



BRGM

BUREAU DE RECHERCHES
GÉOLOGIQUES ET MINIERES

74, Rue de la Fédération

Paris 15^e

Tel. SUF 192 00

DIRECTION SCIENTIFIQUE

DÉPARTEMENT GÉOLOGIE

SERVICE D'HYDROGÉOLOGIE

DÉPARTEMENT DES SERVICES
GÉOLOGIQUES RÉGIONAUX

SERVICE GÉOLOGIQUE RÉGIONAL

PROVENCE-CORSE

16, Bd. Pebre

MARSEILLE (8^e)

Tel. 76-00-40

ÉTUDE DE LA NAPPE DE LA GRAU
(Bouches du Rhône)

RÉSULTATS DE LA PREMIÈRE CAMPAGNE DE SONDAGES
(1962)

par

Ph. CHARBONNIER - G. DUROZOY

Cl. GOUVERNET - J. MARGAT

avec la collaboration de

B. DELLERY et de Mme. LE CALVEZ

DSGR.63.A28

Marseille le 10 Avril 1963

BUREAU DE RECHERCHES
GEOLOGIQUES & MINIERES
74, rue de la Fédération
PARIS 15e

Tél. SUF 94-00

DEPARTEMENT DES SERVICES
GEOLOGIQUES REGIONAUX
Service géologique régional
Provence Corse
16, Bd Pèbre - MARSEILLE 8e
Tél. 76-00-40

DIRECTION SCIENTIFIQUE

DEPARTEMENT GEOLOGIE
Service hydrogéologique

ETUDE DE LA NAPPE DE LA CRAU
(Bouches du Rhône)

Résultats de la première campagne de sondages
(1962)

par

Ph. CHARBONNIER - G. DUROZOY
Cl. GOUVERNET - J. MARGAT

avec la collaboration de B. DELLERY et
de Mme LE CALVEZ

Marseille, le 10 avril 1963

R E S U M E

Ce rapport, réalisé à la fin de la première campagne de travaux donne une interprétation de l'ensemble des résultats obtenus par la prospection géophysique et les sondages (S_1 à S_7 forage d'essai, forage exécuté par la Société Esso Standard) et complète la première interprétation donnée dans le rapport DSGR A 20.

Les travaux exécutés révèlent l'existence d'une tectonique post-miocène affectant le substratum des cailloutis de Crau et marquée par un système de failles, ainsi que l'allure du réseau hydrographique de même âge, dont on a pu ainsi dresser la carte.

Les résultats des essais effectués sur les forages pour l'évaluation des valeurs de K et de T (perméabilité et transmissivité) sont donnés et analysés ; d'après les valeurs obtenues une évaluation du débit de la nappe de la Crau sur la section aval est faite.

En annexe sont donnés :

- 1°/ - Les coupes des sondages 1 à 7.
- 2°/ - Le résultat de l'étude des microfaunes trouvées dans les échantillons du substratum.
- 3°/ - Un exposé des méthodes employées pour le calcul des valeurs de K et T et, pour chaque forage, la description des essais réalisés et les éléments des calculs effectués pour l'obtention de ces valeurs.
- 4°/ - Les diagrammes relatifs aux essais de débit.

TABLE DES MATIERES

	pages
INTRODUCTION	1
1 - RESULTATS DES SONDAGES	2
2	
11 - Sondages 6 et 7 - Profil B	
12 - Profils A,C,D	
13 - Forage d'essai et forage Esso	
14 - Tectonique	
15 - Topographie	
2 - RESULTATS DES ESSAIS	7
21 - Tableau des résultats	
22 - Examen des résultats	
3 - EVALUATION DU DEBIT DE LA NAPPE DE LA CRAU SUR LA SECTION AVAL	11
CONCLUSION	
LISTE DES FIGURES	
ANNEXE 1 - Coupe des sondages 1 à 7 et résultats des essais hydrauliques effectués sur ceux-ci.	
ANNEXE 2 - Microfaunes recueillies dans le substratum de la nappe.	
ANNEXE 3 - Exposé des méthodes de calcul des valeurs de la perméabilité K et de la transmissivité T - Eléments de calcul de K et T pour les sondages 1 à 7.	
ANNEXE 4 - Diagrammes relatifs aux essais de débit effectués sur les sondages 1 à 7 (29 figures).	

INTRODUCTION

Notre précédent rapport du 18 octobre 1962 - auquel nous renvoyons ⁽¹⁾ - donnait une interprétation provisoire des résultats de la première ligne de sondages. On trouvera ici une interprétation des résultats des derniers sondages de la campagne 1962 ; confrontés avec les données de la campagne de prospection géophysique et celles fournies par un sondage effectué en basse Crau par Esso Standard ⁽²⁾, ils permettent d'arriver à une bonne connaissance du substratum des alluvions dans cette partie de la Crau.

Au cours de l'exécution des sondages, des essais de perméabilité (essais "Lefranc") avaient été effectués. Ultérieurement des essais de débit ont été réalisés sur chaque ouvrage. L'ensemble des résultats obtenus est exposé et analysé ici.

-
- (1) Ph. CHARBONNIER - G. DUROZOY - CL. GOUVERNET - J. MARGAT avec la collaboration de B. DELLERY - "Recherches hydrogéologiques dans la Crau. Interprétation provisoire des résultats de la première ligne de sondages S₁ à S₅" - Rapport BRGM DSGR A 20 du 18 octobre 1962.
- (2) Nous remercions vivement la Société Esso Standard qui a bien voulu nous autoriser à suivre le forage et nous en communiquer les résultats, ainsi que la Société des forages E.S.C.O. qui nous a également fait part des données recueillies.

1 - RESULTATS DES SONDAGES

11 - Sondages 6 et 7 Profil B (fig 3)

Le sondage 6 (cote 14,05 m) a touché le substratum, (marne bleue sableuse micacée de l'Helvétien) à - 34,10⁽¹⁾. Le sondage 7 (cote + 12,20 m), implanté à 600 m au SSW du sondage électrique 17, l'a touché, (molasse rousse de l'Helvétien) à - 34,30. On peut ainsi préciser les données de la géophysique qui, entre les sondages électriques 16 et 21, ne pouvait séparer la base des alluvions de leur substratum.

Etant donné que le sondage 7 a atteint la molasse rousse de l'Helvétien à - 34,30 et le pendage du Miocène, connu en affleurement sur la bordure, étant faible (2 à 3°), on doit admettre l'existence d'une faille à l'est du sondage électrique 18 (sinon le sondage 7 aurait rencontré à cette profondeur le Burdigalien supérieur et non l'Helvétien) : il est alors probable que c'est cette faille qui motive la forte dénivellation de l'horizon à 20 m (argiles du Crétacé supérieur) entre les sondages électriques 18 et 19 ; une autre faille serait alors cause de l'autre dénivellation existant dans le même horizon entre les sondages électriques 24 et 25 (ces décrochements pourraient être interprétés également comme le résultat d'un profil d'érosion ante-miocène du substratum crétacé).

(1) Tous les ouvrages de cette campagne ont été rattachés au nivellement général. Voir l'implantation des ouvrages sur la carte fig. 1 en annexe et leur coupe en annexe 1.

Entre les sondages électriques 12 et 16 l'horizon à 80 m correspond donc à la molasse rousse de l'Helvétien, selon les données du sondage 7 ; plus à l'ouest l'horizon à 50 m correspond aux marnes bleues helvétiques (touchées par le sondage 6) ; la molasse rousse se trouve donc à une cote inférieure, décalée par la faille décelée par la géophysique entre les sondages électriques 11 et 12. La zone de discontinuité, décelée par la géophysique entre les sondages électriques 15 et 16, pourrait ne correspondre qu'à une faille de faible rejet ou seulement à une zone où, à la base des cailloutis, la molasse rousse est presque entièrement érodée, alors que, du fait du pendage, elle prend plus d'importance à l'ouest.

12 - Profils A - C - D

Sur le profil C la cote du substratum dans la zone de surcreusement ne peut être déduite que du sondage 7, à 650 m au NNE du sondage électrique 18. L'interprétation géologique est identique à celle du profil B (nécessité du passage d'une ou deux failles à l'est du sondage 19, puisqu'à - 37 on doit être, d'après les données du sondage 7, dans l'Helvétien et que le Burdigalien affleure plus à l'est avec un pendage ouest faible. La faille décelée par la géophysique entre les sondages 11 et 12 décale d'autre part, à l'ouest, les molasses rousses vers le bas et met en contact celles-ci - zone à 80 m - avec la marne helvétique - 50 m. La discontinuité au sein des alluvions, décelée par la géophysique, correspond au talus d'érosion des alluvions, et probablement également à une faille à faible rejet dans le Miocène.

Le profil A ne peut que s'interpréter par comparaison avec le profil B. On est obligé de faire intervenir des accidents pour expliquer la grande épaisseur de la zone à 110 Ω entre les sondages électriques 11 et 17 : à l'aplomb du sondage électrique 15 l'on ne peut admettre un creusement des alluvions supérieur à celui figuré sur la coupe (-10 à - 8) donc la présence sous les cailloutis à cette profondeur du Burdigalien supérieur résistant ; comme celui-ci affleure immédiatement à l'est du sondage électrique 19, une faille doit exister vers le sondage électrique 17. A l'aplomb du sondage électrique 11 la grande épaisseur de la zone à 110 Ω s'explique par la présence de la série Burdigalien-Helvétien, avec la molasse rousse au sommet.

En fonction des données précédentes l'interprétation du profil D, figurant dans notre rapport du 18 octobre 1962, doit être légèrement modifiée. Une réduction de l'épaisseur des calcaires coquillers du Burdigalien supérieur intervient vers le sud, observée dans la région de Fos (cf. coupes stratigraphiques relevées).

13 - Forage d'essai et piézomètres annexes - Forage Esso

La coupe du forage et des piézomètres exécutés à proximité est donnée en annexe. Ces forages ne modifient pas les données fournies par le sondage 3 à proximité duquel ils ont été exécutés.

Par contre, un sondage exécuté par la Société Esso Standard (cote + 1,30 m), à proximité de Fos, sur le profil est

de la géophysique, a donné des résultats intéressants ; touchant le substratum à - 35,30 (grés et molasse du Burdigalien moyen⁽¹⁾) il a permis de préciser les données de la géophysique sur ce profil.

14 - Tectonique

La jonction des failles de même nature, repérées sur les profils,⁽²⁾ amène à considérer un ensemble d'accidents, de direction générale NS tendant à devenir SSW - NNE au fur et à mesure que l'on s'éloigne vers l'est ; ces accidents intéressent le Miocène et s'intègrent normalement dans le cadre tectonique général de la région. On doit admettre, en effet, que des mouvements de bascule ont affectés au Quaternaire ancien la plateforme où s'épandaient les alluvions de l'ancienne Durance, par rapport à la région stable d'affleurements miocènes à l'est de la ligne Istres - Fos, mouvements articulés le long d'un axe NS. Plus au sud, dans la zone du golfe de Fos, les accidents connus sont orientés NNW - SSE (cf. bibliographie n° 2). Les compartiments miocènes sont d'autant plus abaissés qu'on s'éloigne vers l'ouest. Une coupe nord - sud, passant par les sondages Esso S₅ - S₇, oblige, malgré la réduction d'épaisseur de la molasse burdigalienne, soit à admettre un fort pendage du Miocène entre le sondage 5 et le sondage 7, soit à faire passer une faille entre les deux ouvrages. L'existence d'accidents EW affectant le Miocène est donc possible.

(1) Sous les alluvions grossières on a, de 35,30 à 35,75, une molasse fine, compacte, blanchâtre, puis jusqu'à 38,50 des grés fins jaunâtres (Burdigalien moyen) et jusqu'à 40,60 des grés conglomératiques à galets argileux rouges. De 40,60 à 43,- le sondage a traversé des grés fins bicolores devenant argileux à la base (Crétacé supérieur probable).

(2) Cf. fig 1

15 - Topographie ante-quaternaire

Une carte du substratum miocène des alluvions de la Crau, établie sur les données précédentes (fig. 5), fournit l'image d'un réseau hydrographique drainé vers le sud. L'écartement des profils et la marge d'interprétation possible des données de la géophysique laissent place cependant à deux hypothèses possibles : existence d'un thalweg étroit et profond, dans sa partie sud, ramifié vers le nord, ou existence d'une cuvette fermée, isolée, au nord-est (région de Fanfarigoule), analogue à celles existant à l'est de la zone Fos - Miramas, et d'une vallée barrée dans sa partie médiane par un seuil ; les données générales font plutôt pencher en faveur de la deuxième hypothèse.

On remarquera que la zone de creusement maximum du substratum, thalweg orienté NS, comportant ou non une dépression formée à son extrémité nord, est comprise entre deux accidents principaux orientés SN précédemment décrits.

L'ébauche de ce modèle hydrographique daterait du Pliocène mais les mouvements tectoniques ultérieurs ont modifié sa physionomie et notamment les accidents NS qui en sont ici une manifestation et qui ont pu regrouper.

Les conclusions de l'interprétation de l'ensemble des résultats géophysiques et sondages que l'on vient de faire ont partiellement un caractère hypothétique. L'existence d'au moins un, et probablement deux accidents importants de direction NS, coïncidant avec les bordures de la dépression mise en évidence par les sondages dans le substratum, paraît cependant certaine.

2 - RESULTATS DES ESSAIS

Les essais suivants été effectués :

- au cours de la perforation : essais de perméabilité type Lefranc
- après la perforation : essais de débit et mesures de vitesse au micromoulinet Solétanche

Le but de ces essais était la recherche des valeurs admissibles de la perméabilité des alluvions (coefficient K d'où l'on déduit, connaissant l'épaisseur de la tranche noyée des alluvions, la transmissivité T).

Le principe des méthodes employées pour l'obtention de ces valeurs d'après les résultats des essais effectués et la description détaillée des essais sont donnés en annexe.

21 - Résultats

Les résultats sont exposés dans le tableau joint.

22 - Examen des résultats

Les valeurs de la transmissivité, obtenues par les différents procédés, sont assez concordantes, notamment en ce qui concerne le micromoulinet et l'analyse de la remontée par la méthode de Theis⁽¹⁾ qui paraissent donner les résultats les meilleurs. Ce n'est que sur le sondage 2 que le micromoulinet a donné des valeurs éloignées de celles trouvées par les autres

(1) voir annexe 3

TABLEAU DES VALEURS CALCULÉES DES TRANSMISSIVITES DES CAILLOUTIS

SONDAGES	1	2	3	4	5	6	7
Transmissivité en m ² /s Essais Lefranc	(1,6.10 ⁻³)	3,-.10 ⁻²	0,6.10 ⁻¹	1,6.10 ⁻¹	1,4.10 ⁻¹	0,8.10 ⁻¹	3,2.10 ⁻¹
Transmissivité Micromoulinet	1,4.10 ⁻²	2,-.10 ⁻¹	4,3.10 ⁻¹	2,5.10 ⁻¹	1,8.10 ⁻¹	1,9.10 ⁻¹	2,-.10 ⁻¹
Transmissivité Pompage	(1,2.10 ⁻²)	7,-.10 ⁻²	(7,-.10 ⁻²)	5,5.10 ⁻²	(2,6.10 ⁻¹)	/	2,6.10 ⁻¹
Transmissivité remontée	(1,2.10 ⁻¹)	4,8.10 ⁻²	3,4.10 ⁻¹	/	2,4.10 ⁻¹	3,5.10 ⁻¹	2,4.10 ⁻¹
Valeur admise	6,-.10 ⁻²	4,-.10 ⁻²	3,-.10 ⁻¹	3,-.10 ⁻¹	2,-.10 ⁻¹	2,-.10 ⁻¹	2,5.10 ⁻¹
Coefficient de perméabilité K en m/s	5,-.10 ⁻³	4,2.10 ⁻³	2,3.10 ⁻²	1,-.10 ⁻²	5,-.10 ⁻³	7,-.10 ⁻³	8,-.10 ⁻³

() : résultats sujets à caution

procédés (valeurs trop faibles sur la moitié inférieure du forage, trop fortes à la partie supérieure).

Les essais Lefranc donnent toujours des valeurs approchées par excès. Les coupes de sondages jointes (annexe 1), où sont reportés les résultats des essais en face des niveaux correspondants des coupes lithologiques, permettent de faire des comparaisons entre les résultats du micromoulinet et ceux des essais Lefranc ; il faut noter que ces derniers sont ponctuels alors que ceux du micromoulinet couvrent l'intégralité des niveaux.

On notera que pour les sondages ayant traversé une grande épaisseur d'alluvions (S_4 à S_7) les perméabilités vers la base sont souvent faibles ; or l'épaisseur totale de la tranche aquifère intervient dans le calcul de la perméabilité et de la transmissivité. Il faut en tenir compte dans l'appréciation des valeurs de ces coefficients pour les sondages considérés.

Ainsi pour le S_4 les dix derniers mètres de la nappe (1/3 de la puissance) n'interviennent que pour 2 % dans la transmissivité totale.

Pour le S_7 , la perméabilité est également faible sur les 16 derniers mètres.

Pour le S_5 , les 19 derniers mètres de la nappe (1/2 de la puissance totale) n'interviennent que pour 1,7 % de la transmissivité totale.

Or, les transmissivités totales de ces trois ouvrages sont respectivement de 3.10^{-1} , $2,5.10^{-1}$, 2.10^{-1} . Les valeurs

seraient plus fortes si l'on ne faisait intervenir que la partie supérieure des alluvions pour l'estimation de la puissance de la nappe.

Au S₆, par contre, la perméabilité est assez homogène jusqu'à - 30 m (épaisseur totale des alluvions 34 m).

La perméabilité de ces alluvions est, dans l'ensemble, très importante, surtout dans la tranche des 15 premiers mètres (comprise entre 1.10^{-3} et 5.10^{-2}).

o

o o

3 - EVALUATION DU DEBIT DE LA NAPPE DE LA CRAU SUR LA SECTION AVAL

Suivant la relation

$$Q = K S i$$

application de la loi de Darcy

Q = débit en m^3/sec

K = perméabilité en m/sec

i = pente

on peut calculer le débit de la nappe passant à travers une section donnée, ici la section définie par les piézomètres 1 à 5. La surface des alluvions est celle déterminée d'après les données de la campagne de géophysique et celle des sondages (voir la coupe annexe III) jointe à notre rapport DSGR A 20 du 18 octobre 1962). Les débits seront calculés par éléments de section définis entre S_1 et la bordure de la nappe et les points à égale distance entre chaque sondage. La pente établie d'après les données de la carte isopiézométrique de la nappe relevée par le SGR Provence Corse est uniformément de 2/1.000.

On a ainsi, à partir de S_1 :

8.400	$\times 5, \cdot 10^{-3}$	$\times 0,002 = 0,084$	m^3/sec	(120 l/sec)	pour 700m de front
16.800	$\times 4,2 \cdot 10^{-3}$	$\times 0,002 = 0,140$	"	(140 ")	" 1.400m "
18.500	$\times 2,3 \cdot 10^{-2}$	$\times 0,002 = 0,830$	"	(830 ")	" 1.400m "
25.220	$\times 1, \cdot 10^{-2}$	$\times 0,002 = 0,504$	"	(592 ")	" 1.000m "
32.500	$\times 5, \cdot 10^{-3}$	$\times 0,002 = 0,325$	"	(325 ")	" 1.700m "

ce qui donne des débits au km de front de nappe de

84 - 120 - 140 - 830 - 592 - 325 l/sec

Le débit sur la section, entre S_1 et la bordure est, est de $1,87 \text{ m}^3/\text{sec}$ pour 6 km de front, soit une moyenne de $0,3 \text{ m}^3/\text{sec}$ par km de front (300 l/sec).

Si l'on rapporte cette valeur à la section entière de la nappe de la Crau de Miramas (qu'on différencie de la Crau d'Arles géologiquement plus ancienne) le long de la route de Fos à Arles (20 kms) on obtient une valeur du débit de la nappe de $6 \text{ m}^3/\text{sec}$. Ce chiffre ne pourra être considéré comme certain que lorsque seront établis expérimentalement les perméabilités des alluvions entre S_1 et la région de l'étang des Aulnes (Las de Pernes).

o
o o

CONCLUSION

La seconde ligne de sondages de reconnaissance a permis de préciser la coupe établie par la géophysique le long du profil B et d'interpréter géologiquement les données fournies sur le substratum par cette coupe ; cette interprétation a été étendue à l'ensemble des profils.

L'établissement d'une carte du substratum miocène, à partir des données de la géophysique ainsi interprétée et de celles des forages, montre l'existence dans cette partie de la Crau d'un modelé hydrographique ébauché au Pontien et présentant une pente générale vers le sud. Celui-ci peut-être mis en relation avec les failles décelées par l'interprétation des coupes données par la géophysique.

L'interprétation des essais effectués sur les sondages en vue de déterminer la valeur du coefficient de perméabilité des alluvions montre que ce dernier est en moyenne assez élevé (de l'ordre de 5.10^{-3} m/sec et pouvant atteindre 1.10^{-2}). Dans la zone intéressée par les ouvrages le débit percolant à travers une section des cailloutis de Crau est de l'ordre de 300 l/sec par km de front.

L'essai de pompage de longue durée, qui sera exécuté sur le forage en grand diamètre, doit fournir une valeur plus rigoureuse de la perméabilité ; il doit en outre fournir des données importantes sur la valeur du rayon d'influence en fonction du débit pompé.

Enfin, c'est dans le rapport général de synthèse sur la nappe de la Crau, et lorsqu'auront été recueilli les différents éléments nécessaires en particulier résultat des jaugeages sur les canaux d'irrigation et les exutoires de la nappe, que sera abordée la notion de bilan.

LISTE DES FIGURES

- Fig. 1 Implantation des sondages de reconnaissance et des sondages électriques - Profils A B C D - Carte au 1/20.000
- Fig. 2 Interprétation des sondages électriques - Profils L M N - Carte au 1/20.000
- Fig. 3 Coupes d'interprétation suivant les profils A B C D
- Fig. 4 Coupe géologique N S
- Fig. 5 Carte du substratum des cailloutis de la Crau 1/20.000
- Fig. 6 Miocène de la bordure sud-orientale de la Crau - Coupe stratigraphique

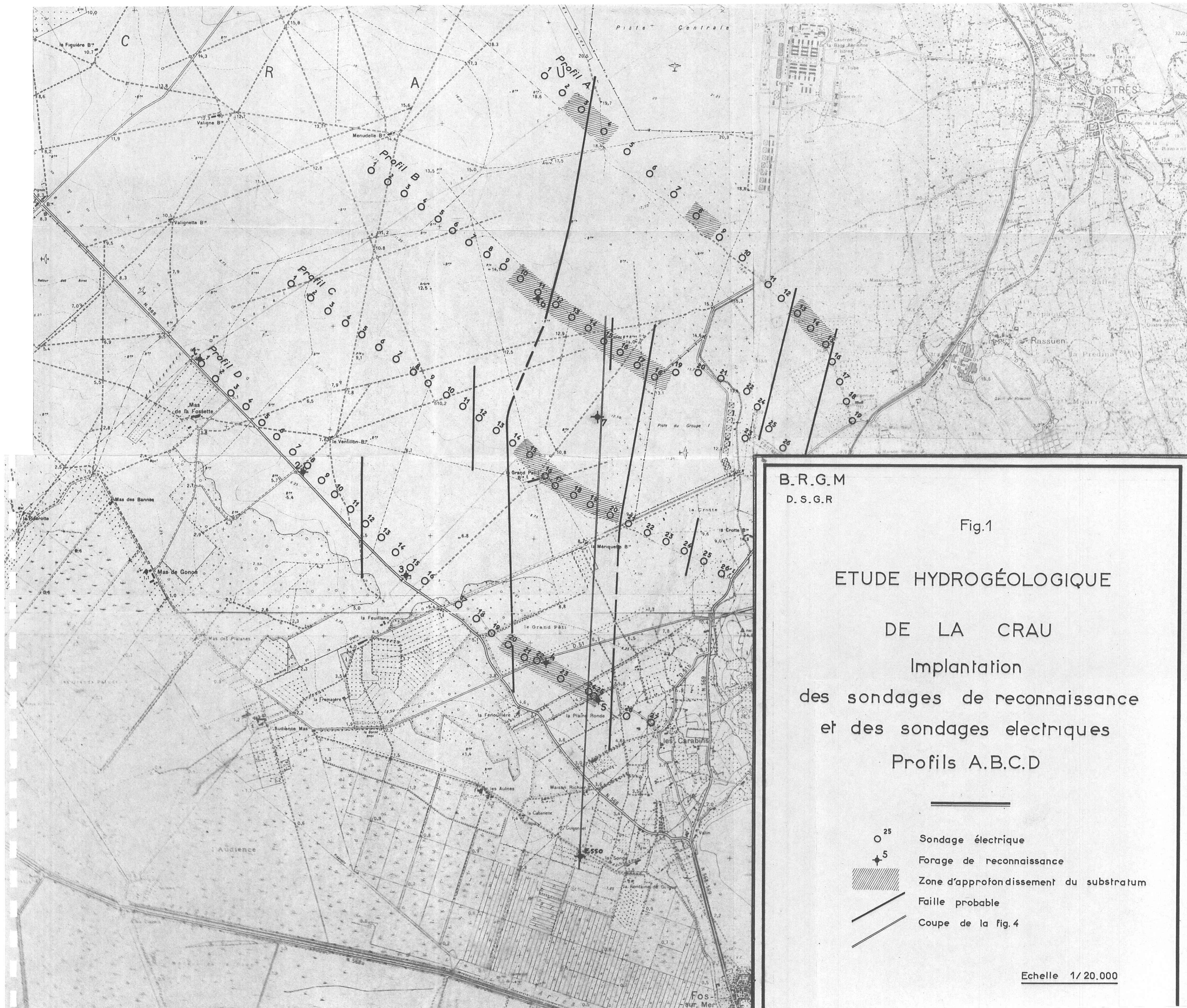
REFERENCES

R. CLUSEAU - "Etude géophysique de la nappe de la Crau dans la région de Fos sur Mer (B. du R.)" - BRGM DS 62 A 46 - mai-juin 1962

G. DUROZOY - J. MARGAT - "Rapport préliminaire sur les recherches hydrogéologiques dans la Crau pour l'alimentation en eau de la région de Fos" - BRGM DSGR 62 A 14 - 14 août 1962

Ph. CHARBONNIER - G. DUROZOY - Cl. GOUVERNET - J. MARGAT, avec la collaboration de B. DELLERY - "Recherches hydrogéologiques dans la Crau. Interprétation provisoire des résultats de la première ligne de sondages S_1 à S_5 " - BRGM DSGR A 20 - 18 octobre 1962



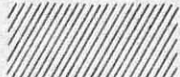


Société SOLETANCHE - "Fos-sur-Mer - Recherches hydrogéologiques Campagne de reconnaissance 1962 - Compte rendu de travaux - 1er février 1963



B.R.G.M
D.S.G.R

Fig.1

ETUDE HYDROGÉOLOGIQUE
DE LA CRAU
Implantation
des sondages de reconnaissance
et des sondages électriques
Profils A.B.C.D

-  Sondage électrique
-  Forage de reconnaissance
-  Zone d'approfondissement du substratum
-  Faille probable
-  Coupe de la fig. 4

Echelle 1/20.000

N° 568
de Nîmes à Marseille
par Montpellier

N° 568
de Arles à Martigues
par Nîmes

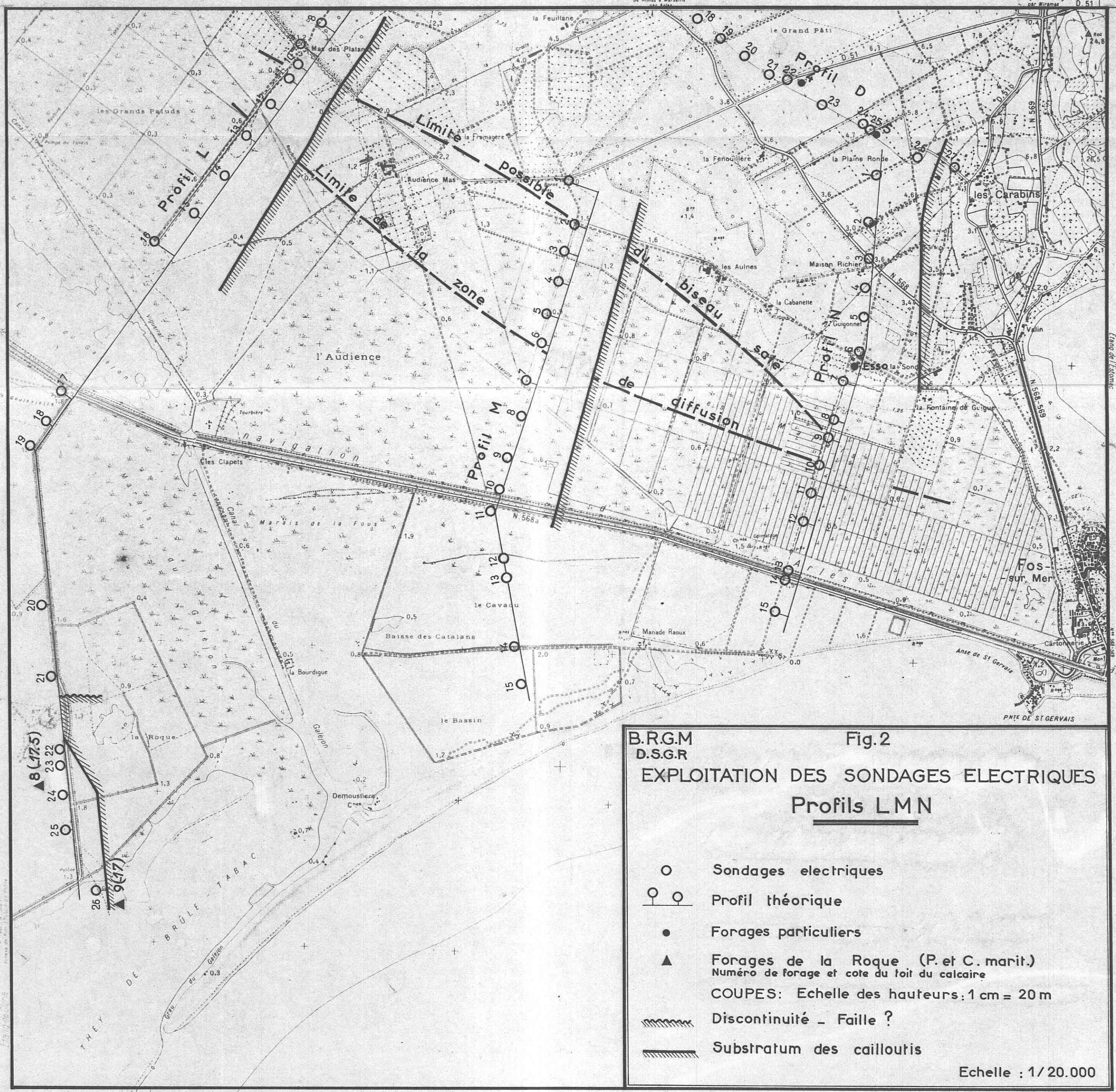
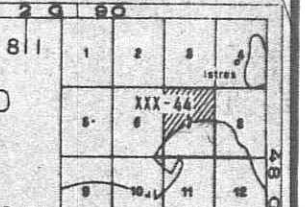


Fig.3

Etude hydrogéologique de la Crau

Coupes d'interprétation
suivant les profils A.B.C.D

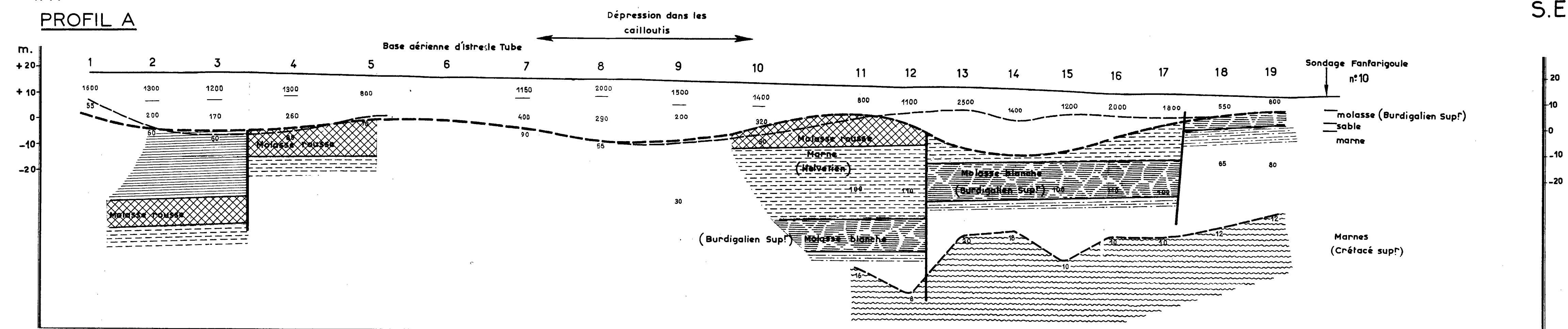
(voir implantation sur la figure n°1)

Sondages électriques et sondages de reconnaissance

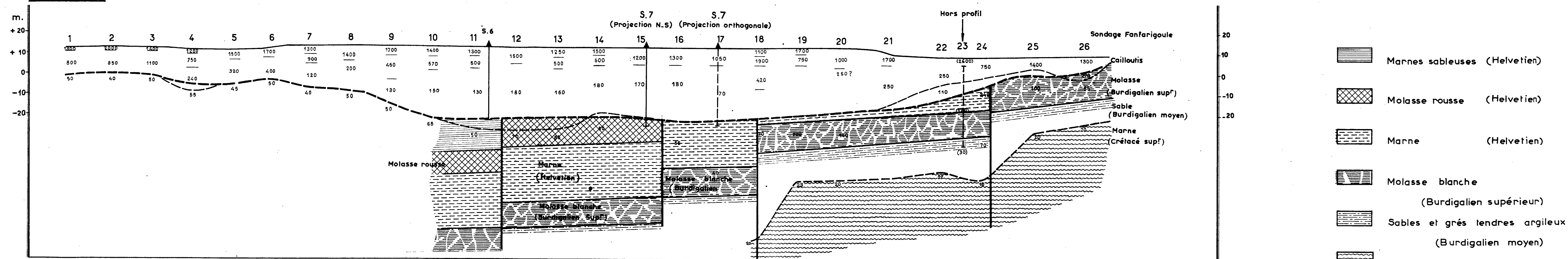
Echelle horizontale 1/10.000

N.W

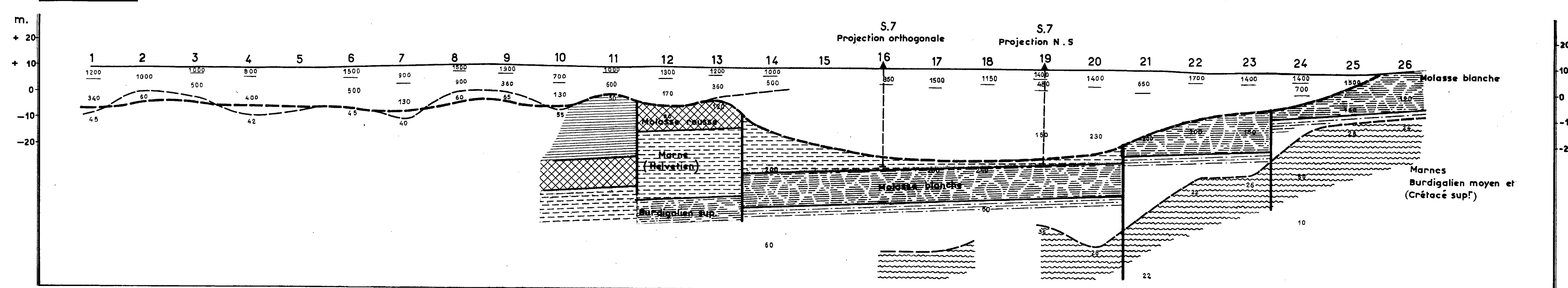
PROFIL A



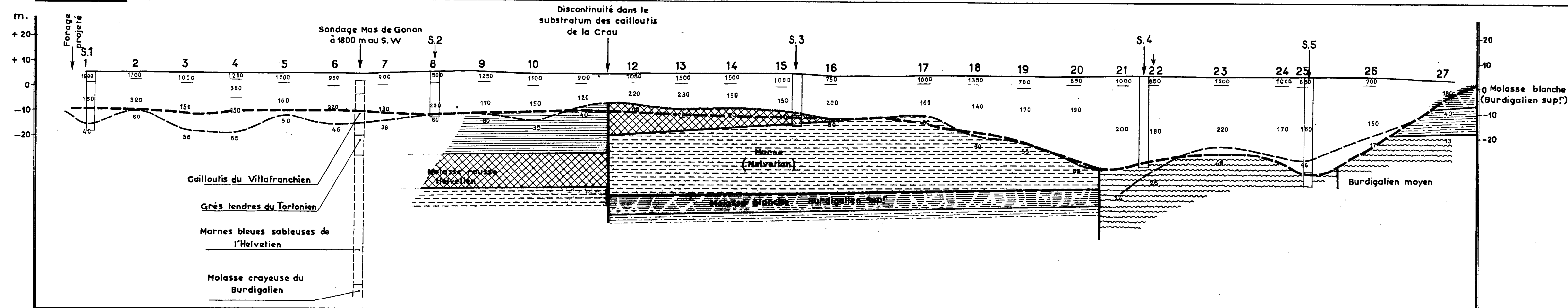
PROFIL B



PROFIL C



PROFIL D



LÉGENDE

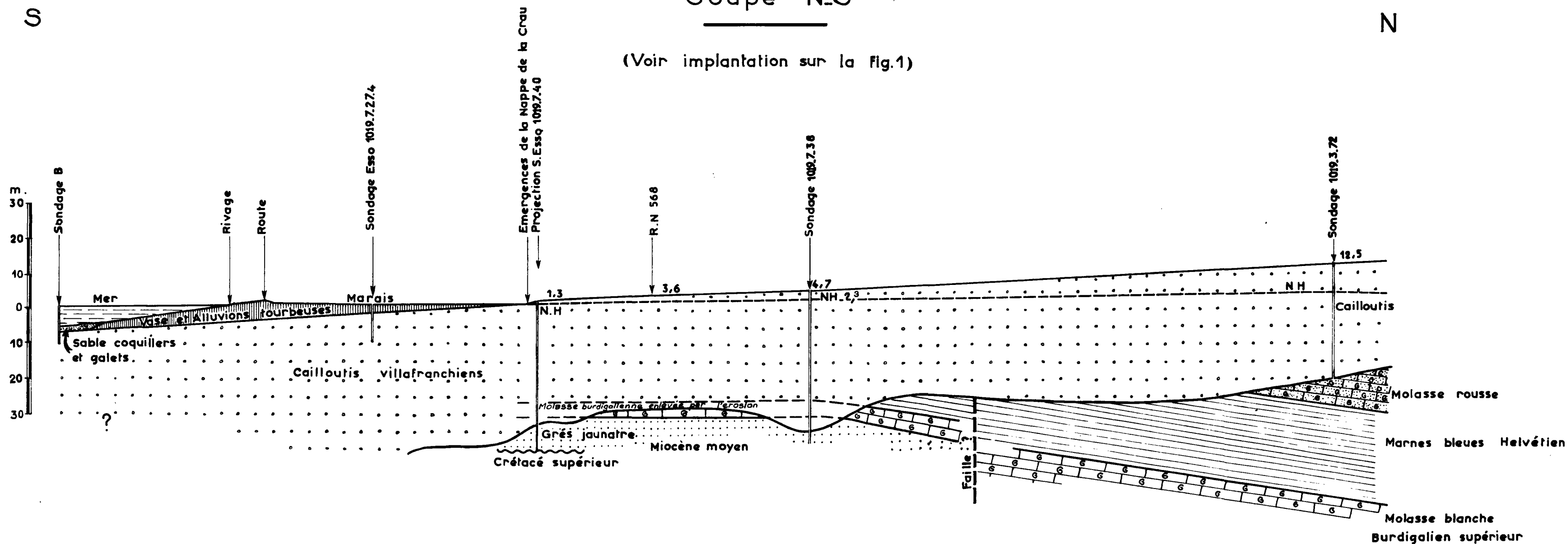
- 1200 Résistivités du terrain en ohms/mètre
- Profil théorique de la base des cailloutis selon les données de la géophysique
- Profil probable de la base des cailloutis selon les données des sondages
- Failles
- Toit des marnes (Burdigalien moyen ou Crétacé supérieur) selon les données de la géophysique

Fig.4

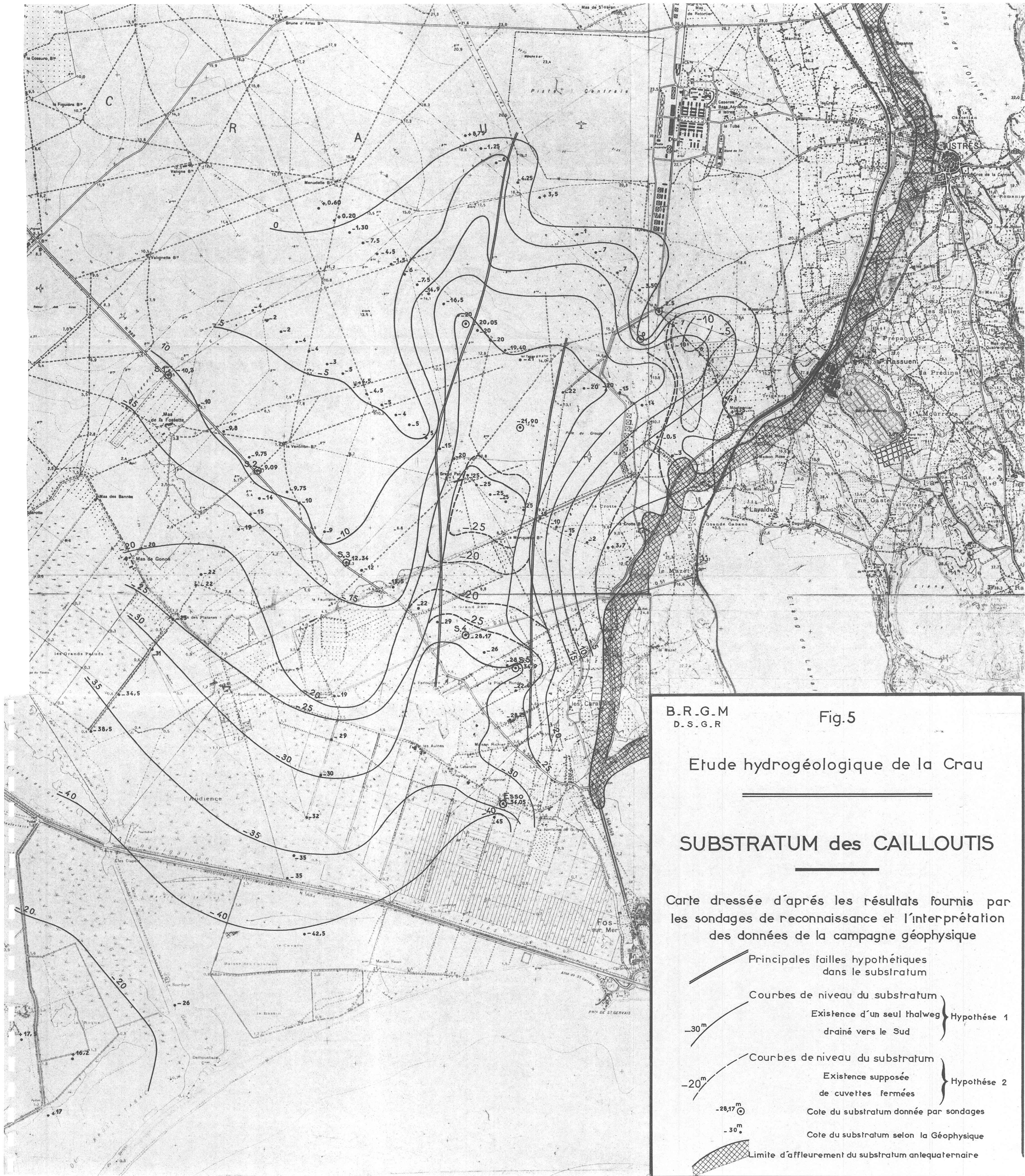
Etude hydrogéologique dans la Crau

Coupe N-S

(Voir implantation sur la fig.1)



Echelle des longueurs : 1/20.000



B.R.G.M
D.S.G.R

Fig.5

Etude hydrogéologique de la Crau

SUBSTRATUM des CAILLOUTIS

Carte dressée d'après les résultats fournis par les sondages de reconnaissance et l'interprétation des données de la campagne géophysique

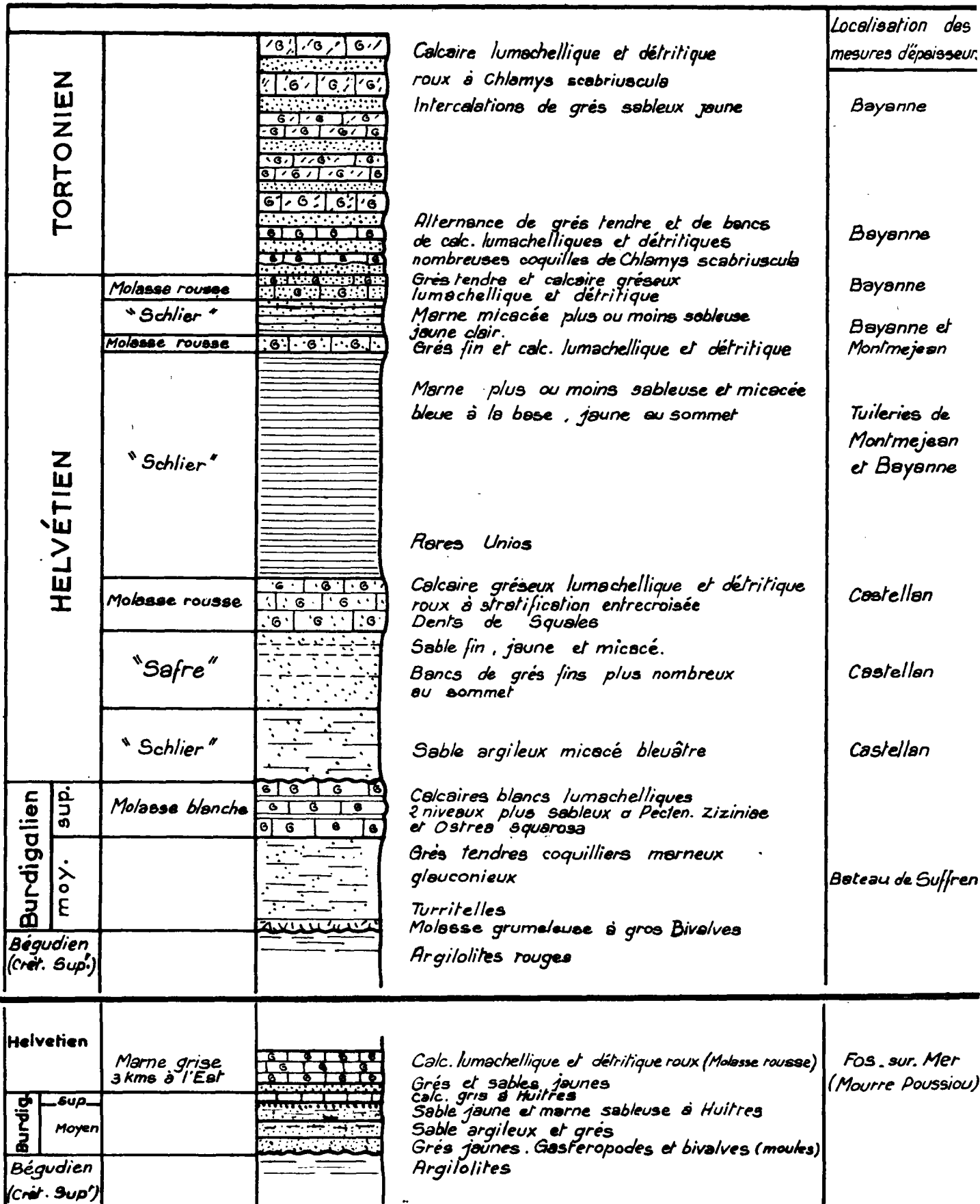
- Principales failles hypothétiques dans le substratum
- Courbes de niveau du substratum
- Existence d'un seul thalweg drainé vers le Sud
- Existence supposée de cuvettes fermées
- Cote du substratum donnée par sondages
- Cote du substratum selon la Géophysique
- Limite d'affleurement du substratum anelaquaternaire

Fig.6

Miocène de la bordure sud-orientale de la CRAU

Coupe stratigraphique

Echelle : 10 m.



A N N E X E 1

ETUDE DE LA NAPPE DE LA CRAU

Coupes des sondages S_1 à S_7

et

**Résultats des essais hydrauliques
effectués sur ceux-ci**

TABLE DES MATIERES
(Annexe 1)

	pages
1 - Coupes des sondages S_1 à S_7	3
- Sondage n° 1	
- Sondage n° 2	
- Sondage n° 3	
- Sondage n° 4	
- Sondage n° 5	
- Sondage n° 6	
- Sondage n° 7	
- Sondages piézométriques	
2 - Résultats des essais hydrauliques pour chaque sondage S_1 à S_7	
21 - Sondage n° 1	11
22 - Sondage n° 2	19
23 - Sondage n° 3	25
24 - Sondage n° 4	32
25 - Sondage n° 5	37
26 - Sondage n° 6	44
27 - Sondage n° 7	51

DÉPARTEMENT BOUCHES-du-RHÔNE

COMMUNE

FOS-sur-MER

Indice de classement :

1019

3

69

désignation

sondage n° 2

Cote du Sol (z) = + 6,00m

13.7-21.7.62

Supplément établie par : Ph. CHARBONNIER

Interprétation de : Ph. CHARBONNIER

Entreprise : SOLETANCHE

Commettant : MINISTÈRE DE LA
CONSTRUCTION

Profondeurs	Tubage et Cimentation	Plan d'eau	Mode de forage	Stratigraphie	Étage	Description Géologique	Valeur de K en 10 ⁻³ m/s	Valeur de K en 10 ⁻³ m/s
							Niveau Constant	
	143,12	N.H.				0,5 Gravier limoneux		
	2,9					Conglomérat très dur		
		4,30				2,4 Gravier et galets : Traces de cimentation		
						4,3 Gravier et galets		0,18
						6,3 Gravier et sables . q.q.s galets	8	0,03
						7,5 Gravier et sable argileux puis sable fin limoneux et gravier		
						9,2 Sable, gravier. q.q.s galets		
						10,7 Conglomérat très dur	3,5	
						12 Gros galets, traces de cimentation		
						13 Conglomérat	descente 0,1 remontée 0,5	
						15 Sable jaune micacé		
						15,6 q.q.s graviers (Helvétique remanié)		
						17,4 Grès tendre glauconieux verdâtre		
						Observation		
						15,6 à 17,4 : Helvétique moyen		
						Tube d'équipement rempli par		
						* Sédiments de 11 à 17,4		

PARTEMENT BOUCHES-du-RHONE

COMMUNE

FOS-sur-MER

Indice de classement :

1019

3

70

signation

Sondage n° 3

Cote du Sol (z) = + 6,00m

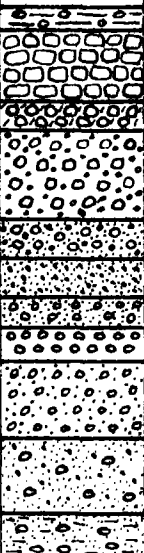
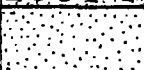
28.7-4.8.1962

pe établie par : Ph. CHARBONNIER

Entreprise : SOLETANCHE

représentation de : Ph. CHARBONNIER

Committant : MINISTRE DE LA
CONSTRUCTION

Profondeurs m	Tubage et Cimentation	Plan d'eau	Mode de forage	Coupe	Etage	Description Géologique	Valeur de K en 10 ⁻³ m/s	
							Lefranc	Microm.
0		N.H.	Percussion (Trépan et curette)		Alluvions. Plio-quatern. de la Crau	0,5 Galets et limon brun-rouge Conglomérat		
	113/125					2,5 3,4 Galets, gravier traces de cimentation		
5	3,8	3,15				Graviers et galets	0,7	80
						6,7 Gros galets, gravier, sable		
						8,2 Sable et gravier	4.	4
10	7"					9,4 Galets et sable	1,5	
						10,7 Galets		
						11,4 Gravier et galets	15	50
15	4 1/2"	15				13,8 Gravier et sable . q. qs galets	5	très faible
						16,4 Sable silteux micacé, q. qs galets		
			Rotation		Helv.	18 Grès verdâtre glauconieux à passées de grès sableux fin		
20	4 1/2"	121				21		
						Observations 16,4 à 18 : Helvetien remanié		

DÉPARTEMENT BOUCHES-du-RHÔNE

COMMUNE FOS-sur-MER Indice de classement : 1019 7 37

Désignation Sondage n° 4 Cote du Sol (z) = + 5,03m
11.8-2.9.1962

Opérateur établi par : Ph. CHARBONNIER
Interprétation de : Ph. CHARBONNIER

Entreprise : SOLETANCHE
Commettant : MINISTÈRE DE LA
CONSTRUCTION

Profondeurs	Tubage et Dimensions	Plan d'eau	Mode de forage	Couche	Étage	Description Géologique	Valeur K en 10 ⁻³ m/s Lefranc Microm.
0		N.H				Limon rouge, graviers et galets	
0,5						Conglomérat	
1,6						Galets et graviers	
2,2		2.6					19
5	2.9					Graviers, sable et quelques galets	10,8 8
7							14 très peu perméable
10	113. 185 mm Lucollex						1,4
10,3						Galets et sable	12 très peu perméable
11,5						Gravier fin et sable	5,5 9.
12,9						Galets, gravier et sable	2,5
13,9						Galets et gravier	20
15,2						Gravier et traces charbonneuses	3
15,50							16
16,50						Gravier, sable grossier un peu de silt	129
23,4						Gravier et sable fin	132,5
24,2						Gravier sable et silt	
32,2						Gravier, sable, galets	15,2
33,2						Calcaire lumachellique détritique blanc	0,015
35,6						Grès fin micacé jaunâtre	
36,2							
5	101 mm		Rotation Couronne diamant		Burdig.		
						Observations	
						Dépôt de sable après épuisement de 15,70 à 36,20, dégagé ultérieurement par pompage jusqu'à 35	

PARTEMENT BOUCHES-du-RHONE

COMMUNE FOS-sur-MER

Indice de classement : 1019 3 71

Désignation Sondage n° 6

Cote du Sol (z) = 14,05m
1.10-21.1962

Travaux établis par : Ph. CHARBONNIER
Interprétation de : Ph. CHARBONNIER

Entreprise : SOLETANCHE
Commettant : MINISTERE DE LA
CONSTRUCTION

Profondeurs	Tubage et Cimentation	Plan d'eau	Mode de forage	Coupe	Étage	Description Géologique	Valeur K en 10-3 m/s	Lefranc	Microm.
			Percussion (trépan et curette à clapet).		Alluvions plio-quaternaires de la Craie	0,4 Galets et limons rouge. Conglomerat 2,7 Graviers, galets, sable Traces de cimentation 9,00 Gravier fin et sable, galets 10,8 Gravier, sable, galets et silt 21,1 Gravier et silt 23,5 Gravier, sable et silt quelques galets vers 27m 29,5 Sable, gravier, silt. quelques galets 32,6 Bloc de molasse du Burdigalien sup. puis gravier et sable argileux 34,1 36 Marne bleue sableuse micacée Dépôt de sable de 27.90 à 36 après équipement			
7"	Ludflex 113-25 Voile nylon	N.H. - 7,4					9,5	40	
13,05	Ludflex 80-72 Voile nylon						4.	10	
4" 1/2							0,7	5	
								0,8	
							6	4	
							0,3		
			Rotation		Helvet.				

DÉPARTEMENT **BOUCHES-DU-RHÔNE**

COMMUNE **FOS-SUR-MER**

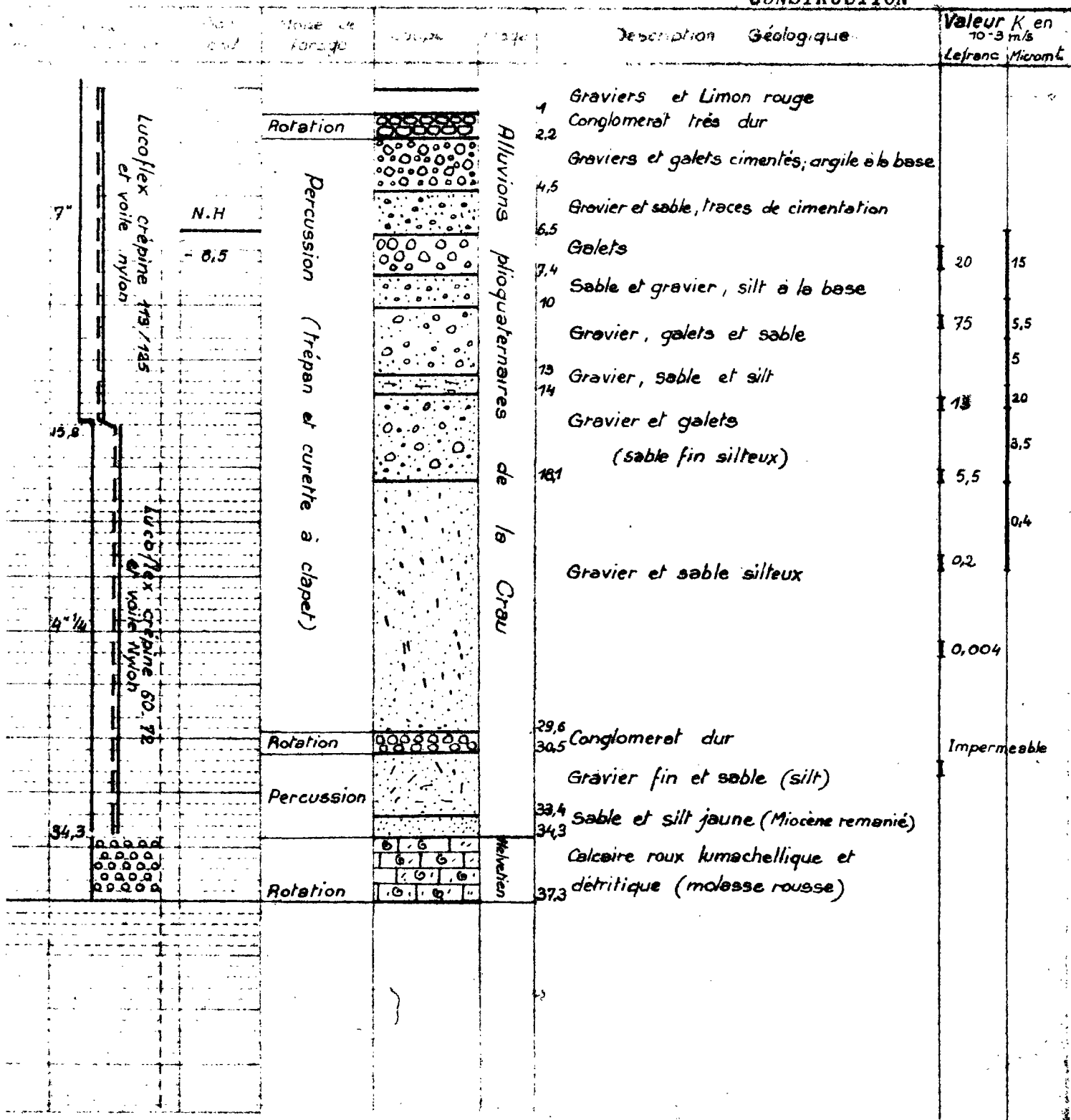
Indice de classement **1019 3 72**

Désignation **sondage n° 7**

Cote du Sol (x) = **28.10-18.11.62**

Travaux établis par **Ph. CHARBONNIER**
Interprétation de **Ph. CHARBONNIER**

Entreprise : **SOLETANCHE**
Commettant : **MINISTÈRE DE LA CONSTRUCTION**



DÉPARTEMENT BOUCHES-DU-RHÔNE

COMMUNE FOS-SUR-MER

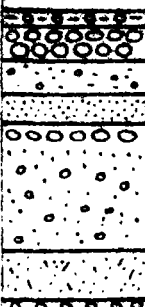


Indice de classement 1019 3 76bis

Désignation Sondage piézométrique

Cote du Sol (2) :
18.11-2.12.1962

Supplément établi par : Ph. CHARBONNIER
Interprétation de : Ph. CHARBONNIER

Entreprise : SOLETANCHE
Committant : MINISTÈRE DE LA
CONSTRUCTION

Profondeurs	Tubage et Cimentation	Plan d'eau	Mode de forage	Coupe	Étage	Description Géologique	
	Luciflex 70/78				Quaternaire	0,5 Galets et limon rouge 1,5 Conglomérat très dur 2,6 Gravier, galets et sable 3,3 Gravier fin et sable Gros galets puis : Gravier, galets et sable, traces de cimentation 8 Gravier et sable 9,5 Galets puis graviers et sable	P ₃ 1 7,50 m SW Puits de pompage
	Luciflex 70/78				Quaternaire	0,7 Gravier et terre rouge 1,5 Conglomérat très dur 2,7 Gravier, galets, sable, cimentés Gravier avec traces de cimentation 6 Gravier, gravier fin et sable 7,1 Gravier, galets, sable silteux 10	P ₃ 3 30 m NE du puits de pompage
	Luciflex 70/78				Quaternaire	0,6 Gravier et Limon rouge Conglomérat très dur 3 Galets, graviers, sable et argile sableuse 5,5 Gravier fin et sable ; traces de cimentation 6,5 Gravier et galets 7,9 Gros galets 8,3 Gravier fin et sable 9 Gravier et galets	P ₃ 4 60 m NW du puits de pompage
						Puits de pompage à 15 m du NW du sondage S ₃ . Terrains traversés identiques. Pro- fondeur 20 m	

2 - RESULTATS DES ESSAIS HYDRAULIQUES POUR CHAQUE SONDAGE S₁ à S₇

21 - Sondage n° 1 - x = 805,68 - y = 135,69 - z = 5,82

211 - Caractéristiques du forage

Le sondage a traversé sur 15 m les alluvions de la Crau avant d'atteindre le substratum constitué par des grés fins.

Il a été équipé :

1°/ de 0 à - 6,65 m de tube Lucoflex plein \varnothing 113/125 mm

2°/ de - 5 à - 25,6 m de tube Lucoflex crépiné \varnothing 60/80 mm

Après la mise en place de l'équipement du sable s'est déposé au fond jusqu'à - 16,28 m du niveau du sol.

Le niveau statique de la nappe a varié autour de - 4,30 m du niveau du sol au cours de la perforation.

212 - Déroulement de l'essai - Dispositif

L'aspiration comprenait 5,8 m de tube vertical \varnothing 42/48 mm.

La hauteur de refoulement était de 1,6 m au-dessus du niveau du sol.

L'essai a eu lieu le mardi 22 août. Il a comporté trois paliers.

- un premier palier de 2 heures où des variations accidentelles de débit ont perturbé la marche de l'essai.
- un second palier d'une heure.
- un troisième palier de 160 minutes.
- l'étude de la remontée sur une heure.

Des mesures continues du coefficient de perméabilité ont été réalisées lors des paliers un et trois à l'aide du micromoulinet Solétanche.

213 - Résultats

2131 - Mesure du coefficient de perméabilité (micromoulinet)

Les mesures, ainsi que les calculs, ont été effectuées par la Société Solétanche qui a fourni les valeurs suivantes :

de	- 7,9	à	- 9,9 m	K	#	5,5 . 10 ⁻³ m/s
	- 9,9	à	- 10,9 m	K	#	0,7 . 10 ⁻³ "
	- 10,9	à	- 11,4 m	K	#	4,2 . 10 ⁻³ "
	- 11,4	à	- 13,1 m	K	#	0,6 . 10 ⁻³ "
au-dessous de	- 13,1 m			K		très faible

En négligeant la transmissivité des deux mètres supérieurs, faible d'après les essais Lefranc, ceci donne une transmissivité

$$T = 1,5 . 10^{-2} \text{ m/s}$$

SONDAGE N° 1

Pompage - Descente

Q l/s	s mm	s/Q $m/m^3/s$	temps réel en secondes
1,14	41	36	180
	33	29	330
	34	29,9	360
	38	33,4	420
1,31	33	25,2	600
	36	27,5	720
	38	29	1 200
	43	32,8	1 800
1,79	59	33	2 100
	63	35,2	2 280
	65	36,3	2 520
	66	36,9	3 900
2,89	130	45	7 380
	134	46,4	7 560
	135	46,7	8 700
	142	49,1	9 900
4,5	273	60,6	10 260
	275	61	10 380
	277	61,5	10 620
	288	64	12 000
	288	64	19 500

2132 - Courbe rabattement spécifique en fonction du temps (Méthode de Theis)

Les éléments de calcul sont reportés sur le tableau ci-joint.

Sur le graphique obtenu les paliers 1 et 4 sont trop courts pour être interprétables. Les paliers 3 et 5 ne comportent que deux points. Le plus valable reste donc le palier 2 (sensiblement parallèle au 5) qui donne

$$\Delta \frac{s}{Q} = 15 \text{ m/m}^3/\text{s}$$

$$\Delta \frac{s}{Q} = \text{accroissement du rabattement spécifique dans un cycle log.}$$

d'où

$T = \frac{0,183}{15} \neq 1,2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$
--

Ce résultat reste sujet à caution mais est assez voisin de celui obtenu par micromoulinet.

2133 - Caractéristiques du forage

C'est la représentation du débit en fonction du rabattement pour les trois paliers de pompage.

$$Q = f(s)$$

On obtient une courbe parabolique classique.

2134 - Remontée

Nous avons interprété la remontée par la méthode

des écoulements transitoires (Méthode de Theis
en traçant le graphique de

$$\Delta \frac{s}{Q} \text{ en fonction de } \log \frac{t^*}{t'}$$

avec

$$t^* = \frac{\int_0^t q dt}{Q_t}$$

depuis le début du pompage.

t^* = temps fictif

q_t = débit intermédiaire à l'instant t

Q_t = " final à l'instant t

t' = temps écoulé depuis le début du pompage

ceci pour tenir compte du pompage à différents débits : l'évolution du rabattement spécifique est représentée non en fonction de $\log t$ mais du logarithme d'un temps fictif qui est le temps pendant lequel il aurait fallu pomper au dernier débit (Q_t) pour extraire le volume d'eau réellement tiré depuis le début.

Les éléments de calcul sont reportés sur le tableau joint.

SONDAGE N° 1

Remontée

$$\int_0^t q dt = \begin{array}{l} 7' \quad . \quad 1,14 \\ 23 \quad . \quad 1,31 \\ 35 \quad . \quad 1,79 \\ 100 \quad . \quad 2,89 \\ 160 \quad . \quad 4,5 \end{array} \quad \begin{array}{l} Qt = 4,5 \text{ l/s} \\ t^* = 260' \end{array}$$

Rabatement	Rabatement spécifique Q = 4,5 l/s	t* en minutes	t' en minute	t* / t' en minute
		260	0	
0,018	4	260,30	30"	521
0,018	4	261	1'	261
0,016	3,56	261,30	1'30	174
0,015	3,34	262	2'	131
0,014	3,11	263	3	88
0,013	2,89	264	4	66
0,016	3,58	266	6	44
0,011	2,44	268	8	33,30
0,011	2,44	270	10	27
0,008	1,78	275	15	18
0,008	1,78	280	20	14
0,007	1,56	295	35	8,30
0,007	1,56	320	60	5

SONDAGE N° 1

Transmissivités d'après les essais Lefranc

4,40 m	à	4,80 m	K =	0,06 . 10 ⁻³
8,68 m	à	8,88 m	K =	0,15 . 10 ⁻³
11,25 m	à	11,86 m	K =	0,6 . 10 ⁻³
15,19 m	à	18,70 m	K =	0,004 . 10 ⁻³
15,19 m	à	24,66 m	K =	0,014 . 10 ⁻³

On obtient un bon alignement des points expérimentaux

$$\Delta \frac{s}{Q} = 1,6 \text{ m/m}^3/\text{s}$$

ce qui donne

$$T \approx 1,2 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$$

Ce résultat semble nettement trop élevé par rapport à ceux obtenus par le micromoulinet et par l'étude de la descente. Cela est peut-être dû à une lente vidange de l'aspiration dans le forage du fait d'une mauvaise étanchéité du clapet de la pompe, cependant le résultat de l'essai de pompage est sujet à caution et pour le micromoulinet nous n'avons pas de mesure dans la partie supérieure de la nappe.

214 - Valeur de la transmissivité

Les essais Lefranc ne donnent aucune indication valable pour le sondage n° 1 c'est en effet sur lui qu'à été mise au point la méthode à employer. Les calculs ont été faits par le bureau d'études de la Société Solétanche. Les résultats figurent dans le tableau joint

Finalement on admettra pour la transmissivité une valeur

$$T \approx 6 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$$

ce qui donne pour coefficient de perméabilité moyen

$$K_m \approx 5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$$

en donnant à la nappe une puissance de 10,4 m.

22 - Sondage n° 2 - x = 806,71 - y = 134,59 - z = 6,51

221 - Caractéristiques du forage

Le sondage a traversé sur 15 m les alluvions de la Crau avant de rencontrer le substratum constitué par des grés tendres.

Il est équipé :

- 1°/ de 0,32 m hors sol à - 3,5 m en tube Lucoflex
plein ϕ 113/125 mm
- 2°/ de - 2,9 m à - 17,10 m en tube Lucoflex
crépiné ϕ 60/80 mm

Après équipement le sable s'est déposé au fond du forage jusqu'à la cote - 10,68 m.

Au cours de la perforation le niveau statique a oscillé autour de - 4,35 m du niveau du sol.

Il était à - 4,339 au début de l'essai de pompage.

222 - Déroulement de l'essai - Dispositif

L'aspiration comprenait 5,5 m de tube vertical ϕ 42/48 mm, 0,5 m de tube de 2 pouces.

L'essai a eu lieu le 24 juillet 1962. Il a comporté trois paliers.

- un premier palier de 40 minutes
- un second palier de 50 minutes
- un troisième palier de 45 minutes

La remontée a été suivie pendant 30 minutes.

Des mesures continues du coefficient de perméabilité ont été réalisées au micromoulinet Solétanche lors des paliers un et trois.

Des échantillons d'eau ont été prélevés aux fins d'analyse en début et fin de pompage.

La température de l'eau mesurée a donné 15° C. Le pH obtenu a été de 6,9.

223 - Résultats

2231 - Mesures du coefficient de perméabilité par micromoulinet (communiquées par Solétanche)

Les mesures effectuées donnent

de - 4,3 à - 5,5 m $K \approx 1,8 \cdot 10^{-2}$ m/s
- 5,5 à - 7, - m $K \approx 0,3 \cdot 10^{-2}$ m/s
au-dessous de - 7, m K très faible

ce qui donne une transmissivité pour $H = 10,7$

$$T \approx 2 \cdot 10^{-1}$$

2232 - Courbe rabattement spécifique en fonction du temps

La courbe expérimentale des rabattements spécifiques en fonction du logarithme du temps donne un bon alignement des points pour le premier palier de pompage. Les deux autres paliers sont ininterprétables. Pour ce premier palier on

obtient

$$\Delta \frac{s}{Q} = 2,5 \text{ m/m}^3/\text{s}$$

d'où

$$T = \frac{0,183}{2,5} = 7 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$$

2233 - Caractéristique du forage

C'est la représentation du débit en fonction du rabattement pour les trois paliers de pompage.

$$Q = f(s)$$

On obtient une courbe parabolique classique.

2234 - Remontée

Par la méthode des écoulements transitoires en traçant le graphique de

$$\Delta \frac{s}{Q} \text{ en fonction de } \log \frac{t^*}{t'}$$

$$\text{avec } t^* = \frac{\int_0^t q dt}{Q t}$$

depuis le début du pompage

Qt = étant le dernier débit

t' = le temps écoulé depuis la fin du pompage

on obtient

$$\Delta \frac{s}{Q} = 3,9 \text{ m/m}^3/\text{s}$$

d'où

$$T = 4,7 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$$

Valeur comparable aux valeurs précédemment trouvées.

SONDAGE N° 2

Descente

$\frac{Q}{l/s}$	s mm	$\frac{s}{Q}$ $m/m^3/s$	temps réel minute
4,88	155	31,8	2
	162	33,4	3,10
	164	33,6	4
	167	34,2	6
	169	34,6	10
	173	35,4	23
	178	36,5	39
3,93	142	36,2	80
	137	34,9	90
2,26	83	36,7	95
	71	31,4	110
	69	30,5	134

SONDAGE N° 2

Remontée

$$t^* = \frac{\int_0^t q dt}{Q t}$$

Rabattement	Rabattement spécifique $q = 2,27 \text{ l/s}$	t minute	t' minute	t* minute	t*/t' minute
		135	0	232	
			15"		928
			35"		401
0,021	9,25				
0,014	6,17	136	1'05"	233	215
0,016	7,05	136,33	1'20"	233,33	175
0,021	9,25		1'40"		140
0,015	6,51	137	2'	234	117
0,015	6,51	138	3'	235	78
0,012	5,29	139	4'	236	58
0,012	5,29	141	6'	238	40
0,012	5,29	145	10'	242	24,2
0,008	3,53	155	20'	252	12,6
0,002	0,88	165	30'	262	8,75
0,008	3,53	150	15'	247	16,5

224 - Valeur de la transmissivité

Les essais Lefranc calculés par Solétanche donnent

de	6,4	à	6,7	m	K	#	8	.	10^{-3}	m/s
	10,1	à	10,25	m	K	#	3,5	.	10^{-3}	m/s
	12,7	à	13,9	m	K	#	1,3	.	10^{-4}	m/s

donc

$$T \neq 3 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$$

Nous voyons que les méthodes de calcul de la transmissivité

- Essais Lefranc
- Theis remontée
- Theis pompage

donnent des résultats comparables. Le micromoulinet donne une valeur plus forte. On admettra une transmissivité de

$$T = 4 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$$

ce qui donne pour coefficient de perméabilité moyen

$$K_m \neq 4,2 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$$

en donnant à la nappe une puissance de 10,7 m.

23 - Sondage n° 3 - x = 807,74 - y = 133,63 - z = 5,66

231 - Caractéristiques du forage

Le sondage a traversé 16,4 m d'alluvions de la Crau avant de rencontrer le substratum constitué par un grès tendre (Helvétien).

Il a été équipé :

- 1°/ de 0,2 hors sol à - 3,8 m de tube Lucoflex plein
ø 113/125 mm
- 2°/ de - 3,8 m à - 15,8 m de tube Lucoflex cré-
piné ø 113/125 mm
- 3°/ de - 15,- m à - 21,- m de tube Lucoflex cré-
piné ø 60/72 mm

Après équipement du sable s'est déposé au fond du forage jusqu'à la cote - 15,63 m.

Le niveau statique au cours de la perforation a oscillé autour de - 3,15 m.

232 - Déroulement de l'essai - Dispositif

L'aspiration comprenait 6,5 m de tube vertical de 3 pouces, 1 coude à 135° de 3 pouces, 1 coude à 90° de 3 pouces.

Le refoulement comprenait 18 m de tube métallique ø intérieur 88 mm, une vanne 3 pouces avec raccord union

La hauteur de refoulement était de 2 m environ au-dessus du niveau du sol.

L'essai a eu lieu le 20 août 1962. Il a comporté 4 paliers.

- premier palier de 100 minutes
- second palier de 30 minutes
- troisième palier de 120 minutes
- quatrième palier de 90 minutes

La remontée a été suivie pendant une heure.

Des mesures continues du coefficient de perméabilité ont été réalisées au micromoulinet Solétanche pour deux débits 5,14 et 12,12 l/s après l'essai de pompage proprement dit.

Des échantillons d'eau ont été prélevés aux fins d'analyse en début et fin de pompage.

La température de l'eau mesurée a donné 15° C. Le pH était de 6,9.

233 - Résultats

2331 - Mesure du coefficient de perméabilité par micromoulinet

Les résultats donnés par Solétanche sont les suivants :

de	3,23	à	6,7	m	K	#	80	$\cdot 10^{-3}$	m/s
	6,7	à	10,3	m	K	##	4	$\cdot 10^{-3}$	m/s
	10,3	à	13,3	m	K	##	50	$\cdot 10^{-3}$	m/s
	13,3	à	18	m	K				très faible

ce qui donne une transmissivité

$$T \neq 4,3 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$$

Le micromoulinet a en outre mis en évidence l'existence d'un courant ascendant (0,7 l/sec. environ) d'une zone supérieure (entre 4,5 et 6,9) vers une zone inférieure (12 m à 13,5) correspondant à une circulation préférentielle dans une zone à forte perméabilité (gros graviers) au-dessus de niveaux moins perméables (sableux).

2332 - Courbe rabattement spécifique en fonction du temps

Le tableau joint donne les éléments de calcul.

A l'aide des paliers 2 et 3 on peut prendre

$$\Delta \frac{s}{Q} = 2,5 \text{ m/m}^3/\text{s}$$

ce qui donne pour la transmissivité

$$T = 7 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$$

Cependant ce résultat reste sujet à caution car on n'obtient pas un alignement net des points sur le graphique à cause des phénomènes de turbulence.

SONDAGE N° 3

Pompage

$\frac{Q}{l/s}$	s mm	$\frac{s/Q}{m/m^3/s}$	temps réel en minutes
6,66	12	1,82	30
	13	1,97	100
9,17	18	1,96	105
	19	2,07	110
	19	2,07	130
12,80	25	1,95	133
	27	2,11	136
	31	2,42	180
	34	2,66	220
	38	2,97	230
19,45	47	2,42	248
	48	2,47	249
	49	2,52	251
	51	2,62	255
	51	2,62	265
	53	2,72	275
	55	2,83	285
	58	2,98	300
	59	3,04	320

SONDAGE N° 3

remontée

$$t^* = \frac{e \int_0^r q dt}{Q t}$$

Rabatement	Rabatement spécifique Q = 19,45 l/s	t minute	t' minute	t* minute	t*/t' minute
		379	0	236	
0,034	1,75	379,16	10"	236,16	1412
0,032	1,65	379,58	35"	236,58	406
0,032	1,65	380	1'	237	237
0,030	1,54	381	2'	238	119
0,026	1,34	382	3'	239	80
0,023	1,18	384	5'	241	48
0,021	1,08	389	10'	246	24,6
0,019	0,98	394	15'	251	16,7
0,010	0,515	409	30'	266	8,9
0,007	0,36	424	45'	281	6,25
0,007	0,36	440	61'	297	4,9

2333 - Caractéristique du forage

C'est la représentation du débit en fonction du rabattement

$$Q = f(s)$$

On obtient une courbe parabolique classique.

2334 - Remontée

Elle est représentée en fonction du temps. Nous avons tracé le graphique des rabattements résiduels spécifiques en fonction du $\log \frac{t^*}{t'}$

$$t^* = \frac{\int_0^t q dt}{Q t}$$

qt = dernier débit

t' = temps écoulé depuis la fin du pompage

L'alignement des points, correct dans la partie médiane de la courbe, donne

$$\Delta \frac{s}{Q} = 0,54 \text{ m/m}^3/\text{s}$$

d'où une transmissivité

$$T = 3,4 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$$

234 - Valeur de la transmissivité

Les essais Lefranc donnent (calculs établis par Solétanche)

4,50 m	à	4,90 m	K =	0,70	.	10^{-3}	m/s
6,75 m	à	7,15 m	K =	4,-	.	10^{-3}	m/s
8,96 m	à	9,36 m	K =	1,50	.	10^{-3}	m/s
10,97 m	à	11,37 m	K =	15,-	.	10^{-3}	m/s
15,10 m	à	15,24 m	K =	5,-	.	10^{-3}	m/s

soit une transmissivité si $H = 13,2$

$$T = 0,6 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$$

Ainsi, micromoulinet et essai de pompage donnent pour la transmissivité des résultats concordants qui permettent d'admettre pour le sondage 3 la valeur

$$T = 3 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$$

Cette valeur est considérable : elle donne pour une puissance de nappe de 13,2 m, une perméabilité moyenne :

$$K_m = 2,3 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$$

24 - Sondage n° 4 - x = 809,12 - y = 132,84 - z = 5,03

241 - Caractéristiques du forage

Le sondage a traversé 33,20 m d'alluvions de la Crau avant de rencontrer le substratum constitué par un calcaire lumachellique et détritique (molasse).

Il est équipé

- 1°/ de 0,20 hors sol à - 2,9 m de tube Lucoflex plein
Ø 113/125 mm
- 2°/ de - 2,9 m à - 16,5 m de tube Lucoflex crépiné
Ø 113/125 mm
- 3°/ de - 15,5 m à - 36,- m de tube Lucoflex crépiné
Ø 60/72 mm

Après équipement le sable a envahi le forage jusqu'à la cote - 15,70 m. Il a donc fallu procéder à un dessablage avant de réaliser l'essai de pompage.

On a ainsi pu pomper sur un forage propre jusqu'à - 31,80 m

Le niveau statique a oscillé au cours de la perforation autour de - 2,6 m.

242 - Déroulement de l'essai -dispositif

L'aspiration comprenait 3,65 m de tube métallique de 3 pouces disposé verticalement, un coude à 135° et un coude à 90°.

Le refoulement comprenait 26,5 m de tube métallique 3 pouces, une vanne de 3 pouces. La hauteur de refoulement étant de 0,85 m.

L'essai a eu lieu le 2 octobre 1962. Il a comporté 4 paliers.

- un premier palier de 60'
- un second palier de 60'
- un troisième palier de 40'
- un quatrième palier de 40' (en fait 2 paliers car il y a eu un changement de régime de la pompe à la 15ème minute).

La remontée a été suivie pendant 20'.

Des mesures continues du coefficient de perméabilité ont été réalisées pour deux débits 8,5 et 10,9 l/s après l'essai de pompage proprement dit.

Des échantillons d'eau ont été prélevés aux fins d'analyse en début et fin de pompage.

La température de l'eau, mesurée, a été de 15° C. Le pH a donné 6,9.

243 - Résultats

2431 - Mesure du coefficient de perméabilité (Micromoulinet)

Les résultats donnés par Solétanche sont les suivants :

5,5 m	à	7 m	K =	6	. 10 ⁻³
7 m	à	8,6 m	Zone très peu perméable		
8,6 m	à	10 m	K =	14	. 10 ⁻³
10 m	à	11,25 m	Zone très peu perméable		
11,25 m	à	13 m	K =	9	. 10 ⁻³
13 m	à	13,80 m	K =	2,5	. 10 ⁻³
13,80 m	à	14,80 m	K =	20	. 10 ⁻³
14,80 m	à	17 m	K =	3	. 10 ⁻³
Au dessous de 17 m			Zone très peu perméable		
d'où :			K ≠	8,5	. 10 ⁻³

$$T = 2,5 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s} \quad (H = 30,4)$$

Le micromoulinet a en outre mis en évidence l'existence d'un courant ascendant (0,2 à 0,3 l/s) d'une zone située entre 31 et 32 m vers la surface de la nappe (circulation dans les niveaux grossiers de la base des alluvions en charge sous les couches silteuses moins perméables).

2432 - Courbe rabattement spécifique en fonction du temps

Les paliers n'ont pas été assez longs pour permettre de déterminer correctement

$$\Delta \frac{s}{Q}$$

Les phénomènes de turbulence masquent la relation entre le rabattement spécifique et le log. du temps.

Sur le tableau joint figurent les débits et les temps ainsi que les valeurs du rabattement spécifique. En utilisant les données du 2ème palier on obtient une valeur de la transmissivité de

$$T = 5,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$$

2433 - Caractéristique du forage

C'est la représentation du débit en fonction du rabattement

$$Q = f(s)$$

On obtient une courbe parabolique classique.

2434 - Remontée

La remontée n'a sans doute pas été suivie de façon correcte, ou a été perturbée par un phénomène parasite (vidange de l'aspiration).; elle ne permet pas, elle non plus, de déterminer la valeur de transmissivité.

244 - Valeur de la transmissivité

Les essais Lefranc (calculés par Solétanche) donnent :

	à	3,59 m	K = 9	. 10^{-3} m/s
5,64 m	à	5,94 m	K = 0,8	. 10^{-3} m/s
7,70 m	à	8,00 m	K = 4	. 10^{-3} m/s
10,01 m	à	10,31 m	K = 12	. 10^{-3} m/s
11,95 m	à	12,65 m	K = 5,5	. 10^{-3} m/s
15,76 m	à	16,06 m	K = 15	. 10^{-3} m/s
19,35 m	à	19,58 m	K = 29	. 10^{-3} m/s
21,96 m	à	22,26 m	K = 32,50	. 10^{-3} m/s
31,29 m	à	31,49 m	K = 5	. 10^{-3} m/s
33,20 m	à	36,20 m	K = 0,015	. 10^{-3} m/s

$$K \neq 5,3 \cdot 10^{-3}$$

d'où

$$\boxed{T = 1,6 \cdot 10^{-1}} \quad (H = 30,4)$$

On admettra une transmissivité de $3 \cdot 10^{-1}$
et une perméabilité de $1 \cdot 10^{-2}$

SONDAGE N° 4

Descente

Q l/s	s mm	S/Q m/m ³ /s	temps minutes
3,77	8	2,2	23
10,7	107	10	67
	112	10,5	72
	115	10,75	80
	116	10,85	85
	116	10,85	100
	116	10,85	126
13,04	165	12,65	128
	166	12,7	130
	167	12,8	135
20,19	362	17,4	185

25 - Sondage n° 5 - $x = 809,61$ - $y = 132,46$ - $z = 4,75$

251 - Caractéristiques du forage

Le sondage a traversé 39,3 m d'alluvions de la Crau avant de rencontrer le substratum constitué par une marne bleue micacée (Burdigalien moyen).

Il a été équipé de la façon suivante :

- 1°/ de - 30 m à - 43 m le forage a été rempli de graviers (20/30 mm) pour empêcher son éboulement
- 2°/ de - 30 m à - 17 m environ, il a été équipé de tube Lucoflex crépiné \varnothing 60/72 mm.
- 3°/ entre - 16 m et - 17 m environ, il existe une coupure accidentelle dans laquelle le forage est éboulé et où il n'y a aucun équipement.
- 4°/ de - 16 m à - 2,5 m il a été équipé de tube Lucoflex crépiné \varnothing 113/125 mm.
- 5°/ de - 2,5 m à - 0,42 hors sol tube Lucoflex plein \varnothing 113/125 mm.

Avant l'essai de pompage, le forage a été plombé à - 15 m, il y a donc eu un petit dépôt de sable au-dessus de la coupure accidentelle.

Diverses méthodes d'instrumentation ont été appliquées pour essayer de réduire cette coupure, mais sans résultat.

Au cours de la perforation le niveau d'eau a oscillé autour de - 2,25 m en-dessous de la cote du sol.

252 - Déroulement de l'essai - dispositif

L'aspiration comprenait 3,65 m de tube métallique \varnothing 3 pouces, disposé verticalement, un coude à 135° de \varnothing 3 pouces, un coude à 90° de \varnothing 3 pouces.

Le refoulement comprenait 20 m de tube métallique \varnothing 3 pouces, une vanne 3 pouces.

La hauteur de refoulement étant d'environ 2 m au-dessus du niveau du sol.

L'essai a eu lieu le 3 octobre 1962. Il a comporté 4 paliers :

- un premier palier de 70 minutes
- un second palier de 40 minutes
- un troisième palier de 60 minutes
- un quatrième palier de 55 minutes

La remontée a été suivie pendant deux heures.

Des mesures continues du coefficient de perméabilité ont été réalisées avec le micromoulinet Solétanche lors des paliers 1 et 3.

Un échantillon d'eau a été prélevé en fin de pompage pour analyse.

La température et le pH de l'eau donnèrent respectivement 15° C et 6,9.

253 - Résultats

2531 - Mesure du coefficient de perméabilité par micro-moulinet

Le sondage étant éboulé à 16,10 m, le micromoulinet n'a pu être descendu au-dessous de 14,60 m

Les résultats donnés par Solétanche sont les suivants :

3,25 m à	5,- m	K =	5,- . 10^{-3} m/s
5,- m à	8,- m	Zone très peu perméable	
8,- m à	8,6 m	K =	3,- . 10^{-3} m/s
8,6 m à	11,25 m	Zone très peu perméable	
11,25 m à	12,8 m	K =	17,- . 10^{-3} m/s
12,8 m à	14,8 m	K =	0,2 . 10^{-3} m/s

$$K \neq 5 . 10^{-3} \text{ m/s}$$

$T = K . H = 1,8 . 10^{-1}$

$$H = 37$$

2532 - Caractéristique du forage

C'est la représentation du débit en fonction du rabattement

$$Q = f(s)$$

On obtient une courbe parabolique classique.

2533 - Courbe rabattement spécifique en fonction du temps

L'interprétation du graphique rabattement spécifique en fonction du log. du temps est très

aléatoire car les phénomènes de turbulence y masquent la relation linéaire en écoulement laminaire.

Les rabattements spécifiques en fonction du temps figurent sur le tableau ci-joint.

Avec beaucoup de réserves, on peut sur le second palier déterminer

$$\Delta \frac{s}{Q} = 0,70 \text{ m/m}^3/\text{s}$$

d'où on tire

$$T \approx 2,6 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$$

2534 - Remontée

Nous avons tracé le graphique des rabattements résiduels spécifiques en fonction du log. de $\frac{t^*}{t'}$

$$t^* = \frac{\int_0^t q dt}{Q t}$$

Qt = dernier débit de pompage

t' = temps écoulé depuis la fin du pompage.

L'alignement des points expérimentaux est excellent : c'est une bonne illustration de la méthode de Theis.

On déduit

$$\Delta \frac{s}{Q} = 0,755 \text{ m/m}^3/\text{s}$$

$$T = 2,4 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$$

254 - Valeur de la transmissivité

Les essais Lefranc (calculés et donnés par Solétanche) sont les suivants :

4,65	à	4,95	K	=	6	.	10^{-3}	m/s
8,25	à	8,55	K	=	1	.	10^{-3}	
7,27	à	7,57	K	=	2	.	10^{-3}	
12,59	à	12,89	K	=	19	.	10^{-3}	
15,26	à	15,81	K	=	15	.	10^{-3}	
20,18	à	20,65	K	=	0,1	.	10^{-3}	
22,64	à	23,13	K	=	0,2	.	10^{-3}	
27,30	à	27,70	K	=	0,1	.	10^{-3}	
32,55	à	33,07	K	=	0,2	.	10^{-3}	
33,08	à	38,58	K	=	0,2	.	10^{-3}	

$$K = 4 \cdot 10^{-3}$$

$$H = 37$$

Soit une transmissivité de

$T \neq 1,4 \cdot 10^{-1}$

A la suite de ces déterminations de transmissivité par différentes méthodes, nous adopterons pour celle-ci la valeur :

SONDAGL N° 5

Pompage

Q l/s	s mm	SQ m/m3/s	temps minutes
7,165	103	14,4	5'
	104	14,5	30'
	104	14,5	65'
10,97	164	14,95	69'30"
	172	15,70	71'
	173	15,8	72'
	176	16,05	74'
	177	16,15	78'
	178	16,25	95'
14,45	247	17,10	110'
	258	17,85	111'
	260	18	114'
	263	18,2	116'
	264	18,3	140'
	264	18,3	170'
20,90	456	21,8	172'
	484	23,2	175'
	486	23,3	200'
	486	23,3	225'

$$T \approx 2 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$$

et une perméabilité de

$$5 \cdot 10^{-3}$$

(H = 37 mm)

Les essais Lefranc montrent que la partie profonde de la nappe de - 20 à - 39,3 (la moitié de la puissance totale) n'intervient que pour $\frac{1}{60}$ de la valeur de cette transmissivité.

Si on la néglige, on obtient pour les 19 premiers mètres de la nappe, un coefficient de perméabilité moyen.

$$K_m \approx 1,05 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$$

26 - Sondage n° 6 - x = 809,01 - y = 136,36 - z = 14,05

261 - Caractéristiques du forage

Le sondage a traversé 34 m d'alluvions de la Crau, avant de rencontrer le substratum constitué par des marnes blanches (Helvétien).

Il a été équipé :

- 1°/ - de 0,42 hors sol à - 5,03 m de tube Luciflex plein \varnothing 113/125 mm
- 2°/ - de - 5,03 à - 13,08 m de tube Luciflex crépiné \varnothing 113/125 mm
- 3°/ - de - 12 à - 32,6 m de tube Luciflex crépiné \varnothing 60/72 mm

Après équipement, du sable s'est déposé au fond du forage jusqu'à la cote - 27,90 m bien que les tubes crépinés aient été entourés d'un voile de nylon à mailles 1,5 . 2 mm.

Au cours de la perforation le niveau statique a oscillé autour de 7,4 m ce qui est relativement profond et a amené des difficultés dans l'essai de pompage car on ne disposait que d'une pompe de surface.

262 - Déroulement de l'essai - Dispositif

L'aspiration comprenait 9,16 m de tube métallique vertical \varnothing 2,5 pouces, 1 crépine de 2 $\frac{1}{2}$ pouces, 1 réduction 2 $\frac{1}{2}$ / 3 pouces, 1 coude à 90° et 1 coude à 135° en \varnothing 3 pouces.

Le refoulement comprenait 1 vanne de 3 pouces, 30 m de tube 3 pouces, 20 m de tube 3 $\frac{1}{2}$ pouces, un raccord 3 / 3 $\frac{1}{2}$ pouces.

La hauteur de refoulement était de 1,2 m au dessus du sol.

L'essai a présenté pas mal de difficultés du fait de la longueur d'aspiration qui approchait de la limite de possibilité de la pompe.

L'essai proprement dit a été effectué le 27 octobre sous une pluie violente.

Il a été pratiquement impossible de maintenir le débit très constant, cependant on peut distinguer :

- un palier d'une heure à 3,55 l/s
- un palier d'une heure à 4,30 l/s
- un palier de 2 heures à 4,18 l/s
- une remontée suivie pendant 10 minutes.

Lors de cet essai des mesures continues du coefficient de perméabilité ont été réalisées au micromoulinet Solétanche.

Les résultats de cet essai ont montré la nécessité d'un petit essai complémentaire qui a été réalisé le 12 novembre. Il a consisté en un pompage de 2 heures à 4,10 l/s et l'étude de la remontée pendant 20 minutes.

Un échantillon d'eau a été prélevé à la fin de ce pompage pour analyse.

263 - Résultats

2631 - Mesure de la transmissivité par Micromoulinet

Les mesures effectuées donnent :

9,10	à	10	m	K	=	40	.	10 ⁻³
10	à	11,5	m	K	=	30	.	10 ⁻³
11,5	à	13	m	K	=	10	.	10 ⁻³
13	à	16,1	m	K	=	5	.	10 ⁻³
16,1	à	23,7	m	K	=	0,8.	10 ⁻³	
23,7	à	25,45	m	K	=	4	.	10 ⁻³

En dessous de 25,45 K = très peu perméable

Soit

$T = 1,9 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$
--

Le micromoulinet a montré l'existence d'un courant descendant (0,5 l/s environ), d'une zone comprise entre 9 et 11 m vers une zone de 23,5 m.

2632 - Caractéristiques du forage

C'est la représentation du débit en fonction du rabattement. Le débit n'ayant pas été poussé au-delà de 418 l/s, on obtient une droite

représenté sur le graphique ci-joint.

2633 - Courbe rabattement spécifique en fonction du te

- a) - lors du pompage une pseudostabilisation est tout de suite atteinte après l'amortissement des à-coups dus au départ de la pompe.

La courbe expérimentale des rabattements spécifiques en fonction du log. du temps n'est pas interprétable par la méthode de Theis. Il faudrait procéder à des pompages de plus longue durée et à plus fort débit.

- b) - Remontée

Si on trace le graphique des rabattements résiduels spécifiques en fonction du log. de $\frac{t}{t'}$ (tableau joint)

t = temps écoulé depuis le début du pompage

t' = temps écoulé depuis l'arrêt de la pompe.

On obtient assez correctement une droite d'où nous tirons :

$$\Delta \frac{s}{Q} = 0,52 \text{ m/m}^3/\text{s}$$

Et la transmissivité T

$$T = \frac{0,183}{0,52} = 3,5 \cdot 10^{-1}$$

$$T = 3,5 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$$

264 - Valeur de la transmissivité

Les essais Lefranc, calculés et communiqués par Solétanche, permettent d'établir une valeur de la transmissivité

8,91	à	9,41	K	=	9,5	.	10^{-3}	m/s
11,72	à	12,20	K	=	4	.	10^{-3}	
15,68	à	16,18	K	=	0,7	.	10^{-3}	
24,31	à	24,76	K	=	6	.	10^{-3}	
29,65	à	30,5	K	=	0,3	.	10^{-3}	

d'où

$$T \simeq 0,85 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$$

Cette valeur n'est certainement pas très précise : plusieurs essais auraient été nécessaires pour tester de façon correcte les quatres premiers mètres sous le niveau statique qui sont les plus perméables.

Ainsi en tenant compte des valeurs obtenues pour la transmissivité, par micromoulinet, par l'étude de la remontée après le pompage et par les essais Lefranc, on peut attribuer à celle-ci la valeur moyenne :

$$T \simeq 2 \text{ à } 3 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$$

et pour la perméabilité

$$K = 7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$$

$$H = 26$$

SONDAGE N° 6

Essai de pompage complémentaire

Remontée

$\frac{Q}{l/s}$	Δs	$\Delta s/Q$	t minutes	t' minutes	t'/t minutes
			120	0	
4,1	0,004	0,975	120,25	0,25	481
	0,003	0,732	120,5	0,5	241
	0,002	0,488	122	2	61
	0,001	0,244	127	7	18,15
	0,0005	0,122	132	12	11
	0,0005	0,122	140	20	7

27 - Sondage n° 7 - x = 809,53 - y = 135,26 - z = 12,20

271 - Caractéristiques du forage

Le sondage a traversé les alluvions de la Crau sur 34 m avant de rencontrer le substratum constitué par un calcaire lumachellique et détritique (molasse).

Il a été équipé :

- 1°/ de 0,35 hors sol à - 0,25 m de tube Lucoflex plein \varnothing 113/125 mm
- 2°/ de - 0,25 m à - 16,- m de tube Lucoflex crépiné \varnothing 113/125 mm entouré d'un voile de nylon à mailles 1,5 . 2 mm
- 3°/ de - 16,- m à - 34,30 m de tube Lucoflex crépiné \varnothing 60/72 mm entouré d'un voile de nylon à mailles 1,5 . 2 mm

Après équipement du sable s'est déposé au fond du forage jusqu'à la cote - 28,80 m.

272 - Déroulement de l'essai - dispositif

L'aspiration comprenait 7,8 m de tube métallique vertical \varnothing 2 $\frac{1}{2}$ pouces, une crépine \varnothing 2 $\frac{1}{2}$ pouces, un raccord 2 $\frac{1}{2}$ - 3 pouces, un coude à 90° et un coude à 135° en 3 pouces.

Le refoulement comprenait 1 vanne de 3", 30 m de tube de 3", 1 raccord de 3/3 $\frac{1}{2}$ pouces, 18 m de tube de 3 $\frac{1}{2}$ pouces.

La hauteur de refoulement était de 1,1 m.

L'essai a eu lieu le 6 décembre; Il a comporté 3 paliers :

- un palier de 120 '
- un palier de 130'
- un palier de 90'

La remontée a été suivie pendant une heure.

Des mesures continues du coefficient de perméabilité ont été réalisées au micromoulinet Solétanche pour le second et le troisième palier.

Des échantillons d'eau ont été prélevés en début et en fin de pompage pour analyse.

La température de l'eau mesurée a donné 14,5° C et le pH était de 6,6

273 - Résultats

2731 - Mesure de la transmissivité par Micromoulinet
Résultats fournis par Solétanche

6,73	à	10,60	m	K =	15	.	10^{-3}	m/s
10,60	à	11,15	m	K =	55	.	10^{-3}	
11,15	à	13,40	m	K =	5	.	10^{-3}	
13,40	à	14,20	m	K =	20	.	10^{-3}	
14,20	à	17,75	m	K =	3,5	.	10^{-3}	
17,75	à	22	m	K =	0,4	.	10^{-3}	

Au dessous de 22 m K = très peu perméable

$$K = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$$

$$H = 27,5$$

$T = 2 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$
--

2732 - Caractéristiques du forage

C'est la représentation du débit en fonction du rabattement

$$Q = f(s)$$

Les paliers sont trop rapprochés pour donner une bonne définition graphique de la caractéristique.

SONDAGE N° 7

Descente

s m	Q m ³ /s	Δ s/Q	t
30 . 10 ⁻³	4,81 . 10 ⁻³	6,24	1' 15"
32 . 10 ⁻³	4,81 . 10 ⁻³	6,66	3' 30"
33 . 10 ⁻³	4,81 . 10 ⁻³	6,87	15'
34 . 10 ⁻³	4,81 . 10 ⁻³	7,07	120'
36 . 10 ⁻³	4,55 . 10 ⁻³	7,80	185'
38 . 10 ⁻³	4,87 . 10 ⁻³	7,81	295'

2733 - Courbe rabattement spécifique en fonction du temps

Les valeurs du rabattement spécifique en fonction du temps figurent dans le tableau joint. Du graphique, où l'alignement des points expérimentaux n'est pas remarquable, on peut tirer :

$$\Delta \frac{s}{Q} = 0,7 \text{ m/m}^3/\text{s}$$

D'où une valeur de la transmissivité T

$$T = \frac{0,183}{\Delta s/Q} = \frac{0,183}{0,7}$$

$T = 2,6 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$
--

2734 - Etude de la remontée

Si l'on trace le graphique des rabattements résiduels spécifiques, en fonction du log. du temps (tableau joint), on obtient un alignement des points expérimentaux qui sans être excellent permet de tirer :

$$\Delta \frac{s}{Q} = 0,75 \text{ m/m}^3/\text{s}$$

SONDAGE N° 7

Remontée

$$t^* = \frac{\int_0^t q dt}{Q t}$$

s	s/Q t	t*	t'	t*/t'
	4,87	330'	0	
17 . 10 ⁻³	3,49	330' 5"	5"	3961
7 . 10 ⁻³	1,44	330' 15"	15"	1321
5 . 10 ⁻³	1,025	330' 30"	30"	661
5 . 10 ⁻³	1,025	330' 45"	45"	441
3 . 10 ⁻³	0,616	331'	1'	331
3 . 10 ⁻³	0,616	332'	2'	166
2 . 10 ⁻³	0,411	333'	3'	111
2 . 10 ⁻³		335'	5'	67
2 . 10 ⁻³		337'	7'	48
1 . 10 ⁻³	0,206	342'	12'	28,5
0		352'	22'	16
0		367'	37'	9,9
0		390'	60"	6,5

Ce qui donne pour la transmissivité

$$T = \frac{0,183}{\Delta s/Q} = \frac{0,183}{0,75}$$

$$T = 2,4 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$$

274 - Valeur de la transmissivité

Les essais Lefranc (calculés et communiqués par Solétanche) donnent :

7,81	à	8,12	K =	20	.	10^{-3}	m/s
10,47	à	10,97	K =	75	.	10^{-3}	
14,25	à	14,58	K =	13	.	10^{-3}	
17,70	à	18,14	K =	5,5	.	10^{-3}	
21,83	à	22,33	K =	0,2	.	10^{-3}	
25,58	à	26,27	K =	0,004	.	10^{-3}	

Ce qui donne

$$T \neq 3,25 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$$

(Valeur sans doute par excès)

On peut donc admettre pour valeur de la transmissivité

$$T \simeq 2,5 \text{ à } 3 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$$

Ce qui donne pour la totalité des alluvions une perméabilité de

$$K = 8 \cdot 10^{-3}$$

(H = 28m)

Et pour les 20 premiers mètres du sondage une perméabilité de

$$K = \frac{T}{H} = \frac{T}{20 - 6,65}$$

$K \simeq 2 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$
--

A N N E X E 2

ETUDE DE LA NAPPE DE LA CRAU

Microfaunes recueillies
dans les échantillons du substratum
atteint par les sondages 1 à 7

Etude effectuée par Madame LE CALVEZ - BRGM

Sondage n° 1

Profondeur : 23 m

Molasse tendre de couleur jaunâtre, contenant une micro-faune pauvre et très mal fossilisée.

Globulina gibba
Rotalia beccarii

d'Orb.
Lin.

Sondage n° 2

Profondeur : 15,60 m

Molasse tendre de couleur jaunâtre après lavage, micacée et légèrement glauconieuse, contenant des débris de Mollusques (Pélécypodes).

Foraminifères abondants et riches en forme planctoniques.

Globigerina bulloides	d'Orb.
Globigerina inflata	d'Orb.
Globigerina cf. ampliapertura	Bolli
Globigerinoides trilobus	Reuss
Globigerinoides sacculiferus	Brady
Globigerinoides sp.	
Orbulina bilobata	d'Orb.

et parmi les formes benthiques, qui n'existent le plus souvent qu'avec 1 ou 2 individus :

Bolivina dilatata	Reuss
Cassidulina crassa	d'Orb.
Cassidulinoides bradyi	Norman
Caucasina sp.	
Cibicides lobatulus	W. et J.
Cibicides ungerianus	d'Orb.
Elphidium crispum	Lin.
Entosolenia orbignyana	Seg.
Gyroldina soldani	d'Orb.
Hopkinsina bononiensis	Fern.
Lenticulina intermedia	d'Orb.
Marginulina sp.	
Nonion Beucanum	d'Orb.
Siphonodosaria jarvisi	Cushman
Siphonodosaria verneuli	d'Orb.
Virgulina schreibersiana	Czjzcek

Helvétien moyen.

Sondage n° 3

Profondeur : 18 m - 21 m

Molasse tendre sableuse et très glauconieuse, présentant après lavage une couleur jaune verdâtre ; renfermant des débris d'Oursins, de Mollusques et de Bryozoaires, avec une très belle faune de Foraminifères.

Bolivina dilatata	Reuss
Bulimina pupoides	d'Orb.
Cancris auriculus	F. et M.
Cassidulina crassa	d'Orb.
Cassidulina laevigata	d'Orb.
Caucasina sp.	
Cibicides boueanus	d'Orb.
Cibicides lobatulus	W. et J.
Cibicides mexicanus	Nuttall.
Cibicides ungerianus	d'Orb.
Dentalina sp.	
Entosolenia marginata	
Entosolenia orbignyana	Seg.
Eponides haidingeri	d'Orb.
Eponides praecinctus	Karrer
Eponides schreibersii	d'Orb.
Globigerina bulloides	d'Orb.
Globigerinoides trilobus	Reuss
Globorotalia menardi	d'Orb.
Globulina gibba	d'Orb.
Hopkinsina bononiensis	Forn.
Lagena sulcata	W. et F.
Lenticulina cultrata	Montf.
Lenticulina submamilligera	Cushm.
Lenticulina intermedia	d'Orb.
Lenticulina orbicularis	d'Orb.
Lenticulina rotulata	Lmk.
Marginulina glabra	d'Orb.
Marginulina sp.	
Nonion boueanum	d'Orb.
Nonion granosum	d'Orb.
Nonion tuberculatum	Mont.
Nonion umbilicatum	d'Orb.
Orbulina bilobata	d'Orb.
Pullenia bulloides	d'Orb.
Siphonodosaria verneuili	d'Orb.
Siphonodosaria jarvisi	Cushm.
Sphaeroidina bulloides	d'Orb.

Sondage n° 3 (suite)

Textularia abbreviata	d'Orb.
Textularia articulata	d'Orb.
Textularia deperdita	d'Orb.
Uvigerina rutila	Cushman.
Vaginulina legumen	Lin.

Helvétien probablement plus supérieur que le n° 2.

Sondage n° 4

Profondeur : 36,10 m

Molasse gréseuse extrêmement peu fossilifère. Quelques débris de coquilles de Mollusques et de rares Rotalia encroûtés et impossibles à déterminer spécifiquement.

Sondage n° 5

Profondeur : 40 à 43 m.

Molasse grise, très micacée, contenant des débris de coquilles de Pecten et de radioles d'Oursins (ces dernières très abondantes).

Microfaune très pauvre et de très petite taille, composée, en grande partie de Nonion :

Canceris auriculus	F. et M.
Cibicides sp.	
Elphidium cf. rugosum	d'Orb.
Nonion boueacum	d'Orb.
Nonion sp.	
Pullenia bulloides	d'Orb.
Rotalia beccarii	Lin.

Burdigalien supérieur ou Helvétien inférieur.

Sondage n° 6

Profondeur : 36 m

Conglomérat marneux, contenant des galets roulés, du quartz de provenances diverses, de la glauconie, du mica.

Foraminifères peu abondants, assez riches en formes planctoniques :

Globigerina bulloides	d'Orb.
Globigerina ampliapertura	Bolli
Globigerina inflata	d'Orb.
Globigerinoides trilobus	Reuss
Globorotalia menardi	d'Orb.

et parmi les espèces benthiques :

Cancris auriculus	F. et M.
Cassidulina laevigata	d'Orb.
Eponides haidingeri	d'Orb.
Gyroidina soldanii	d'Orb.
Marginulina murex	Batsch
Nonion soldanii	d'Orb.
Nonion sp.	
Pullenia bulloides	d'Orb.
Trifarina bradyi	Cushm.
Uvigerina rutila	Cushm.

chaque espèce ne comprenant qu'un ou deux individus.

Helvétique.

Sondage n° 7

Profondeur : 37,20 m

Calcaire lumachellique et détritique roux.

Molasse très gréseuse et dure.

Quartz, quelques petits grains calcaires, glauconie, mica blanc assez rare.

Lamellibranches, Oursins

Microfaune : néant

Foraminifères : néant

A N N E X E 3

ETUDE DE LA NAPPE DE LA CRAU

Exposé des méthodes de calcul
des valeurs de la perméabilité K
et
de la transmissivité T

Eléments de calcul de K et T
pour les sondages S_1 à S_7

TABLE DES MATIERES
(Annexe 3)

	pages
1 - Méthodes employées pour le calcul du coefficient de perméabilité K	2
11 - Essais Lefranc	
12 - Micromoulinet	
13 - Essais de débit en fin de forage et interprétation par la méthode de Theis	
2 - Etude des essais	11
21 - Sondage S ₁	
22 - " S ₂	
23 - " S ₃	
24 - " S ₄	
25 - " S ₅	
26 - " S ₆	
27 - " S ₇	

1 - METHODES EMPLOYEES POUR LE CALCUL DU COEFFICIENT DE PERMEABILITE.-

11 - Essais Lefranc

111 - Généralités

La méthode tire son nom de celui de son inventeur qui a montré que, si à la base d'un forage tubé au sein d'un matériau perméable existait un vide de forme quelconque (lanterne), le débit Q injecté ou pompé à travers la surface de cette lanterne était égal à :

$$Q = K \cdot \Delta h \cdot f$$

Q = débit en m^3

K = coefficient de perméabilité en m/s

Δh = surcharge ou décharge de la nappe en m

f = coefficient de forme de la lanterne en m

La valeur du coefficient f , qui dépend de la forme de la lanterne, est donnée par une formule générale ⁽¹⁾ ou plus simplement des abaques.

Il s'agit ici d'essais "ponctuels" et la cavité réalisée doit être petite.

(1) Formule Solétanche (d'après Schneebeli)

$$C = \frac{2 \pi}{2,303} \cdot \frac{d \sqrt{\frac{l^2}{d^2} - 1}}{\log 10 \left(\frac{1}{d} + \sqrt{\frac{l^2}{d^2} - 1} \right)}$$

l = longueur de la cavité

d = diamètre

Les essais sont effectués au fur et à mesure de l'avancement selon la nature du terrain traversé, et à des profondeurs déterminées par le géologue suivant la nature des terrains, et sont réalisés soit par pompage (mesure du débit et de la dénivellation correspondante) soit par injection (mesure de la vitesse de descente après remplissage du forage).

Après différents essais, lors de l'exécution du sondage 1, on a adopté uniformément la méthode du pompage ; la représentation graphique du débit en fonction de la dénivellation permet de mesurer la pente α de la droite obtenue (pour des valeurs petites de h) et de calculer la perméabilité K :

$$K = \frac{1}{f \cdot \alpha}$$

112 - Exécution des essais

Pour exécuter les essais on disposait d'une pompe Richier capable d'un débit de 4 à 5 l/sec., d'une sonde électrique, d'un chronomètre et d'un bac de 200 l.

Dans les alluvions les essais ont été espacés les uns des autres de 3 à 4 mètres. Pour les sondages 5, 6 et 7, ils ont été plus rapprochés dans la partie supérieure de la nappe que dans la partie inférieure qui s'est révélée moins perméable, donc intervenant moins dans la transmissivité.

Trois essais ont été réalisés dans les calcaires fissurés du substratum.

1121 - Préparation des essais

Dans les sondages n° 1 et 2 il a été possible de réaliser des poches basses (hauteur inférieure à deux fois le diamètre) en travaillant à la curette sous le sabot de la colonne de tubage, car les alluvions étaient légèrement cimentées.

Dans le substratum il a été possible de réaliser des poches hautes (hauteur supérieure à deux fois le diamètre) car les calcaires avaient une bonne cohésion.

Par contre dans les autres sondages les alluvions aquifères avaient tendance à s'écrouler et à combler toute cavité créée sous le sabot de la colonne de tubage. Il a fallu procéder de la façon suivante :

- placer dans le forage, curé jusqu'au sabot de la colonne de tubage, 60 à 70 cm de gravier propre (10/30 mm)
- remonter la colonne de 30 à 50 cm.

On obtenait ainsi une poche soutenue par le gravier dont la perméabilité est beaucoup plus grande que celle du terrain. On peut alors calculer l'essai comme si la poche était vide.

1122 - Exécution de l'essai

Selon la valeur de la perméabilité plusieurs méthodes furent employées

- Fortes perméabilités (supérieures à 10^{-4} m/s)
Après avoir noté le niveau d'eau la pompe était mise en marche vanne fermée. Les débits étaient augmentés par paliers, pour chaque palier le débit et le niveau d'équilibre étaient mesurés, (38 essais sur 44).

On réalisait ainsi 4 à 5 débits croissants puis deux à la redescente après le débit maximum.

On notait finalement le niveau d'eau revenu à l'équilibre après l'essai.

- Perméabilités assez faibles (10^{-4} à 10^{-5} m/s) (5 essais sur 44). Après avoir noté le niveau d'eau on mettait la pompe en marche pour vider le forage et ensuite on mesurait la remontée du niveau d'eau en fonction du temps.

On notait le niveau stabilisé à la fin de l'essai.

1123 - Interprétation

- Etablissement des graphiques. Immédiatement après l'exécution de l'essai la courbe du rabattement en fonction du débit était tracée sur papier millimétré pour se rendre compte si l'essai était correct et interprétable.

On devait obtenir une droite pour les débit

faibles s'infléchissant ensuite avec une allure parabolique pour les débits plus forts sinon l'essai était incorrect et devait être repris.

- Calcul du coefficient de perméabilité. Le coefficient de forme C pouvait être évalué sur le chantier à l'aide des formules de Schneebeli, ce qui permettait d'avoir rapidement une valeur du coefficient de perméabilité.

Ensuite le bureau d'études de Solétanche déterminait C au moyen d'abaques.

Il n'y a jamais eu beaucoup de divergence entre les valeurs de K obtenues par les deux méthodes (celles qui seront données ici sont celles calculées par le bureau d'études Solétanche).

12 - Micromoulinet

121 - Principe

Le micromoulinet Solétanche (construit par Neyrpic) permet de mesurer les vitesses verticales de l'eau aux différents niveaux d'un sondage. Son principe est identique à celui des hélices utilisées pour mesurer la vitesse des cours d'eau.

122 - Appareillage

Il comprend une petite cage dans laquelle se trouve une hélice fixée sur un axe vertical ; celle-ci tourne

ne en face d'électrodes, et à chaque tour un redan de l'hélice modifie la résistance du circuit électrique d'où une impulsion qui est transmise par un fil à la surface où elle est enregistrée par un compteur.

123 - Mise en oeuvre

La cage de l'hélice est descendue dans le forage par paliers (généralement de 50 cms). A chaque palier on note le nombre d'impulsions enregistrées pendant un temps donné.

L'intérêt de l'appareil est qu'il permet des mesures pratiquement continues des vitesses verticales dans le forage. Il est en effet possible de serrer à volonté les paliers dans une zone intéressante.

124 - Interprétation

Le micromoulinet peut-être employé sans pompage il mesure alors les vitesses naturelles qui permettent de déterminer des horizons qui fournissent de l'eau et d'autres qui en absorbent.

Avec pompage des courbes d'étalonnage permettent de passer d'un nombre X de tours par seconde à une vitesse V qui s'établit sous l'effet d'un rabattement x

Pour une tranche AB du sondage on en déduit le débit Q_{ab} sortant du terrain et dans le cadre des hypothèses de Dupuit on peut calculer le coefficient de perméabilité de la tranche AB par la formule simplifiée suivante :

$$K_{ab} = \frac{Q_{ab}}{AB \cdot z}$$

K_{ab} = coefficient de perméabilité pour une tranche de terrain AB

Q_{ab} = débit sortant du terrain entre A et B

z = rabattement créé par le pompage

AB = hauteur de la tranche de terrain considéré

13 - Essais de débit en fin de forage et interprétation par la méthode de Theis

Le détail de l'équipement sera donné pour chaque forage qui comportait toujours un tubage crépiné sur la hauteur de l'aquifère et plein à la partie supérieure (tubes Lucoflex).

Les pompages ont été réalisés avec une pompe Richier de faible débit (5 l/s) par paliers successifs. Les débits étaient jaugés avec un fût de 200 l. Les temps étaient pris au chronomètre à une demi-seconde près, les rabattements étaient mesurés avec une sonde électrique à 1 mm près (les mesures au micromoulinet étaient réalisées lors du pompage).

Le dispositif général était le suivant :

L'aspiration comprenait un tube vertical \varnothing 42-48 mm, un coude à 90°, 0,5 m de tube métallique 2", un flexible de 4,8 \varnothing 48 mm interne. Le refoulement comprenait 5 m de flexible \varnothing intérieur 48 mm, une vanne de 2", un coude à 90°.

131 - Principe de la méthode de Theis

L'équation de l'écoulement transitoire pur est :

$$s = \frac{2,303 Q}{4 \pi T} \log \frac{2,25 T t}{r^2 S}$$

- s = rabattement au temps t à distance r du puits (en m)
- Q = débit de pompage constant (en m³/sec.)
- S = coefficient d'emmagasinement
- T = transmissivité de l'horizon aquifère (en m²/sec.)
- t = temps écoulé depuis l'origine du pompage (en sec.)

La transmissivité, produit de l'épaisseur d'une formation aquifère par sa perméabilité, est la grandeur représentant le mieux l'aptitude d'une formation aquifère à conduire l'eau, la perméabilité étant définie par le coefficient de Darcy K selon l'équation :

$$Q = K A i$$

(la chute de pression subie par l'eau au passage de la formation aquifère est proportionnelle à la vitesse de filtration).

- i = pente de la ligne piézométrique
- A = section empruntée par le débit Q

Une représentation graphique du rabattement en fonction du temps permet de déterminer T et S.

On démontre que

$$T = \frac{0,183}{\Delta \frac{s}{Q}}$$

$\Delta \frac{s}{Q}$ = accroissement du rabattement spécifique pour un cycle log.

$$S = \frac{2,25 T t^0}{r^2}$$

La représentation graphique du rabattement en fonction du débit est faite en coordonnées semi-logarithmiques. L'évolution de la fonction

$$s = \frac{2,303 Q}{4 \pi T} \log \frac{2,23 T t}{r^2 S}$$

pour plusieurs débits est ainsi représentée par des droites ayant même origine sur l'axe des temps, en ordonnée étant par ailleurs porté le quotient du rabattement par le débit, ou rabattement spécifique (le rabattement est fonction linéaire du débit).

Les essais de débits ayant été effectués ici sans mesure de l'influence du pompage sur piézomètres on ne dispose pas de mesure de rabattement à une distance r du puits ; seules donc pourront être calculées les valeurs de T et S .

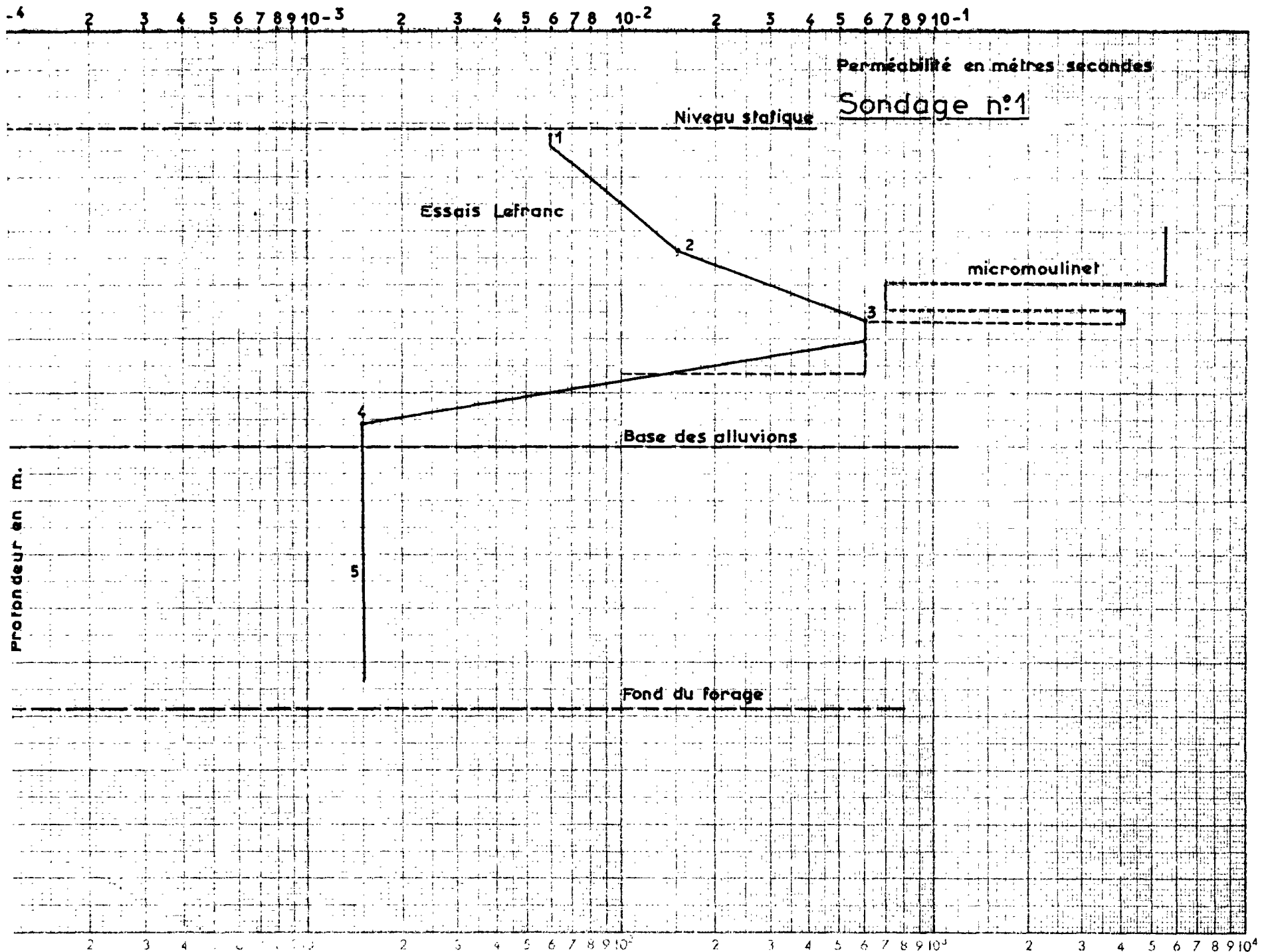
o

o o

A N N E X E 4

ETUDE DE LA NAPPE DE LA CRAU

**Diagrammes relatifs aux essais de débit
effectués sur les sondages 1 à 7**



Q / L₀

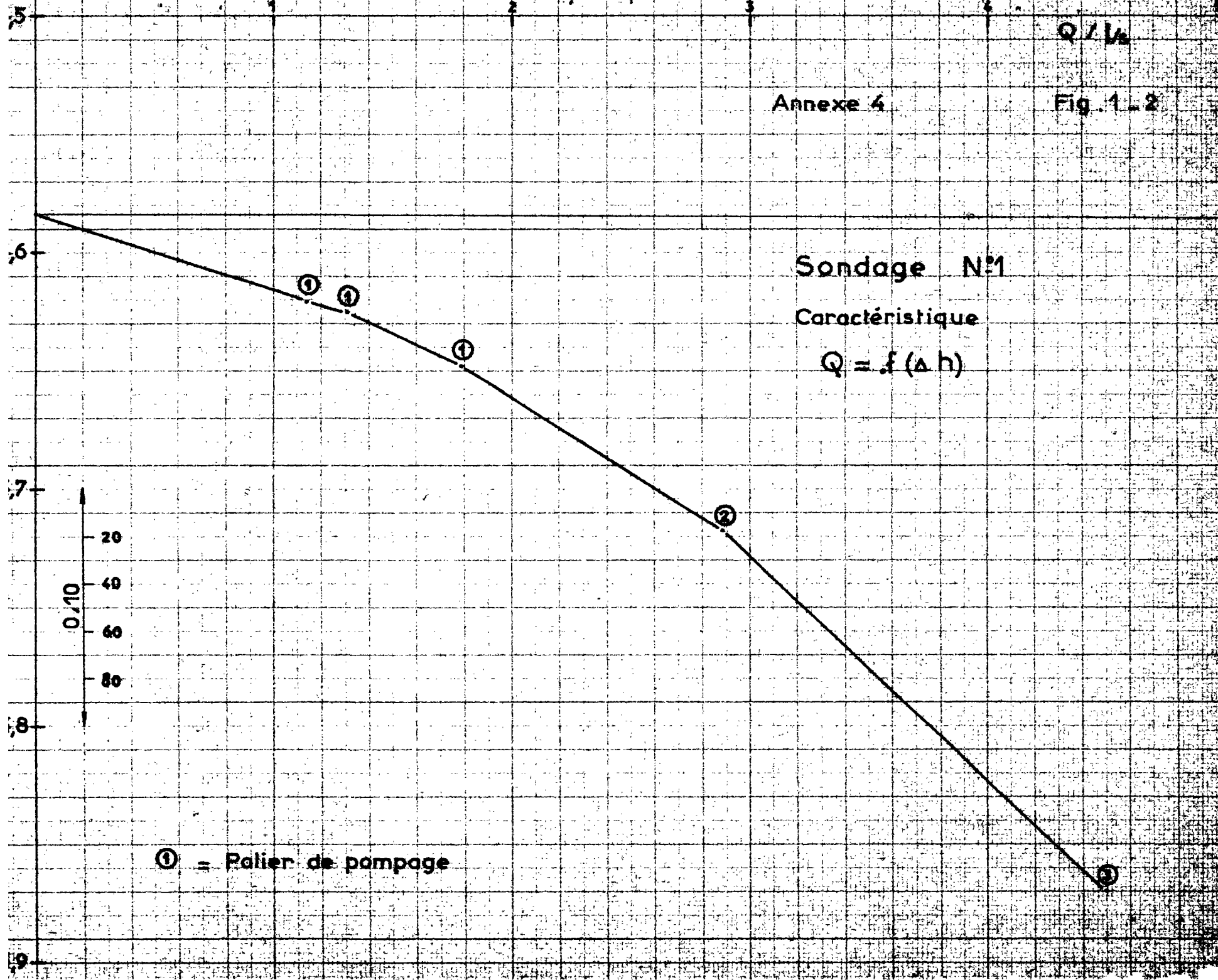
Annexe 4

Fig. 1-2

Sondage N°1

Caractéristique

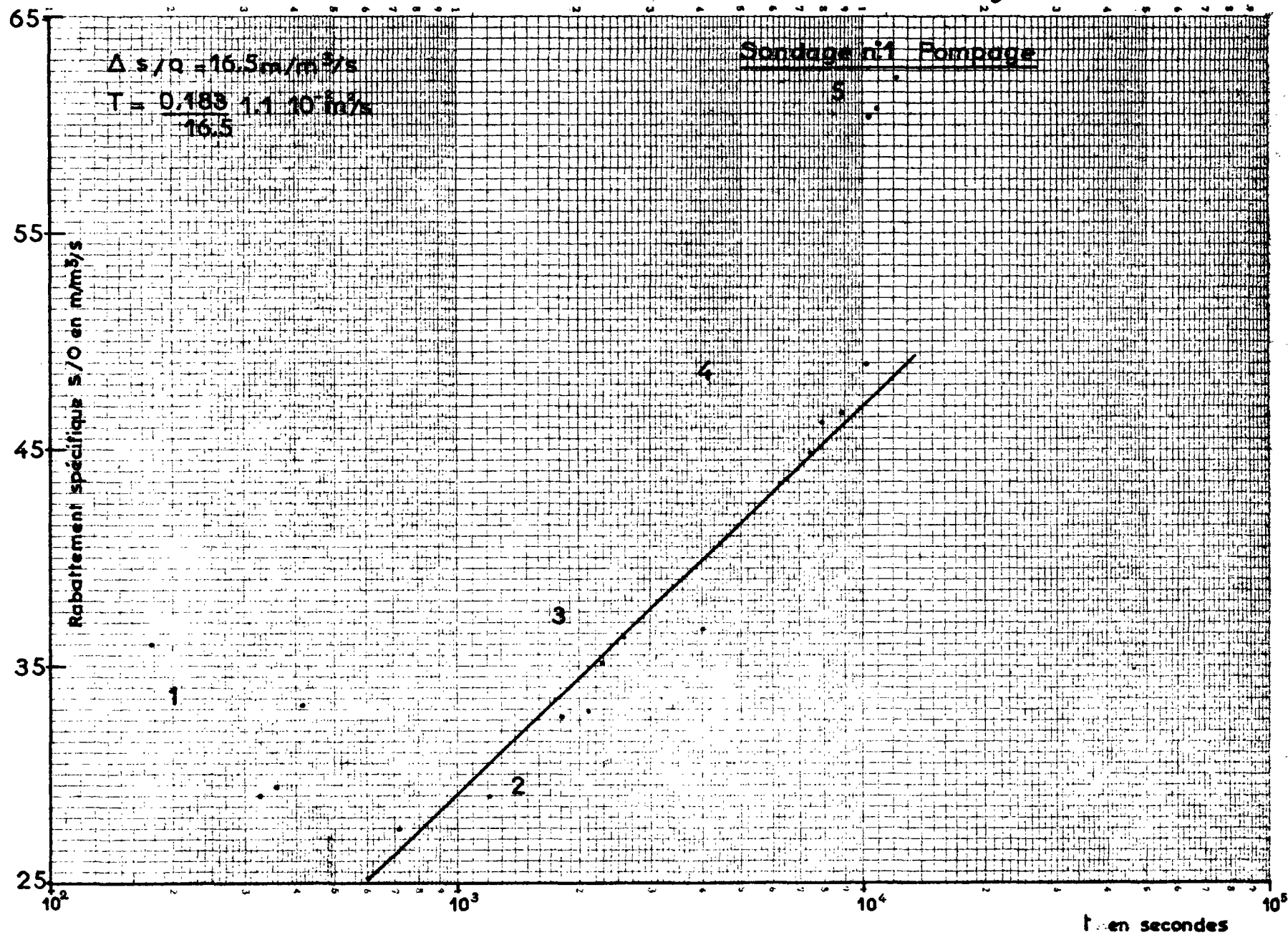
$$Q = f(\Delta h)$$



① = Palier de pompage

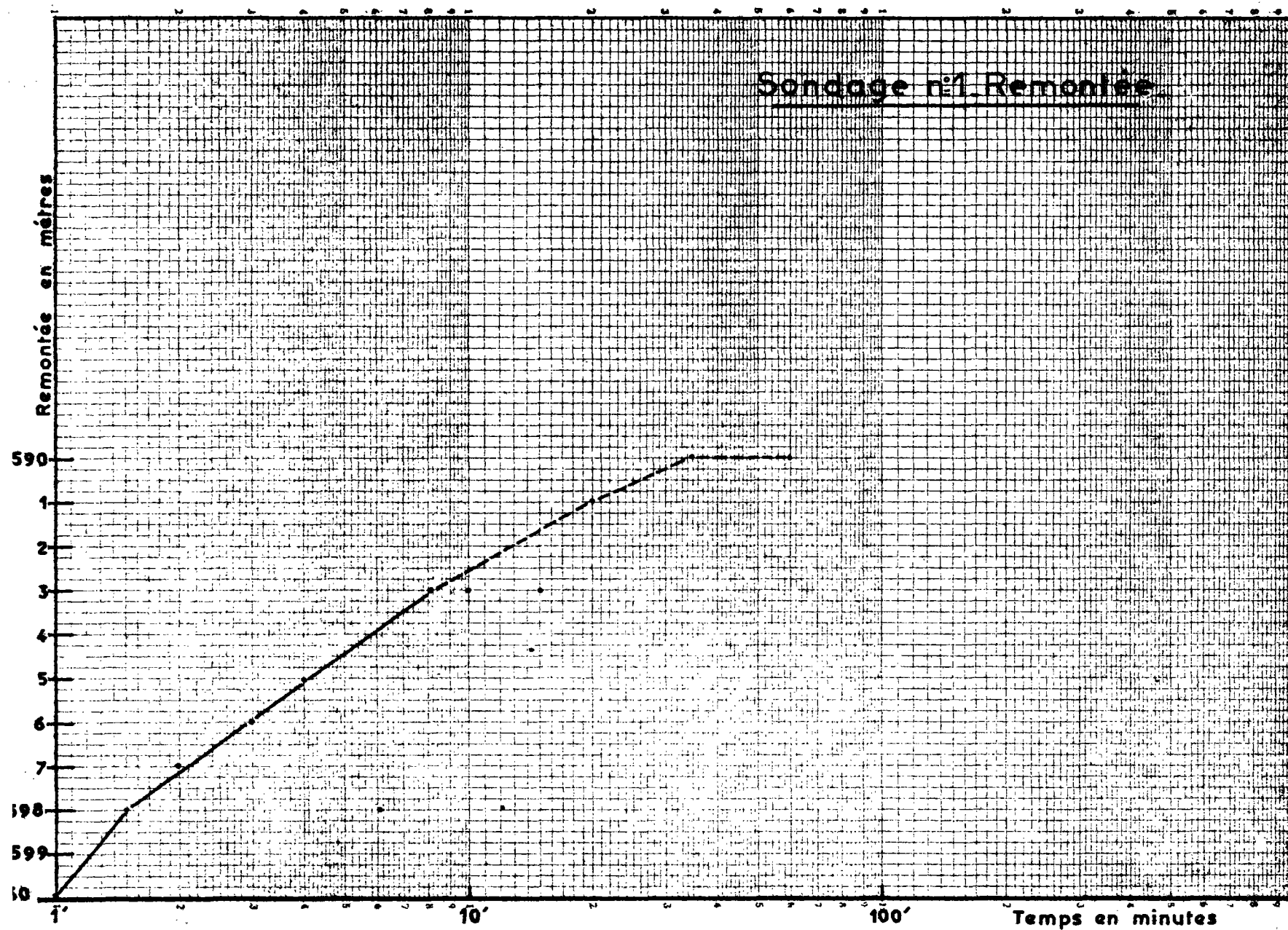
Annexe 4

Fig 1_3



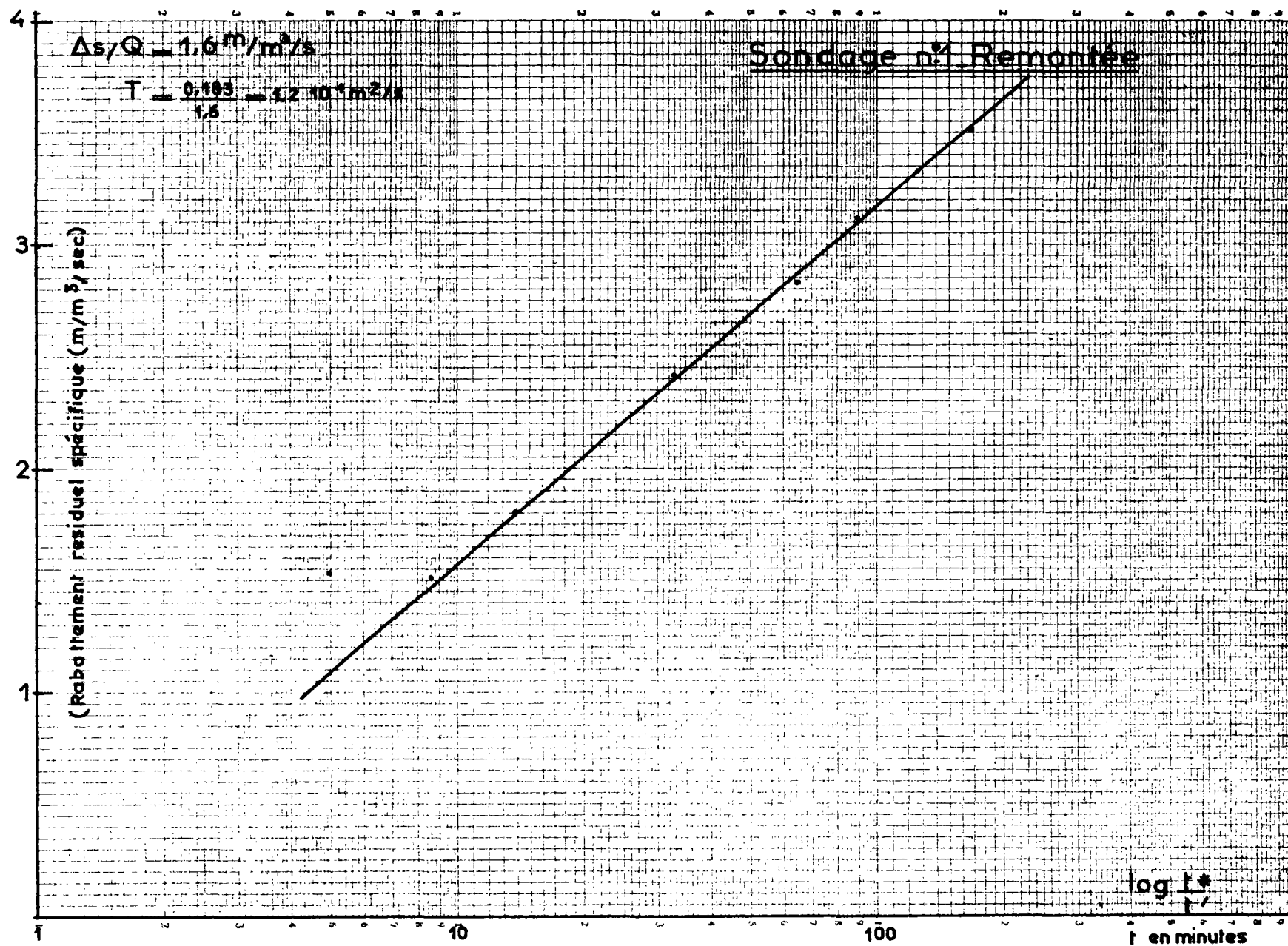
Annexe 4

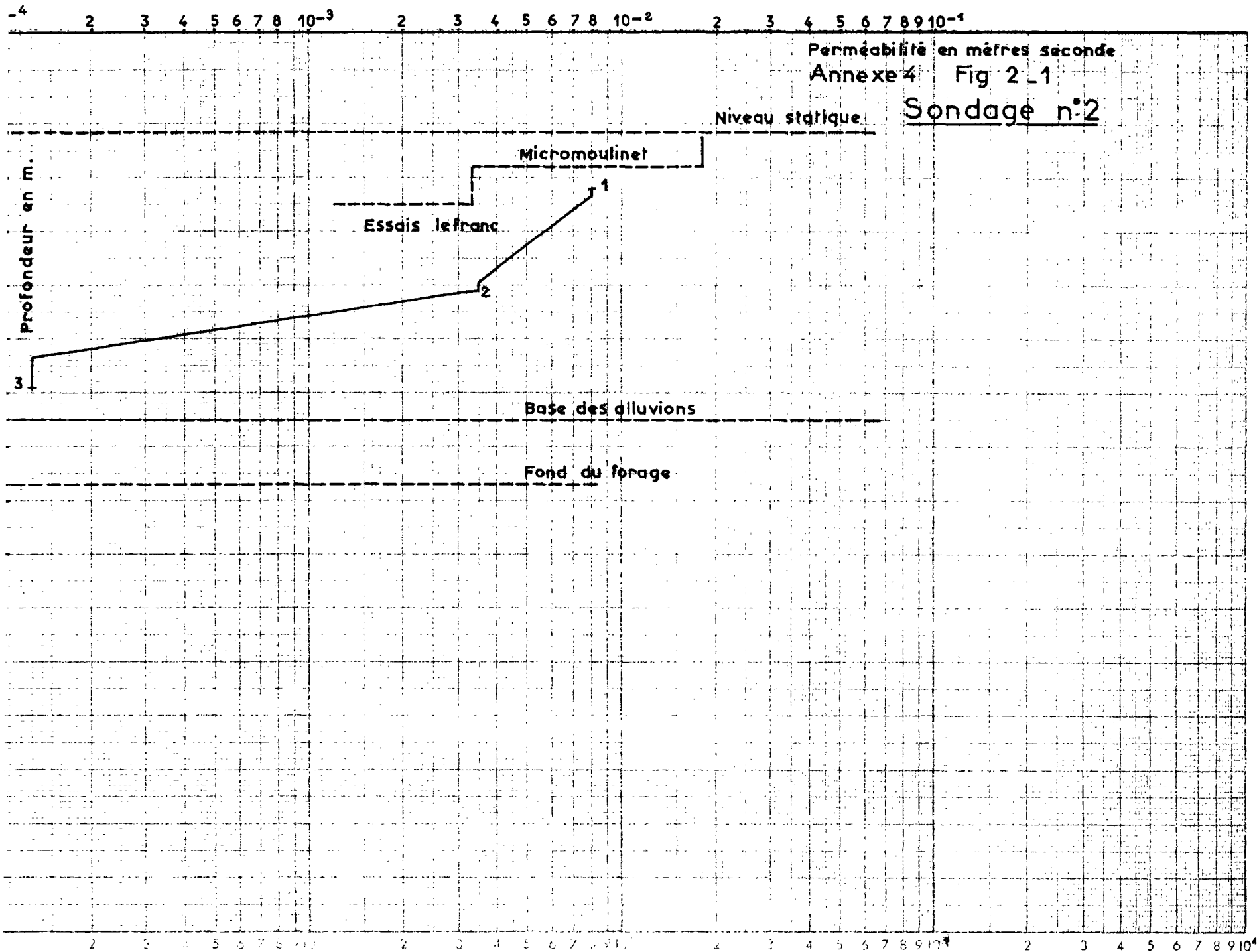
Fig 1-4

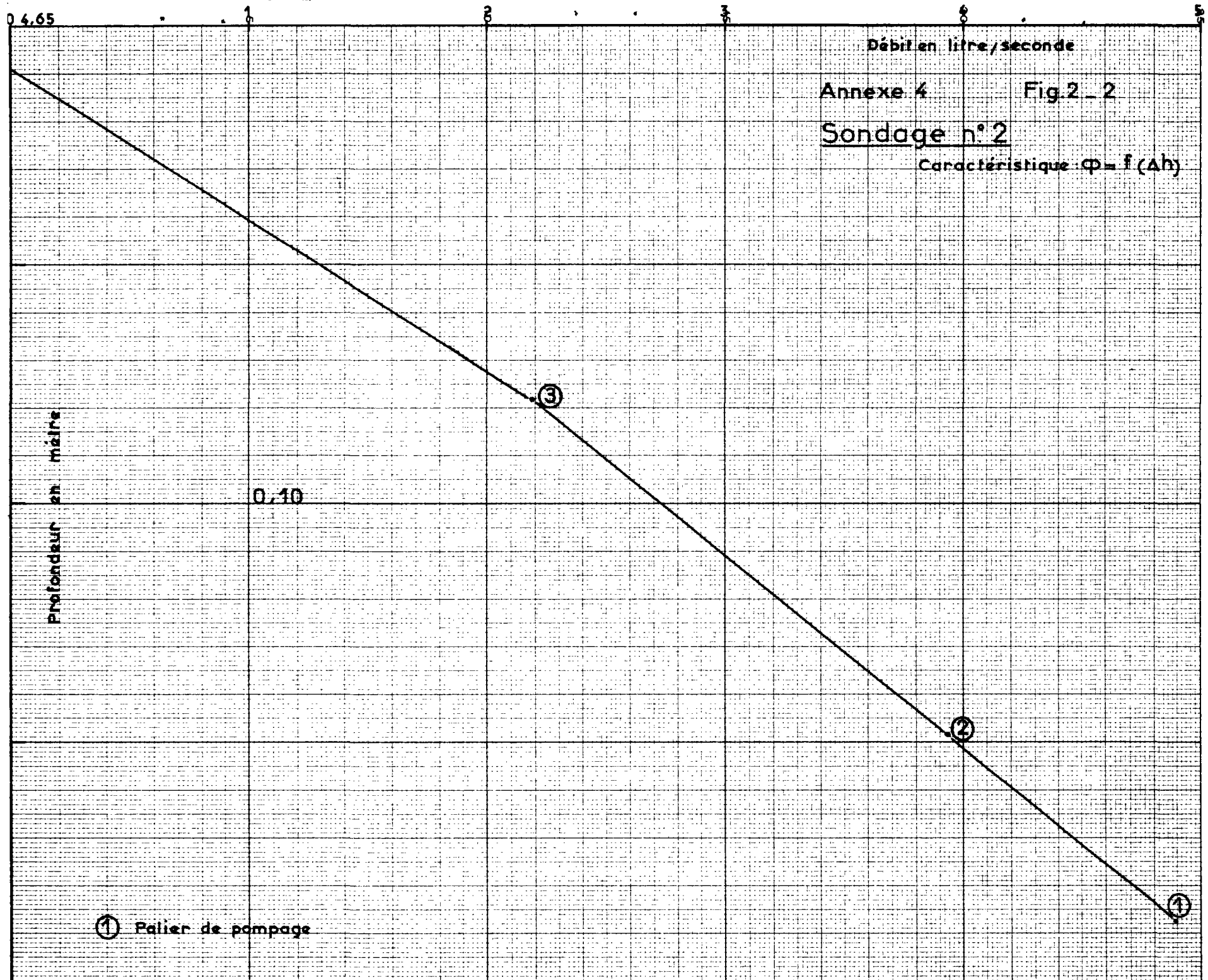


Annexe 4

Fig 1_5

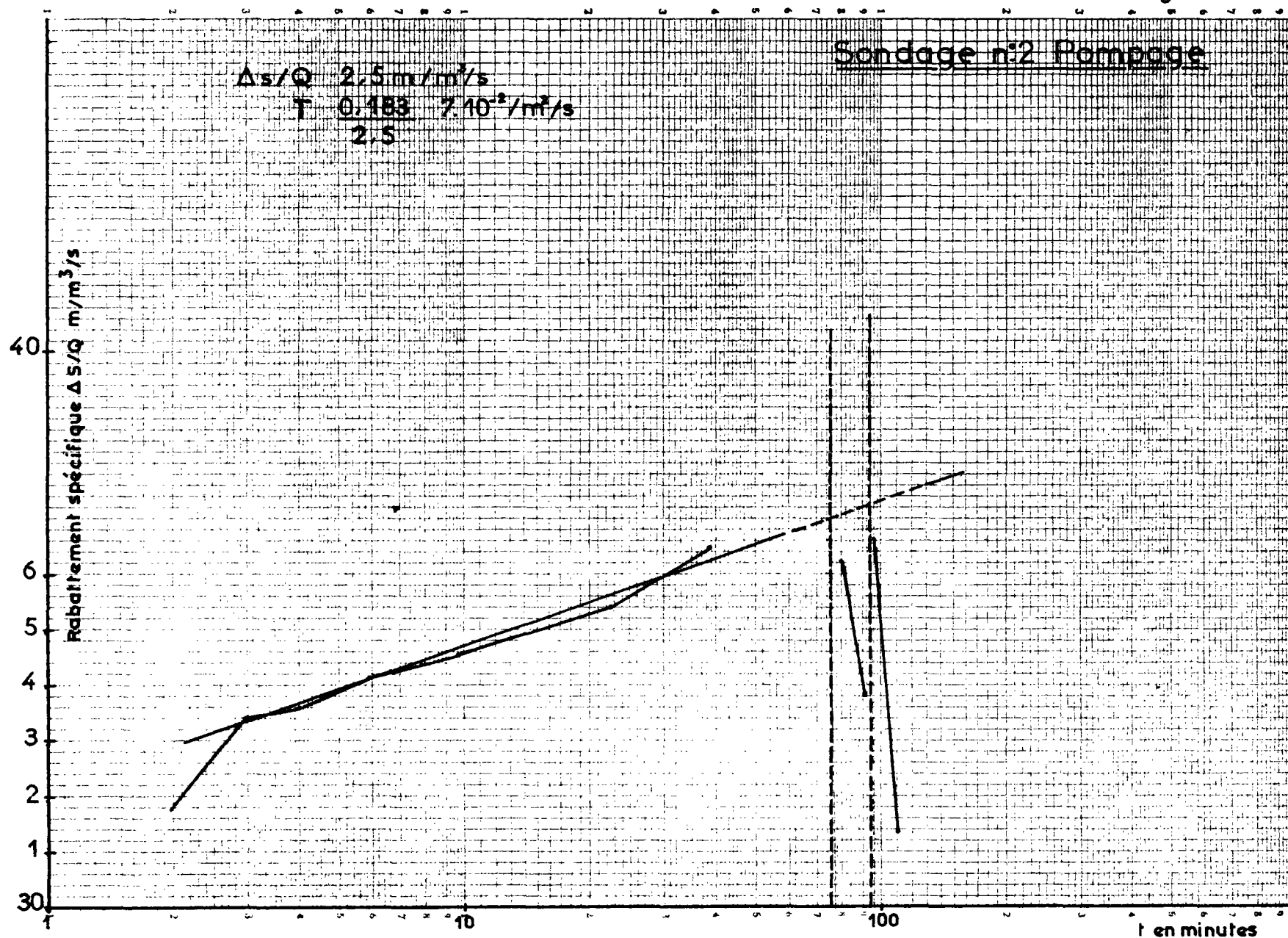






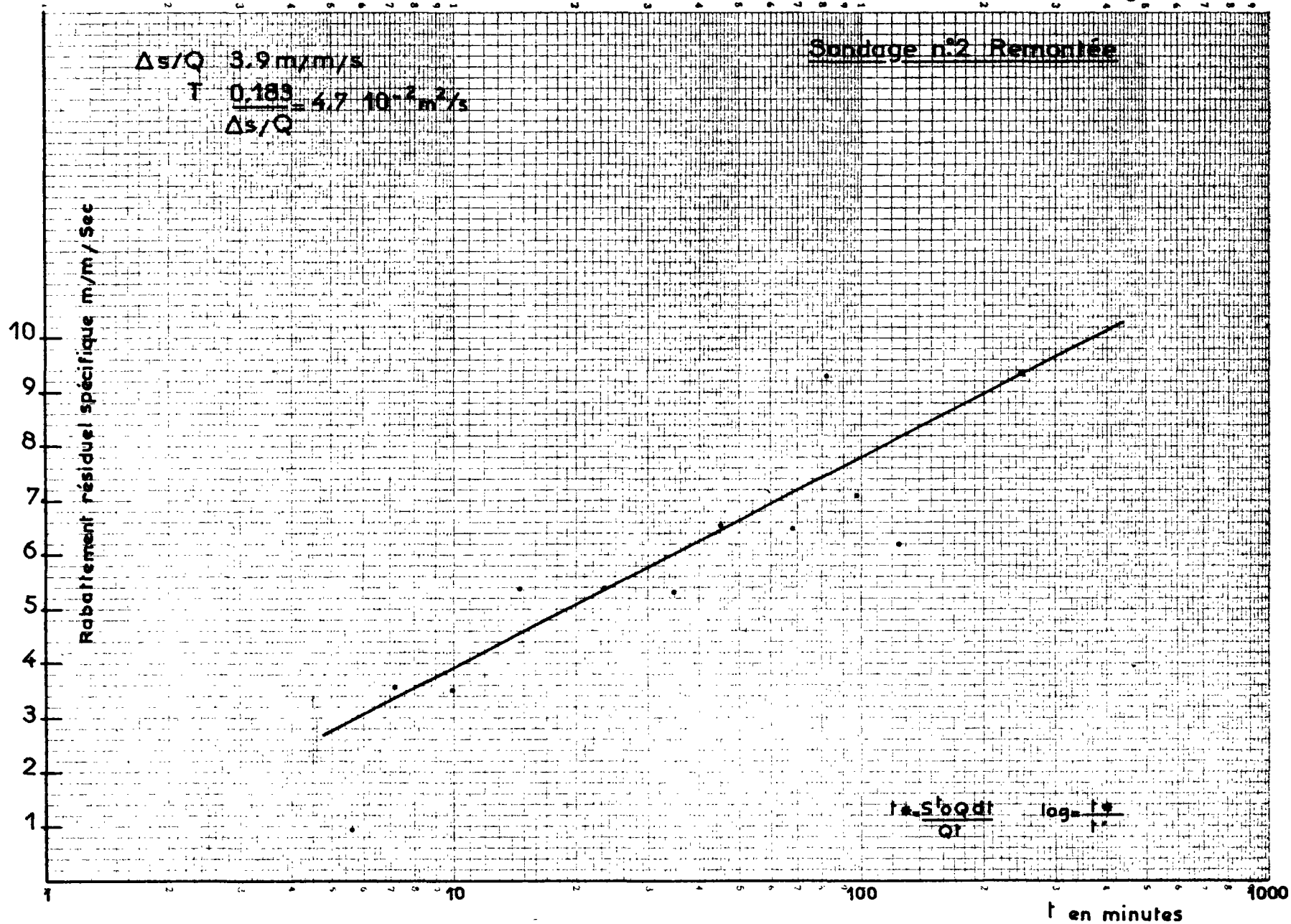
Annexe 4 -

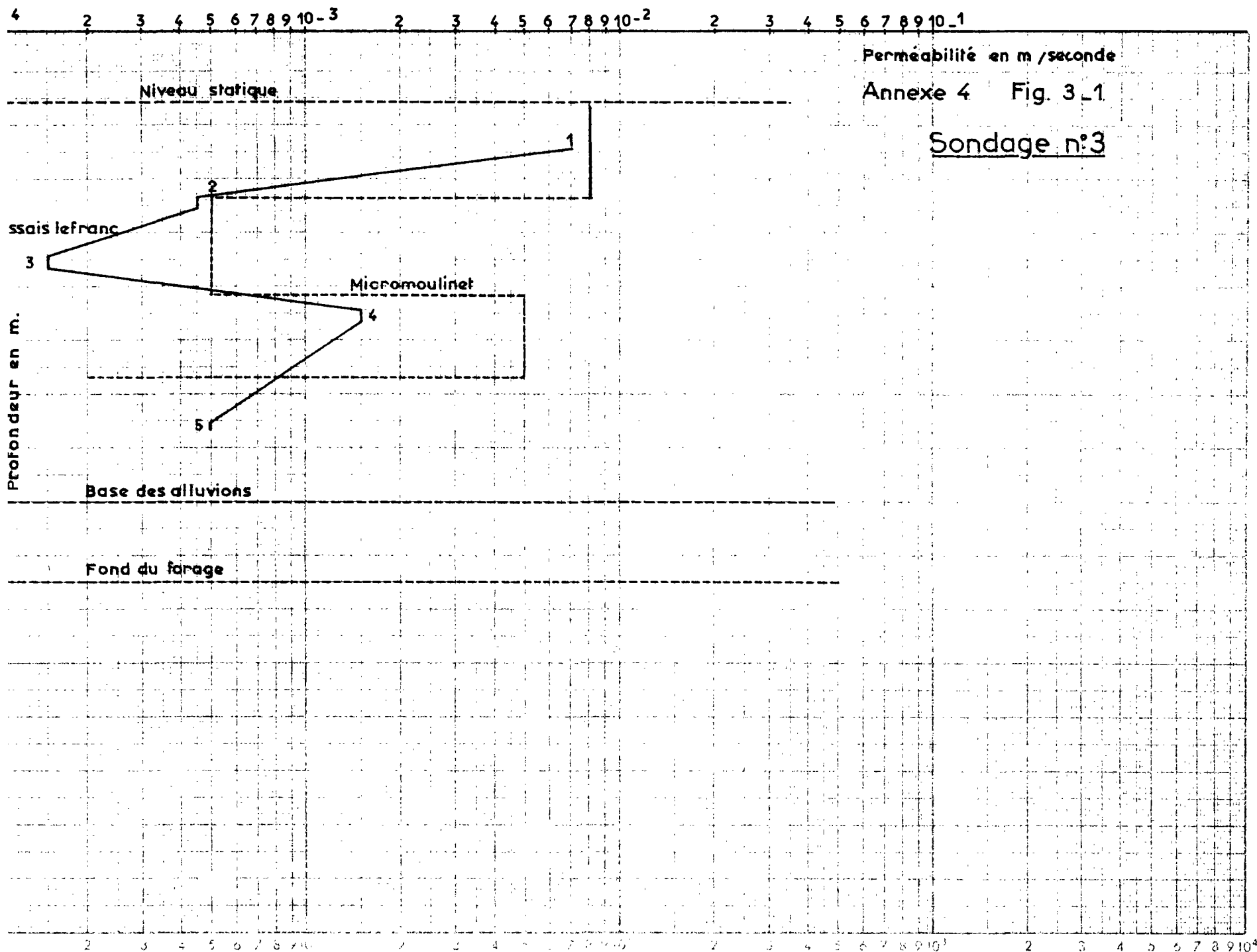
Fig. 2 - 3



Annexe 4

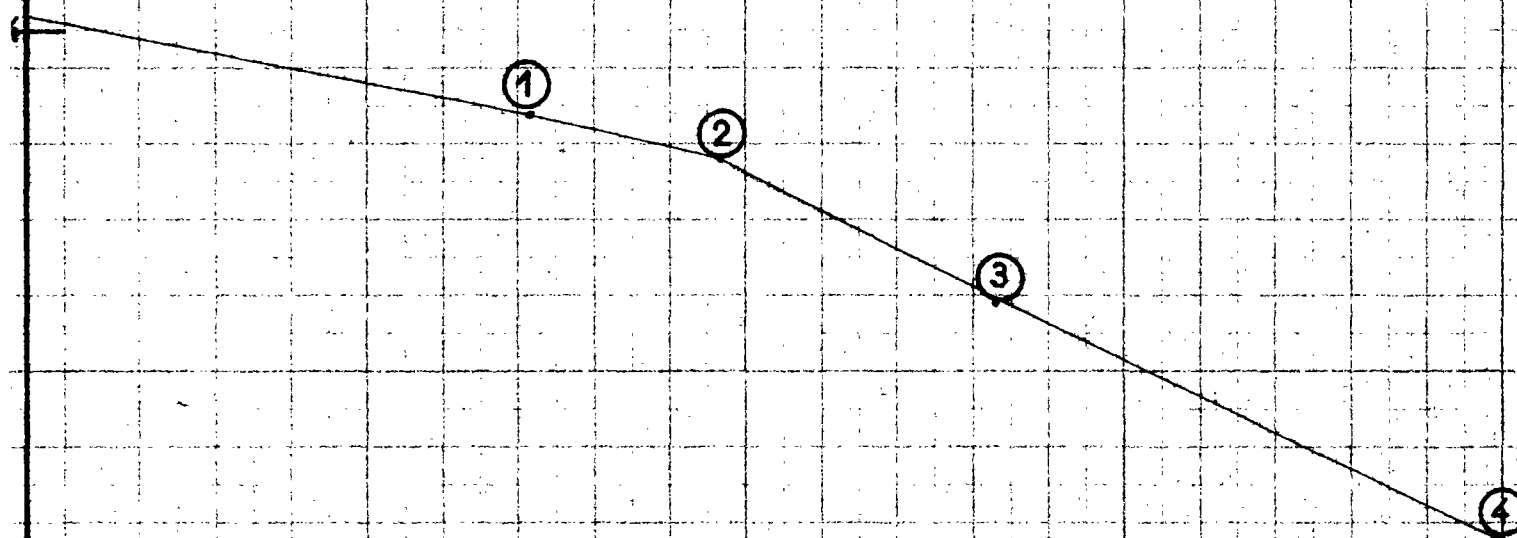
Fig. 2-4



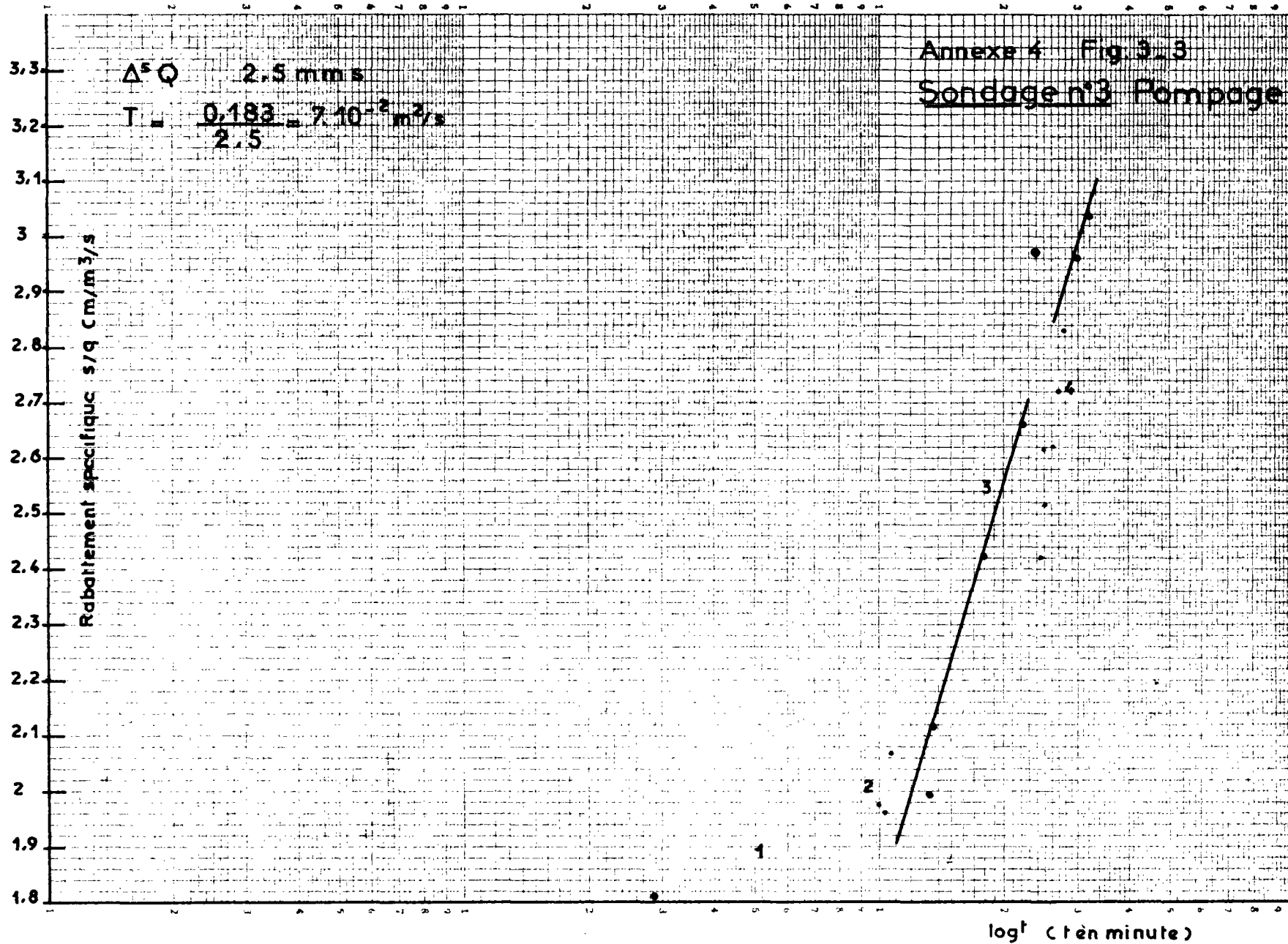


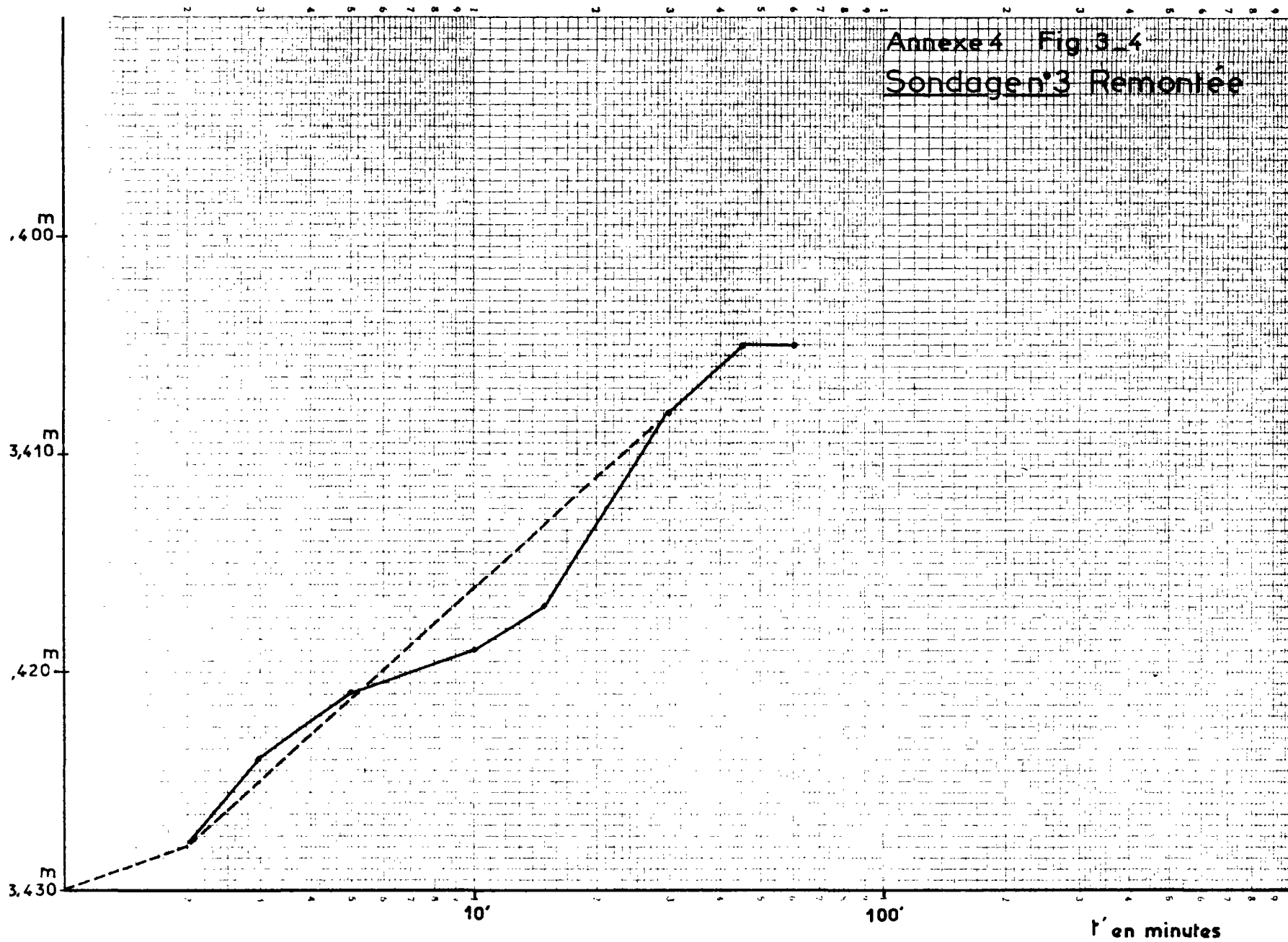
Sondage n°3

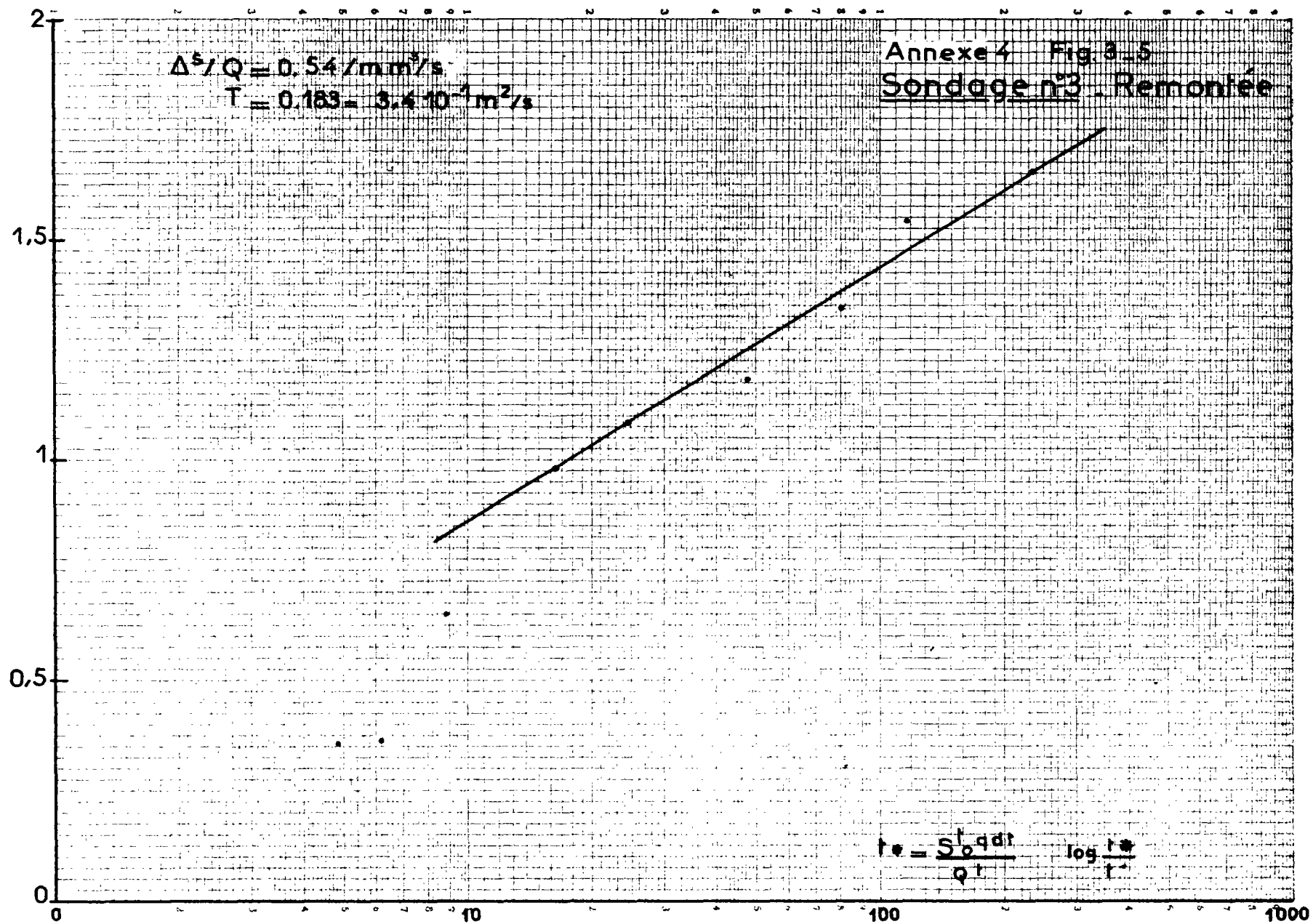
Caractéristique: $Q = f(\Delta h)$

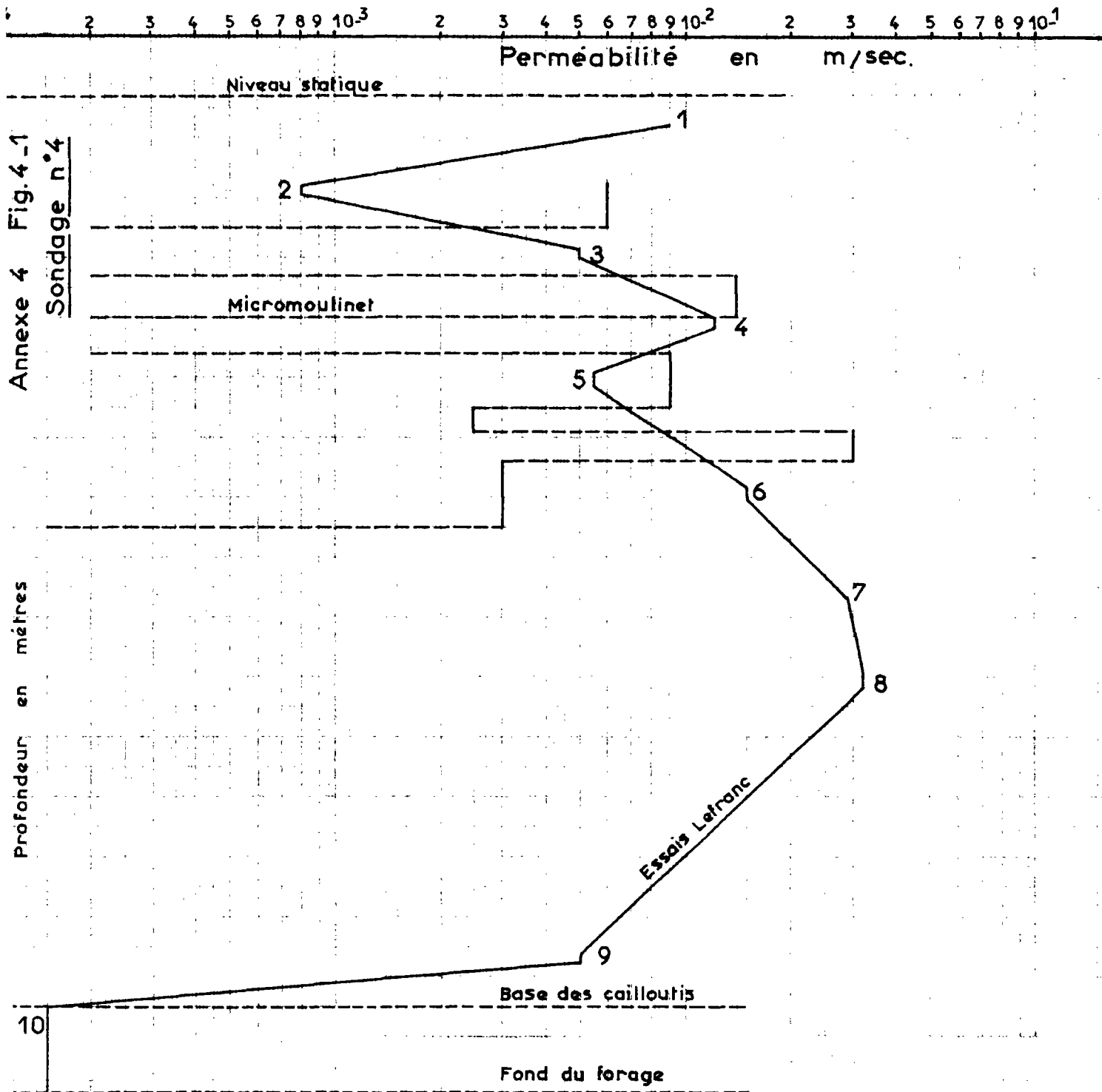


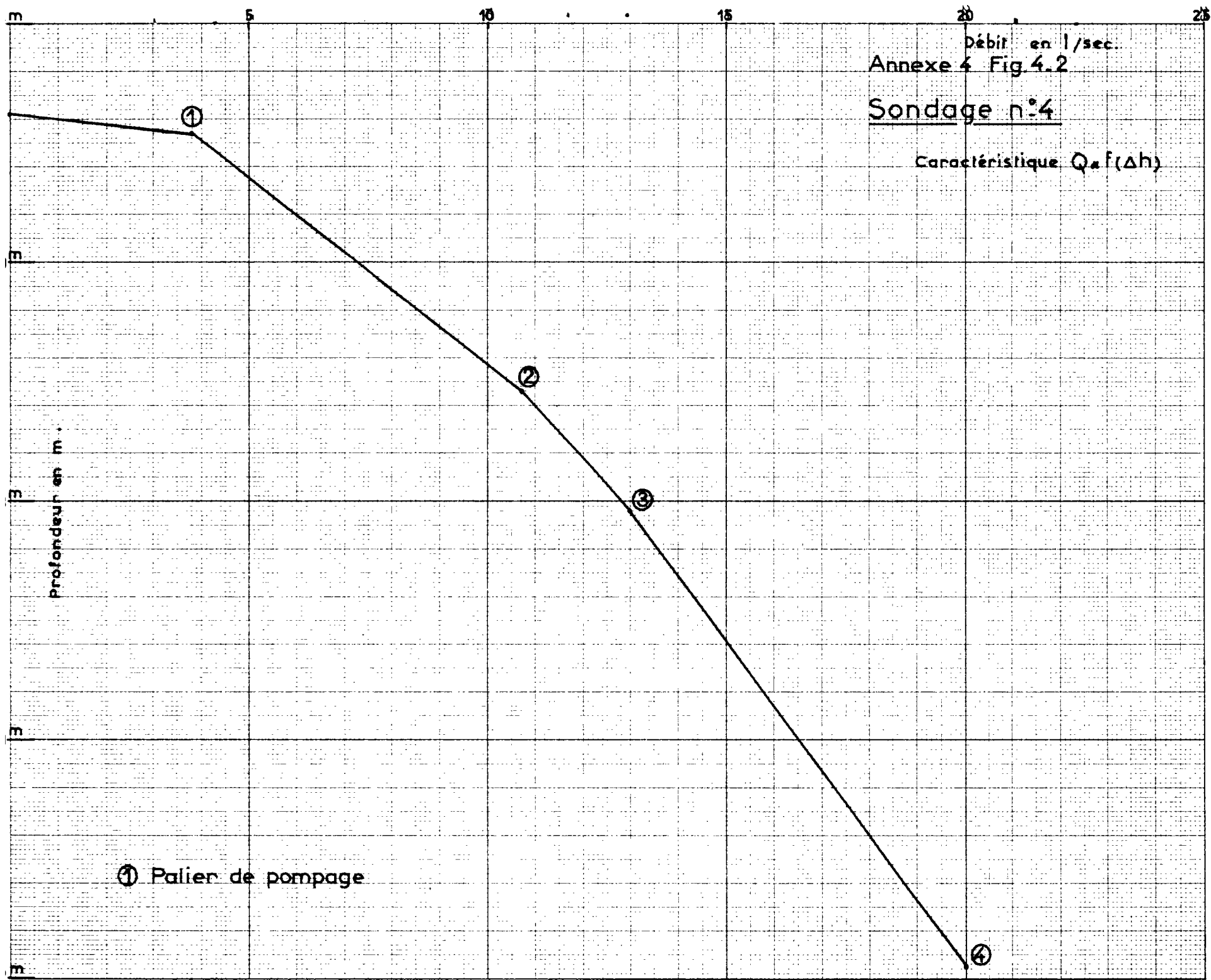
① = palier de pompage









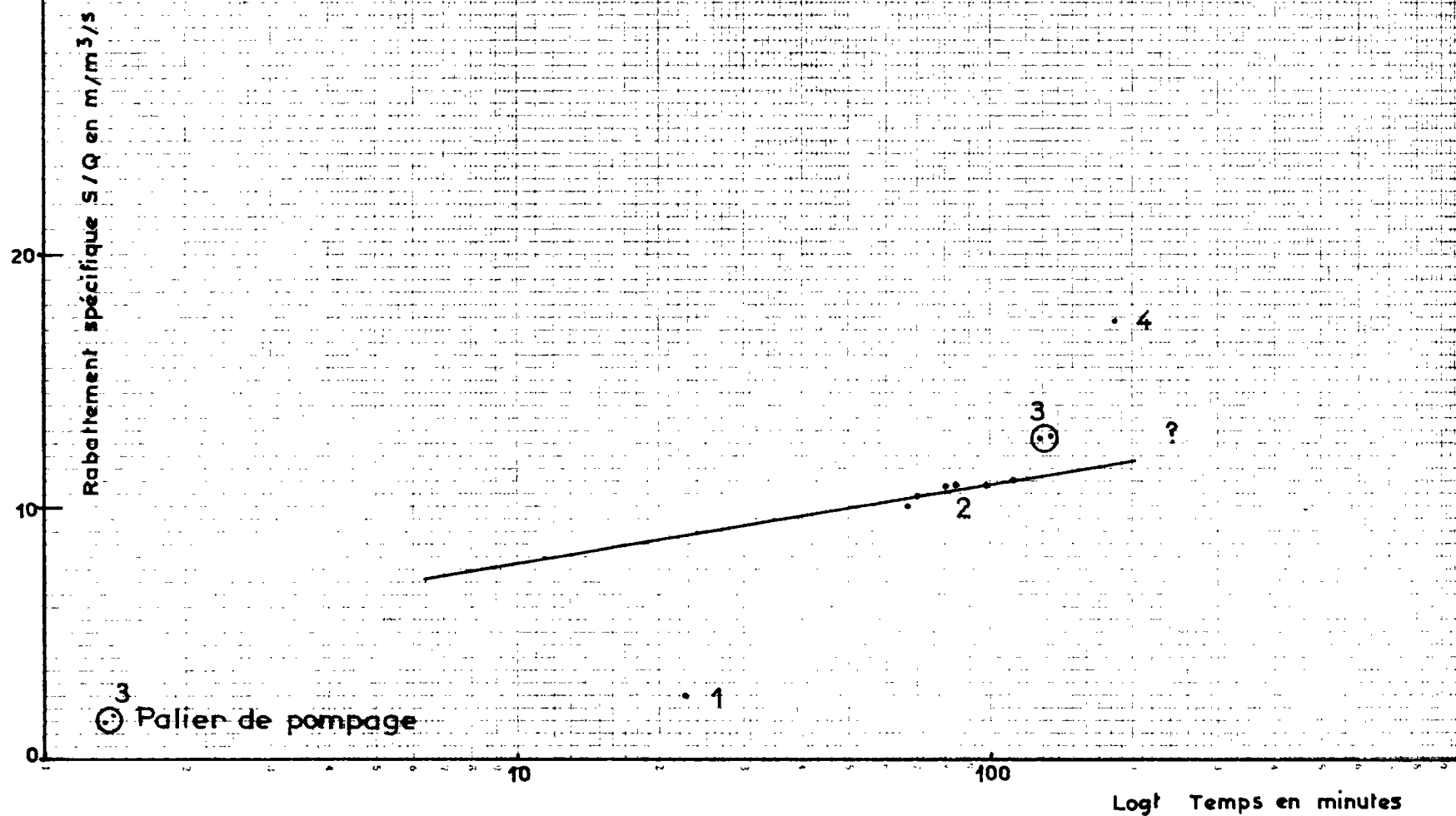


$$\Delta \frac{s}{Q} = 3,3 \text{ m/m}^3/\text{s}$$

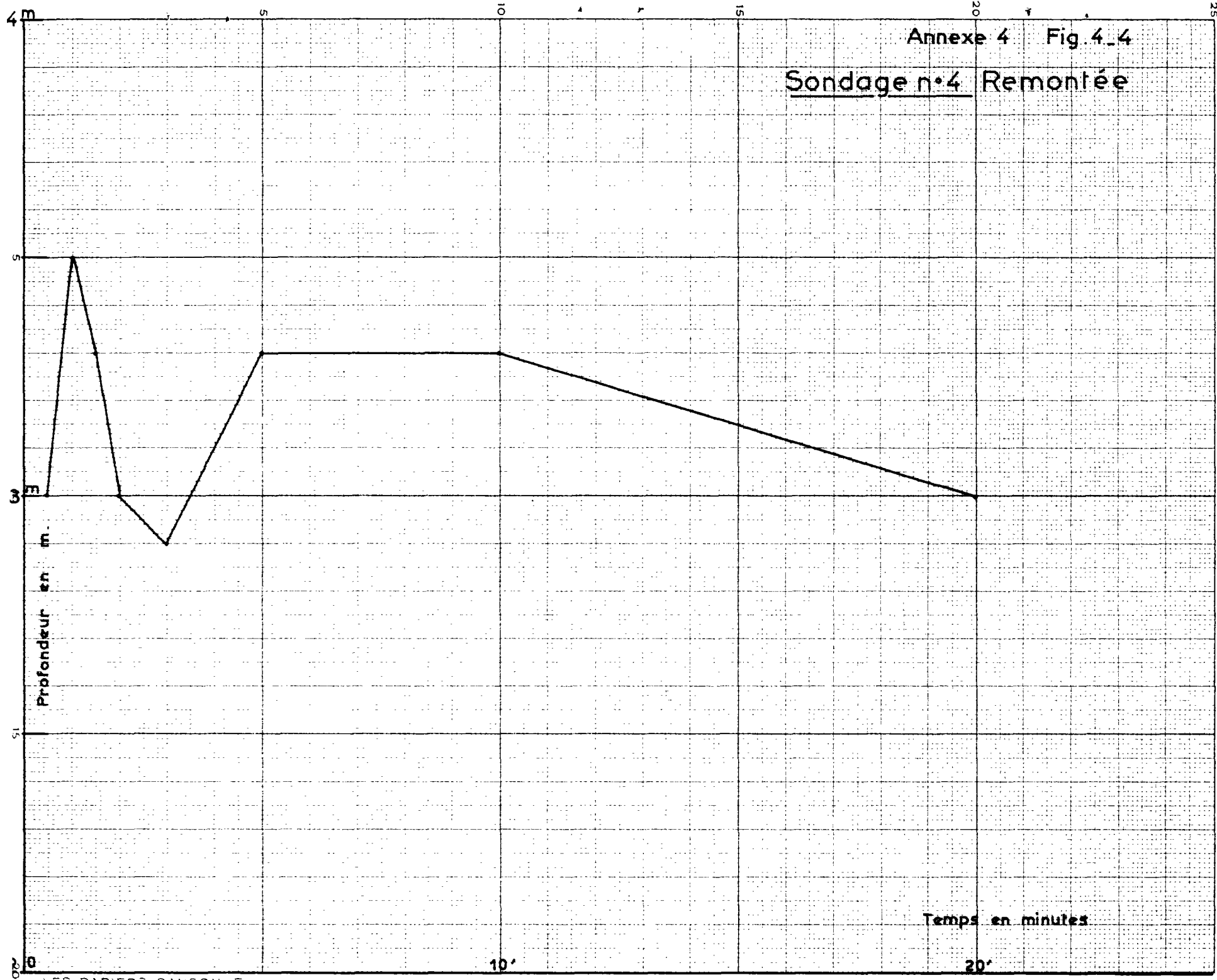
$$T = \frac{0,183}{3,3} = 5,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$$

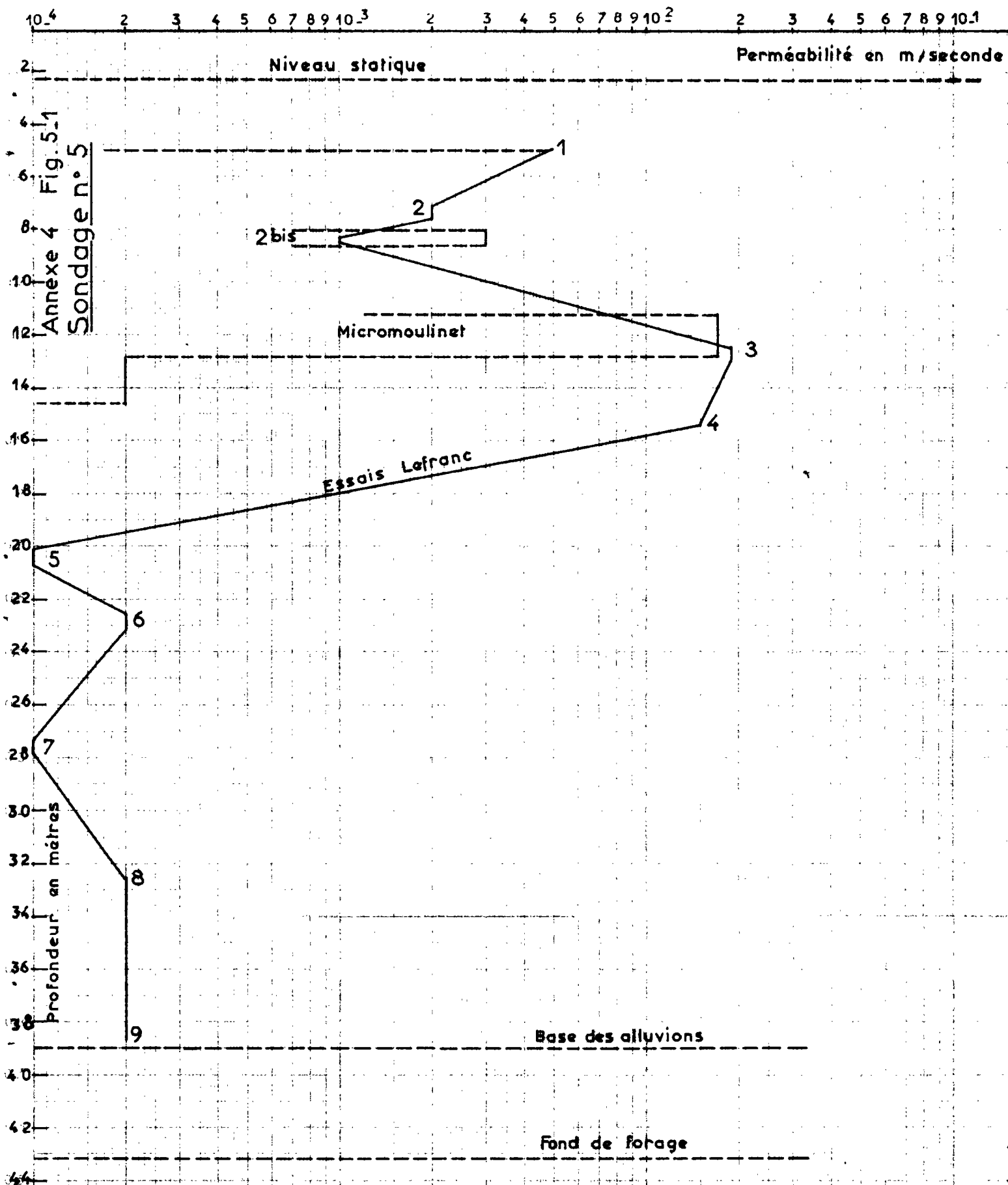
Annexe 4 Fig. 4.3

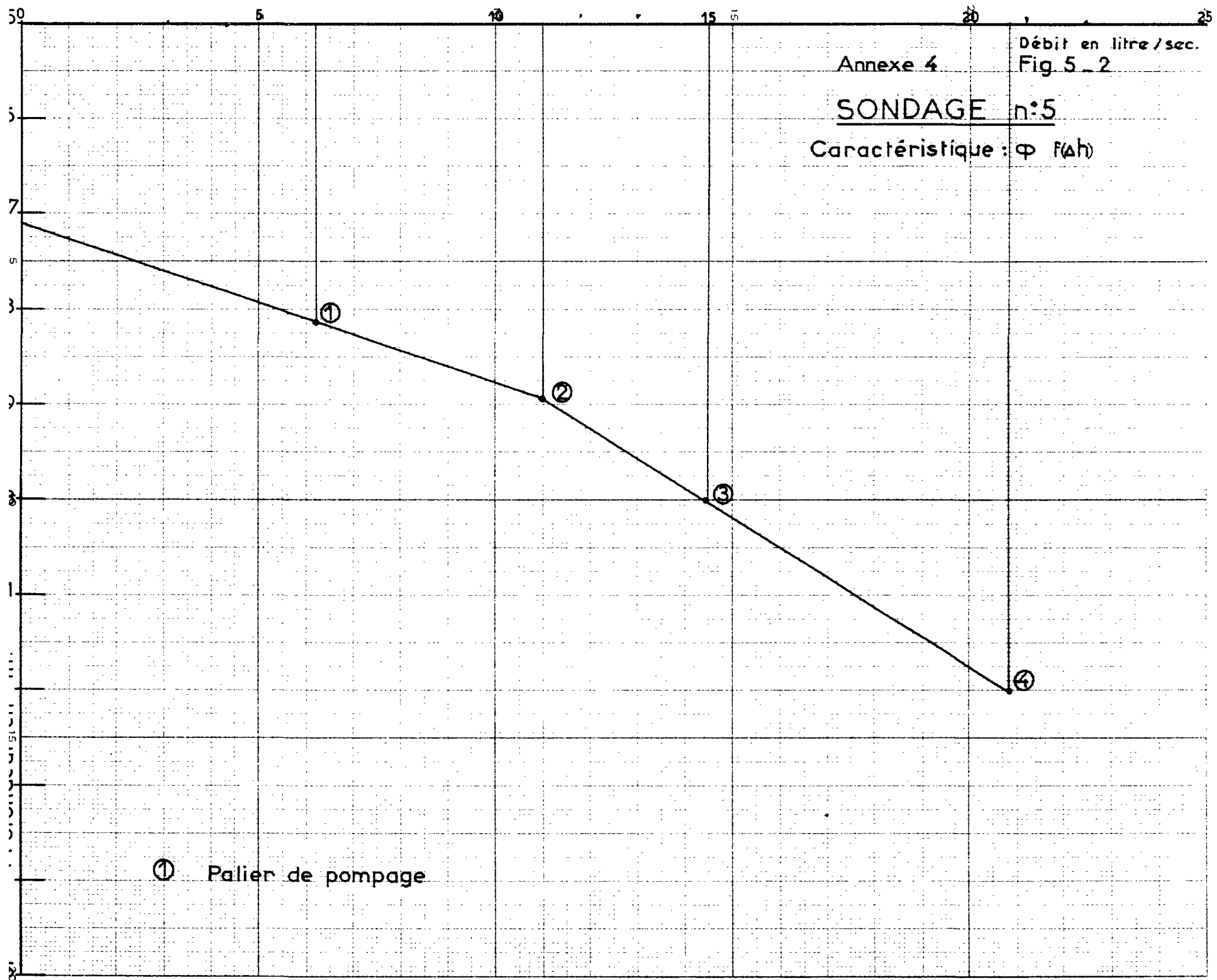
Sondage n°4 Descente

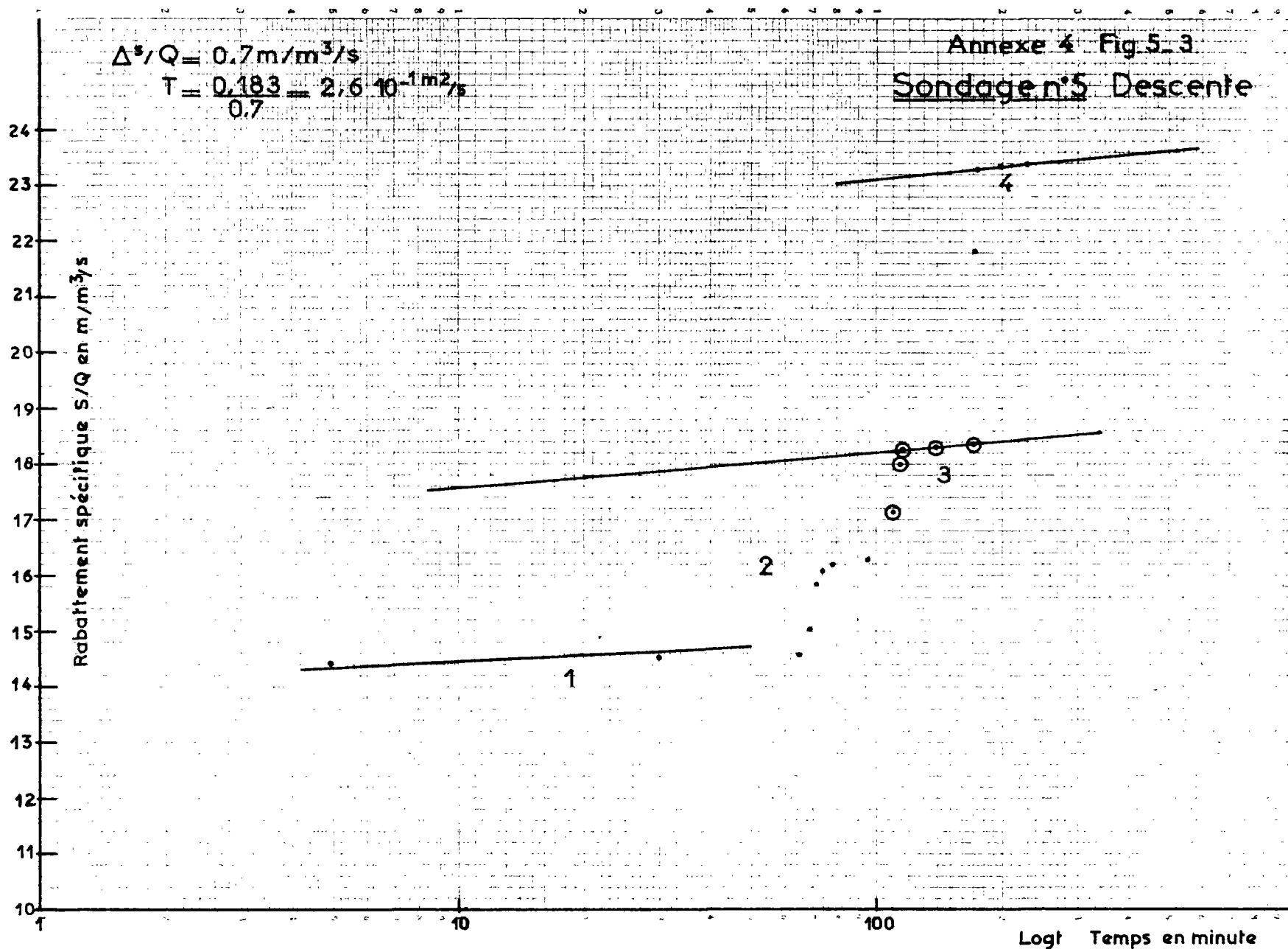


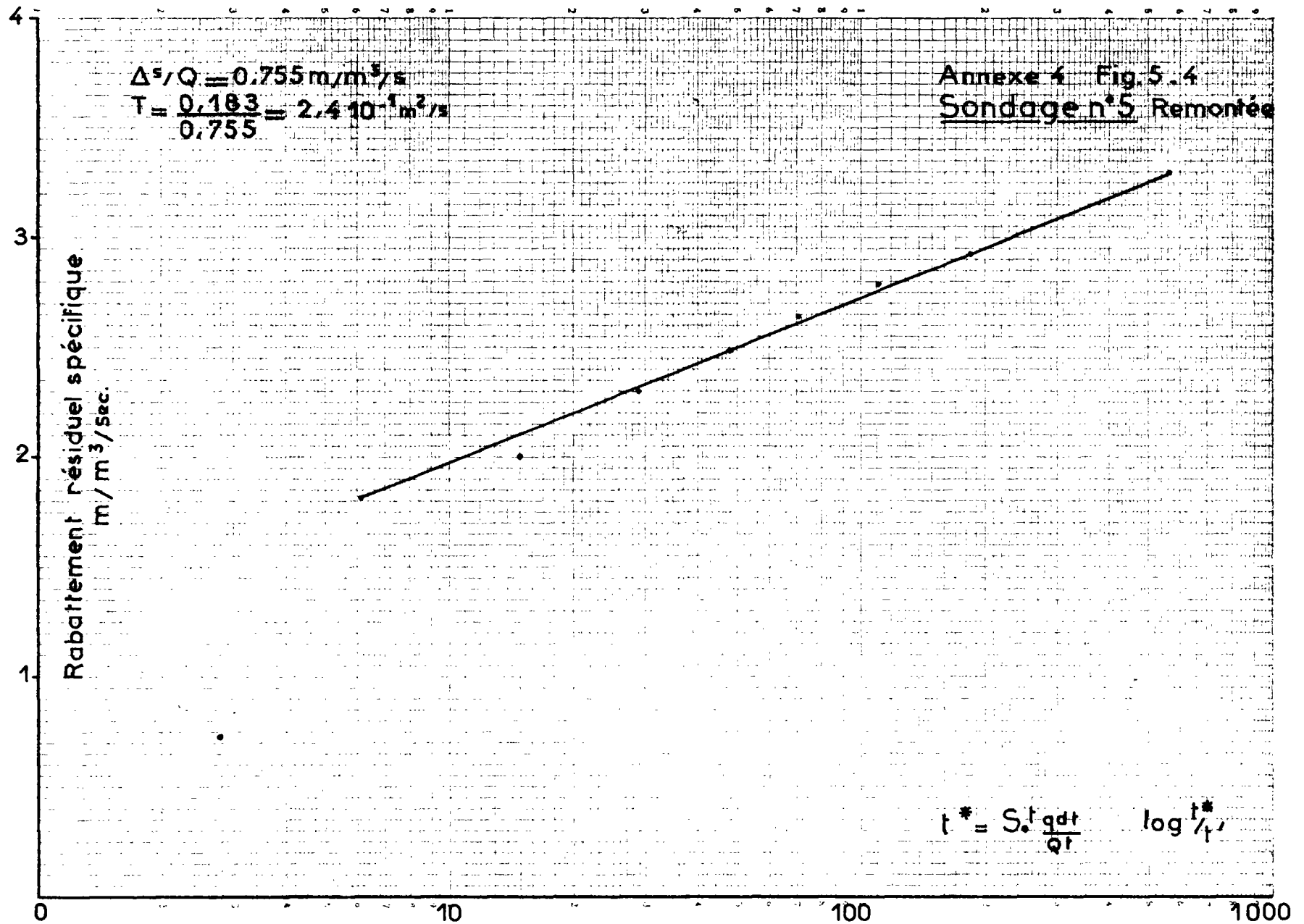
Sondage n°4 Remontée





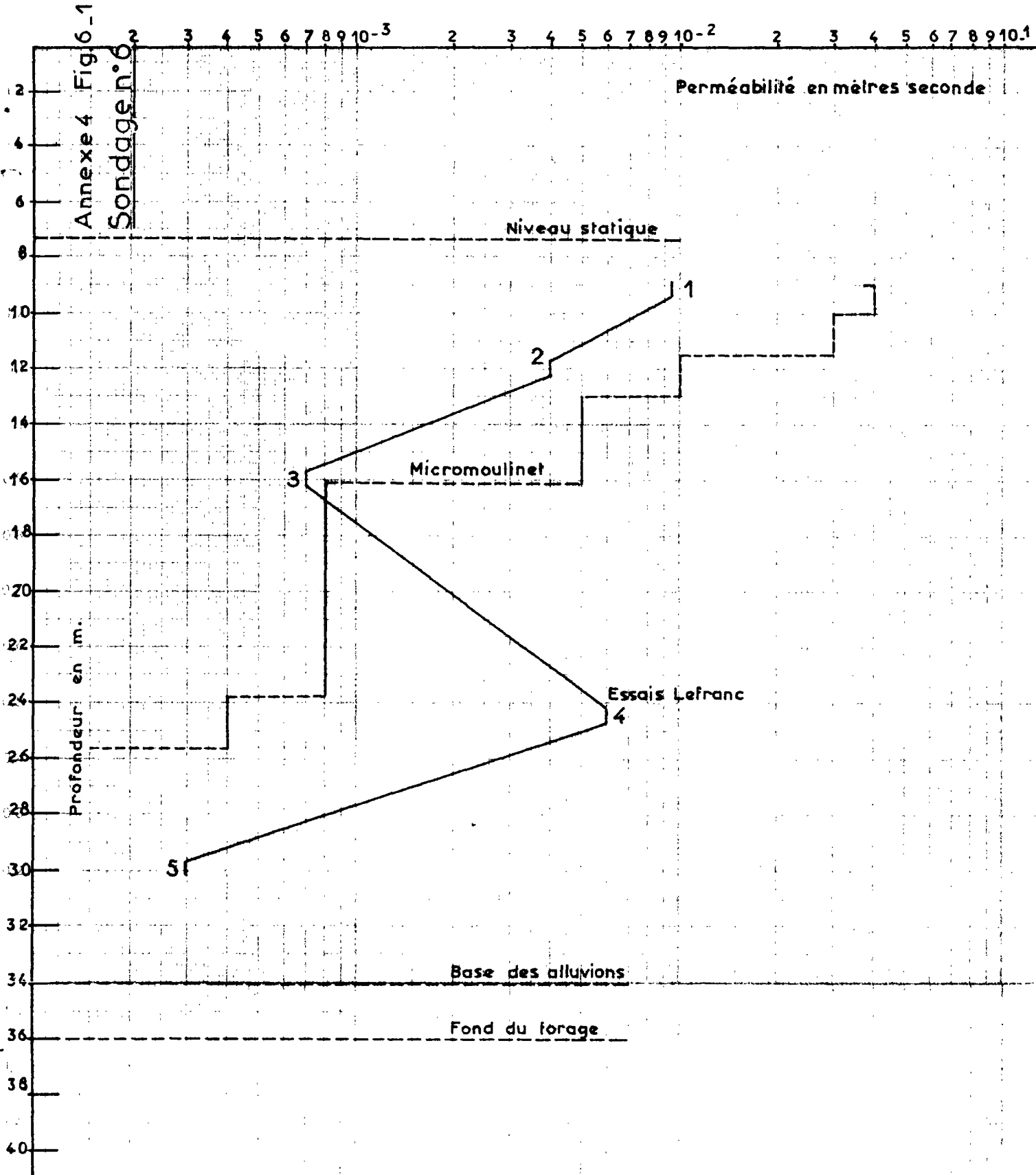


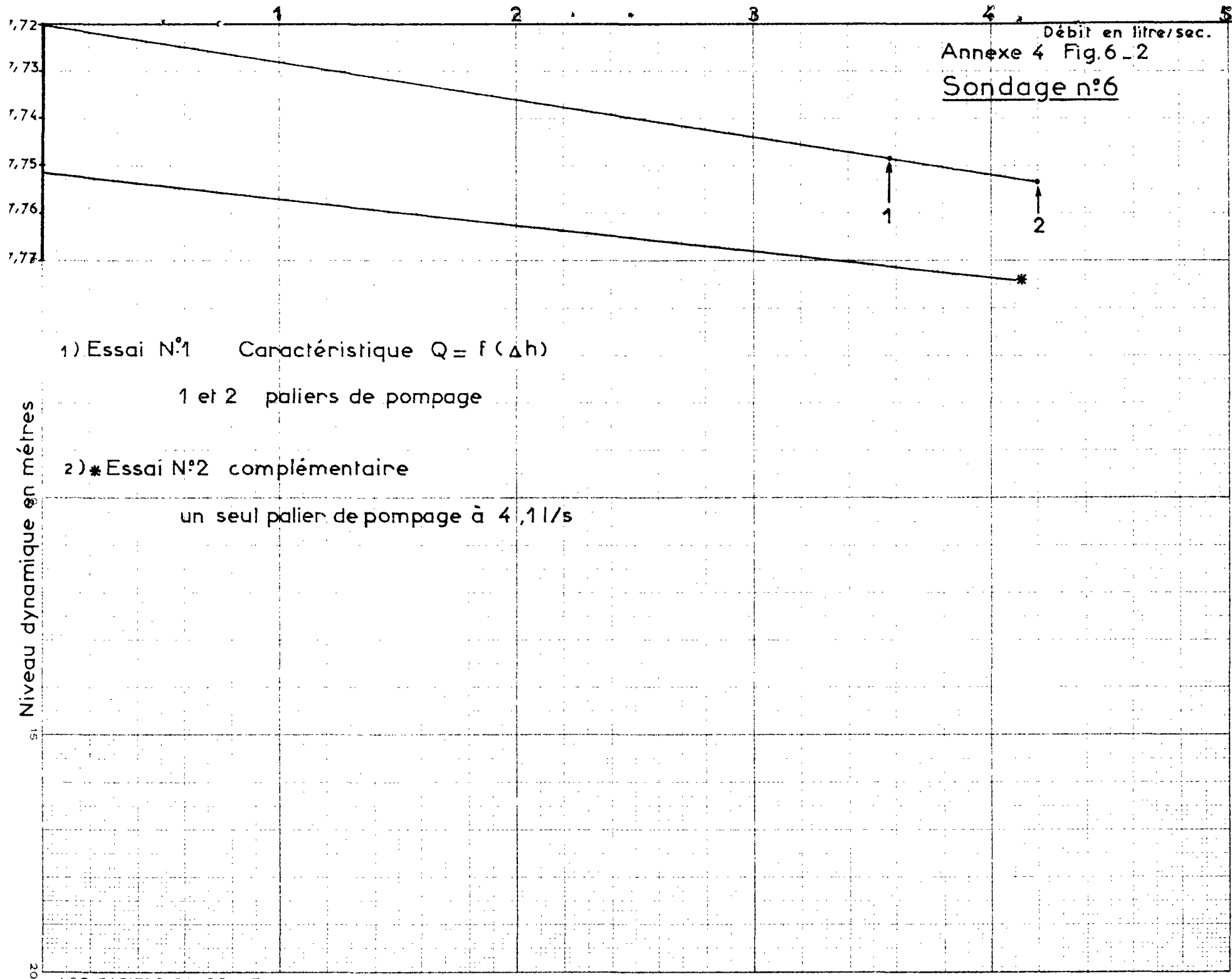


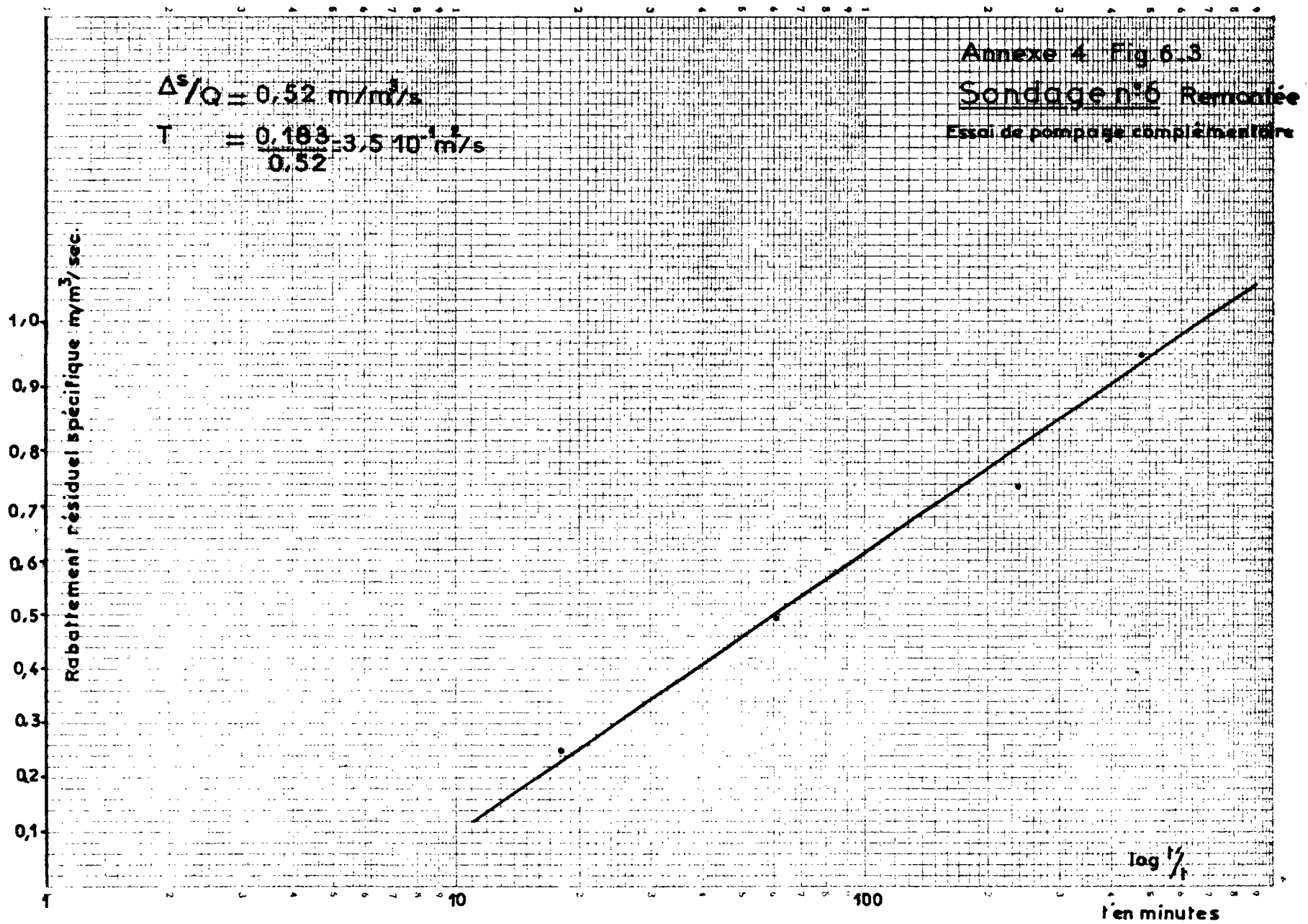


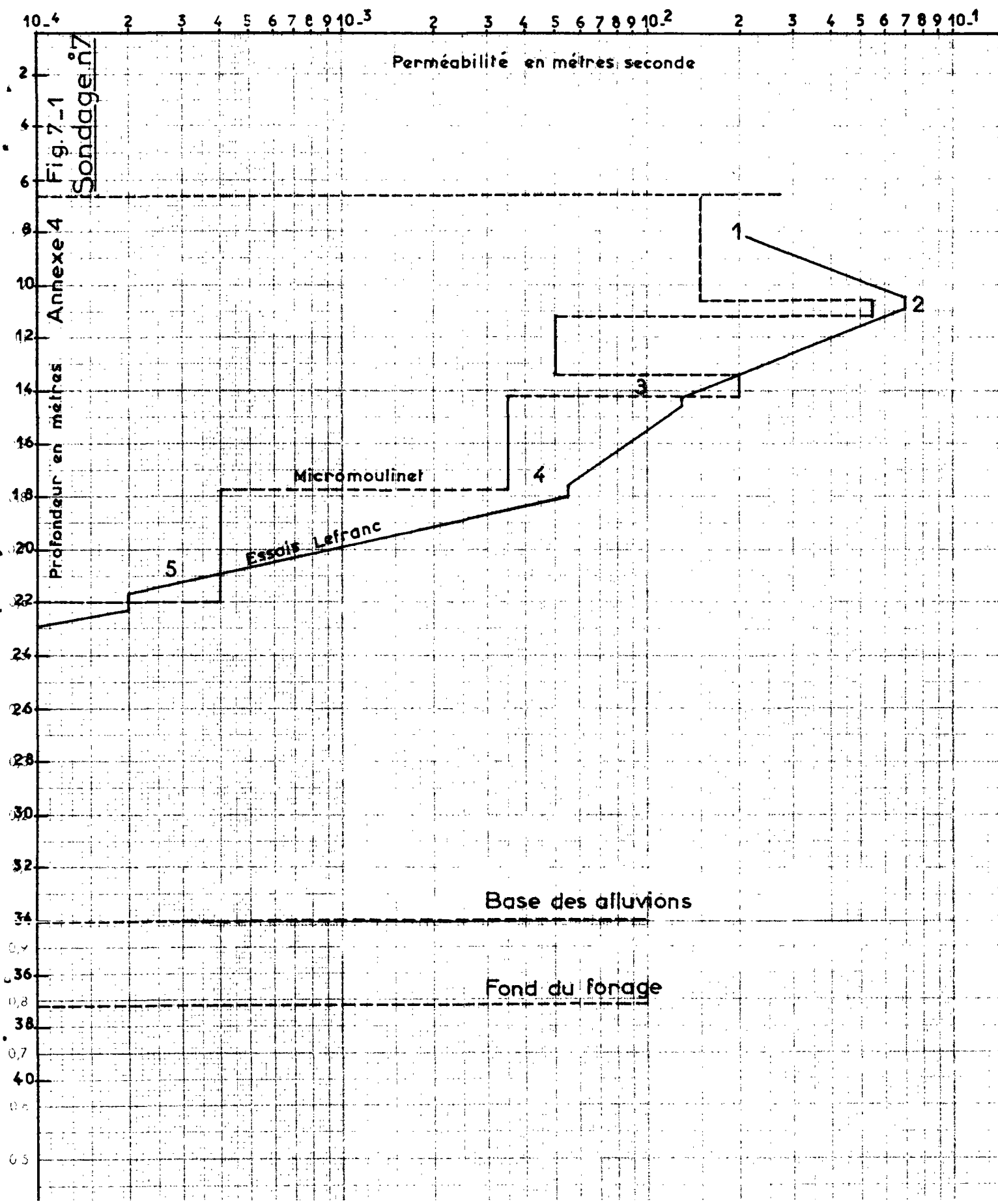
Annexe 4 Fig. 6-1

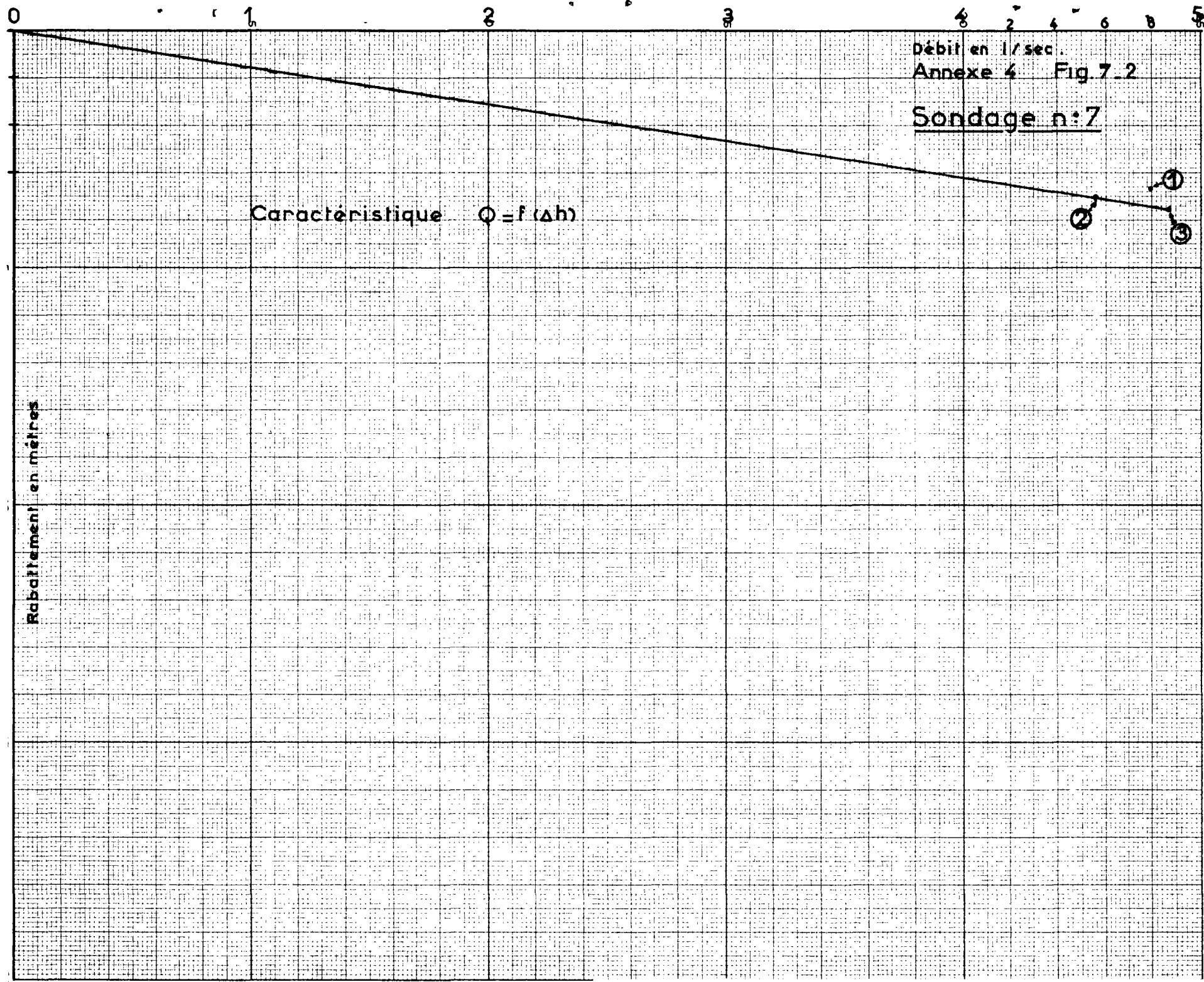
Sondage n° 6

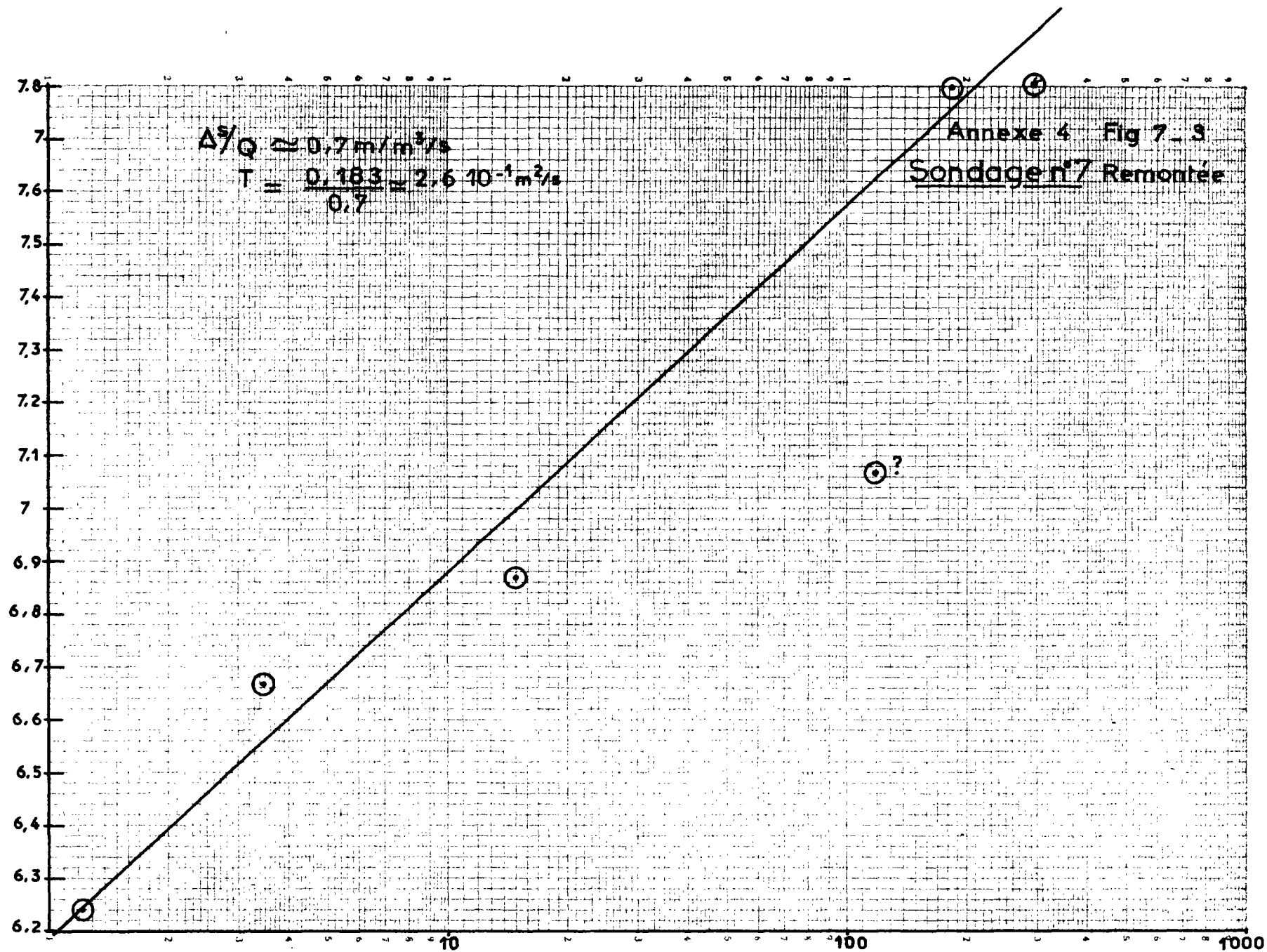












Annexe 4 Fig 7.4
Sondage n°7 Remantée

$$\Delta s/o = 0.75$$
$$T = \frac{0.188}{0.75} 2.4 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$$

