DEUX METHODES RAPIDES DE DETERMINATION IN SITU DE LA TRANSMISSIVITE ET DU COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT DES TERRAINS AQUIFERES

A. HOLEYMAN

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION

CHAPITRE I : METHODE DU NIVEAU STATIONNAIRE

I. Théorie de l'écoulement transitoire 1

II. Solution de l'équation fondamentale 2

III. Analyse de la vitesse de descente du niveau piézométrique 5

IV. Réponse de la vitesse de variation de niveau à un signal de pompage rectangulaire 7

V. Résolution de l'équation $\ln \frac{t + T_o}{t} = A \left(\frac{1}{t} - \frac{1}{t + T_o} \right)$ 9

VI. Exploitation des résultats de l'analyse théorique 15
- Mesure du coefficient d'emmagasinement
- Mesure de la transmissivité

VII. Présentation des résultats 17
1. Figure 9
2. Exemple
3. Abaque

VIII. Domaine d'applicabilité 21
1. Types de nappes
2. Rapidité
3. Sous-sol hétérogène

CHAPITRE II : METHODE DU NIVEAU DE RETOUR

I. Introduction 25

II. Analyse de l'évolution du niveau piézométrique suite à un pompage de durée limitée 25

III. Résolution de l'équation fondamentale 27
1. $\frac{R}{A}$ en fonction de $\frac{T_o}{A}$
2. $\frac{R}{A}$, $\frac{T_o}{A}$, $\frac{R + T_o}{A}$ en fonction de $\frac{R}{T_o}$
3. Abaque final
4. Exemple

IV. Domaine d'application 35

V. Comparaison des deux méthodes 35

CHAPITRE III : VERIFICATIONS EXPERIMENTALES

I. Introduction 37

II. Essais classiques 38
1. Variations de niveau dans le puits
2. Courbe de rabattement et rabattement spécifique
3. Rabattement en fonction du temps
4. Difficultés d'interprétation

III. Méthode du niveau répété 51
1. Applicabilité du principe de superposition
2. Indépendance des résultats vis-à-vis du temps de pompage (ou du niveau d'arrêt de la pompe)
3. Indépendance des résultats vis-à-vis du débit
4. Indépendance des résultats vis-à-vis du point d'analyse pour un milieu homogène
5. Vérification de la symétrie de la courbe $R + T_o$ par rapport à l'axe $R/T_o = 1$ (diagramme semi-logarithmique)
6. Confirmation des valeurs obtenues par les méthodes classiques
7. Justifications des valeurs du coefficient d'emmagasinement obtenues
   α. Appareillage imparfait
   β. S = constante ?

CONCLUSIONS 63

Avertissement

Dans le présent exposé, on a supposé qu'étaient connus :

- d'une part, les définitions et des théories générales s'appliquant aux mouvements de l'eau dans le sol ainsi que l'établissement des formules théoriques de résolution des puits en régime transitoire.

- d'autre part, les différents types de nappe, les lois générales de circulation qui s'y appliquent et leurs paramètres fondamentaux.

On se limitera donc, sur ces points à un rappel succint et on renverra le lecteur aux ouvrages généraux d'hydrologie.

NOTATIONS

d : Différentielle

e : Base des logarithmes naturels

h : Hauteur piézométrique

k : Perméabilité

kH : Transmissivité de la nappe captive

ln : Logarithme naturel

m_V : Coefficient de compressibilité du terrain

n : Porosité

r : Coordonnée radiale

t : Variable de temps

t_e : Instant où cesse le pompage

u : Variable égale à $r^2/4\alpha t$

$\overline{v}$: Vecteur vitesse d'écoulement

w : Variable d'intégration

x,y,z : Coordonnées de l'espace

z(r,t): Solution de l'équation de la chaleur

A : Paramètre égal à $r^2/4\alpha$

C : Constante d'intégration

E : épaisseur de la nappe libre

$-E_i(-u)$: intégrale logarithmique

H : Puissance de la nappe captive

M_V : Coefficient de compressibilité du terrain

N_e : Porosité effective

Q : Débit

R : Délai entre le moment d'arrêt de la pompe et l'instant où le niveau repasse par le niveau atteint lorsque cesse le pompage.

S : Coefficient d'emmagasinement

T : Délai entre le moment d'arret de la pompe et l'instant où le niveau cesse de descendre

T_o : Durée du pompage

T_i : Transmissivité (= kH) obtenue d'après différentes méthodes

V : Volume de terrain

$W(u)$: Intégrale logarithmique

W_o : Valeur de W(u) au moment où cesse le pompage

W_n : valeur de W(u) au moment où le niveau cesse de descendre

Z, Z_i, Z^* : Vitesse de descente du niveau piézométrique.

α : Coefficient égal à KH/S

β : Coefficient de compressibilité de l'eau

γ : Facteur tenant compte des effets de l'accélération

Δ : Différence

Δ^2 : Laplacien

Δc : Différence de rabattement par cycle de temps

Δs : Différence de rabattement par cycle de distance

Δh : Rabattement au moment où cesse le pompage

ΔH : Tassement

Δs : Rabattement arbitrairement choisi

$\Delta \xi$: Rabattement après un temps arbitrairement choisi

ω : Variable d'intégration

$\overline{\omega}$: Poids spécifique de l'eau

τ : Variable d'intégration

Ψ : Potentiel de l'écoulement

ξ : Rabattement

ξ_m : Rabattement maximum

ξ_o : Rabattement au moment où cesse le pompage.

INTRODUCTION

Les méthodes de mesure de la perméabilité et du coefficient d'emmagasinement du sous-sol se sont révélées jusqu'à présent lourdes d'utilisation, longues et coûteuses.
Par la réalisation d'un signal de pompage rectangulaire et en s'intéressant au temps à partir duquel le niveau cesse de descendre, l'auteur présente ici une théorie s'appuyant sur une formulation en régime transitoire qui permet d'envisager l'élimination des défauts cités plus haut.
Les résultats de l'étude sont présentés sous la forme d'un abaque dont l'utilisation est illustrée par un exemple.

Afin d'utiliser un appareillage de mesure plus simple, l'auteur a ensuite développé une autre méthode s'appuyant également sur la réalisation d'un signal de pompage rectangulaire. Dans ce cas, la mesure du temps nécessaire à obtenir une seconde fois le niveau atteint juste à l'arrêt de la pompe permet d'obtenir les paramètres fondamentaux régissant l'écoulement transitoire.

Là encore, les résultats sont présentés sous la forme d'un abaque utilisé lors de vérifications expérimentales .

CHAPITRE I : METHODE DU NIVEAU STATIONNAIRE

I. Théorie de l'écoulement transitoire

Dans le cas des écoulements non-permanents, la loi fondamentale de filtration est :

$$\bar{v} + \gamma \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} = - k \overline{\text{grad}}\ \psi \qquad (1)$$

où $\bar{v}$ est le vecteur vitesse
γ un facteur qui tient compte des effets de l'accélération.
k la perméabilité (milieu homogène et isotrope).
ψ le potentiel de l'écoulement.

En raison des valeurs très faibles de $\frac{d\bar{v}}{dt}$, on peut négliger ce terme lorsqu'on analyse les écoulements dans le sol. C'est pourquoi on utilise la formule de Darcy

$$\bar{v} = -k \overline{\text{grad}}\ \psi \qquad (2)$$

en tenant compte que $\bar{v}$ et ψ sont des fonctions non seulement des variables de l'espace x, y, z, mais aussi du temps.

En associant cette loi fondamentale de filtration à l'équation de continuité résultant de l'hypothèse de l'incompressibilité du fluide (div $\bar{v}$ = o), on obtient pour les écoulements à surface libre et à faible gradient l'expression suivante.

$$\frac{Ne}{kE} \frac{\partial h}{\partial t} = \Delta h \qquad (3)$$

dans laquelle E est l'épaisseur moyenne de la nappe libre
Ne la porosité effective
h la hauteur de la surface libre.

Ne est compris entre 0.18 et 0.43

Pour les écoulements des nappes captives, on obtient

$$\frac{(M_v + n\beta)\ \bar{\omega}}{k} \frac{\partial \psi}{\partial t} = \Delta \psi \qquad (4)$$

où M_v est le coefficient de compressibilité du terrain
n la porosité
β le coefficient de compressibilité de l'eau
ω le poids spécifique de l'eau.

Pour les sables, $n\beta$ est de l'ordre de 50 fois plus petit que M_v, c'est pourquoi on néglige généralement ce terme.

Le problème mathématique, aussi bien dans le cas des nappes libres que des nappes captives, revient à celui posé par la propagation de la chaleur, soit :

$$\boxed{\frac{\partial \xi}{\partial t} = \alpha\ \Delta \xi} \qquad (5)$$

II. Solution de l'équation fondamentale

La condition pour laquelle il est nécessaire de résoudre l'équation différentielle correspond à la mise en marche d'une pompe qui maintient un régime constant par la suite. Le signal de pompage est donc celui représenté à la figure 1.

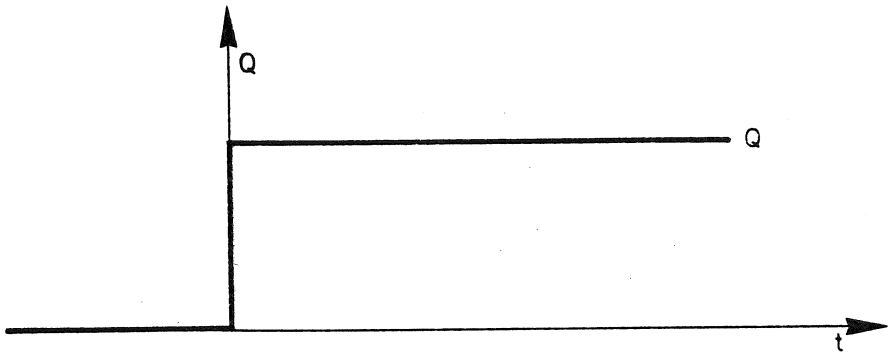


Fig.1

Ce signal est réalisé dans un puits unique s'alimentant dans une nappe infinie et que l'on placera à l'origine du système des coordonées.

En coordonées polaires, une solution élémentaire de cette équation est :

$$z\,(r,\,t) = C\,\frac{e^{-\frac{r^2}{4\alpha t}}}{t} \qquad (6)$$

L'équation étant linéaire, on peut obtenir une autre solution en intégrant la première :

$$\xi = c\int_0^t \frac{e^{\frac{-r^2}{4\alpha\tau}}}{\tau}\,d\tau \qquad (7)$$

Le débit s'écoulant vers le puits situé à l'origine s'obtient grâce à l'expression

$$Q = -\lim_{r\to 0}\left(2\pi kH\, r\,\frac{\partial\xi}{\partial r}\right)$$

$$= -\lim_{r\to 0}\left\{2\pi kH\, r\,\frac{\partial}{\partial r}\left(c\int_0^t \frac{e^{\frac{-2^2}{4\alpha\tau}}}{\tau}\,d\tau\right)\right\}$$

et après dérivation par rapport à r et intégration sur t,

$$Q = \lim_{r\to 0}\left\{\,2\pi kHr \times 2C\,\frac{e^{\frac{-r^2}{4\alpha t}}}{r}\,\right\}$$

$$= 4\pi kHC \qquad (8)$$

Le débit est dès lors constant dans le temps et la solution correspond bien au problème posé. La valeur de la constance C peut être déduite du débit et on peut écrire

$$\xi = \frac{Q}{4\pi kH}\int_0^t \frac{e^{\frac{-r^2}{4\alpha\tau}}}{\tau}\,d\tau \qquad (9)$$

qui donne donc la baisse de niveau piézométrique pour tout point de la nappe en fonction du temps.

Grâce au changement de variable

$$w = \frac{r^2}{4\alpha\sigma}$$

on évalue le terme intégral

$$\int_0^t e^{\frac{-r^2}{4\alpha\sigma}} \, d\sigma = \int_u^\infty \frac{e^{-w}}{w} \, dw = -E_i(-u) = W(u) \qquad (10)$$

qui est une intégrale logarithmique dont les valeurs sont reprises dans le tableau I et dont le graphique est représenté à la figure 2.

Cette intégrale logarithmique peut être calculée sous la forme de la série :

$$W(u) = -0.5772 - u + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} - \frac{u^4}{4 \cdot 4!} + \ldots$$

TABLEAU I : Valeurs de W(u)

U	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	$2191o^{-3}$	$49.1o^{-3}$	$131o^{-3}$	$3.81o^{-3}$	$121o^{-3}$	$0.361o^{-3}$	$0.121o^{-3}$	$0.0381o^{-3}$	0
$\times 1o^{-1}$	1.82	1.22	0.91	0.70	0.56	0.45	0.37	0.31	0.26
$\times 1o^{-2}$	4.04	3.35	2.96	2.68	2.47	2.30	2.15	2.03	1.92
$\times 1o^{-3}$	6.33	5.64	5.23	4.95	4.73	4.54	4.39	4.26	4.14
$\times 1o^{-4}$	8.63	7.94	7.53	7.25	7.02	6.84	6.69	6.55	6.44
$\times 1o^{-5}$	10.94	10.24	9.84	9.55	9.33	9.14	8.99	8.86	8.74

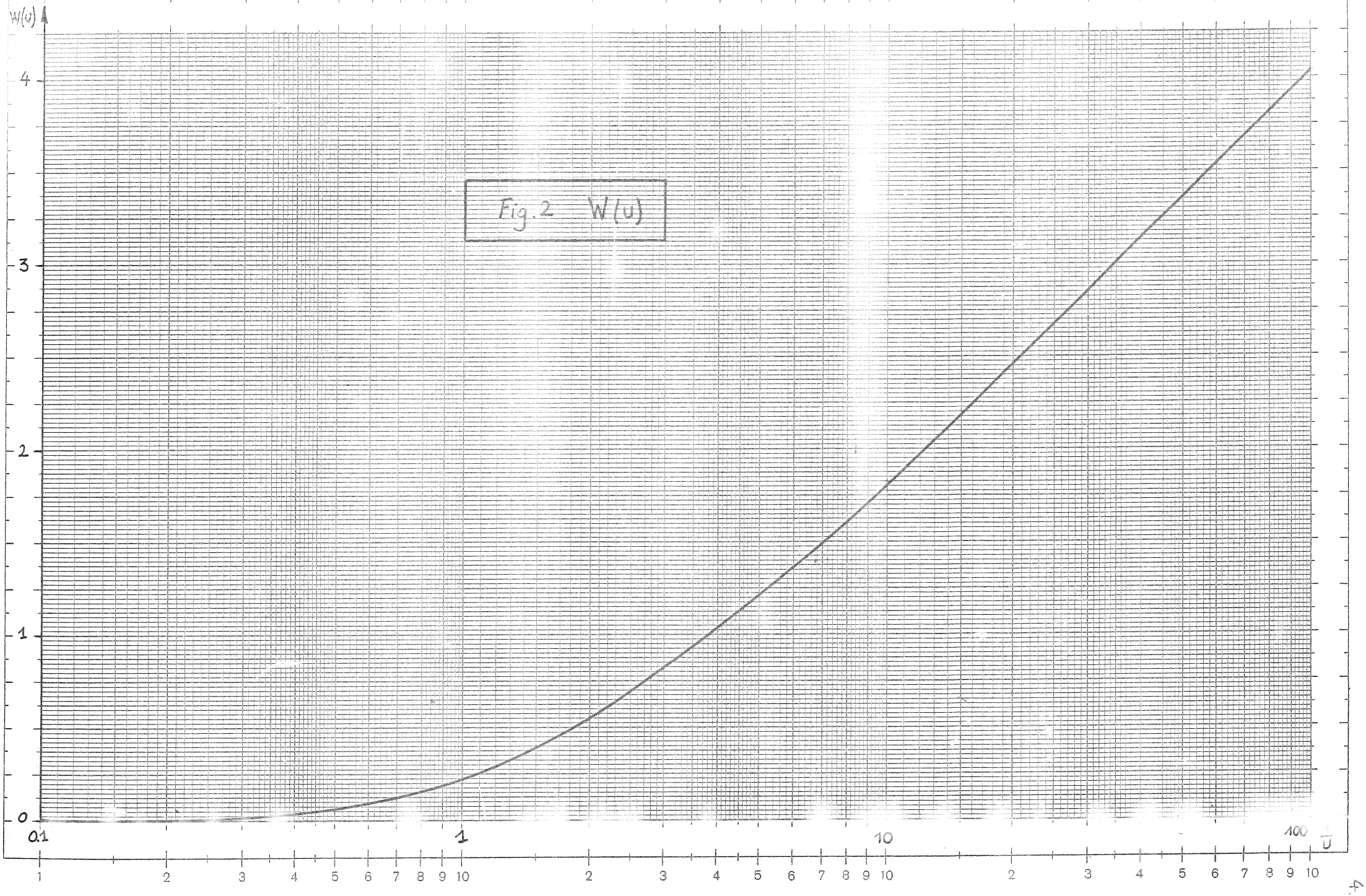


Fig. 2 W(u)

III. Analyse de la vitesse de descente du niveau piézométrique

Au lieu d'évaluer l'intégrale logarithmique pour obtenir la valeur de la baisse du niveau piézométrique, on s'intéressera à la vitesse de descente du niveau piézométrique en fonction du temps et de la distance du point considéré au puits. La vitesse est donnée par différentiation par rapport au temps de l'expression donnant le niveau piézométrique (9) ou par substitution de C par sa valeur dans la solution fondamentale (6).

$$Z(r,t) = \frac{Q}{4\pi kH} \quad \frac{e^{\frac{-r^2}{4\alpha t}}}{t} \qquad (11)$$

On remarque qu'il s'agit d'une fonction analytique parfaitement définie. On peut la mettre sous la forme

$$Z = C \quad \frac{e^{\frac{-A}{t}}}{t}$$

en posant $A = \frac{r^2}{4\alpha}$ (12)

Pour un type de nappe donnée A est essentiellement fonction de la position du point auquel on considère la baisse de niveau.

La fig. 3 donne l'allure de cette fonction pour différentes valeurs de A ; on remarque que la vitesse de descente est pratiquemment nulle pendant un certain temps et donc qu'en fonction de l'éloignement du point considéré au puits, il faut attendre ce temps avant de voir se manifester l'effet du pompage. La vitesse de descente augmente ensuite rapidement pour passer par un maximum pour t = A et diminuer lentement en fonction du temps ; ce n'est que pour une valeur plus grande de ce temps que le régime quasi permanent est réalisé.

On remarquera que la surface sous tendue par ces courbes représente l'abaissement de la nappe puisque cette grandeur est l'intégrale de la vitesse. Les courbes ne s'intersectent jamais car au fur et à mesure que l'on s'éloigne du point de pompage, l'abaissement et la vitesse d'abaissement de la hauteur piézométrique diminuent.

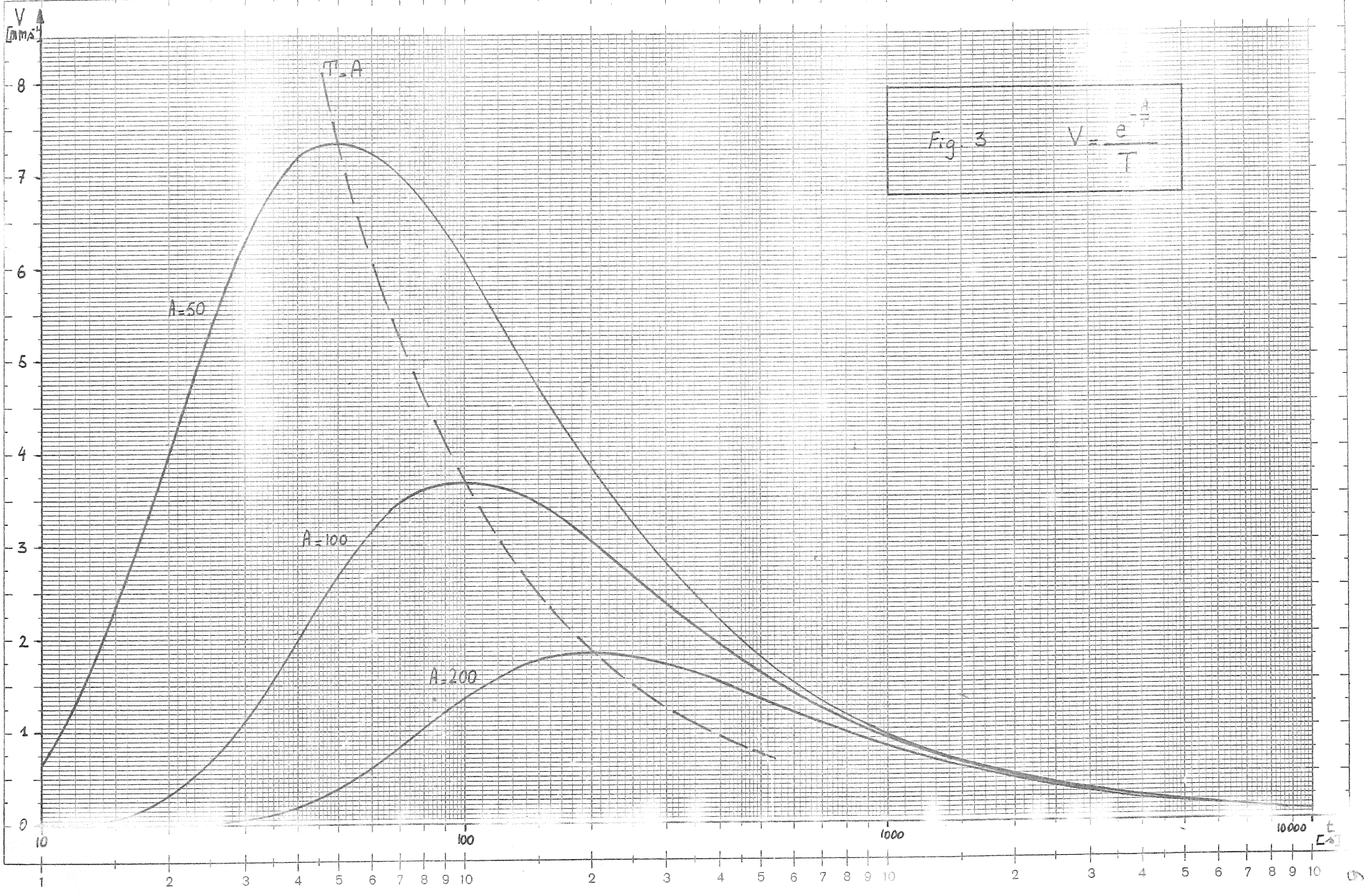


Fig. 3 $V = \frac{e^{-\frac{A}{T}}}{T}$

IV. Réponse de la vitesse de variante du niveau à un signal de pompage rectangulaire

On réalise un signal de pompage rectangulaire en branchant la pompe à un certain moment et en l'arrêtant ensuite. Le signal de débit se représente de la façon suivante :

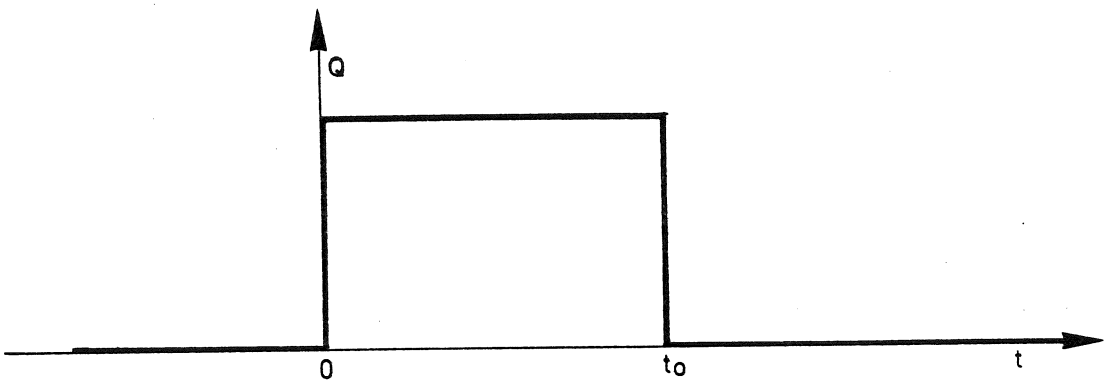


Fig. 4

Pour étudier la vitesse de descente du niveau piézométrique, on se basera sur le principe de superposition : le signal en question sera le résultat des deux signaux suivants :

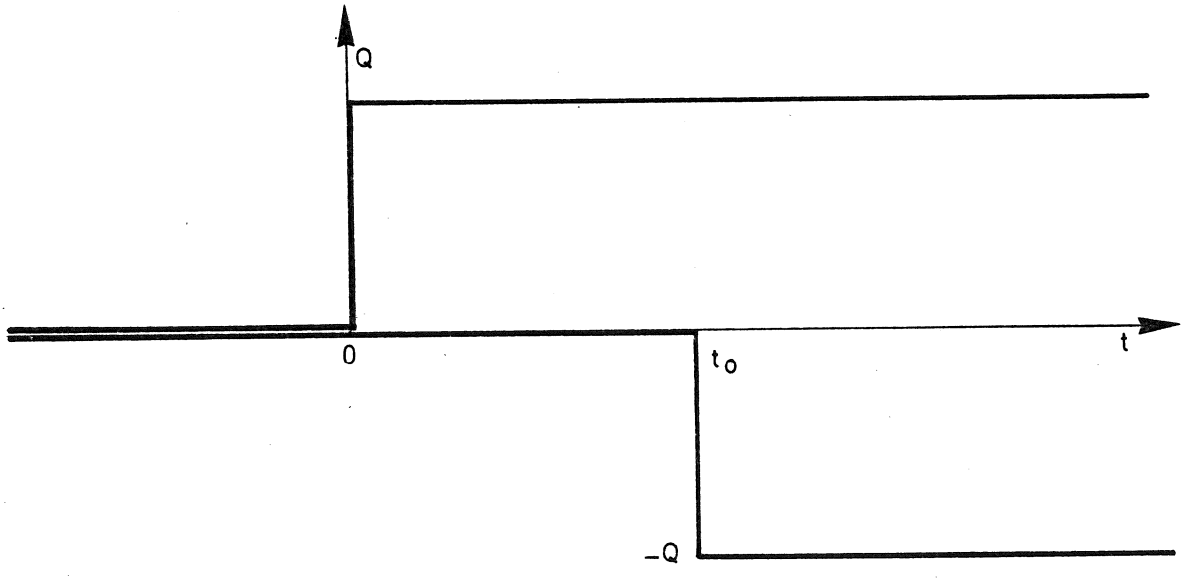


Fig. 5

Comme nous connaissons la solution fondamentale pour ces deux signaux distincts, il suffira d'additionner les réponses respectives pour obtenir la variation du niveau piézométrique suite à un pompage opéré pendant un certain temps.

La solution au signal 1 est

$$Z_1 = C \frac{e^{\frac{-A}{t}}}{t} \qquad \text{pour } t > 0.$$

La solution au signal 2 est

$$Z_2 = - C \frac{e^{-\frac{A}{t-t_o}}}{t - t_o} \qquad \text{pour } t > t_o.$$

En plaçant l'origine du temps au moment où on arrête la pompe, on obtient la réponse résultante, en remplaçant C par sa valeur

$$Z^* = \frac{Q}{4\pi kH} \left\{ \frac{e^{-\frac{A}{t+t_o}}}{t + t_o} - \frac{e^{-\frac{A}{t}}}{t} \right\} \qquad (13)$$

On s'intéresse maintenant au moment où la vitesse s'annule, c'est-à-dire au moment où, suite à ce signal de pompage particulier, le niveau cesse de descendre pour remonter par la suite. Comme dans cette expression $\frac{Q}{4\pi kH}$ peut être mis en évidence, on constate au premier abord que l'on se débarrasse de la variable kH (transmissivité). Notre but revient à chercher la valeur de t (comptée à partir de l'arrêt de la pompe) pour laquelle le niveau s'arrête de descendre et donc à résoudre l'équation :

$$\frac{e^{-\frac{A}{t+T_o}}}{t + T_o} = e^{-\frac{A}{t}} \frac{}{t} \qquad (14)$$

ou, sous une autre forme

$$\ln \frac{t + T_o}{t} = A \left(\frac{1}{t} - \frac{1}{t+T_o}\right)$$

La solution T dépend de T_o et de $A = \frac{r2}{4\alpha}$

V. Résolution de l'équation $\ln \frac{t + T_o}{t} = A \left(\frac{1}{t} - \frac{1}{t + T_o}\right)$

L'équation transcendante peut être résolue graphiquement (voir figure 6).

Etant donné le nombre des valeurs que peuvent prendre les paramètres A et T_o, on a préféré résoudre l'équation (14) par la méthode de Newton-Raphson, au moyen de l'ordinateur.

Les valeurs de $\mathcal{T}$ en fonction de A pour différentes valeurs de T_o, sont mises sous la forme de tableau (voir tableau II).

En portant A en fonction de $\mathcal{T}$ pour différentes valeurs de T_o (voir figure 7), on remarque que les solutions pour une valeur donnée du rapport T_o/A s'alignent sur des droites parallèles à la droite $\mathcal{T} = A$. Il en résulte que si l'on connaît la valeur de $\mathcal{T}$ pour un couple de valeurs T_o et A, on peut connaître toutes les valeurs de $\mathcal{T}$ pour le rapport T_o/A observé en ce point en fonction de A.

En conclusion, par la mise en évidence du rôle que joue la variable adimensionnelle T_o/A, on élimine un paramètre et l'on peut présenter la solution sous trois formes :

$$\begin{cases} T_o/A \text{ en fonction de } T/T_o \\ \dfrac{T}{A} \text{ en fonction de } \dfrac{\mathcal{T}}{T_o} \\ \dfrac{T + T_o}{A} \text{ en fonction de } \dfrac{\mathcal{T}}{T_o} \end{cases}$$

Les solutions adimensionnelles sont représentées à la figure 9, partie de gauche.

Cette condensation des résultats peut également se justifier par des manipulations mathématiques de la formule (14)

$$\frac{e^{-\frac{A}{\mathcal{T}+T_o}}}{T + T_o} = \frac{e^{-\frac{A}{\mathcal{T}}}}{\frac{\mathcal{T}}{A}}$$

ou

$$\frac{e^{-\frac{\frac{A}{T}}{1+\frac{T_o}{\mathcal{T}}}}}{\frac{1 + \frac{T_o}{\mathcal{T}}}{\frac{A}{\mathcal{T}}}} = \frac{e^{-\frac{A}{\mathcal{T}}}}{\frac{\mathcal{T}}{A}}$$

qui est une relation liant univoquement $\frac{A}{T}$ à $\frac{\mathcal{T}}{T_o}$.

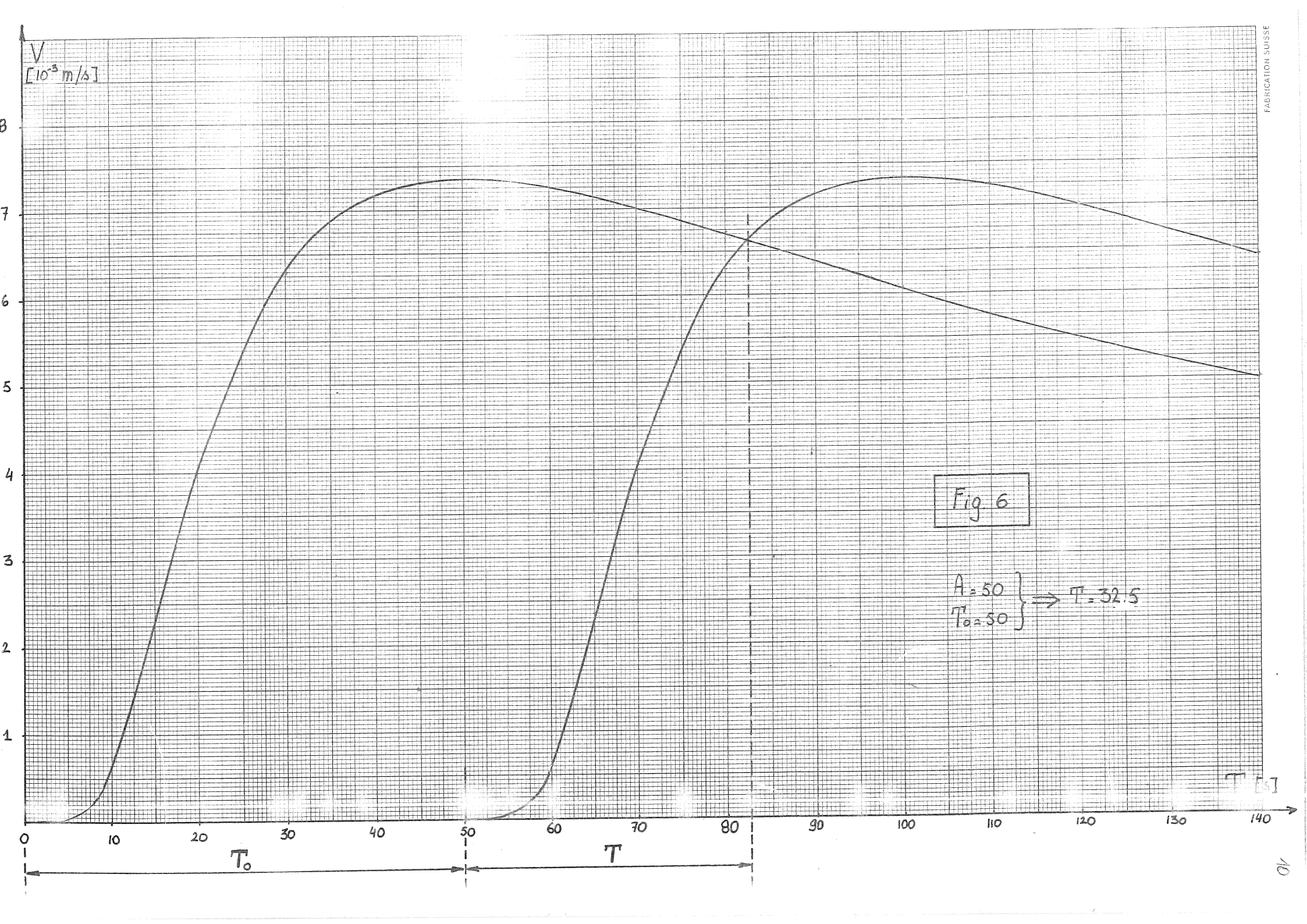

V
[10⁻³ m/s]
8
7
6
5
4
3
2
1
T [s]
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
110
120
130
140
T₀
T
Fig. 6
A = 50
T₀ = 50
⇒ T = 32.5

TABLEAU II Valeurs de T pour différents A et To.

T / To \ A	1	2	5	10	20	50	100	200	500	1000	2000	5000	10000
1	0.6508	1.581	4.535	9.51	19.48	49.5	100	200	500	1000	2000	5000	10000
2	0.4958	1.302	4.130	9.07	19.02	49	99	200	500	1000	2000	5000	10000
5	0.3399	0.9020	3.254	7.917	17.7	47.55	97.4	198	500	1000	2000	5000	10000
10	0.2667	0.6799	2.479	6.51	15.81	45.35	95.1	194.8	495	1000	2000	5000	10000
20	0.2185	0.5337	1.855	4.96	13.01	41.3	90.7	190	490	990	2000	5000	10000
50	0.1763	0.4128	1.334	3.39	9.02	32.54	79	177	475	974	1980	5000	10000
100	0.1542	0.3527	1.092	2.67	6.80	24.8	65	158	453	951	1948	4950	10000
200	0.1372	0.3083	0.9249	2.18	5.37	18.6	49.6	130	413	907	1902	4900	9900
500	0.1199	0.2650	0.7708	1.76	4.13	13.3	34	90	325	791	1770	4755	9740
1000	0.1097	0.2399	0.6858	1.54	3.53	10.9	26.7	68	248	651	1581	4535	9510
2000	0.1011	0.2193	0.6185	1.37	3.08	9.2	21.8	53.4	186	496	1302	4130	9070
5000	0.0917	0.1972	0.5483	1.20	2.64	7.7	17.6	41.3	133	340	902	3254	7907
10000	0.0871	0.1834	0.5054	1.097	2.40	6.9	15.4	35.3	109	267	680	2479	6508

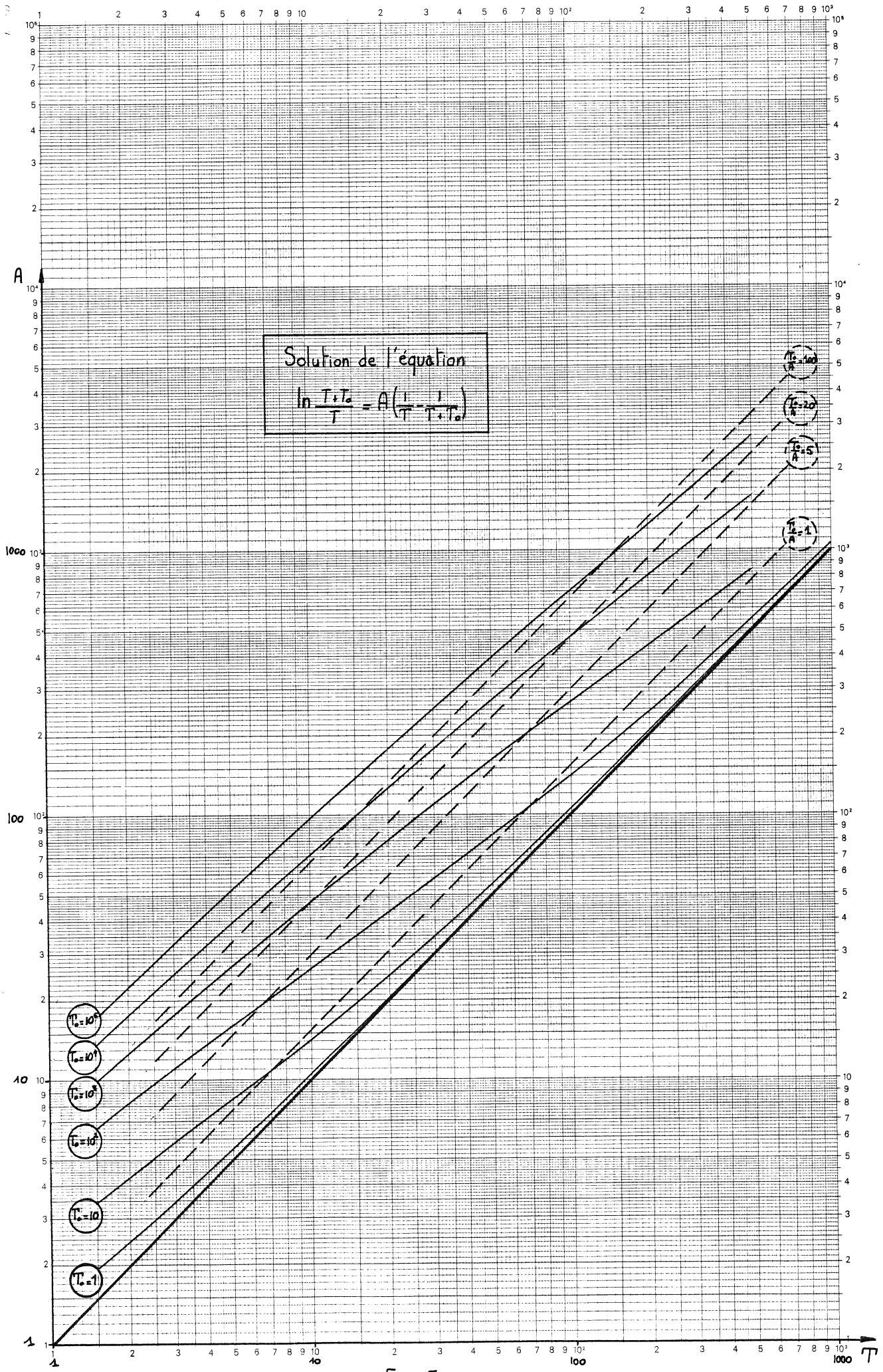

Solution de l'équation
$\ln \frac{T+T_a}{T} = A\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T+T_a}\right)$
A
T
$\frac{T_a}{A}=100$
$\frac{T_a}{A}=20$
$\frac{T_a}{A}=5$
$\frac{T_a}{A}=1$
$T_a=10^5$
$T_a=10^4$
$T_a=10^3$
$T_a=10^2$
$T_a=10$
$T_a=1$
1000
100
10
1
1
10
100
1000

Fig. 7

En effet, en explicitant, on obtient

$$\frac{T}{A} = \frac{1 - \dfrac{1}{1 + To/T}}{\ln\,(1 + T_o/T)} \qquad (15)$$

fonction reproduite à la figure 8.

De la même façon, on peut obtenir $\dfrac{T + T_o}{A} = \dfrac{T}{A}\,(1 + \dfrac{To}{T})$.

On remarque que $\dfrac{T}{A}$ est toujours plus petit que l'unité car A est le temps pour lequel la fonction

$\dfrac{e^{-\frac{A}{T}}}{T}$ accuse son maximum.

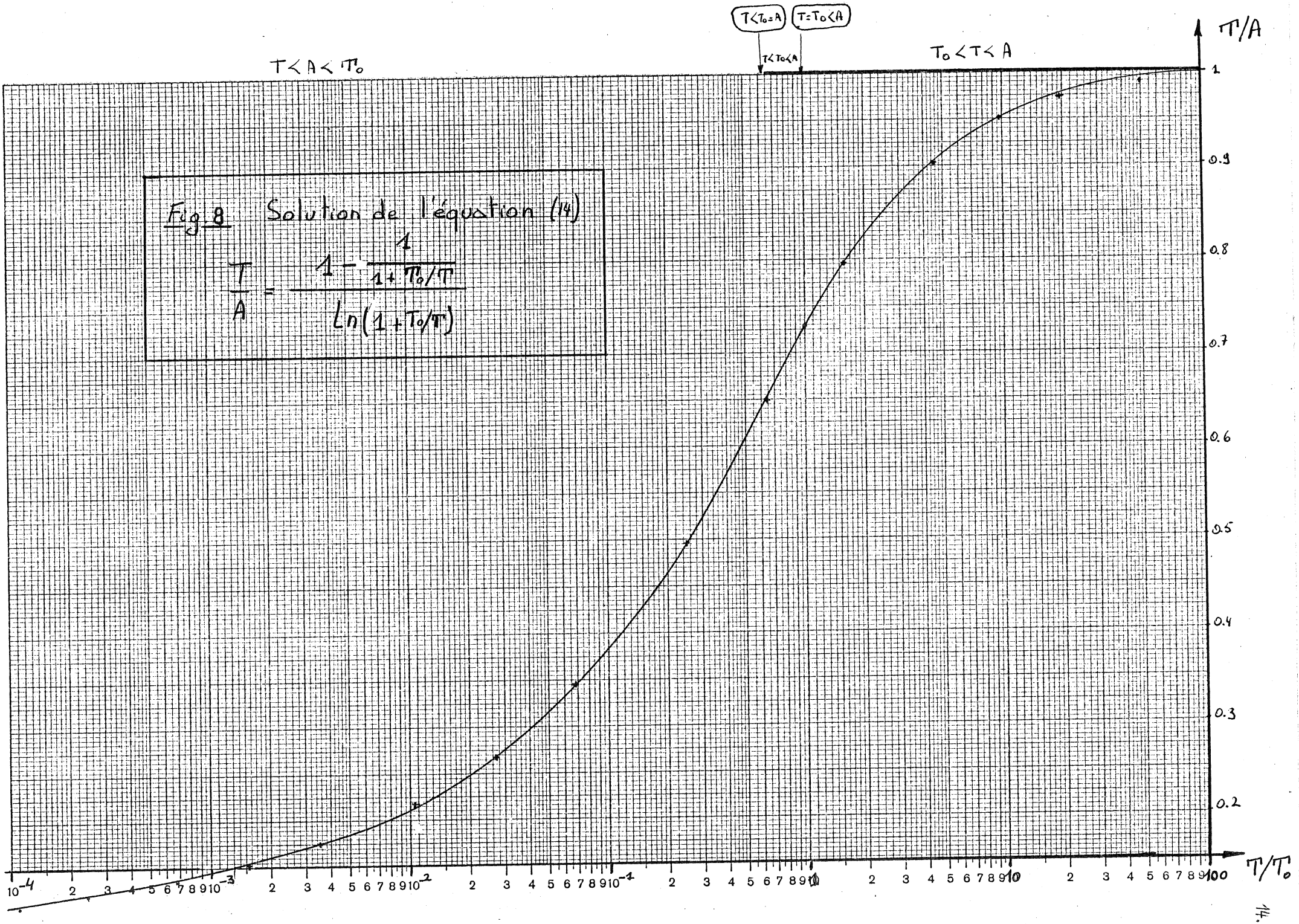


Fig 8 Solution de l'équation (14)

$$\frac{T}{A} = \frac{1 - \dfrac{1}{1 + T_0/T}}{\ln(1 + T_0/T)}$$

VI. Exploitation des résultats de l'analyse théorique

(1°) Mesure du coefficient d'emmagasinement

Si, à la suite d'un pompage de durée T_o, on parvient à mesurer le temps T nécessaire à ce que le niveau piézométrique cesse de descendre, il est possible grâce à l'équation (15) de trouver la valeur de $\frac{A}{T}$ et donc de $A = \frac{r^2}{4\alpha}$; la position du point de mesure étant connue, on obtient dès lors la valeur de α.

Une fois la valeur de α connue, il est possible de trouver l'influence d'un système de pompage sur la nappe puisque c'est le paramètre essentiel permettant de calculer le rayon d'influence selon la méthode de Jacob.
En effet, $R_{influence} = 1.5 \sqrt{\alpha t}$.
De plus, la valeur de α est une indication du caractère captif ou libre de la nappe. En effet, pour une nappe libre, aussi bien que pour une nappe captive,

$$\alpha = \frac{kE}{ne} = \frac{kH}{S} = \frac{T}{S} \qquad (16)$$

où T est la transmissivité et S le coefficient d'emmagasinement.
Le coefficient d'emmagasinement varie très fortement d'après le type de nappe : pour une nappe libre, S serait d'après Cazenove, de 0,5 à 2 % dans les limons, de 2 à 15 % dans les graviers plus ou moins sableux. Par contre, pour une nappe captive, le coefficient d'emmagasinement est très faible : de 10^{-3} à 10^{-6}.

(2°) Mesure de la transmissivité

En considérant la mesure de l'abaissement total de la nappe à l'instant où elle s'arrête de descendre (instant T), il est possible de déterminer la valeur du coefficient C de la solution fondamentale correspondant au cas du régime à débit constant et donc, moyennant la mesure du débit pompé pendant le signal rectangulaire, estimer la valeur du produit kH.

On se souviendra du changement de variable effectué pour exprimer l'abaissement de la nappe aquifère au moyen de l'intégrale logarithmique

$$u = \frac{r^2}{4\alpha t} = \frac{A}{t}$$

En appliquant de nouveau le principe de superposition pour obtenir l'abaissement provoqué par un signal carré, on exprime :

$$\xi = C \left\{ - E_i \left(-\frac{A}{T}\right) + E_i \left(-\frac{A}{T+T_o}\right) \right\} \qquad (17)$$

Etant donné que la mesure de T_o/T nous donne directement $\frac{A}{T}$ et $\frac{A}{T+T_o}$, il est très facile de déterminer l'expression entre crochets, et moyennant la mesure de ξ pour $t = T$ d'évaluer C.

Enfin, on estimera la transmissivité par l'expression

$$kH = \frac{Q}{4\pi C} = \frac{Q \times \left\{ W\left(\frac{T+To}{A}\right) - W\left(\frac{To}{A}\right) \right\}}{4 \pi \xi} \qquad (18)$$

D'autre part, la mesure du niveau atteint lors de l'arrêt de la pompe peut donner un autre moyen d'estimer la valeur de la transmissivité : ξ au temps To est donné par l'expression

$$\xi_o = C \{- Ei (- \frac{A}{To})\} = C W (\frac{To}{A})$$

Puisque la valeur de T/To précise celle de $\frac{To}{A}$, on obtient

$$kH = \frac{Q \times W (\frac{To}{A})}{4 \pi \xi o}$$

VII. Présentation des résultats

1. Figure 9

La figure 9 se compose de deux parties :

. à gauche, $\frac{To}{A}$, $\frac{T}{A}$, $\frac{T + To}{A}$ en fonction de $\frac{T}{To}$

. à droite, W en fonction de $\frac{t}{A}$

{ l'ordonnée est commune pour $\frac{t}{A}$, $\frac{To}{A}$, $\frac{T}{A}$ et $\frac{T + To}{A}$

{ l'abscisse en bas porte la valeur de T/To
{ l'abscisse en haut porte la valeur de W

Les 3 échelles sont logarithmiques.

2. Exemple

Supposons qu'on réalise pendant 10 minutes un débit de 2 litres/sec (7.2 m3/h) et que l'on mesure à 20 mètres du puits un abaissement piézométrique de 1 m à 10 minutes et de 1.6m à 16 min 30 sec; les données sont les suivantes :

{ To = 600 sec
{ T = 300 sec
{ ξo = 1 m
{ ξM = 1.6m
{ Q = 2 10^{-3} m3/s
{ r = 20 m

On résoudra le problème de la manière suivante :

on calcule $\frac{T}{To}$ = 0.65, on trace, à partir de cette valeur définie sur l'abscisse basse de la figure 9, une verticale qui intercepte les 3 courbes de gauche en 3 points :

$$\left.\begin{array}{l} \frac{T}{A} = 0.65 \\ \frac{To}{A} = 1 \\ \frac{T + To}{A} = 1.65 \end{array}\right\} \rightarrow A = 600 \text{ sec}$$

A partir de ces coordonnées on trace 3 horizontales qui interceptent W en 3 points

pour $\frac{T}{A}$ = 0.65, W = 0.095

$\frac{T + To}{A}$ = 1.65, W = 0.450

$\rightarrow \Delta W = 0.355$

$$kH = \frac{2 \times 10^{-3} \times 0.355}{4 \pi \times 1.6} = 3.5\ 10^{-5} \text{ m2/s.}$$

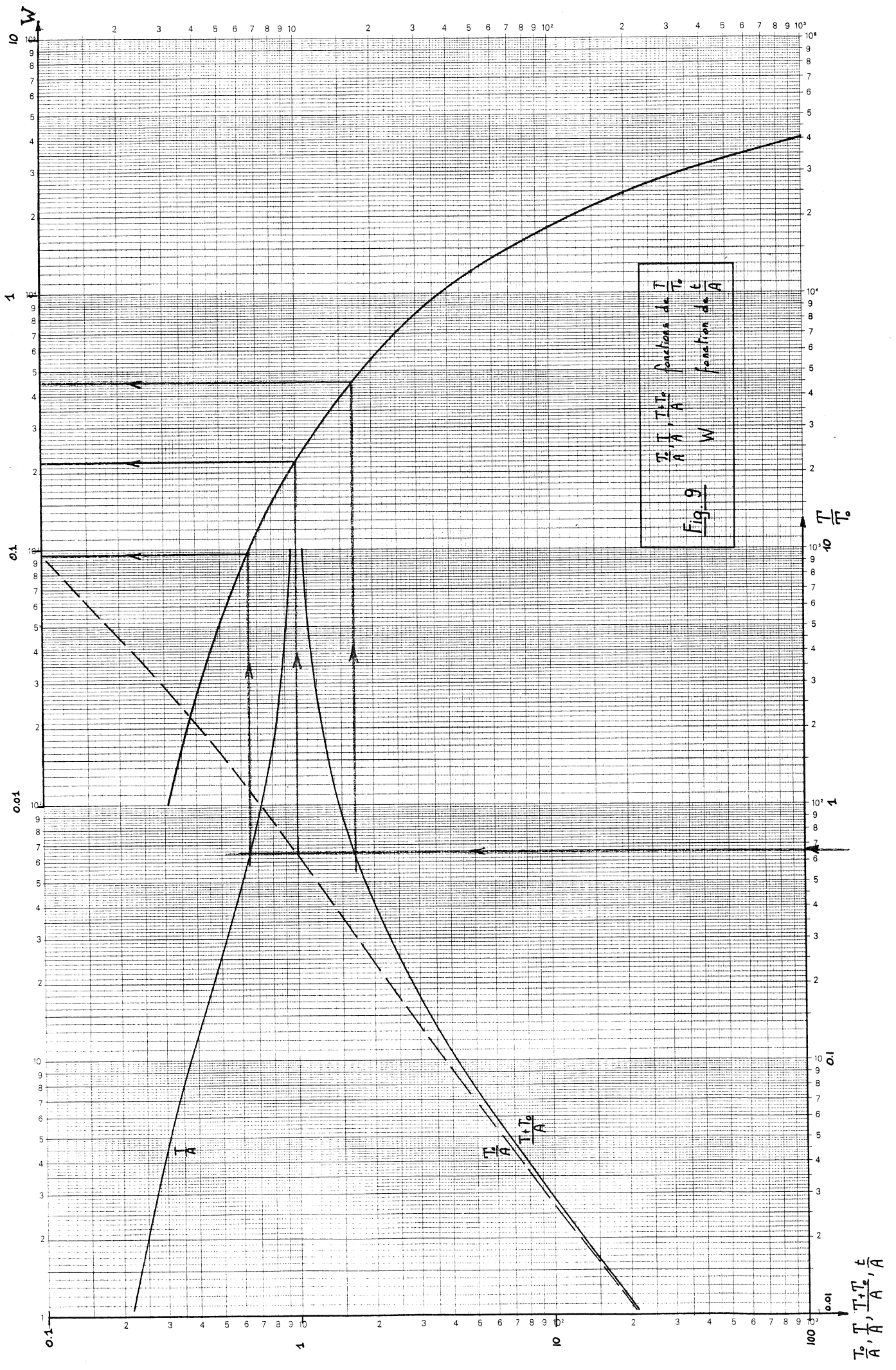

W
$\frac{T}{T_0}$
$\frac{T_0}{A}, \frac{T}{A}, \frac{T+T_0}{A}$ fonctions de $\frac{T}{T_0}$
W fonction de $\frac{t}{A}$
$\frac{T}{A}$
$\frac{T_0}{A}$
$\frac{T+T_0}{A}$
$\frac{T_0}{A}, \frac{T}{A}, \frac{T+T_0}{A}, \frac{t}{A}$

Fig. 9

pour $\frac{To}{A} = 1 \rightarrow W = 0.22$

$$kH = \frac{2 \times 10^{-3} \times 0.22}{4 \pi \times 1} = 3.5\ 10^{-5}\ m2/s.$$

La valeur du coefficient d'emmagasinement s'obtient par

$$S = \frac{4A \times kH}{r^2} = \frac{4 \times 600 \times 3.5\ 10^{-5}}{(20)^2} = 2 \cdot 10^{-4}$$

(Il s'agit donc d'une nappe captive).

3. Abaque

En répétant pour différentes valeurs de T/To, le calcul de Wo (W pour la valeur correspondante de To/A) et de W_M (différence entre W pour $\frac{T + To}{A}$ et W pour $\frac{T}{A}$), il est possible de présenter les résultats finaux sous la forme d'un abaque unique commode à utiliser (voir figure 11).

En fonction de T/To (échelle logarithmique), sont portées les valeurs de W_M, Wo et $\frac{T + To}{10.A}$.

En se référant à l'exemple pris précédemment

$\frac{T}{To} = 0.65$ donne directement

$\frac{T + To}{10.A} = 0.165$

$Wo = 0.22$

$W_M = 0.365$,

valeurs qui permettent aisément la poursuite des calculs de kH et S.

On remarquera que la valeur de kH est obtenue directement, c'est-à-dire sans l'intermédiaire de S, au contraire des méthodes classiques, qui soit en traçant la droite (approximation logarithmique) soit en traçant la courbe (Δ, x^2/t) résolvent graphiquement un système d'équations à deux inconnues.

VIII. Domaine d'applicabilité

1. Types de nappes

Pour se trouver dans les conditions d'application, il faudra se situer dans un domaine du rapport de T/To compris entre 0.1 et 10. En effet, en dessous de 0.1, la différence entre W_r et W_o n'est pas assez sensible tandis que pour T/To > 10, la valeur de W_r n'est plus assez grande. Idéalement, on cherchera à se rapprocher de T/To = 1, puisque Wo, W_r sont sensibles et bien distincts, tandis que la précision de mesure des temps T et To sera la même.

Dans le cas T/To=1, on a T= To ≃ 0.73 A; si l'on admet avec un type courant de système de lecture pouvoir prendre avec précision des temps minima de l'ordre de 30 secondes (l'effet de vidange du puits en est ainsi diminué), on adoptera comme valeur minimale de A : 40 secondes.

Afin de voir pour quel type de nappe la méthode peut s'appliquer, on a calculé des valeurs typiques du coefficient A dans les cas extrêmes : nappe captive, nappe libre, transmissivité élevée et faible, coefficient d'emmagasinement élevé et faible (voir tableau III).

Ces valeurs permettent de déterminer l'éloignement minimum du point d'observation par application de la formule $r = 2\sqrt{\alpha A} = 2\sqrt{\frac{kHA}{S}}$.

En ce qui concerne les nappes libres de grande transmissivité, la valeur minimale de r sera de 3 à 6 mètres et tout piézomètre plus éloigné permettra de mesurer commodément T et To. Pour les nappes libres de faible transmissivité, la valeur minimale de r sera très faible (0.1 à 0.2 m) mais par contre, si l'on s'éloigne du puits, les valeurs T et To seront très grandes.
Dans ce cas, on adoptera un faible temps de pompage comparé à A (par exemple $To = \frac{A}{10} = 100\ r^2$, soit environ 3 h pour un piézomètre situé à 10 m du puits).

En ce qui concerne les nappes captives, il apparaît que la méthode ne peut s'appliquer qu'à celles de faible transmissivité et/ou de coefficient d'emmagasinement élevé. En effet, dans le cas d'une nappe captive à transmissivité élevée et à faible coefficient d'emmagasinement, les temps à mesurer sont trop courts (l'eau afflue en masse, tandis que l'onde de pompage se propage très rapidement) et si l'on s'éloigne trop du puits, les rabattements ne sont plus sensibles.

Il est possible cependant d'envisager de travailler avec des piézomètres à faible temps de réponse, afin de diminuer la valeur minimale de A.

2. Rapidité

Dans les conditions idéales que l'on peut attendre dans la majorité des cas, le temps total pour faire une lecture est de 1.5 A; dans les cas où la nappe est très lente à réagir, on se rapproche même de A. Quand on estime que la valeur de $\frac{t}{A}$ nécessaire pour obtenir un régime quasi permanent est de 50 à 100, on conclut que la méthode est de 20 à 100 fois plus rapide que les méthodes classiques de détermination des paramètres kH et S.

TABLEAU III Valeurs de A pour différents types de nappes.

A (sec) = (r exprimé en mètres).	nappe libre		nappe captive	
	$S = 4.10^{-2}$	$S = 20.10^{-2}$	$S = 4.10^{-3}$	$S = 4.10^{-6}$
(transmissivité élevée) $KH = 10^{-2}$ m^2/s	r^2	$5\ r^2$	$0,1\ r^2$	$0.0001\ r^2$
(faible transmissivité) $KH = 10^{-5}$ m^2/s	$1000\ r^2$	$5000\ r^2$	$100\ r^2$	$0.1\ r^2$

3. Sous-sol hétérogène

Dans le cas d'un sous-sol hétérogène, on recommandera l'installation représentée à la figure 10.

Le puits sera actionné par intermittence, tandis qu'une cellule piézométrique à corde vibrante sera enfoncée à différentes profondeurs.

On pourra ainsi en répétant le signal de pompage pour les profondeurs de mesure, obtenir un profil des valeurs de kH et S après avoir fait, grâce aux valeurs de kH et S brutes, la partition des débits pour les différents horizons. Ce profil permettra également une appréciation des perméabilités verticales.

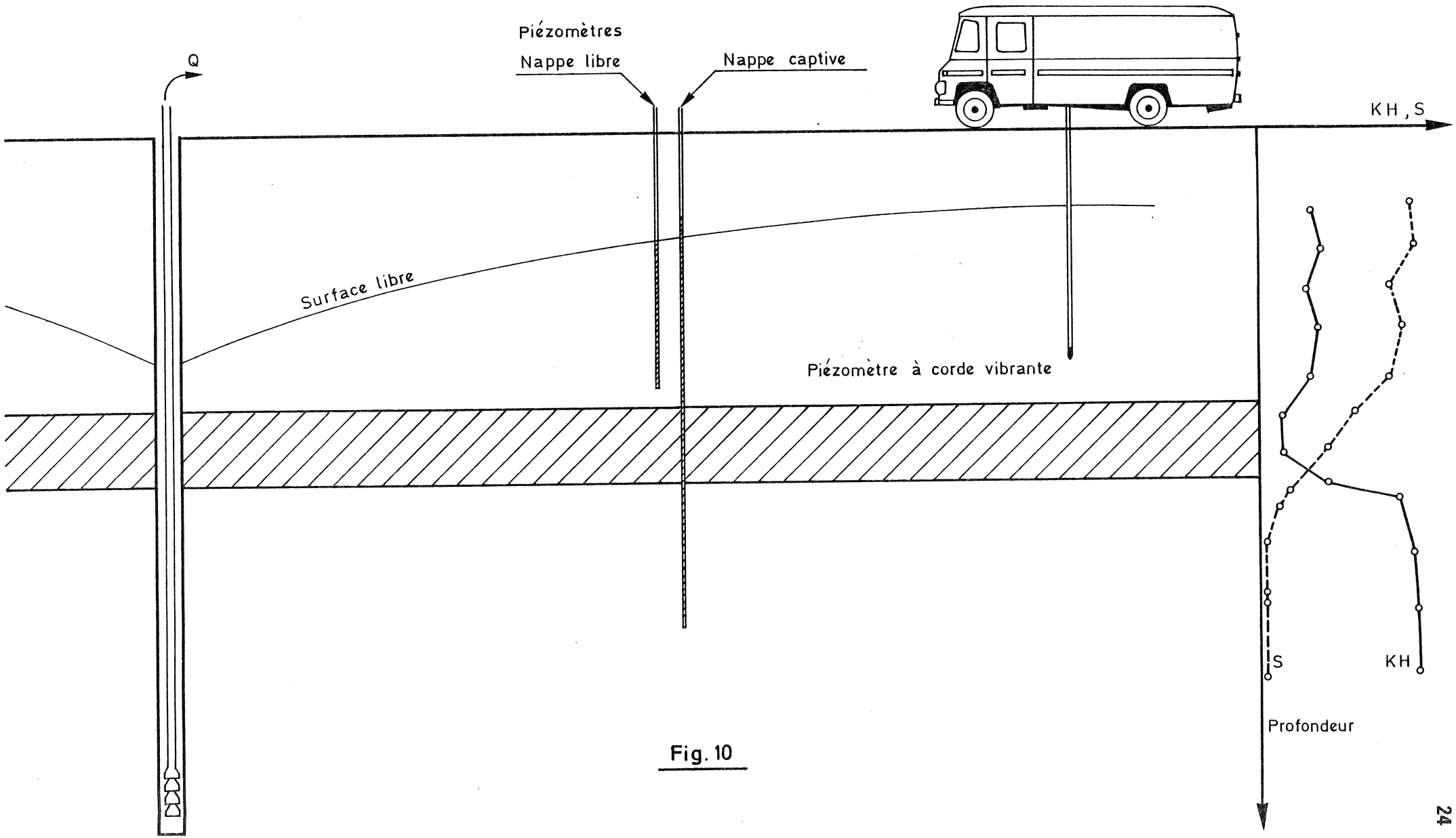

Piézomètres
Nappe libre
Nappe captive
Q
KH , S
Surface libre
Piézomètre à corde vibrante
S
KH
Profondeur

Fig. 10

CHAPITRE II : METHODE DU NIVEAU DE RETOUR

I. Introduction

La méthode du niveau de retour permet d'estimer rapidement la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement d'une nappe aquifère (libre ou captive). Elle exploite le retard que prend le niveau piézométrique en un certain point pour repasser par une valeur de référence lorsque l'on arrête le pompage. Etant donné les faibles temps mis à faire les mesures, elle s'appuie sur la formulation en régime transitoire.

II. Analyse de l'évolution du niveau piézométrique suite à un pompage de durée déterminée

Lorsque l'on met le système de pompage en route, l'abaissement piézométrique en un point distant de r de la pompe s'exprime en fonction du temps de la façon suivante :

$$\xi(r,t) = \frac{Q}{4\pi kH} \int_0^t \frac{e^{-\frac{r^2}{4\alpha\tau}}}{\tau} d\tau$$

dans laquelle Q =-débit de la pompe

kH = -transmissivité

t = temps

τ = variable d'intégration

r = distance

$\alpha = \frac{kH}{S}$

S = coefficient d'emmagasinement.

On posera pour la simplification des écritures $\frac{r^2}{4\alpha} = A$

$$W(u) = W\left(\frac{A}{T}\right) = \int_{\frac{A}{T}}^{\infty} \frac{e^{-\omega}}{\omega} d\omega$$

la valeur de $W\left(\frac{A}{T}\right)$ est une intégrale logarithmique dont les valeurs sont tabulées, et dont le graphique est représenté à la figure 2 ($\frac{T}{A} = \frac{1}{u}$).

Pour une valeur donnée de A (par exemple A = 1 sec), et en choisissant $Q = 4\pi kH$, le niveau piézométrique en fonction du temps peut être représenté par le graphique de la figure 12.

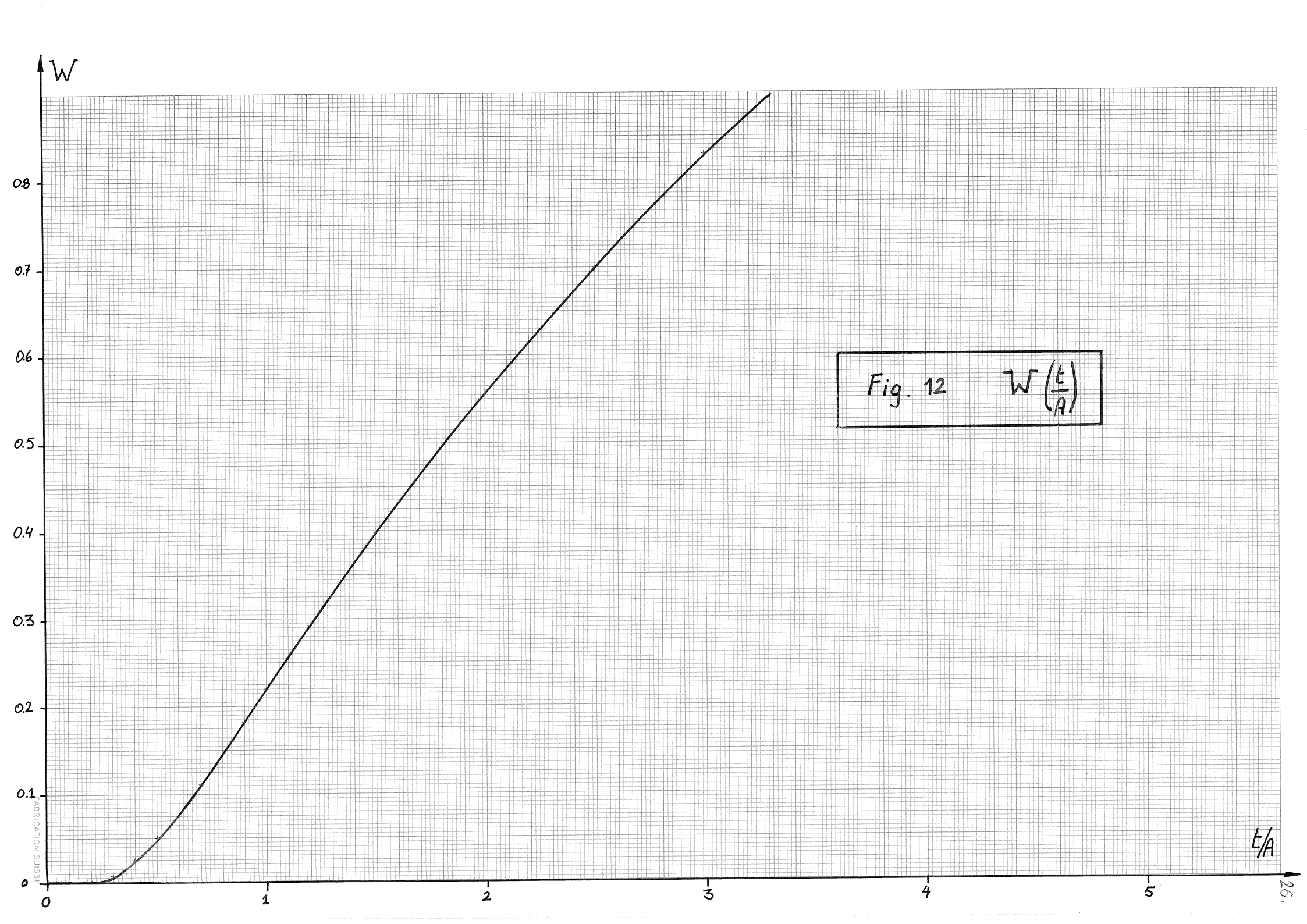


Fig. 12 $W\left(\frac{t}{A}\right)$

FABRICATION SUISSE

Lorsque la pompe fonctionne seulement pendant un temps T_o, on peut obtenir l'évolution du niveau piézométrique en superposant les solutions fondamentales : la première ayant pour origine t = o et la seconde, comptée négativement, ayant pour origine des temps $t = T_o$. Il faut en effet remarquer qu'un débit constant de t = 0 à $t = T_o$ est la somme d'un débit constant débutant au temps t = o et d'une injection de même débit débutant au temps t = To.

En sommant les deux solutions fondamentales, on obtient l'évolution du niveau piézométrique en fonction du temps. Cette évolution est représentée par le graphique de la figure 13. On remarque que le niveau continue à descendre pendant un certain temps pour atteindre un minimum et remonter ensuite pour dépasser le niveau défini par l'arrêt de la pompe.

L'équation définissant le temps R est donc

$$\frac{Q}{4\pi kH} \int_{To}^{To+R} \frac{e^{-\frac{r^2}{4\alpha\tau}}}{\tau} d\tau = \frac{Q}{4\pi kH} \int_{o}^{R} \frac{e^{-\frac{r^2}{4\alpha\tau}}}{\tau} d\tau \qquad (18)$$

Etant donné que l'on s'intéresse à un point particulier de l'évolution de la courbe résultante qui est indépendante de $\frac{Q}{4\pi kH}$ (En s'intéressant simplement au temps R, on élimine l'inconnue sur les amplitudes), on peut obtenir directement la valeur de $\frac{R}{A}$ en fonction de To/A.

To/A est bien le paramètre adimensionnel de départ qui définit de manière univoque le résultat adimensionnel $\frac{R}{A}$. Il en résulte qu'à une valeur de paramètre R/To correspond une seule valeur de $\frac{To}{A}$ et de $\frac{R}{A}$.

Dès lors, connaissant R/To, et en faisant appel à ces solutions, on peut obtenir $\frac{To}{A}$ et $\frac{R}{A}$ qui donnent directement la valeur de A (To, et R sont mesurés sur chantier.)

De plus à une valeur du rapport R/To correspond une seule valeur de

$$W\left(\frac{To}{A}\right)$$

Il en découle que, connaissant R/To, on peut obtenir en faisant appel à la solution $W = W\{\frac{To}{A}\ \left(\frac{R}{To}\right)\}$ la valeur de W et partant, grâce à la mesure et au choix de $\xi(To)$ obtenir l'expression :

$$\frac{Q}{4\pi kH} = \frac{\xi}{W}$$

et dès lors $KH = \frac{Q}{4\pi} \cdot \frac{W}{\xi o}$

III. Résolution de l'équation fondamentale.

En opérant dans l'équation fondamentale (18) la substitution $\tau = A\omega$, où $A = \frac{r^2}{4\alpha}$ on obtient :

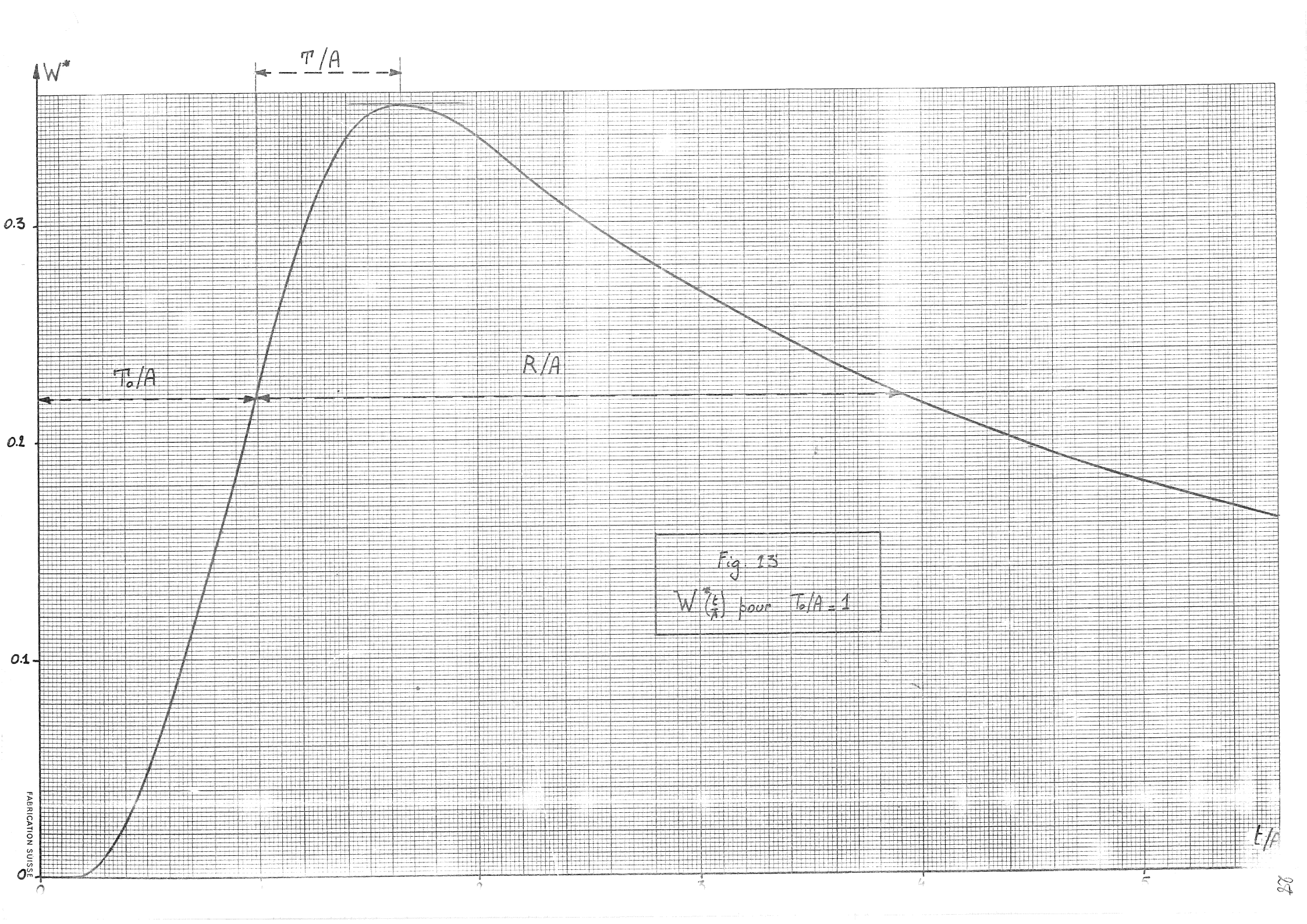


Fig. 13

$W^*\left(\frac{t}{A}\right)$ pour $T_0/A = 1$

FABRICATION SUISSE

$$\int_{\frac{To}{A}}^{\frac{To+R}{A}} \frac{e^{-\frac{1}{\omega}}}{\omega} d\omega = \int_{o}^{R} \frac{e^{-\frac{1}{\omega}}}{\omega} = d\omega$$

$\frac{1}{t} e^{-\frac{1}{t}}$ est une fonction qui est proportionnelle à la vitesse de descente du niveau piézométrique : posons $v(t) = \frac{1}{t} e^{-\frac{1}{t}} = \frac{1}{t e^{\frac{1}{t}}}$; v est indépendante de A. On peut réécrire l'équation :

$$\int_{o}^{\frac{To+R}{A}} v(t)dt - \int_{o}^{\frac{\pi_o}{A}} v(t)\,dt = \int_{o}^{\frac{t}{A}} v(t)\,d(t)$$

ou encore

$$W\left(\frac{To+R}{A}\right) - W\left(\frac{To}{A}\right) = W\left(\frac{R}{A}\right).$$

Cette équation intégrale a été résolue au moyen de l'ordinateur avec un programme mettant en oeuvre la méthode de Newton-Raphson sur les fonctions $W\left(\frac{To+R}{A}\right) - W\left(\frac{To}{A}\right)$ et $W\left(\frac{R}{A}\right)$ calculées sous forme de séries. Les résultats sont repris au tableau IV.

Afin d'étudier l'interdépendance des paramètres on a porté en graphique

1°) $\frac{R}{A} = F\left(\frac{To}{A}\right)$ - Figure 14

On remarque que pour une valeur de A donné (une nappe aquifère définie et un piézomètre désigné),R croît au fur et à mesure que To décroît. Ceci veut dire que si sur chantier on obtient une valeur de R trop petite que pour être mesurée avec précision, il convient de raccourcir le temps de pompage To.

2°) $\frac{R}{A}, \frac{To}{A}, \frac{R+To}{A} = F\left(\frac{R}{To}\right)$ - Figure 15

Etant donné que les variables $\frac{R}{A}$ et $\frac{To}{A}$ sont univoquement déterminées, il a été choisi comme paramètre significatif du problème le rapport $\frac{R}{To}$.

En plus des courbes de $\frac{R}{A}$ et $\frac{To}{A}$, on a représenté la courbe de $\frac{R+To}{A}$ parce que les valeurs fluctuent dans des ordres de grandeur plus restreints et permettent de définir les conditions optimales de travail. C'est pourquoi on l'a retenue pour le calcul de la valeur de A. En effet R+To est le temps total mis à faire la mesure. On remarque que ce temps total est minimum pour un rapport de R/To égal à 1, en outre la courbe est symétrique par rapport à un axe vertical tracé en cette valeur.
On peut donc déduire que les conditions optimales de travail sont rencontrées pour une valeur du rapport de R/To comprise entre 0.1 et 10, ce qui correspond au domaine de plus grande précision de la mesure de R/To.

Tableau IV Valeurs de W, R/To et $\frac{R + To}{A}$ pour différents $\frac{To}{A}$

To/A	(R + To)/A	R/To	W
0.15	632	4213	$0.227\ 10^{-3}$
0.20	170	850	$1.16\ 10^{-3}$
0.25	65	260	$3.8\ 10^{-3}$
0.30	34	112	$8.6\ 10^{-3}$
0.40	15.2	37	$25\ 10^{-3}$
0.50	9.4	17.8	$48.9\ 10^{-3}$
0.70	5.54	6.92	0.111
0.90	4.24	3.72	0.182
1	3.911	2.911	0.2194
1.5	3.324	1.216	0.398
2	3.37	0.687	0.56
3	3.977	0.326	0.829
4	4.793	0.198	1.04
5	5.686	0.137	1.22
6	6.61	0.103	1.37
8	8.534	0.066	1.62
10	10.47	0.047	1.823
15	15.4	0.0265	2.196
20	20.36	$17.85\ 10^{-3}$	2.468
40	40.2851	$7.13\ 10^{-3}$	3.137
60	60.255	$4.25\ 10^{-3}$	3.534
80	80.237	$2.96\ 10^{-3}$	3.817
100	100.225	$2.25\ 10^{-3}$	4.038

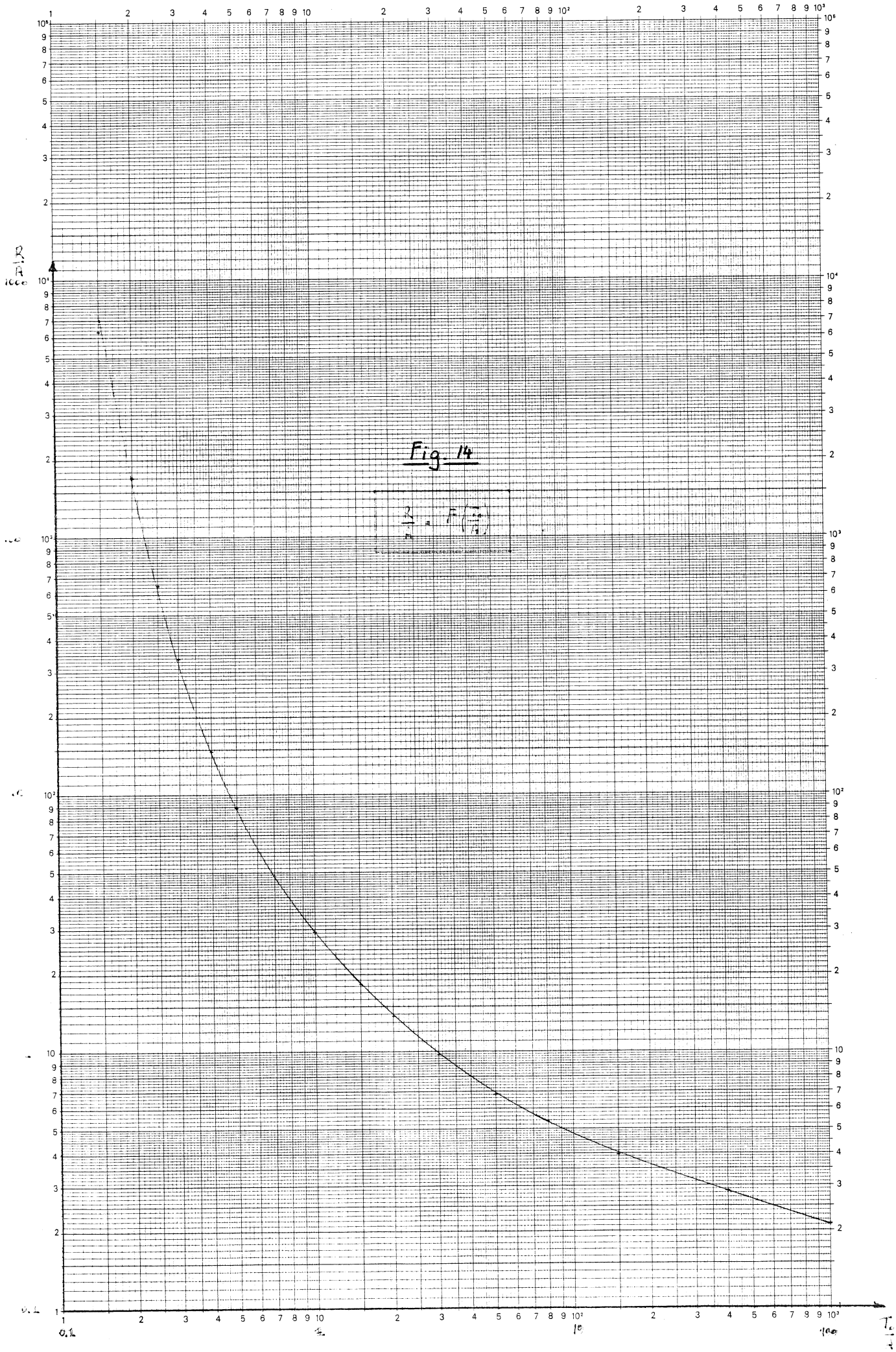


Fig. 14

Les Papiers Canson - France

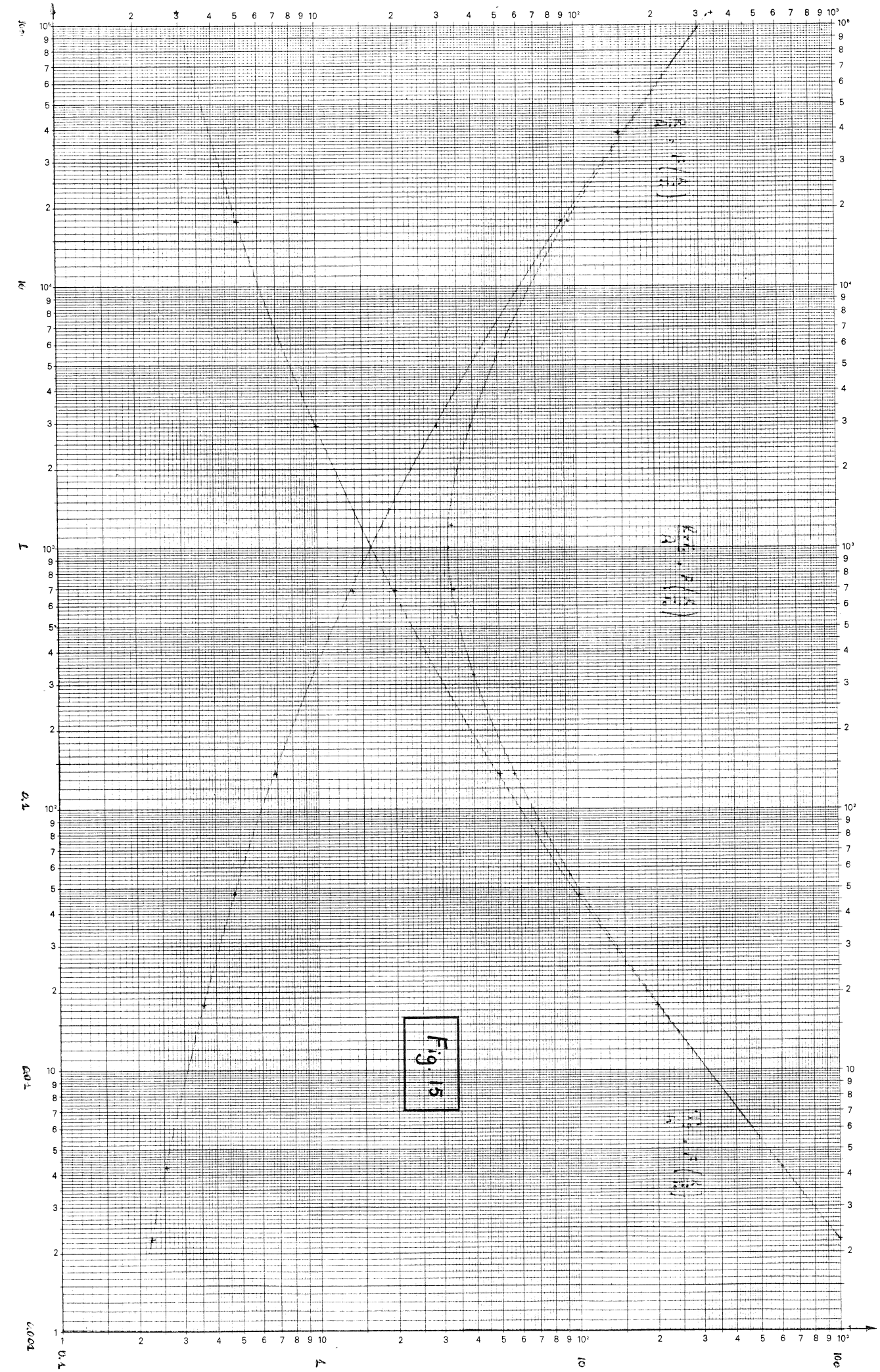


Fig. 15

3°) Abaque final - Figure 16.

Pour chaque valeur du rapport $\frac{R}{T_o}$, on a calculé la valeur correspondante de W par l'intermédiaire de $\frac{A}{T_o}$. On remarque que pour le domaine optimal défini ci-dessus, la valeur de W oscille entre 1.5 et 0.1. Pour R/To =1, W = 0.45 et le temps R est de 20 à 50 fois plus court que le temps nécessaire pour s'assurer du mouvement quasi permanent.

4°) Exemple.

Reprenons le même exemple de la 1ère méthode, soit :

$Q = 2\ 10^{-3}\ m^3/s$
To= 600 sec = 10 min.
Δh= 1 m
r = 20 m
R = 1740 sec. = 29 min.

on calcule $\frac{R}{T} = 2.9$

on lit sur l'abaque (figure 16) pour cette valeur,

$$R + To = 3.9\ A$$
$$W = 0.22$$

on obtient dès lors

$$A = \frac{R + To}{3.9} = 600 \text{ sec.}$$

$$KH = \frac{Q.W}{A\pi.\Delta h} = \frac{2.10^{-3} \times 0.22}{4\pi \times 1} = 3.5\ 10^{-5}\ m^2/s.$$

et

$$S = \frac{4.A\ kH}{r^2} = \frac{4 \times 600 \times 3.5\ 10^5}{(20)^2} = 2\ 10^{-4}$$

IV. Domaine d'applicabilité

La condition optimale de réalisation d'un essai est réalisée lorsque $R = To \simeq 1.6\ A$. Si l'on adopte la limite inférieure de 30 secondes pour mesurer avec précision les temps, A doit se situer aux environs de 20 sec. ceci permet d'étendre la méthode à des nappes pour lesquelles de faibles valeurs de A sont inévitables (nappe captive de transmissité élevée et de faible coefficient d'emmagasinement).

Des temps de pompage faibles comparés à A sont à déconseiller car ils s'accompagnent de plus grandes valeurs de R/To et donc d'un temps total de mesure plus élevé.

V. Comparaison des deux méthodes

La méthode du niveau stationnaire est toujours plus rapide que celle du niveau de retour. Elle devient particulièrement intéressante pour de grandes valeurs de A (ou du rapport $\frac{r^2 S}{4kH}$) (voir figure 17). Par contre, l'utilisation pratique de la seconde méthode est plus aisée. Alors que la première requiert une instrumentation plus sophistiquée (l'enregistrement est recommendable), la seconde peut s'effectuer simplement comme suit :

Une sonde électrique de lecture de niveau est introduite dans un piézomètre. On relève le niveau initial et on descend la sonde d'une profondeur choisie (par exemple 20 cm) ; puisque la sonde est plongée dans l'eau, le voyant (le voltmètre ou l'avertisseur sonore) est en action. Le chronomètre est enclenché lors du démarrage de la pompe. Dès que le niveau est atteint, le voyant s'éteint et la pompe est arrêtée ; on prend note de ce temps. On attend que le niveau remonte et que le voyant s'allume à nouveau. On arrête le chronomètre.

Lorsque l'on dispose d'un matériel limité, il faut recommencer l'opération pour chaque piézomètre mais il est possible de trouver rapidement l'abaissement optimal du niveau d'eau de départ (cette limite peut être fixée par une estimation des dangers de tassement) puisqu' il correspond à la valeur de $W = 0.45$. Après l'essai et en opérant une règle de 3 sur la valeur de l'abaissement arbitraire de départ, il est possible d'obtenir l'abaissement conduisant au minimum du temps mis à faire les mesures. On remarquera qu'en milieu homogène, cet abaissement est indépendant de l'éloignement du piézomètre vis-à-vis du puits.

Il est possible, moyennant plusieurs mesures au même piézomètre de vérifier si les valeurs de A et KH se corrèlent. Dans le cas où les valeurs obtenues sont trop dispersées, les hypothèses de départ ne sont pas vérifiées. Enfin, en appliquant conjointement les deux méthodes, les contrôles sont plus nombreux. Dès lors les méthodes possèdent en elles des éléments qùi permettent de s'assurer qu'elles sont bien applicables.

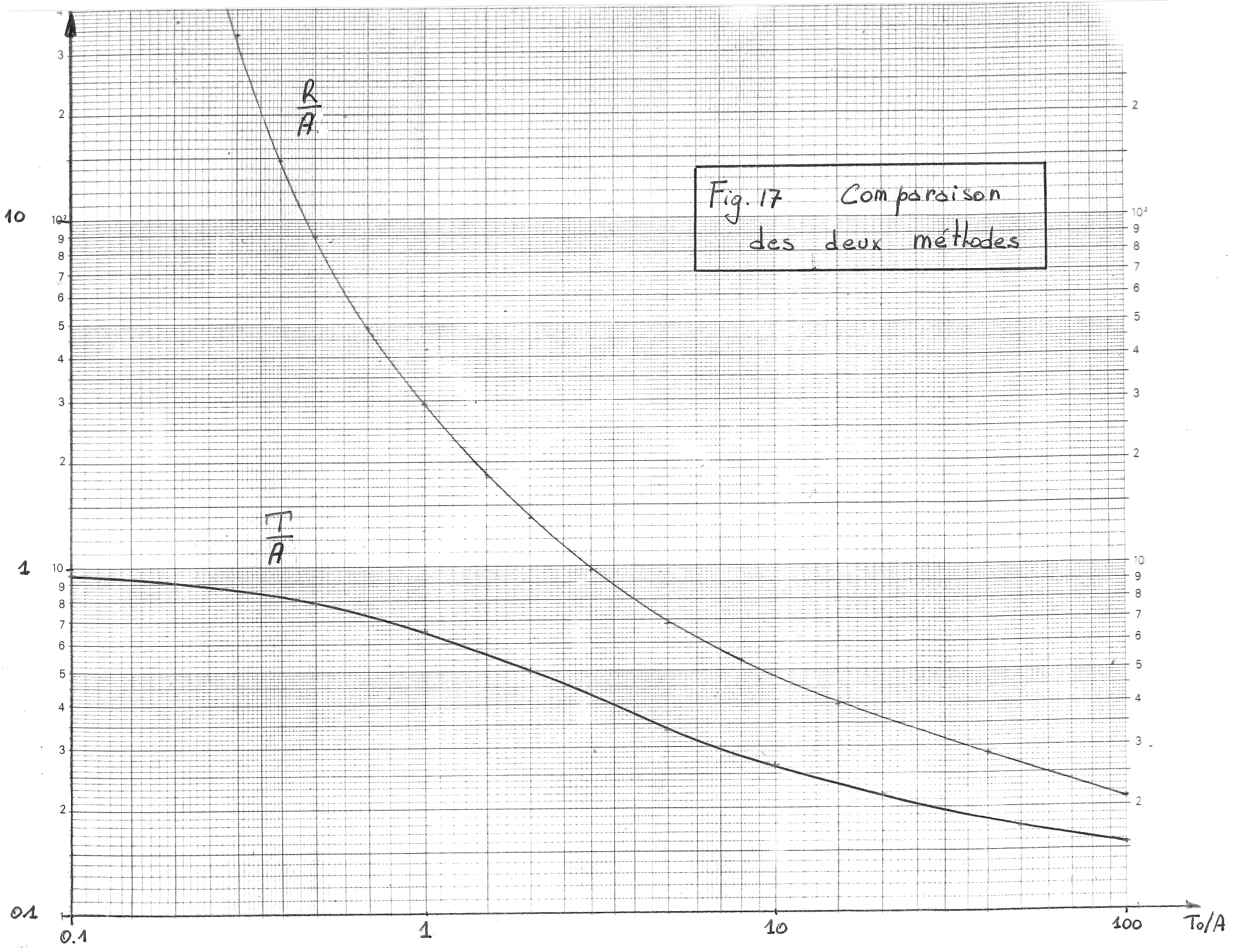


Fig. 17 Comparaison des deux méthodes

CHAPITRE III : VERIFICATIONS EXPERIMENTALES

I. Introduction

De la même façon que l'idée d'appliquer un signal de pompage rectangulaire pour en tirer des renseignements sur le comportement des nappes était survenue sur un chantier où le lançage de cannes filtrantes avait permis de suivre en amplitude et dans le temps le trajet de l'onde provoquée, il s'imposait d'analyser plus profondément le comportement sur chantier de ces méthodes théoriquement acceptables.

L'occasion de contrôler la véracité des prédictions faites au moyen de la méthode du niveau constant pour une nappe captive a été fournie par le chantier du "Collecteur d'assainissement de la vallée de la Dyle".

Le sous-sol du site qui se trouve à proximité de la gare d'Ottignies peut se schématiser de la façon suivante :

quaternaire	1 m de sol végétal 3 à 4 m de limon 2 à 3 m de sable limoneux veiné d'argile et par endroits de tourbe 1 à 1,5 m de sable avec lits de graviers de fond de vallée
primaire	1 à 1,5 m de roche primaire (Dévilien) altérée en argile verte en dessous : le Bed-rock du massif du Brabant.

La vallée est assez plate et divers sondages effectués dans les environs laissent présager des horizons assez homogènes.

Les essais ont été réalisés au cours du mois de juin 1978, autour d'un puits traversant la nappe captive des graviers et muni d'une pompe centrifuge immergée d'un débit nominal de 20 m3/heure.

Un certain nombre de piézomètres étaient en place et les mesures qui ont été faites selon la méthode décrite dans le chapitre II ont permis de confirmer l'applicabilité et l'exactitude des faits annoncés par la théorie.

II. Essais classiques

Différents essais de pompage ont été réalisés sur le site de la vallée de la Dyle, qui ont permis de mesurer les phénomènes suivants :

. la descente et la remontée du niveau dans le puits pour différents débits

. la descente de niveau piézométrique dans quelques piézomètres pour le débit maximum.

La somme de ces informations a permis de tracer les graphiques suivants :

. courbe de rabattement spécifique → caractère de la nappe

. rabattement en fonction du temps
. rabattement en fonction de la distance
} → approximation logarithmique.

1. variations de niveau dans le puits

Les variations de niveau mesurées dans le puits sont portées à la

figure 19 $Q = 2.272\ 10^{-3}$ m3/s (8.18 m3/h)

figure 20 $Q = 3.13\ 10^{-3}$ m3/s (11.25 m3/h)

figure 21 $Q = 5.55\ 10^{-3}$ m3/s (20 m3/h).

Lorsqu'une partie linéaire peut se dégager, on calcule la transmissivité au moyen de la formule :

$$T = \frac{0.183\ Q}{\Delta c}$$

où Δc est la variation du niveau par cycle de temps.

Fig. 19 → $T_1 = \frac{0.183 \times 2{,}272\ 10^{-3}}{0.056} = 7.42\ 10^{-3}$ m2/s

Fig. 20 → $T_2 = \frac{0.183 \times 3.125\ 10^{-3}}{0.076} = 7.52\ 10^{-3}$ m2/s

Fig. 21 → $T_3 = \frac{0.183 \times 5.55\ 10^{-3}}{0.152} = 6.71\ 10^{-3}$ m2/s.

En dépit des grands rabattements pour lesquels il est difficile de définir avec certitude la portion rectiligne à prendre en considération, les valeurs de la transmissivité pour différents débits sont à peu près égales et l'on peut prendre pour valeur de T d'après ces mesures $7 \cdot 10^{-3}$ m2/s.

2. courbe de rabattement et rabattement spécifique

En prenant comme référence le temps le plus long réalisé au cours de ces expériences (15 minutes) on obtient le tableau suivant :

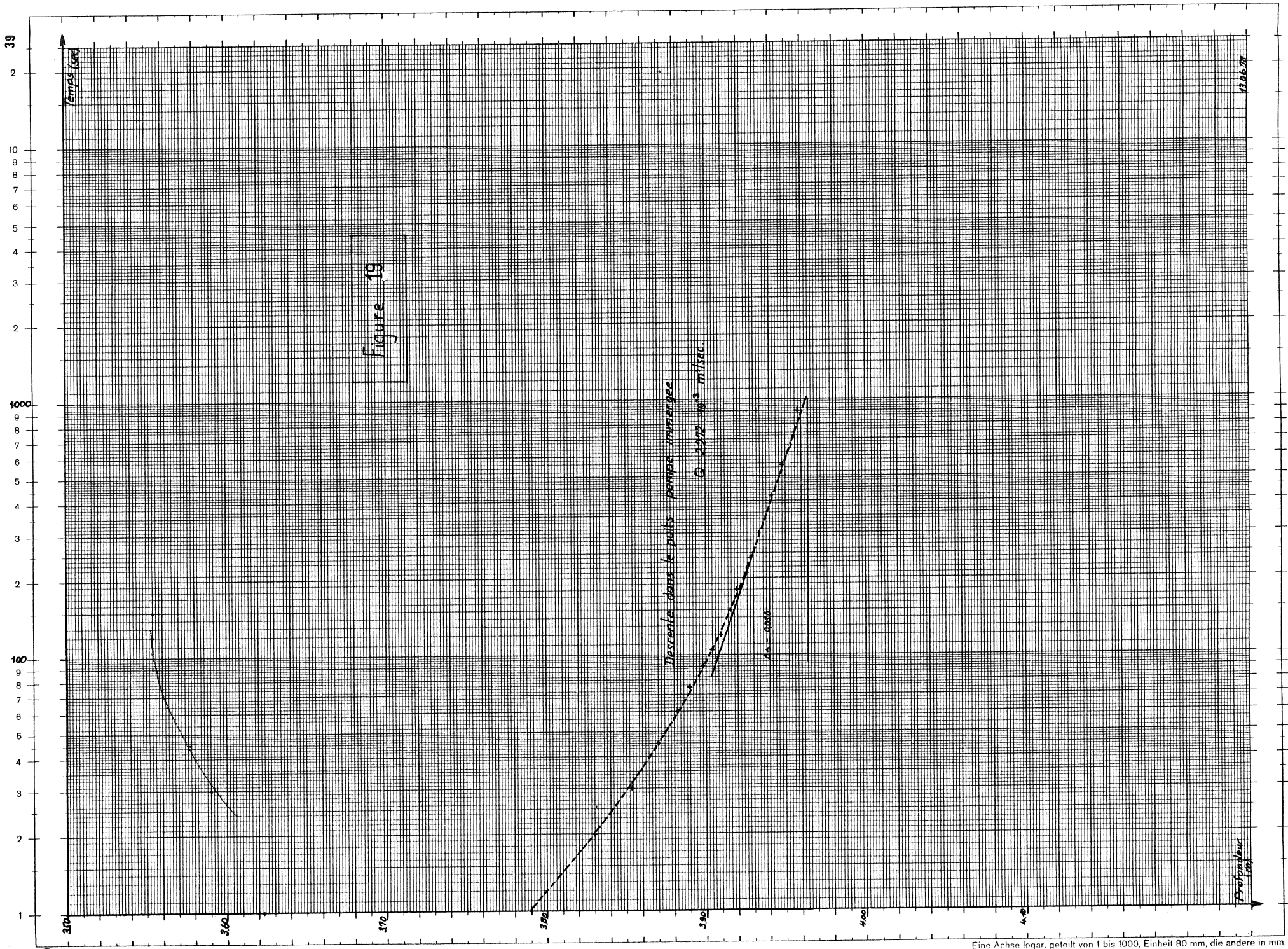


Figure 19

Eine Achse logar. geteilt von 1 bis 1000, Einheit 80 mm, die andere in mm.

SELECTA COPYRIGHT SCHLEICHER & SCHÜLL GMBH 3352 EINBECK Bestell-Nr. 667 005 Nr. 4201 D

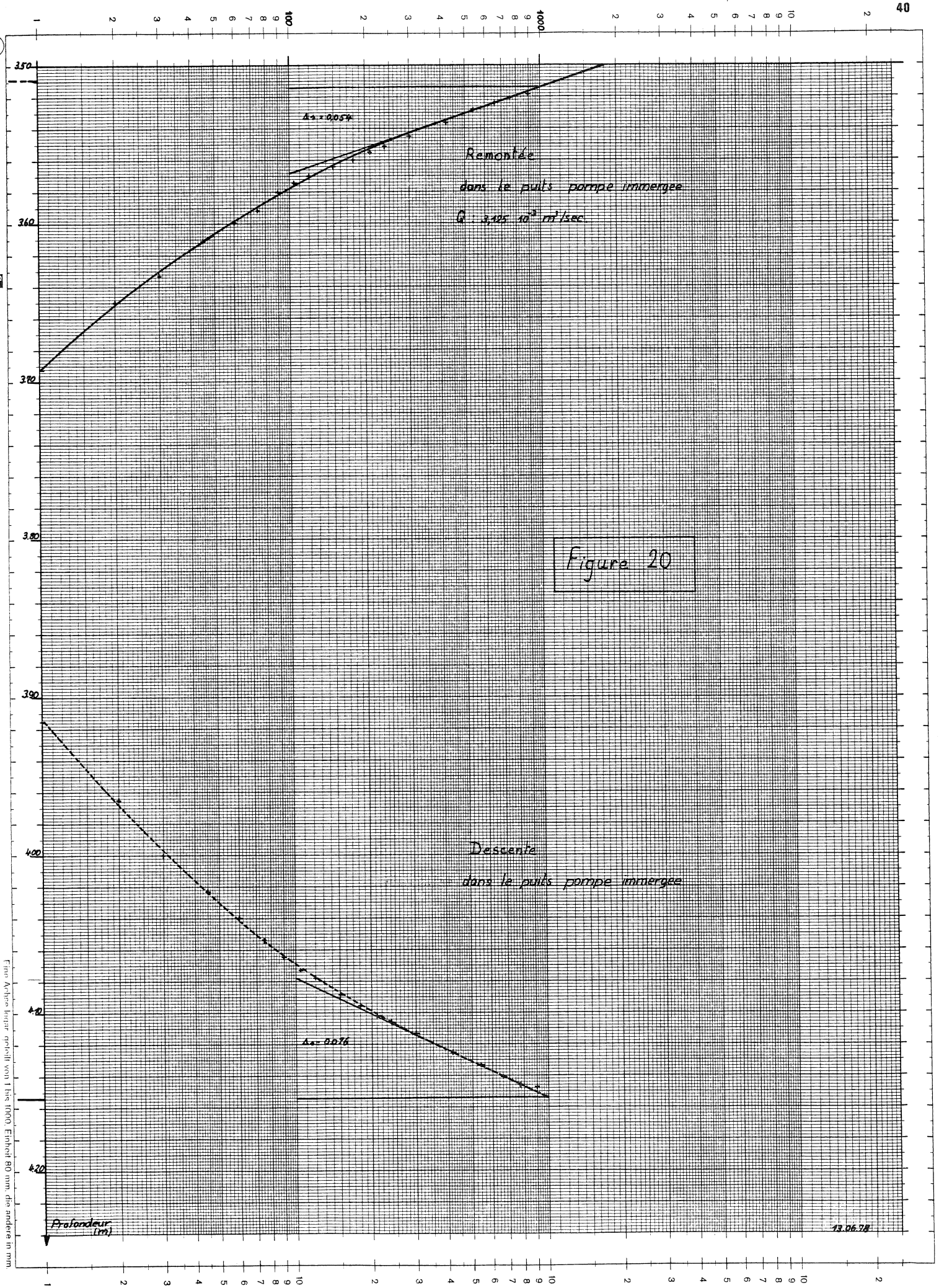


Figure 20

COPYRIGHT SCHLEICHER & SCHUELL GMBH 3352 EINBECK

Eine Achse logar. geteilt von 1 bis 1000, Einheit 80 mm, die andere in mm

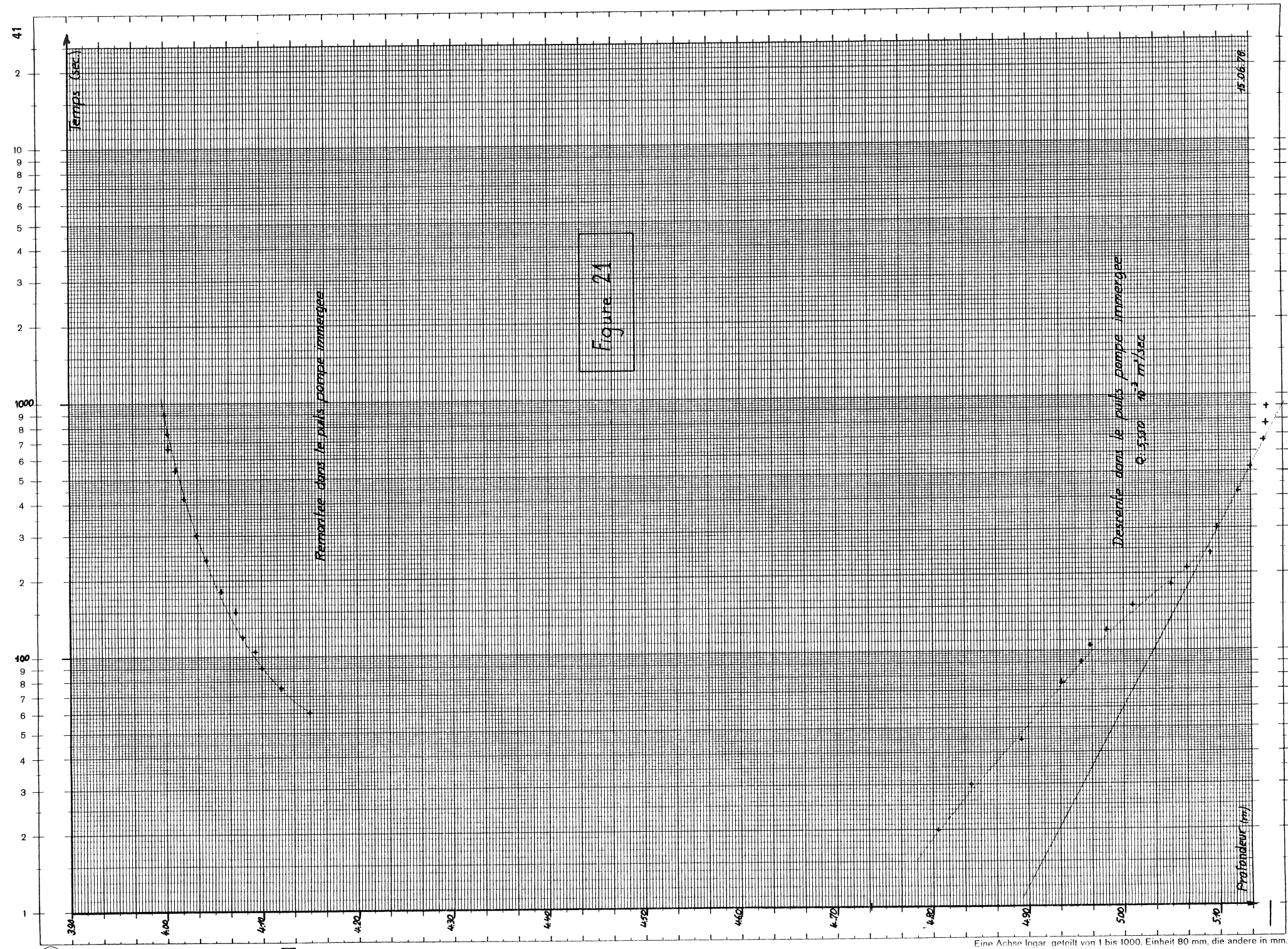


Figure 21

Eine Achse logar. geteilt von 1 bis 1000, Einheit 80 mm, die andere in mm.

SELECTA COPYRIGHT SCHLEICHER & SCHÜLL GMBH 3352 EINBECK Bestell Nr. 667 005 Nr. 430

Q $\{10^{-3}$ m3/s$\}$	Δ (15') {m}	Δ/Q $\{10^{3}$ $m^{-2}s\}$
2.272	0.455	0.200
3.13	0.638	0.204
5.55	1.161	0.209

La fonction $\Delta = f(Q)$ est représentée à la figure 22, c'est une droite qui passe par l'origine; la nappe peut être considérée comme captive dans la gamme de débit de la pompe.

3. rabattement en fonction du temps

Parmi les piézomètres disponibles, on en a choisi quelques uns situés à des distances échelonnées du puits

piézomètre n° 2 r = 3 m
10 r = 17,7 m
26 r = 21,75 m
28 r = 29,75 m
32 r = 41,8 m
PI r = 55 m

Pour un débit d'environ 2.85 10^{-3} m3/s, on dispose des courbes de descente de niveau des piézomètres 10, 26, 28, 32 et PI (voir figure 23).

Pour le débit nominal (5.4 10^{-3} m3/s), on dispose des courbes de descente de niveau des piézomètres 2 (voir figure 24), 10 (voir figure 25), et PI.

D'autre part, pour le débit de 2.85 10^{-3} m3/s, il a été possible de tracer le profil du rabattement pour différents temps (voir figure 26).

De la figure 23, on dégage la transmissivité grâce à la pente commune des approximations logarithmiques pour les différents piézomètres
Δc = 0.065 m

$$\rightarrow T = \frac{0.183.Q}{0.065} = 8.10^{-3} \text{ m2/s.}$$

De la figure 24, on déduit Δc = 0.24 m pour la descente et 0.12 m pour la remontée

$$\rightarrow T = \frac{0.183.Q}{0.12} = 8.2\ 10^{-3} \text{ m2/s.}$$

De la figure 25, on déduit Δc = 0.22 m pour la descente et 0.17 m pour la remontée

$$\rightarrow T = \frac{0.183.Q}{0.17} = 5.8\ 10^{-3} \text{ m2/s.}$$

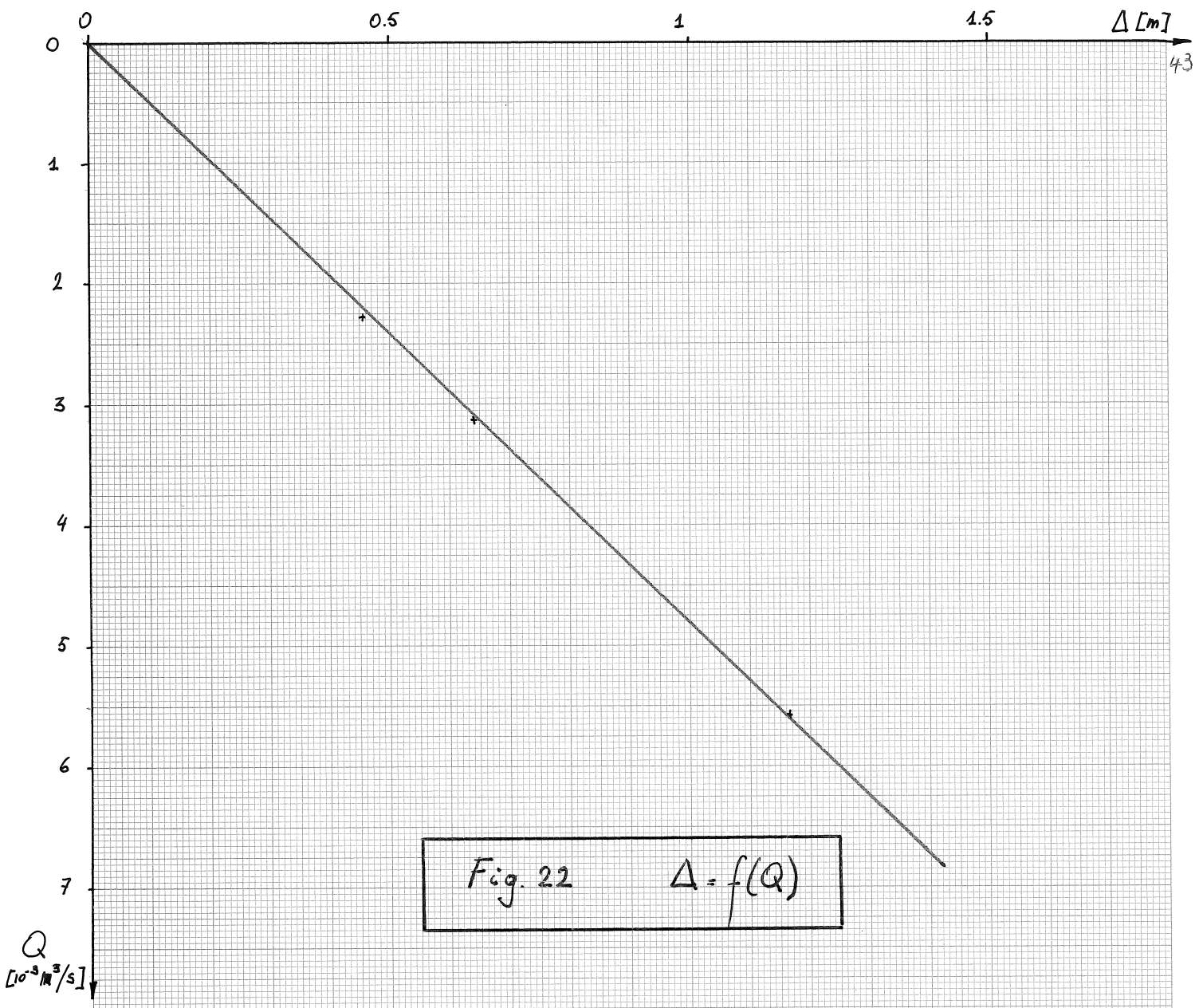
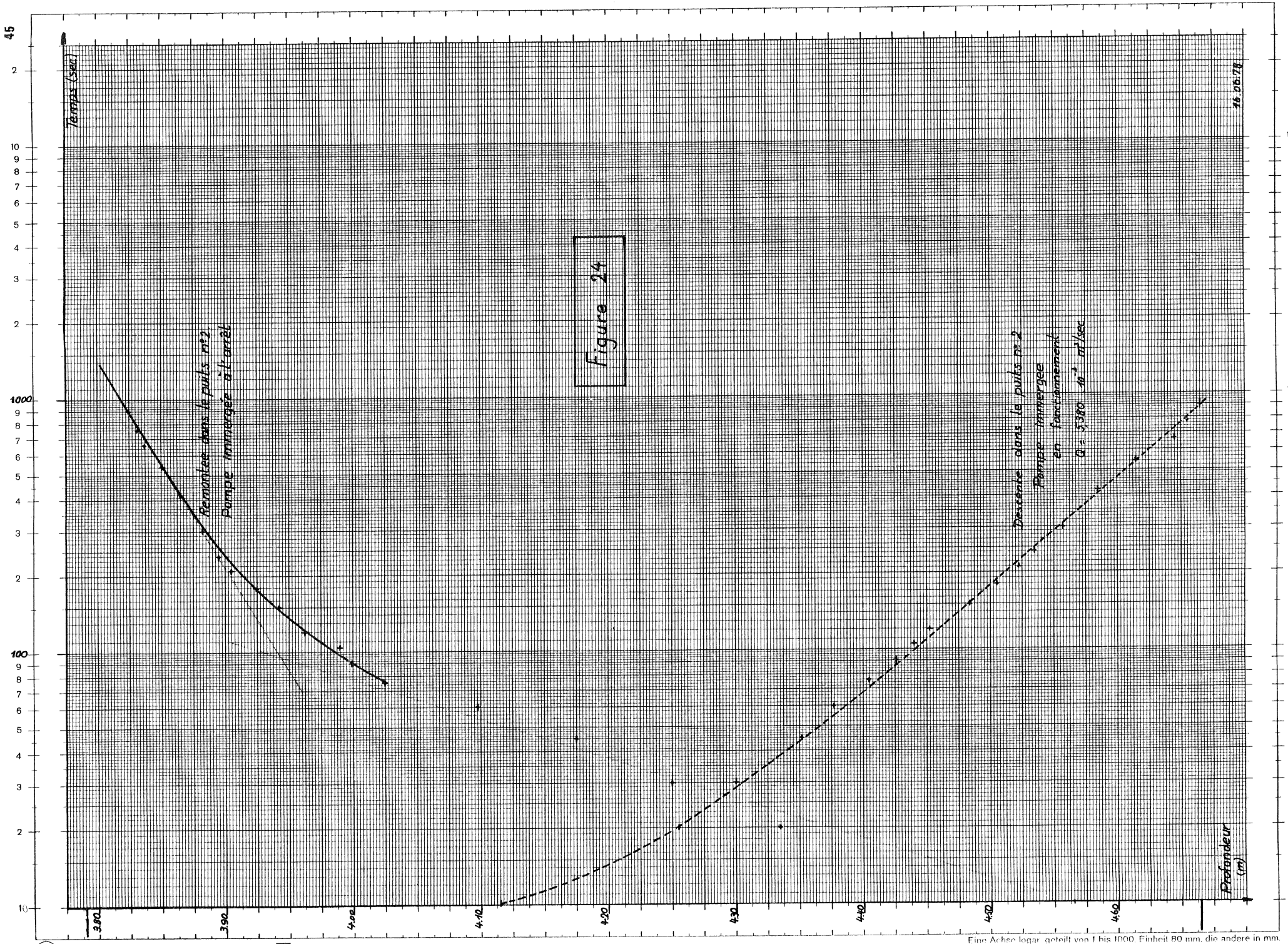


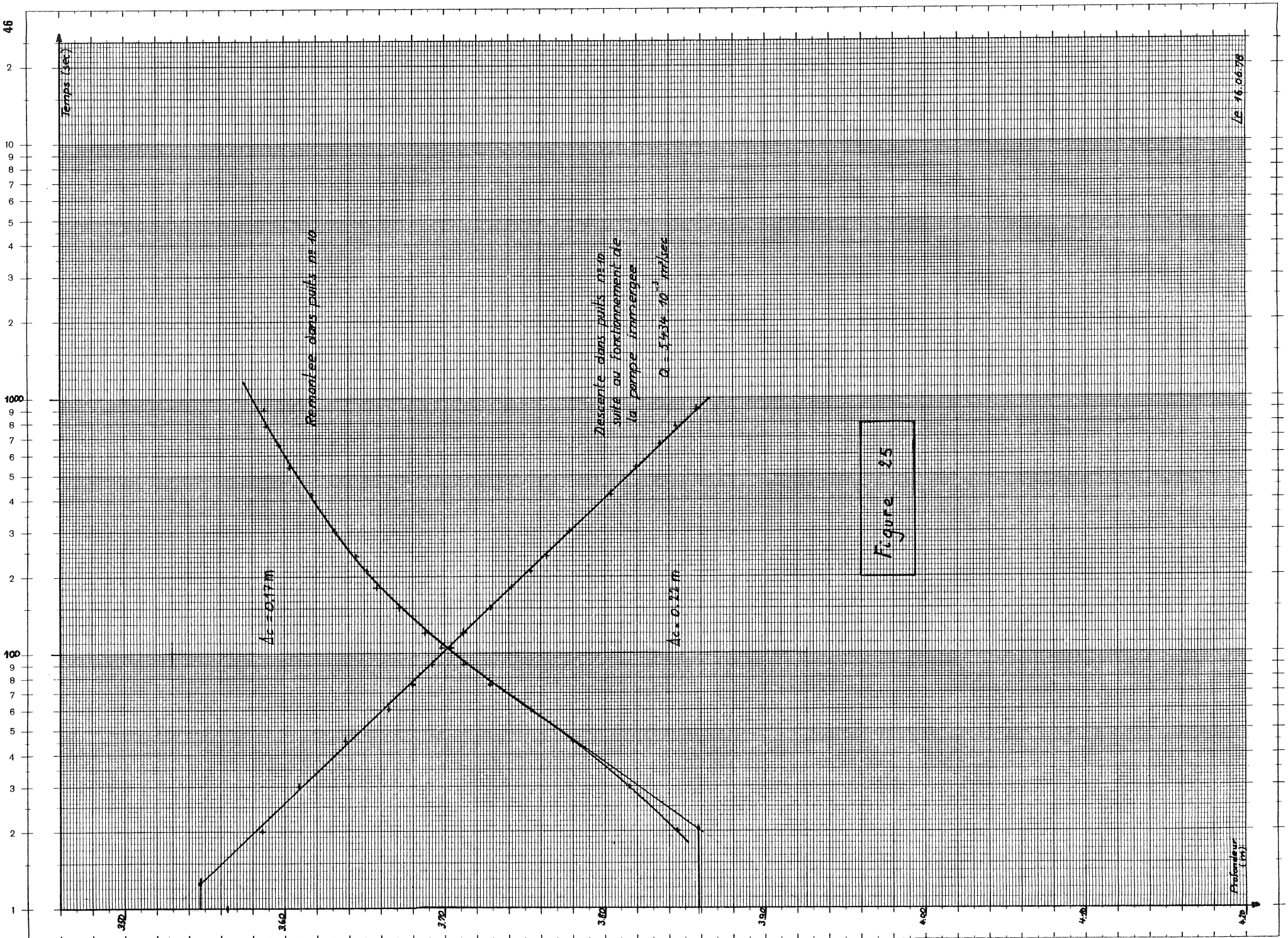
Fig. 22 $\Delta = f(Q)$

FABRICATION SUISSE



SELECTA COPYRIGHT SCHLEICHER & SCHUILL GMBH 3352 EINBECK Bestell-Nr. 667 005

Eine Achse logar. geteilt von 1 bis 1000, Einheit 80 mm, die andere in mm



SELECTA COPYRIGHT SCHLEICHER & SCHULL GMBH, 3352 EINBECK Bestell Nr. 667 005, Nr. 430 ; P .....

Eine Achse logar. geteilt von 1 bis 1000, Einheit 80 mm, die andere in mm

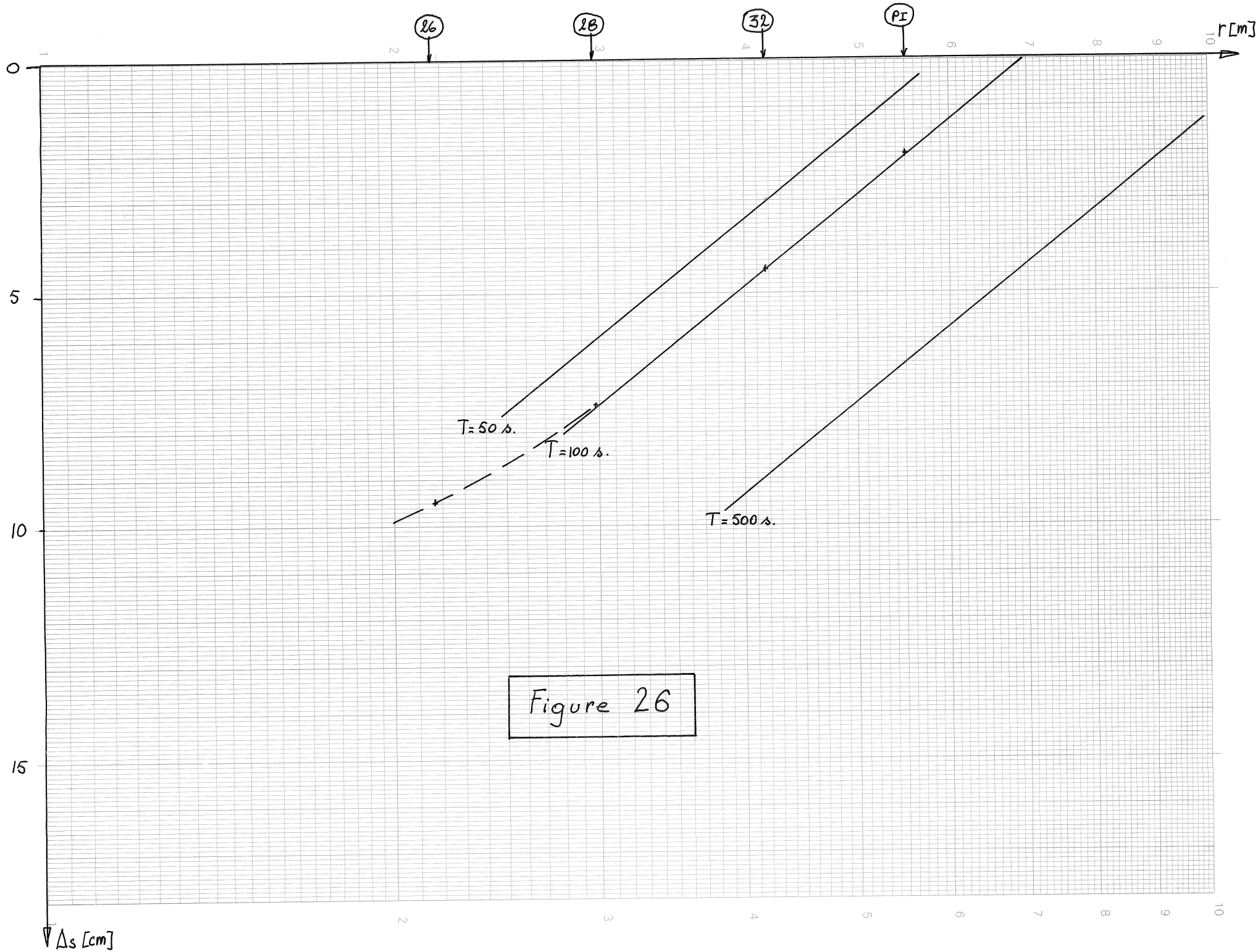


Figure 26

4. Difficultés d'interprétation

Ces deux dernières figures montrent à quel point il est dangereux d'extraire la valeur de la transmissivité de l'observation d'un piézomètre. De plus, ici, les courbes de descente et de remontée ne se ressemblent guère et ce n'est que lorsqu'on dispose des informations déduites de la figure 23 que l'on peut choisir avec plus de chance la "bonne pente".

La forme non classique de la courbe de descente peut s'expliquer par l'effet de vidange du puits : dans les premiers moments du pompage, une partie du débit sert à évacuer l'eau contenue dans le puits afin de réaliser un certain gradient. L'abaissement du niveau prend dès lors du retard, ce qui déplace la portion initiale de la courbe vers la droite. Ceci peut avoir pour effet d'aligner les points sur une droite qui peut donner l'illusion d'un régime quasi permanent (figure 27). Dans ce cas, on sous-estime la transmissivité.

D'autre part, la solution classique suppose la constance du débit, alors que l'on sait que le débit initial (Qi) est maximum pour décroître en fonction du temps vers une valeur asymptotique (Qa). Ceci a pour effet de relever la partie finale du tracé et peut également produire l'illusion d'un régime quasi permanent (figure 28). Dans ce cas, on surestime la transmissivité.

De la figure 26, on peut déduire une information plus globale :
$\Delta s = 0.205$ m pour 1 cycle de distance au temps t = 100 sec et R = 69 m.

$$T = \frac{0.183 \times 2Q}{\Delta s} = \frac{0.185 \times 2.85\ 10^{-3} \times 2}{0.205} = 5\ 10^{-3}\ m^2/s$$

Dès lors

$$S = \frac{2.25 \times T \times t}{R^2} = \frac{2.25 \times 5\ 10^{-3} \times 100}{(09)^2} = 0.00024$$

tandis que la figure 23 nous donne comme valeur de to à faire entrer dans la formule,

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

3.2 sec pour r = 21.75 m → $S = 0.12\ 10^{-3}$
7.6 sec pour r = 29.65 m $0.16\ 10^{-3}$
24 sec pour r = 41.8 m $0.25\ 10^{-3}$
et 48 sec pour r = 55 m $0.29\ 10^{-3}$

Pour lespiézomètres2 et 10, on trouve

to = 0.02 sec pour r = 3 m → $S = 0.04\ 10^{-3}$
et to = 1.25 sec pour r = 17,7 m → $S = 0.07\ 10^{-3}$

Une fois de plus, on remarque la perturbation apportée par la vidange du puits pour les piézomètres situés à sa proximité.

./.

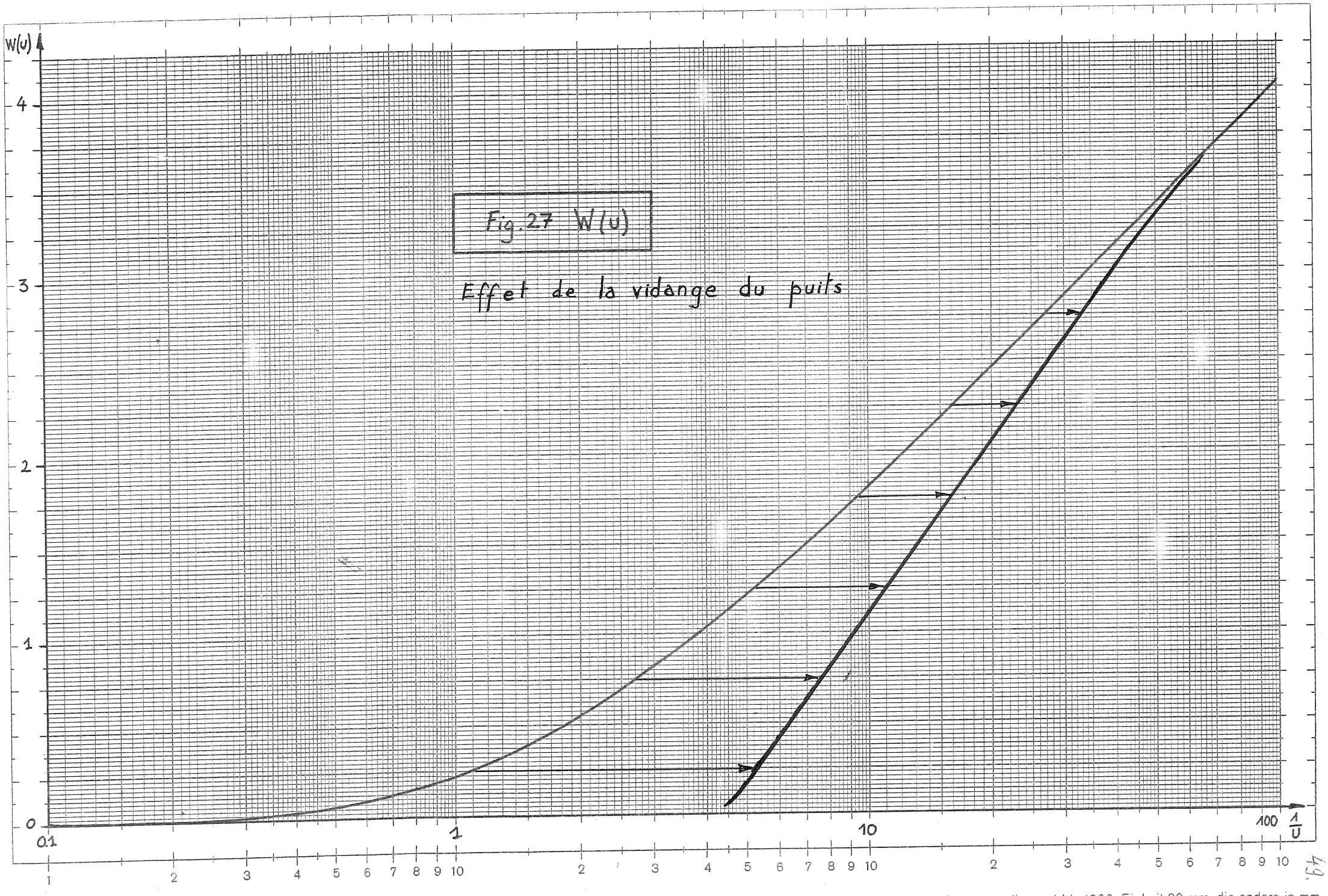


Fig. 27 W(u)

Effet de la vidange du puits

SELECTA COPYRIGHT SCHLEICHER & SCHÜLL, 3352 EINBECK Bestell-Nr. 667056, Nr. 373½ A 4 MADE IN GERMANY

Eine Achse logar. geteilt von 1 bis 1000, Einheit 90 mm, die andere in mm

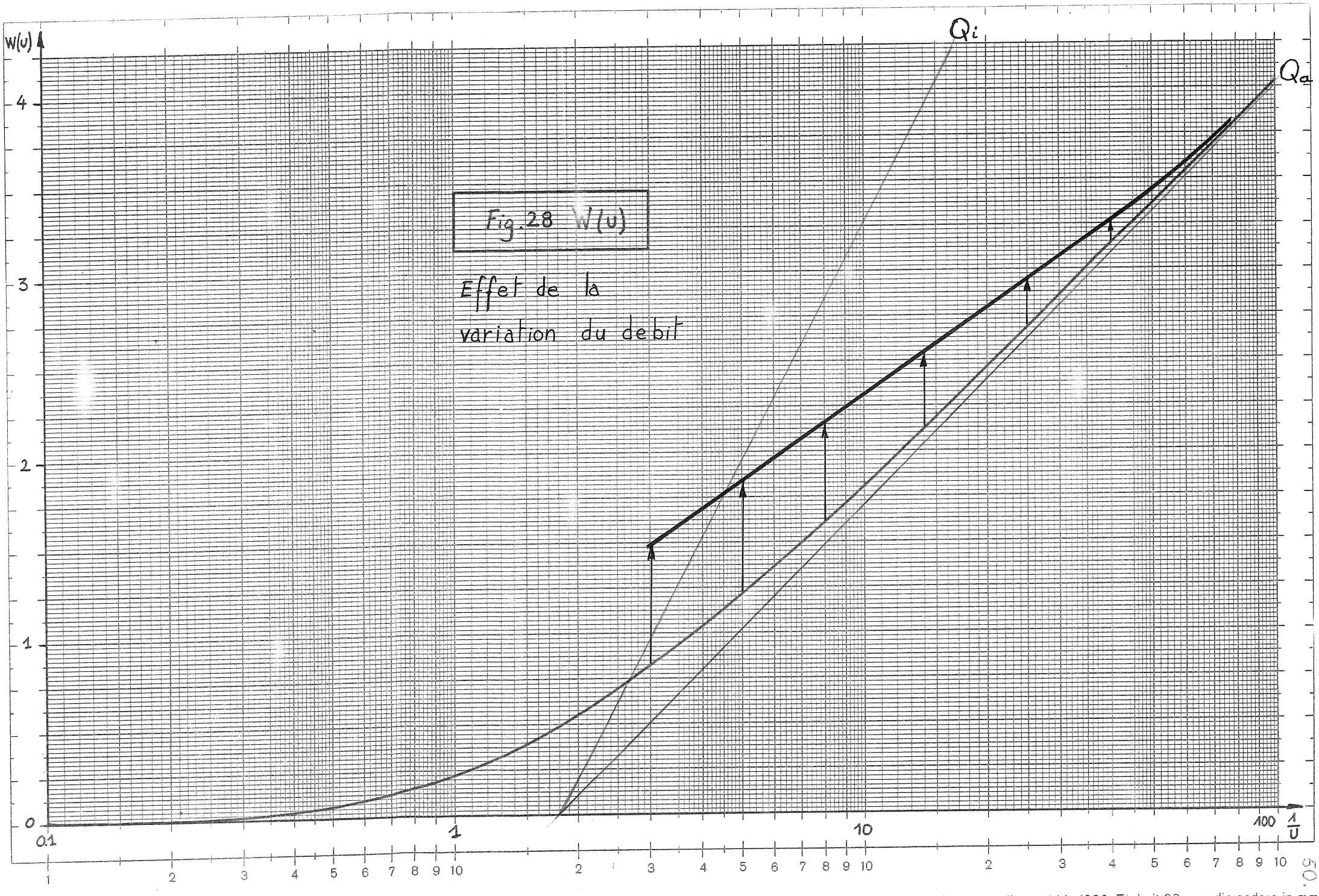


Fig. 28 W(u)

Effet de la variation du debit

SELECTA COPYRIGHT SCHLEICHER & SCHÜLL, 3352 EINBECK Bestell-Nr. 667056, Nr. 373½ A 4 MADE IN GERMANY

Eine Achse logar. geteilt von 1 bis 1000, Einheit 90 mm, die andere in mm

III. Méthode du niveau répété

La méthode du niveau répété a pu être appliquée en quelque points. Les expériences réalisées ont permis de vérifier les hypothèses et leurs conséquences :

1. applicabilité du principe de superposition
2. indépendance des résultats vis-à-vis du temps de pompage (ou du niveau d'arrêt de la pompe).
3. Indépendance des résultats vis-à-vis du débit.
4. Indépendance des résultats vis-à-vis du point d'analyse pour un milieu homogène.
5. Vérification de la symétrie de la courbe $\frac{R + To}{A}$ par rapport à l'axe R/To = 1 (diagramme semi logarithique).
6. Confirmation des valeurs obtenues par les méthodes classiques.

1. Applicabilité du principe de superposition

Le principe de superposition peut être appliqué si en utilisant uniquement la courbe expérimentale de descente, on obtient les mêmes résultats qu'avec la méthode mettant en jeu la descente et la remontée du niveau.

Considérons la courbe de descente de niveau relevée dans le piézomètre 10 pour un débit de $5.4\ 10^{-3}$ m^3/s et cherchons pour différentes valeurs de Δs (rabattement de référence) les valeurs de To, R, R/To et les grandeurs A, KH et S.

Les valeurs de Δs et T sont reprises dans le tableau suivant :

T (sec)	22.5	32.5	46	66	98	211	475
Δs (m)	0.03	0.06	0.09	0.12	0.15	0.20	0.25

En utilisant la construction reproduite à la figure 29, il est possible d'obtenir les valeurs de R pour différents Δs. Les résultats déduits de la seule courbe de descente (comptée une fois positivement et une fois négativement avec retard) comparés aux valeurs expérimentales sont les suivants :

Méthode	Δs	To	R + To	R	R/To
courbe	0.03	22.5	72	49.5	2.2
exp.	0.03	22.5	63.5	47	2.1
courbe	0.06	32.5	66	33.5	1.03
exp.	0.06	32.5	68	35.5	1.09
courbe	0.09	46	70	24	0.52
exp.	0.09	46	79	33	0.71
courbe	0.12	66	85	19	0.29
exp.	0.12	66	84.5	18.5	0.28
courbe	0.15	98	113	15	0.153
exp.	0.15	98	112.5	14.5	0.148

On peut remarquer l'excellente corrélation entre les valeurs obtenues d'une manière semi-expérimentale (superposition graphique) et les valeurs obtenues sur chantier (superposition physique). Hormis le point Δs = 0.09 m, on peut constater dans l'ensemble une erreur sur la valeur de R/To de l'ordre de 5 %. Pour cette gamme de la valeur de R/To (compris entre 0.1 et 2), l'erreur sur A sera comprise entre 1.8 et 3.4 % et sur KH comprise entre 0 et 2.3 %. On remarquera que pour les valeurs de R/To plus petites que 1, les erreurs sur A et KH s'annulent pour donner une valeur à peu près correcte de S.

En effet $S = \frac{4KH.A}{r^2}$ et si $\frac{\Delta (R/To)}{R/To} = -5\ \%$, (pour R/To = 0.1 par exemple)

$\frac{\Delta (KH)}{KH} = +1{,}8\ \%$ et $\frac{\Delta A}{A} = -2.3\ \%$ et dès lors $\frac{\Delta S}{S} \simeq -0{,}5\ \%$

On remarque donc que les erreurs commises sur la grandeur de base R/To n'entraîne que des modifications peu sensibles des résultats KH et S.

On en conclut, que dans le domaine de précision qui nous occupe, le principe de superposition peut être appliqué.

./.

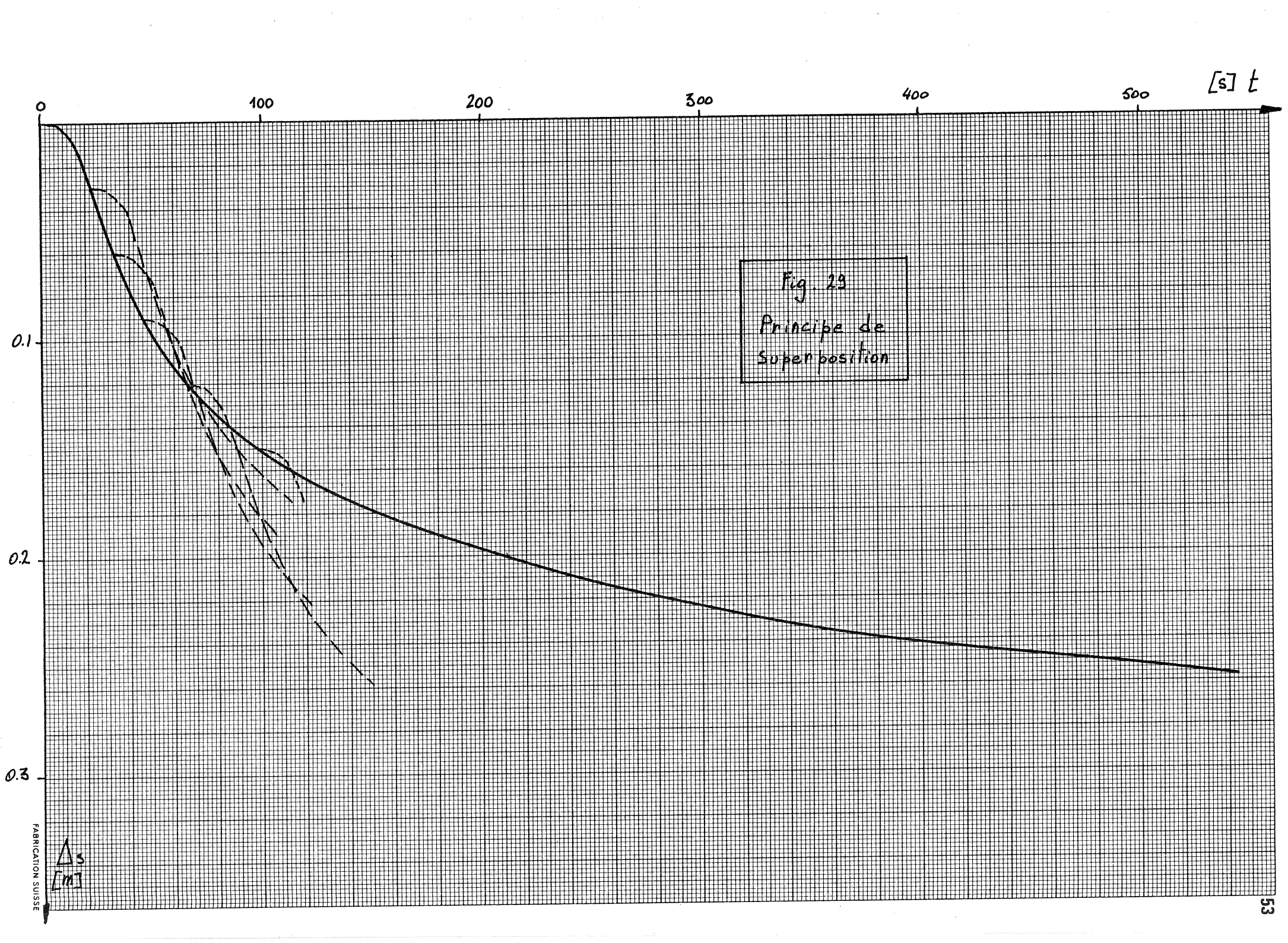


Fig. 29
Principe de
Superposition

FABRICATION SUISSE

2. Indépendance des résultats vis-à-vis du temps de pompage (ou du niveau d'arrêt de la pompe).

Les développements mathématiques repris au chapitre II laissent présager que les grandeurs de base peuvent être obtenues par une expérience mettant en jeu un pompage de durée limitée, et arbitrairement choisie.

Les expériences ont été répétées sur le même piézomètre en faisant varier le niveau à partir duquel on arrêtait la pompe.

1ère série. Débit supposé constant et égal à $2.85\ 10^{-3}$ m^3/s.
piézomètre 32, r = 41.8 m

Δs (m)	To (s)	R+To (s)	R (s)	R/To	$\frac{R+To}{A}$	W	A (s)	KH ($10^{-3} m^2/s$)	S (10^{-3})
0.01	32	80.5	48.5	1.52	3.32	0.35	24	7.9	0.43
0.02	43.5	79.5	36	0.83	3.25	0.51	24	5.8	0.32
0.05	130.5	152.5	22	0.168	5.2	1.13	29	5.1	0.34

On peut remarquer une variation de la valeur de KH dans l'ordre de grandeur tandis que la valeur de S, ainsi que prédit au paragraphe 1 varie bien moins fort. Etant donné que le débit pouvait varier d'une séquence de pompage à l'autre (rien ne permettait de supposer qu'il serait indépendant de la durée du pompage), une seconde série d'essais a été réalisée avec mesure du débit pour chaque séquence de pompage.

2 ème série. piézomètre 32, r = 41.8 m (la flèche indique les grandeurs mesurées).

	↓	↓	↓					↓			
Δs (m)	To (s)	R+To (s)	R	R/To	$\frac{R+To}{A}$	W	A (s)	Q ($10^{-3} m^3/s$)	KH ($10^{-3} m^2/s$)	S (10^{-3})
0.01	27.5	89	61.5	2.24	3.6	0.27	24.7	2.77	6	0.34
0.02	43	80.5	37.5	0.87	3.25	0.49	24.8	3.08	6	0.34
0.03	61	89	28	0.46	3.6	0.705	24.7	2.90	5.4	0.31
0.04	83	106	23	0.28	4.2	0.9	25.2	2.88	5.2	0.30
0.05	114	135	21	0.184	5	1.09	27	2.96	5.1	0.32

Lorsque l'on mesure le débit, on s'assure une meilleure stabilité des valeurs de KH et de S qui se trouvent à moins de 10 % d'une valeur moyenne.

./.

Autre exemple : piézomètre 25 (r = 12.2 m)

Δs (m)	To (s)	R+To (s)	R (s)	R/To	$\frac{R+To}{A}$	W	A (s)	Q (10^{-3} m^3/s)	KH (10^{-3} m^2/s)	S (10^{-3})
0.01	12.5	66.5	54	4.32	4.5	0.17	14.8	2.05	2.8	0.07
0.02	18	59.5	41.5	2.3	3.6	0.265	16.5	2.95	3.1	0.09
0.03	25	56.5	31.5	1.26	3.25	0.39	17.4	3.13	3.2	0.09
0.04	31	58	27	0.87	3.25	0.49	17.8	3.09	3.0	0.09
0.05	36	59	23	0.64	3.35	0.59	17.6	3.02	2.8	0.08

Une fois de plus, les résultats ne dépendent pas significativement du Δs choisi. Les valeurs de KH et S pour le piézomètre 25 diffèrent de celles du piézomètre 32 car il se situe dans la direction perpendiculaire à l'écoulement dans la vallée et de plus, il était à proximité d'une fouille remplie d'eau qui jouait le rôle de réservoir de régulation.

Moyennant la mesure exacte du débit pour la séquence de pompage, on peut conclure que les valeurs de KH et de S peuvent être déduites indépendamment du rabattement de référence Δs.

3. Indépendance des résultats vis-à-vis du débit.

Il est impératif que les grandeurs puissent être déterminées indépendamment du débit ; c'est pourquoi plusieurs essais ont été réalisés sur le même piézomètre avec des débits différents. Le piézomètre PI, situé à 55 m du puits nous a donné les 2 séries de mesures suivantes :
1ère série : débit moyen ($Q \simeq 3\ 10^{-3}\ m^3/s$).

Δs (m)	To (s)	R+To (s)	R (s)	R/To	$\frac{R+To}{A}$	W	A (s)	Q (10^{-3} m^3/s)	KH (10^{-3} m^2/s)	S (10^{-3})
0.01	68	201	133	1.96	3.5	0.295	57	2.85	6.7	0.51
0.02	104	184	80	0.77	3.3	0.53	56	2.99	6.3	0.46
0.03	154	217	63	0.47	3.6	0.7	60	2.93	5.5	0.43
0.05	297	330	33	0.113	6.2	1.33	53	2.91	6.2	0.43

./.

2ème série : grand débit ($Q \simeq 5.4\ 10^{-3} m^3/s$)

Δs (m)	To (s)	R+To (s)	R (s)	R/To	R+To / A	W	A (s)	Q ($10^{-3} m^3/s$)	KH ($10^{-3} m^2/s$)	S (10^{-3})
0.01	38.5	229.5	191	4.96	4.8	0.15	48	5.6	6.7	0.42
0.02	57.5	197.5	141	2.45	3.7	0.255	53	5.28	5.4	0.38

On constate que les valeurs de KH oscillent entre 5.4 et 6.7 $10^{-3} m^2/s$ et que celles de S de 0.00038 à 0.00051, ce qui est tout-à-fait acceptable lorsque l'on considère les amplitudes mises en jeu. Il est certain que si le puits avait été équipé d'une pompe mieux adaptée à la transmissivité de la nappe, on aurait pu faire les mesures avec des variations de niveau multipliées par 5 (pompe de 100 m^3/h par exemple)

De ces deux séries d'expériences,on peut conclure que les résultats ne sont pas influencés significativement par le débit choisi pour réaliser l'expérience pour autant qu'il donne lieu à des variations de niveau aisées à mesurer.

4. Indépendance des résultats vis-à-vis du point d'analyse pour un milieu homogène.

Ainsi que l'investigation géotechnique le montre, on peut s'attendre à rencontrer des étendues relativement homogènes dans la direction générale de l'écoulement dans la vallée de la Dyle. La figure 26 montre d'ailleurs qu'il est possible de tracer une droite par les points représentant le rabattement aux piézomètres 28,32 et PI tandis que le rabattement en 26 est réduit. Voyons quels résultats donne la méthode du niveau répété appliquée aux points 28, 32, et PI.

Pour le point 28, on a obtenu :

Δs (m)	0.01	0.02	0.05
KH ($10^{-3} m^2/s$)	7.5	6.3	4.7
S (10^{-3})	0.28	0.24	0.24

} sans mesure précise du débit.

./.

Pour le point 32, on a obtenu :

Δs(m)	0.01	0.02	0.05	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05
KH ($10^{-3}m^2/s$)	7.9	5.8	5.1	6	6	5.4	5.2	5.1
S (10^{-3})	0.43	0.32	0.34	0.34	0.34	0.31	0.30	0.32
	sans mesure précise du débit			débit mesuré à chaque signal de pompage				

Pour le point PI, on a obtenu (débit mesuré à chaque signal de pompage).

Δs (m)	0.01	0.02	0.03	0.05	0.01	0.02
KH ($10^{-3}m^2/s$)	6.7	6.3	5.5	6.2	6.7	5.4
S (10^{-3})	0.51	0.46	0.43	0.43	0.42	0.38
	débit moyen				grand débit	

On constate que toutes les mesures faites avec détermination exacte du débit à chaque signal de pompage sont comprises entre 5.1 et 6.7 $10^{-3}m^2/s$ pour le coefficient d'emmagasinement. Compte tenu de l'imprécision apportée dans les autres mesures, on peut considérer que le sous-sol qui présente une certaine homogénéité, fait transparaître en différents points d'analyse des valeurs semblables des paramètres régissant l'écoulement.

5. Vérification de la symétrie de la courbe R+To par rapport à l'axe R/To = 1 (diagramme semi-logarithmique.)

Dans le paragraphe 2, lors de la 2ème série d'essais on a obtenu une visualisation exemplaire de la symétrie de la courbe $\frac{R+To}{A}$ par rapport à l'axe R/To = 1. En effet, pour une même valeur de R+To (Δs = 0.01 m et Δs = 0.03 m) on a obtenu un échange entre les valeurs de R et To (To = 27.5 s → 61 s et R = 61.5 s → 28s), donnant des valeurs inverses du rapport R/To.

./.

Au cours des autres séries d'essais, on a toujours pu observer la variation de R+To en fonction de R/To ainsi que le montrait l'abaque. En effet, on a pu constater d'une part, que le minimum des valeurs de R+To (temps total mis pour faire les lectures) s'observait pour la valeur de R/To la plus proche de l'unité. D'autre part,au plus le rapport R/To différait de 1, au plus grand était le temps R+To.

Enfin, pour un milieu relativement homogène et un débit relativement constant, on a confirmé que la valeur optimale de Δs se conservait d'un piézomètre à l'autre.

En effet, en se basant sur la valeur de W obtenu pour Δ = 2 cm, par une simple règle de 3 ayant pour but d'obtenir le Δ pour lequel W = 0.45 (c'est pour cette valeur que R/To = 1), on obtient

Piézomètre 28

$\Delta s = 2$ cm R/To = 0.72 et W = 0.55 → $\Delta opt = \frac{2 \times 0.45}{0.55} = 1.64$ cm

Piézomètre 32

. 1ère série.

$\Delta = 2$ cm R/To = 0.83 et W = 0.51 → $\Delta opt = \frac{2 \times 0.45}{0.51} = 1.76$ cm

. 2ème série.

$\Delta = 2$ cm R/To = 0.87 et W = 0.49 → $\Delta opt = \frac{2 \times 0.45}{0.49} = 1.89$ cm

Piézomètre PI

$\Delta = 2$ cm R/To = 0.77 et W = 0.53 → $\Delta opt = \frac{2 \times 0.45}{0.53} = 1.70$ cm

De ces observations, on peut conclure que le temps mis à faire une mesure selon la méthode du niveau constant est valablement représentée par la forme de (R+To)/A reprise sur l'abaque. De plus, pour un milieu relativement homogène donné, l'abaissement optimal dépend uniquement de la pompe : une fois qu'il a été approximé pour un piézomètre, on peut le conserver pour les autres, ce qui garantit la plus grande rapidité d'exécution.

6. Confirmation des valeurs obtenues par les méthodes classiques.

Afin de voir si la cohérence intrinsèque de la méthode, établie par les 5 paragraphes précédents, mène à un résultat confirmant les valeurs obtenues au moyen de méthodes classiques, on a comparé les valeurs obtenues par les 2 méthodes.

En rappelant les difficultés d'interprétation de la méthode classique, on se souvient que KH était égal à $7\ 10^{-3}\ m^2/s$ lorsque l'on considérait la descente des niveaux en fonction du temps et à $5\ 10^{-3}\ m^2/s$ lorsque l'on considérait le profil de rabattement pour un temps donné.

./.

Par la méthode du niveau constant, en ne retenant que les valeurs pour lesquelles le débit a été déterminé pour chaque signal de pompage, on obtient des valeurs de KH oscillant entre 5.1 et 6.7 $10^{-3} m^2/s$. On peut dès lors considérer que les valeurs de KH obtenues par les deux méthodes sont concordantes.

En ce qui concerne les valeurs de la transmissivité, les méthodes classiques donnaient des valeurs comprises entre 0.12 et 0.29 10^{-3}. La méthode du niveau de retour donne des valeurs supérieures oscillant entre 0.24 et 0.51 10^{-3}. Néanmoins l'ordre de grandeur permet de déterminer rapidement si la nappe est libre ou captive. Cette disparité peut trouver son origine dans 2 facteurs : l'erreur induite par l'utilisation d'un appareillage qui n'est pas parfaitement adapté à la méthode et le fait que S n'est pas nécessairement une constante.

7. Justification des valeurs du coefficient d'emmagasinement obtenues.

α Appareillage imparfait.

L'élément de mesure du niveau piézométrique mis en oeuvre dans les expériences décritesci-dessus consistait en une sonde électrique introduite dans le tube piézométrique. Le niveau initial était répéré puis la sonde était baissée du rabattement de référence choisi. La pompe était mise en route et lorsque le voyant s'éteignait, on arrêtait la pompe. Le temps R+To était défini par le nouvel allumage du voyant. Cette manière de procéder est tributaire de l'hystérèse de la sonde : lorsque le niveau descend, le ménisque qui se forme entre la surface de l'eau et la borne électrique supérieure maintient le contact ; dès lors le niveau réel est inférieur au niveau de référence choisi. L'hystérèse du matériel employé était de l'ordre de 3 mm : c'est la différence de lecture entre le niveau pour lequel le voyant cesse d'être allumé (remontée de la sonde) et celui pour lequel le voyant s'allume (descente de la sonde). Etant donné les faibles rabattements mis en jeu (pompe de débit nominalrelativement faible), cette hystérèse a eu pour conséquence d'augmenter la valeur de To et encore plus la valeur de R+To puisque le niveau devait remonter à une valeur supérieure à celle de l'arrêt de la pompe. Il en résulte que sans que le rapport R/To soit gravement affecté, la valeur de R+To était sensiblement augmentée. (En reprenant une courbe expérimentale, on peut estimer l'erreur à 10 et même 20 % dans certains cas).

Cependant ce défaut ne suffit pas à expliquer des valeurs de S environ 2 fois plus grandes. En outre son influence peut être réduite en mettant en oeuvre des rabattements plus grands ou un matériel ne présentant pas d'hystérèse.

β S = constante ?

En revenant à l'équation de base, on voit que S est l'expression implicite de la compressibilité de l'ensemble des horizons aquifères influencés par le rabattement.

S est défini comme suit (nappe captive voir équation (4)).

$$S = (m_v + n\beta)\,\bar{\omega}\,.\,H \qquad (19)$$

./.

dans laquelle m_v est le coefficient de compressibilité du terrain ($kg^{-1}m^2$)

n	la porosité	(sans unité)
β	le coefficient de compressibilité de l'eau	($kg^{-1}m^2$)
$\bar{\omega}$	le poids spécifique de l'eau	($kg\ m^{-3}$)
H	la puissance de la nappe	(m)

on vérifie que S est bien sans dimensions.

Lorsque la pression interstitielle baisse d'un kg/m2 dans un milieu poreux l'eau se dilate de $n\beta$ par unité de volume poreux tandis que le squelette poreux se comprime de m_v par unité de volume. Au plus S est grand, au plus le milieu est compressible puisque la compressibilité de l'eau est pratiquemment constante et qu'elle est nettement plus faible que celle du sol. Pour fixer les idées, M. Caquot donne les valeurs suivantes dans son traité de mécanique des sols :

$\beta = 0.0455\ \ 10^{-3}$ cm2/kg

$m_v = 10^{-3}$ cm2/kg (valeur moyenne pour les sables).

Dès lors, on peut admettre approximativement

$$S = m_v . \bar{\omega} . H \qquad (20)$$

Si l'on considère maintenant un cube de terrain de volume V, le volume d'eau expulsé par le squelette pour une baisse élémentaire de pression interstitielle sera :

$$\Delta v = V \times m_v \ . \ dp.$$

Etant donné que le milieu est saturé, la diminution de volume du squelette est égale au volume d'eau expulsé. En outre, si l'on suppose que seule la compression peut s'opérer dans la direction verticale, la réduction relative de volume sera égale à la réduction relative de hauteur que l'on peut exploiter pour trouver le tassement

$$\Delta H = H \times m_v \ . \ dp. \qquad (21)$$

Si l'on considère un prisme de base unitaire traversant complètement la nappe captive influencée par le rabattement, on obtiendra l'expression du tassement total dû à l'horizon aquifère et H sera la puissance de la nappe.

Pour une nappe captive en milieu homogène, le tassement pourra dès lors s'exprimer en fonction du coefficient d'emmagasinement :

$$\Delta h = \frac{S}{\bar{\omega}} \times dp \qquad (22)$$

./.

On contrôle que Δh est exprimé en mètres. Cette relation va nous permettre de trouver un sens physique au coefficient d'emmagasinement : supposons que le niveau piézométrique de la nappe baisse d'un mètre en un point donné ; dp sera alors égal à 1000 kg/m2 tandis que $\bar{\omega}$ = 1000 kg/m3. On peut dire alors :

Le coefficient d'emmagasinement d'une nappe captive est le tassement exprimé en mètres de l'horizon la recelant lorsque la hauteur piézométrique baisse d'un mètre.

Cette interprétation du coefficient d'emmagasinement nous permet de voir deux raisons principales pour lesquelles sa valeur doit diminuer avec le temps de pompage.

La première est que m_v diminue avec la contrainte appliquée ainsi que le montre n'importe quel diagramme de consolidation. Cependant, les zones de variation de pression réalisées sur le chantier de la Dyle ne permettent pas d'expliquer dans ce cas-ci la diminution de S avec la hauteur de rabattement. Sur d'autres chantiers, par contre, si les baisses de pression mises en jeu sont importantes par rapport à la contrainte verticale effective in situ, on peut s'attendre à observer une diminution de S avec l'importance et la durée du pompage.

La seconde est que l'horizon aquifère n'est pas seul source d'eau pour l'écoulement lorsque la pression baisse. En effet, les couches réputées imperméables qui délimitent la nappe captive subissent les variations de la pression interstitielle sur leur frontière et par consolidation, peuvent fournir leur eau à l'écoulement.

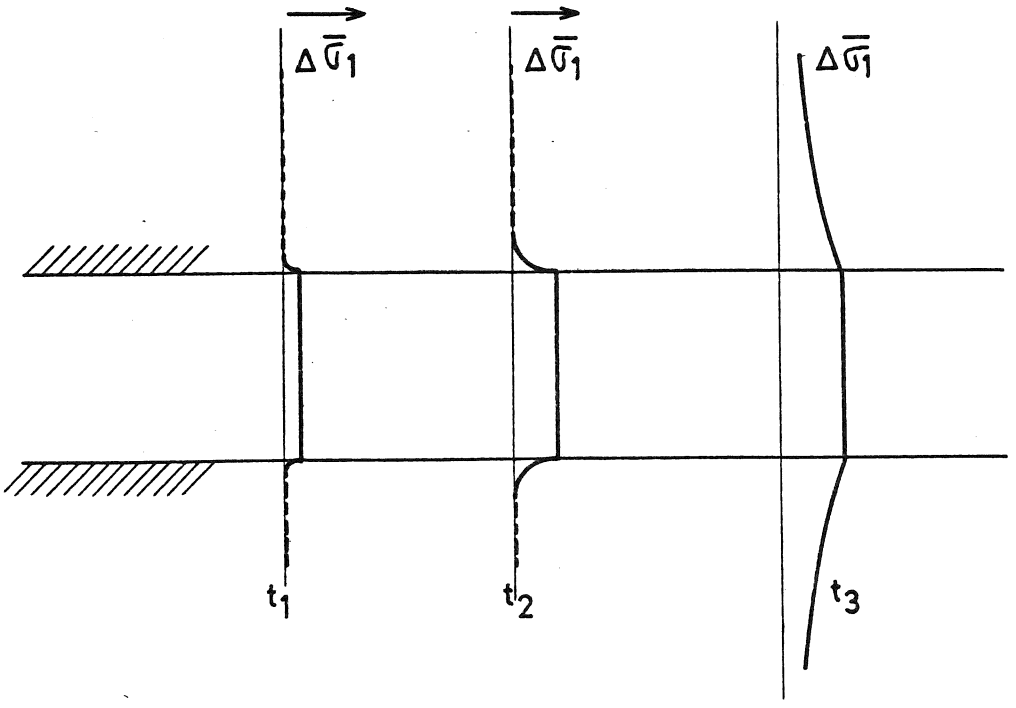


Fig.30

On a porté à la figure 30 le profil des incréments de pression verticale effective relatifs à une verticale donnée pour certains instants après la mise en route de la pompe. L'incrément de pression verticale dans la nappe captive croît suivant la loi classique, entraînant avec un certain retard les couches la délimitant. On voit donc qu'à la compressibilité intrinsèque de l'horizon aquifère principal, s'ajoute un terme qui décroît très rapidement avec le temps. En effet, lorsqu' une contrainte est appliquée à la surface d'un sol réputé imperméable, c'est au cours des premiers instants que la vitesse de consolidation est la plus grande. Par contre, lorsque le régime quasi permanent est atteint, les couches imperméables continuent à donner de l'eau, mais à une vitesse tellement faible que l'on peut considérer que seule la compressibilité de l'horizon principal intervient. On trouve dans les résultats un indice que ce facteur de consolidation a joué un rôle sur le chantier de la Dyle : les valeurs de S accusent une tendance à la diminution avec le temps de pompage initial choisi.

De ces considérations, on peut conclure que la valeur du coefficient d'emmagasinement obtenue par la méthode du niveau répété est une expression instantannée de la compressibilité de l'horizon principal et des phénomènes de consolidation des couches limitrophes. A cet égard, il peut être considéré comme un indicateur réel des dangers de tassements provoqués par le rabattement de la nappe aquifère.

./.

CONCLUSIONS

L'analyse de la réponse piézométrique suite à un pompage de durée limitée permet la résolution séparée des deux paramètres régissant l'écoulement transitoire : la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement. L'onde ainsi provoquée présente deux points particuliers lorsqu'on l'observe dans un piézomètre en fonction du temps : un maximum et un point de retour au niveau correspondant à l'arrêt de la pompe.

Les deux méthodes qui en découlent nécessitent la connaissance des grandeurs suivantes : le débit (Q), la distance du piézomètre d'observation à la pompe (r), la durée du pompage (To) et le rabattement atteint lors de l'arrêt du pompage (ξo).

Dans la méthode du niveau stationnaire, on mesure le temps compté à partir de l'arrêt de la pompe auquel le niveau cesse de descendre (T) et le rabattement maximum atteint (ξ_m). Moyennant le calcul du paramètre adimensionnel $\frac{T}{To}$, on utilise un abaque permettant d'obtenir rapidement les valeurs de KH et de S.

Dans la méthode du niveau de retour, on mesure le temps (R), compté à partir de l'arrêt de la pompe, auquel le rabattement repasse par la valeur ξo. Ici aussi moyennant le calcul du paramètre adimensionnel $\frac{R}{To}$, on obtient par un autre abaque les valeurs de KH et de S.

Grâce aux expériences réalisées sur le chantier de la Dyle, il a été possible de tester la méthode du niveau de retour appliquée au cas d'une nappe captive. On a pu vérifier que les hypothèses de Theis étaient valables pour des piézomètres ne se situant pas trop près du puits de pompage et que le principe de superposition des solutions élémentaires pouvait être utilisé. On a pu constater que les valeurs obtenues étaient indépendantes de la durée de pompage, du débit et du point d'analyse pour un milieu homogène, et que les prévisions du comportement de R vis-à-vis de To étaient exactes. Les valeurs de la transmissivité obtenues sont parfaitement confirmées par les méthodes classiques d'analyse. Les valeurs obtenues du coefficient d'emmagasinement sont plus grandes que celles découlant des méthodes classiques. Pour le site étudié, le rapport des deux valeurs oscillait autour de 2 tandis que l'ordre de grandeur permettait de confirmer en un coup d'oeil le caractère captif de la nappe sollicitée. L'interprétation physique du coefficient d'emmagasinement permet d'expliquer ces écarts vis-à-vis des valeurs obtenues au moyen du régime quasi permanent et il apparaît en fait que la valeur obtenue par une méthode rapide constitue un indicateur réel des dangers de tassements puisqu'elle fait intervenir de manière sensible les phénomènes de consolidation des couches voisines de l'écoulement principal.

Lorsque les méthodes sont utilisées conjointement, de nombreuses vérifications permettent de s'assurer de la valeur des paramètres de base.

./.

En résumé, deux nouvelles méthodes de mesure des propriétés hydrogéologiques du sous-sol sont présentées. Leur particularité réside dans

. la réalisation d'un signal rectangulaire de pompage

. la mesure des temps auxquels la nappe
  - cesse de descendre
  - repasse par un niveau de référence

. l'obtention séparée de la transmissivité et du coefficient d'emmagasinement au moyen d'abaques établis grâce au choix judicieux d'un paramètre adimensionnel (rapport de temps).

Leurs qualités sont les suivantes :

. domaine d'applicabilité étendu à tous les types de nappes homogènes horizontalement (extension accrue moyennant l'utilisation de piézomètres à faibles temps de réponse)

. simplicité de mesure

. rapidité du procédé particulièrement appréciable pour les sites où des tassements dus au rabattement sont à craindre(faibles rabattements mis en oeuvre)

. possibilité d'obtention d'un profil plutôt qu'une analyse globale.

. obtention d'un indicateur des dangers de tassements.

. obtention directe d'un paramètre déterminant le rayon d'influence

. possibilité de mesure sur un site pour lequel le système de pompage est en fonctionnement (arrêt de la pompe pendant une durée limitée et mesure du relèvement du niveau piézométrique).