2'	5.00	90'	15.60	0.35	120'	0.05
3'	7.89		3'	4.80	100'	16.00			
4'	8.40		4'	4.00	110'	16.40			
5'	8.72		5'	3.90	120'	16.90	0.42		
6'	8.90		6'	3.85	135'	17.20			
7'	9.10		7'	3.78	150'	17.40	0.55		
8'	9.45		8'	3.70	165'	17.60			
9'	9.80		9'	3.65	180'	17.90	0.80		
10'	10.10		10'	3.60	210'	18.22	0.88		
12'	10.25		12'	3.40	240'	18.35	0.95		
14'	10.42		14'	3.30	270'	18.55	1.10		
16'	10.75		16'	3.25	300'	18.70	1.12		
18'	10.83		18'	3.18	330'	18.92	1.24		
20'	10.95		20'	3.10	360'	19.20	1.26		
22'	11.40		22'	3.00	390'	19.32	1.28		
24'	11.55		24'	2.80	420'	19.45	1.33		
26'	11.75		26'	2.70	450'	19.52	1.38		
28'	11.85		28'	2.30	480'	19.80	1.40		
30'	11.90	0.15	30'	2.10	510'	19.95	1.41		
35'	12.40		40'	1.80	540'	20.10	1.41		
40'	12.95		50'	1.30	570'	20.33	1.42		
45'	13.40		60'	1.10	600'	20.40	1.42		
50'	13.70		70'	0.90	630'	20.45	1.42		
55'	14.40		80'	0.85	660'	20.50	1.43		
60'	14.60	0.32	90'	0.70	690'	20.60	1.44		
70'	14.65		100'	0.50	720'	20.72	1.45		

III

LISTE DES FOSSILES

F<sub>20</sub> : Q= 60 m<sup>3</sup>/h

t	Δ <sub>f</sub>	Δ <sub>p</sub>	t'	Δ' <sub>f</sub>	t	Δ <sub>f</sub>	Δ <sub>p</sub>	t'	Δ' <sub>f</sub>
1'	35.20		1'	13.09	70'	39.28		70'	1.39
2'	36.24		2'	7.68	80'	39.33		80'	1.26
3'	37.08		3'	5.04	90'	39.37	0.36	90'	1.11
4'	37.25		4'	4.11	100'	39.44		100'	0.98
5'	37.49		5'	3.70	110'	39.50		110'	0.86
6'	37.52		6'	3.47	120'	39.50	0.49	120'	0.74
7'	37.79		7'	3.30	150'	39.62	0.60		
8'	37.81		8'	3.18	180'	39.70	0.69		
9'	37.92		9'	3.06	210'	39.77	0.78		
10'	38.03		10'	2.96	240'	39.85	0.86		
12'	38.11		12'	2.79	270'	39.90	0.93		
14'	38.20		14'	2.69	300'	39.98	0.99		
16'	38.29		16'	2.65	330'	40.05	1.04		
18'	38.38		18'	2.61	360'	40.08	1.09		
20'	38.46		20'	2.45	390'	40.14	1.13		
22'	38.55		22'	2.44	420'	40.20	1.18		
24'	38.63		24'	2.29	450'	40.25	1.21		
26'	38.70		26'	2.27	480'	40.32	1.24		
28'	38.77		28'	2.28	510'	40.35	1.29		
30'	38.85	0.12	30'	2.15	540'	40.38	1.33		
35'	38.94		35'	2.98	570'	40.46	1.38		
40'	38.99		40'	1.89	600'	40.48	1.42		
45'	39.05		45'	1.78	630'	40.54	1.45		
50'	39.09		50'	1.71	660'	40.56	1.47		
55'	39.16		55'	1.62	690'	40.59	1.51		
60'	39.22	0.27	60'	1.52	720'	40.62	1.55		



LISTE DE FOSSILES PROVENANT PAR LES FORAGES DU DELTA  
DU NESTOS

BIVALVES

1. *Abra alba* (WOOD) 2. *Acanthocardia aculeata* (L.) 3. *Aequipecten opercularis* L. 4. *Aloidis* (*Aloidis*) *carinata* (DUJ.) 5. *Aloidis* (*Aloidis*) *carinata* f. *dertolaevis* (SACC.) 6. *Aloidis* (*Varicorbula*) *gibba* f. *pseudolaevis* (SACC.) 7. *Anomia* sp. (groupe *ephippium* L.) 8. *Arca noae* L. 9. *Astarte* (*Astarte*) *sulcata* (DA COSTA) 10. *Cardita* (*Glans*) sp. 11. *Cardium* (*Parvicardium*) *exiguum* 12. *Cardium* (*parvicardium*) *minimum* PHIL. 13. *Cerastoderma edule* f. *adriatica* 14. *Chama gryphoides* L. 15. *Chamelea gallina striatula* (LINNE) 16. *Chlamys multistriata* (POLI) 17. *Chlamys* cf. *multistriata* (P.) 18. *Chlamys opercularis* (L.) 19. *Chlamys varia* L. 20. *Circomphalus casinus* (L.) 21. *Corbula gibba* (OLIV.) 22. *Ctena decussata* (O.G. COSTA) 23. *Digitaria* (L.) 24. *Donax* (*Paradonax*) *intermedia* HORN 25. *Donax trunculus* L. 26. *Dossinia* (*Orbiculus*) *exoleta* (L.) 27. *Divaricella ornata* AG. 28. *Kellya suborbicularis* MTG. 29. *Leda* (*Lembulus*) *pella* L. 30. *Lima lima* (L.) 31. *Limopsis anomala minuta* 32. *Limopsis faurita* (BROCCHI) 33. *Loripes dentatus* (DEFR.) 34. *Loripes lacteus* (*Lucina lactea*) (L.) 35. *Lucinella divaricata* (L.) 36. *Mactra subtruncata indequalis* JEFFR. 37. *Mercenaria mercenaria* (L.) 38. *Mesodesma* (*Donacilla*) *cornea* (POLI) 39. *Modiola mytiloides* BRN 40. *Modiolus* (*Modiolus*) *barbatus* (L.) 41. *Monia patelliformis* (L.) 42. *Mytilus* sp. 43. *Nucula jeffreysi* BELL. 44. *Nucula mitida* SOW. 45. *Nuculana minuta* (MÜLL.) 46. *Ostrea edulis* L. 47. *Ostrea lamellosa* BROCCHI 48. *Papillicardium papillosum* (POLI) 49. *Pitar islandicoides* LMK. 50. *Pitar rude* (POLI) 51. *Pycnodonta cochlear* (POM) 52. *Pycnodonta cochlear maviularis* (BROCCHI) 53. *Scrobicularia plana* (DA COSTA) 54. *Solen marginatus* (PENNT.) 55. *Spisula* (*Spisula*) *subtruncata* (DA COSTA) 56. *Proteopecten glaber* (L.) 57. *Sphaerocardium pancicostatum* (SOW.) 58. *Tellina* sp. 59. *Tellina* (*Arcopagiopsis*) *balaustina* L. 60. *Tellina* (*Moerella*) *domacina* (L.) 61. *Tellina pulchella* LK. 62. *Venericardia* sp. 63. *Venerupis* (*Venerupis*) *corrugata*



*senegalensis* (GM.) 64. *Venus* (*Ventricola*) *multilamella* LK. 65. *Venus* (*Timoclea*) *ovata* PENNT. 66. *Venus* (*Circomphalus*) *plicata* f. *perlamellosa* SACCO 67. *Venerupis* (*Tapes*) *aurea* (GM.)

#### GASTEROPODES

67a. *Calyptrala chinensis* (L.) 68. *Bittium digitatum* ZH. 69. *Bittium reticulatum rudis* BRUEN. 70. *Buccinum undatum* L. 71. *Cerithium* (*Vulgocerithium*) *Crenatum* cf. *subrenatocoronata* 72. *Cerithium* (*Pithocerithium*) *doliolum* BROCCHI 73. *Cerithium* (*Theridium*) *vulgatum* BRUG. (= *Gourmya vulgata* (BRUG.)) 74. *Columbella* sp. 75. *Cyclope* (*Cyclonassa*) *neritea* (L.) 76. *Cythara attenuata* (MTG.) (= *Mangelia attenuata* MONT.) 77. *Gibbula* cf. *filiformis* DE RAYN 78. *Gibbula umbillicaris* L. 79. *Jujubinus striatus bibasilaris* 80. *Gourmya rupestris* (RISSO) 81. *Hadriana broahii* (MONT.) 82. *Hinia incrassata* (STRÖM.) 83. *Hinia* (*Nassa*) *varicosa* (TURT.) 84. *Hinia* (*Nassarius*) *asperulus* (BR.) 85. *Natica* (*Natica*) *helicina* BR. 86. *Natica* (*Lunatia*) *macilentia* PHIL. 87. *Odostomia* cf. *conoidea* (BR.) 88. *Rissoa decussata* 89. *Rissoa ventricosa* DESM. 90. *Rissoina brugueri* (PAVR.) 91. *Tricolia pulla* L. (*Phasianella*) 92. *Trochus* sp. 93. *Turboella marginata* MICH. 94. *Turboella pulchella* PHIL. 95. *Turboella similis* (SCACC.) 96. *Torculoidella* (*Turritella*) *bicarinata* EICH. 97. *Turritella bieniaszi* 98. *Turritella decipiens* MONT. 99. *Turritella tricarinata* 100. *Turritella tricarinata communis* 101. *Trunculariopsis trunculus* (L.) (= *Murex*) 102. *Vermetus* (*Lemintina*) *semisurrectus* BIV. 104. *Lunatia* (*Lunatia*) *catena* (DA COSTA) 105. *Chime* (*clausinella*) *fasciata* (DA COSTA)

#### SCAPHOPODES

106. *Dentalium* (*Antale*) *fossile* 107. *Dentalium* (*Antale*) *novemcostatum mutabilis* (DÖDER.) 108. *Dentalium* (*Antale*) *vulgare* DA COSTA 109. *Dentalium* (*Entalis*) *badensis* PART. 110. *Dentalium inaequicostatum* (DAUTZ.) 111. *Dentalium inaequale rotundatior* SACCO 112. *Dentalium variabile* 113. *Siphonodentalium biffisum*.

#### MADREPORAIRES

114. *Cladocora caespitosa* GUALT. 115. Du groupe *Helliastraea*

#### ECHINIDES

116. *Dorocidaris papillata* LESKE 117. *Echinocyamus pusillus* (MÜLL.) 118. *Echinus* sp. 119. *Polyechinus agulhensis* DÖD. 120. *Schizaster* sp. (*plastron*)

#### ANNELIDES

121. *Serpula* sp.

#### BRYOZOAIRES

122. *Schizoporella* sp.

#### ARTHROPODES

123. *Cancer* cf. *pagurus* L. 124. *Balanus* sp.



Dernière page d'une thèse

V U

Grenoble, le

Le Président de la thèse

V U, et permis d'imprimer,

Grenoble, le

UNIVERSITÉ DE GRENOBLE  
SCIENTIFIQUE ET MÉDICALE  
RUE MANCHELIERE  
38000 GRENOBLE  
TEL. 04 77 12 34 56

Le Président de l'Université Scientifique et  
Médicale de Grenoble.



THESE DE DOCTORAT DE SPECIALITE  
Spécialité : Géologie Appliquée - Option : Hydrogéologie

*Titre d'ouvrage :*

**EVOLUTION ET COMPORTEMENT D'UN SYSTEME  
AQUIFERE HETEROGENE. GEOLOGIE ET  
HYDROGEOLOGIE DU DELTA DU NESTOS (GRECE)  
ET DE SES BORDURES**

*Nom de l'auteur :* STOURNARAS Georges

*Etablissement :* Université Scientifique et Médicale de Grenoble.

**RESUME**

Cette étude concerne le delta du Nestos (Grèce du Nord) et les deltas dont la formation est plutôt influencée par l'action fluviale et l'action de la houle.

Les forages et les sondages électriques ont permis de constater, pendant le dernier stade de l'évolution du delta, une translation de l'écoulement du Nestos d'Ouest en Est.

Ceci est aussi vérifié par l'analyse des conditions géomorphologiques et fut déterminant pour le régime hydrogéologique des deux secteurs du delta.

Après l'aménagement de la rivière, commence la phase de destruction du delta. Les barrages naturels des îles de Thassopoula et Thassos n'ont pas permis la formation des profils sous-marins typiques, sauf dans le cas des côtes orientales. L'effet de la houle a donné trois types de côtes. Le transport des sédiments et la formation de la plate-forme sous-marine sont influencés par la présence des îles ci-dessus mentionnées. L'analyse morphométrique du delta exprime la distribution du volume des sédiments et indique que la convexité ou la concavité des côtes et des profils sous-marins résulte de cette distribution. Plus encore, cette analyse peut être utilisée pour la connaissance des conditions hydrogéologiques, avant la réalisation de recherches précises.

Les analyses minéralogiques des sédiments et la détermination des fossiles ont complété la connaissance sur la formation du delta, et les conditions paléocéologiques.

L'étude des conditions hydrogéologiques a été faite, pour les marbres, des bordures du delta, à l'aide de la géologie, des mesures du débit des sources et l'analyse des courbes, des analyses chimiques et isotopiques et de l'analyse tectonique des affleurements des marbres. Cette étude pour les systèmes aquifères de la plaine deltaïque, qui résultent par la formation du delta, est basée sur les essais de pompage, ainsi que sur les analyses chimiques et isotopiques. Dans ce domaine, on a essayé de critiquer les méthodes d'essais de pompage dans les conditions hétérogènes du delta et dans les conditions d'utilisation des forages qui exploitent toutes les couches aquifères traversées. En tenant compte des pertes de charge dans les forages, en essayant d'établir une corrélation entre le Débit Spécifiques des forages et la Transmissivité on est arrivé à établir un cadre d'application des méthodes des essais de pompage sous les conditions ci-dessus mentionnées. L'étude inclut encore la description des conditions hydrogéologiques et hydrochimiques de la nappe phréatique et du système des nappes profondes, leurs variations et leurs conditions d'alimentation.

**MOTS CLÉS**

Grèce, Nestos, Delta, Quaternaire, Massif du Rhodope, Hydrogéologie, Hydrochimie, Hydrodynamique, Géomorphologie, Aquifères hétérogènes, Essais de pompage et limites d'application, Composition isotopique des eaux, Corrélation Transmissivité - Débit Spécifique.

12 AVR. 1984

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