

CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DE LA CONSTRUCTION

Etablissement reconnu par application de l'arrêté-loi du 30.1.1947

Siège social : rue du Lombard 41, 1000 Bruxelles

Station expérimentale : avenue Pierre Holoffe, 1342 Limelette



THEORIE DE LA METHODE DE L'ONDE

Compte rendu d'étude et de recherche n° 25 - 1980

(Recherche subventionnée par l'Institut pour l'Encouragement
de la Recherche Scientifique dans l'Industrie et l'Agriculture - I.R.S.I.A.)

THEORIE DE LA METHODE DE L'ONDE

**Méthodes de mesure de la perméabilité
et du
coefficient d'emmagasinement du sous-sol**

A. Holeyman, ir., M.S.
précédemment ingénieur-chercheur au C.S.T.C.

Cette étude a été effectuée dans le cadre des recherches en géotechnique subventionnées par l'I.R.S.I.A., sous l'égide du Groupe de travail "Géotechnique" du Comité technique Gros oeuvre du C.S.T.C., par M. A Holeyman, alors ingénieur-chercheur au C.S.T.C.

Grâce à la collaboration de M. Bouckaert, ingénieur à l'Association momentanée SOCOL-AQUAVIA-DANHEUX & MAROYE, l'auteur a pu observer sur chantier les phénomènes qui lui ont donné l'idée de l'utilisation d'une "onde de pompage" pour déterminer les paramètres régissant les écoulements souterrains.

Il l'en remercie ici ainsi que MM. Verbeke et Lahaye qui lui ont apporté l'indispensable soutien technique lors de l'expérimentation sur chantier de la méthode du niveau de retour.

Les recherches expérimentales basées sur cette méthode sont actuellement poursuivies par M. C. Legrand, ingénieur-chef de projet au C.S.T.C.

Composition du Groupe de travail Géotechnique

Président : M. V. Roisin

Membres : MM. D. Andries, Y. Charon, R. Colin,
E. De Beer, A. D'Haenens, A. De
Sutter, A. Fagnoul, E. Lousberg,
J. Nuyens, J. Vander Linden, A.
Van Wambeke, M. Wallays

C.S.T.C. : MM. H. Motteu
C. Legrand

SOMMAIRE

1. Introduction	5
2. Notations utilisées	6
3. Méthode du niveau stationnaire	8
3.1 Théorie de l'écoulement transitoire	8
3.2 Solution de l'équation fondamentale	9
3.3 Analyse de la vitesse de descente du niveau piézométrique	12
3.4 Réponse de la vitesse de variation du niveau à un signal de pompage rectangulaire	14
3.5 Résolution de l'équation $\ln \frac{t + T_0}{t} = A \left(\frac{1}{t} - \frac{1}{t + T_0} \right)$	16
3.6 Exploitation des résultats de l'analyse théorique	22
3.61 Mesure du coefficient d'enmagasinement	22
3.62 Mesure de la transmissivité	22
3.7 Présentation des résultats	24
3.71 Abaque de la figure 9	24
3.72 Exemple	24
3.73 Abaque final	26
3.8 Domaine d'applicabilité	29
3.81 Types de nappes aquifères	29
3.82 Rapidité de la méthode de mesure	30
3.83 Sous-sol hétérogène	30
4. Méthode du niveau de retour	32
4.1 Introduction	32
4.2 Analyse de l'évolution du niveau piézométrique suite à un pompage de durée déterminée	32
4.3 Résolution de l'équation fondamentale	35
4.4 Présentation des résultats. Abaque final	40
4.5 Domaine d'applicabilité	42
5. Comparaison des deux méthodes de mesure	43
6. Conclusions	45
Bibliographie	47

1. INTRODUCTION

Les méthodes de mesure de la perméabilité et du coefficient d'enmagasinement du sous-sol se sont révélées jusqu'à présent lourdes à l'utilisation, longues et coûteuses.

En réalisant un signal de pompage rectangulaire et en étudiant le temps à partir duquel le niveau de la nappe aquifère cesse de descendre, l'auteur a mis au point 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'employer un appareillage de mesure plus simple, l'auteur a ensuite développé une autre méthode de mesure s'appuyant également sur la réalisation d'un signal de pompage rectangulaire. La mesure du temps nécessaire pour obtenir une seconde fois le niveau atteint juste à l'arrêt de la pompe, permet d'obtenir les paramètres fondamentaux régissant l'écoulement transitoire.

Les résultats obtenus avec cette deuxième méthode de mesure sont également présentés sous la forme d'un abaque utilisé lors de vérifications expérimentales.

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

- d'une part, les définitions et les 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 aquifère, les lois générales de circulation qui s'y appliquent et leurs paramètres fondamentaux

On se limite donc sur ces points à un rappel succinct et on renvoie le lecteur aux ouvrages généraux d'hydrologie.

2. NOTATIONS UTILISEES

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
n_e	: porosité effective
r	: coordonnée radiale
t	: variable de temps
t_0	: instant où cesse le pompage
u	: variable égale à $\frac{r^2}{4\alpha t}$
\vec{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 $\frac{r^2}{4\alpha}$
C	: constante d'intégration
E	: épaisseur de la nappe libre
$-E_1(-u)$: intégrale logarithmique
H	: puissance de la nappe captive
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'enmagasinement

T	:	délai entre le moment d'arrêt de la pompe et l'instant où le niveau cesse de descendre
T_0	:	durée du pompage
V	:	volume de terrain
$W(u)$:	intégrale logarithmique
W_0	:	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 $\frac{kH}{S}$
β	:	coefficient de compressibilité de l'eau
γ	:	facteur tenant compte des effets de l'accélération
δ	:	différentielle
Δ	:	laplacien
Δs	:	rabattement arbitrairement choisi
$\Delta \xi$:	rabattement après un temps arbitrairement choisi
ξ	:	rabattement
ξ_m	:	rabattement maximum
ξ_0	:	rabattement au moment où cesse le pompage
Ψ	:	potentiel de l'écoulement
ω	:	variable d'intégration
$\bar{\omega}$:	poids spécifique de l'eau

3. METHODE DU NIVEAU STATIONNAIRE

3.1 Théorie de l'écoulement transitoire

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

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

avec \bar{v} vecteur vitesse d'écoulement
 γ facteur tenant compte des effets de l'accélération
 k perméabilité (milieu homogène et isotrope)
 ψ potentiel de l'écoulement

En raison des valeurs très faibles de $\frac{\partial \bar{v}}{\partial t}$, on peut négliger ce terme lorsqu'on analyse les écoulements dans le sol. C'est pourquoi on utilise la formule de Darcy

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

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 ($\text{div } \bar{v} = 0$) on obtient pour les écoulements à surface libre et à faible gradient l'expression suivante :

$$\frac{n_e}{kE} \frac{\partial h}{\partial t} = \Delta h \quad (3)$$

avec E épaisseur moyenne de la nappe libre
 n_e porosité effective
 h hauteur de la surface libre

n_e est compris entre 0,18 et 0,43

Pour les écoulements des nappes captives, on obtient

$$\frac{(m_V + n\beta) \bar{\omega}}{k} \frac{\delta\psi}{\delta t} = \Delta\psi \quad (4)$$

avec m_V coefficient de compressibilité du terrain
 n porosité
 β coefficient de compressibilité de l'eau
 $\bar{\omega}$ poids spécifique de l'eau

Pour les sables, $n\beta$ est environ 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 dans celui des nappes captives, revient à celui posé par la propagation de la chaleur, soit :

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

3.2 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.

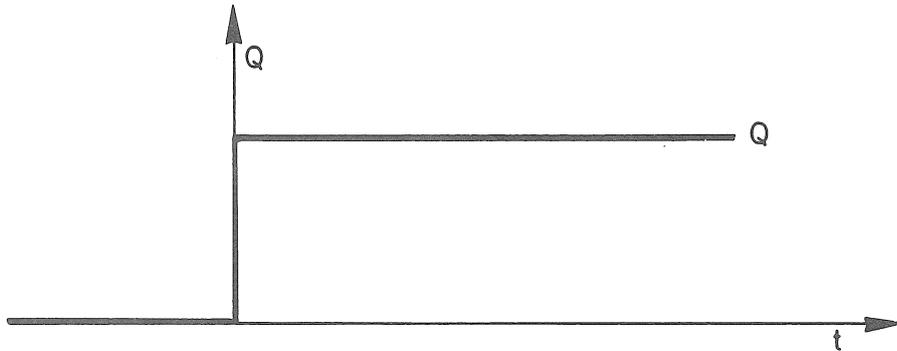


Fig. 1.

Ce signal est réalisé dans un puits unique s'alimentant dans une nappe infinie et placé à l'origine du système des coordonnées.

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

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

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

$$\xi = C \int_0^t \frac{e^{-\frac{r^2}{4\alpha\zeta}}}{\zeta} d\zeta \quad (7)$$

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

$$\begin{aligned} Q &= - \lim_{r \rightarrow 0} \left(2\pi kH r \frac{\partial \xi}{\partial r} \right) \\ &= - \lim_{r \rightarrow 0} \left(2\pi kH r \frac{\partial}{\partial r} \left(C \int_0^t \frac{e^{-\frac{r^2}{4\alpha\zeta}}}{\zeta} d\zeta \right) \right) \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} Q &= \lim_{r \rightarrow 0} \left(2\pi kHr 2C \frac{e^{-\frac{r^2}{4\alpha t}}}{r} \right) \\ &= 4\pi kHC \quad (8) \end{aligned}$$

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

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

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

Grâce au changement de variable

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

on évalue le terme intégral

$$\int_0^t \frac{e^{-\frac{r^2}{4\alpha\zeta}}}{\zeta} d\zeta = \int_u^\infty \frac{e^{-w}}{w} dw = -E_1(-u) = W(u) \quad (10)$$

qui est une intégrale logarithmique dont les valeurs sont données dans le tableau 1 et dont le graphique est représenté sur la figure 2.

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

$$W(u) = -0,5772 - u + u - \frac{u^2}{2.2!} + \frac{u^3}{3.3!} - \frac{u^4}{4.4!} + \dots$$

Tableau 1 - Valeurs de W(u)

u	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	$219 \cdot 10^{-3}$	$49 \cdot 10^{-3}$	$13 \cdot 10^{-3}$	$3,8 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$0,36 \cdot 10^{-3}$	$0,12 \cdot 10^{-3}$	$0,038 \cdot 10^{-3}$	0
$\times 10^{-1}$	1,82	1,22	0,91	0,70	0,56	0,45	0,37	0,31	0,26
$\times 10^{-2}$	4,04	3,35	2,96	2,68	2,47	2,30	2,15	2,03	1,92
$\times 10^{-3}$	6,33	5,64	5,23	4,95	4,73	4,54	4,39	4,26	4,14
$\times 10^{-4}$	8,63	7,94	7,53	7,25	7,02	6,84	6,69	6,55	6,44
$\times 10^{-5}$	10,94	10,24	9,84	9,55	9,33	9,14	8,99	8,86	8,74

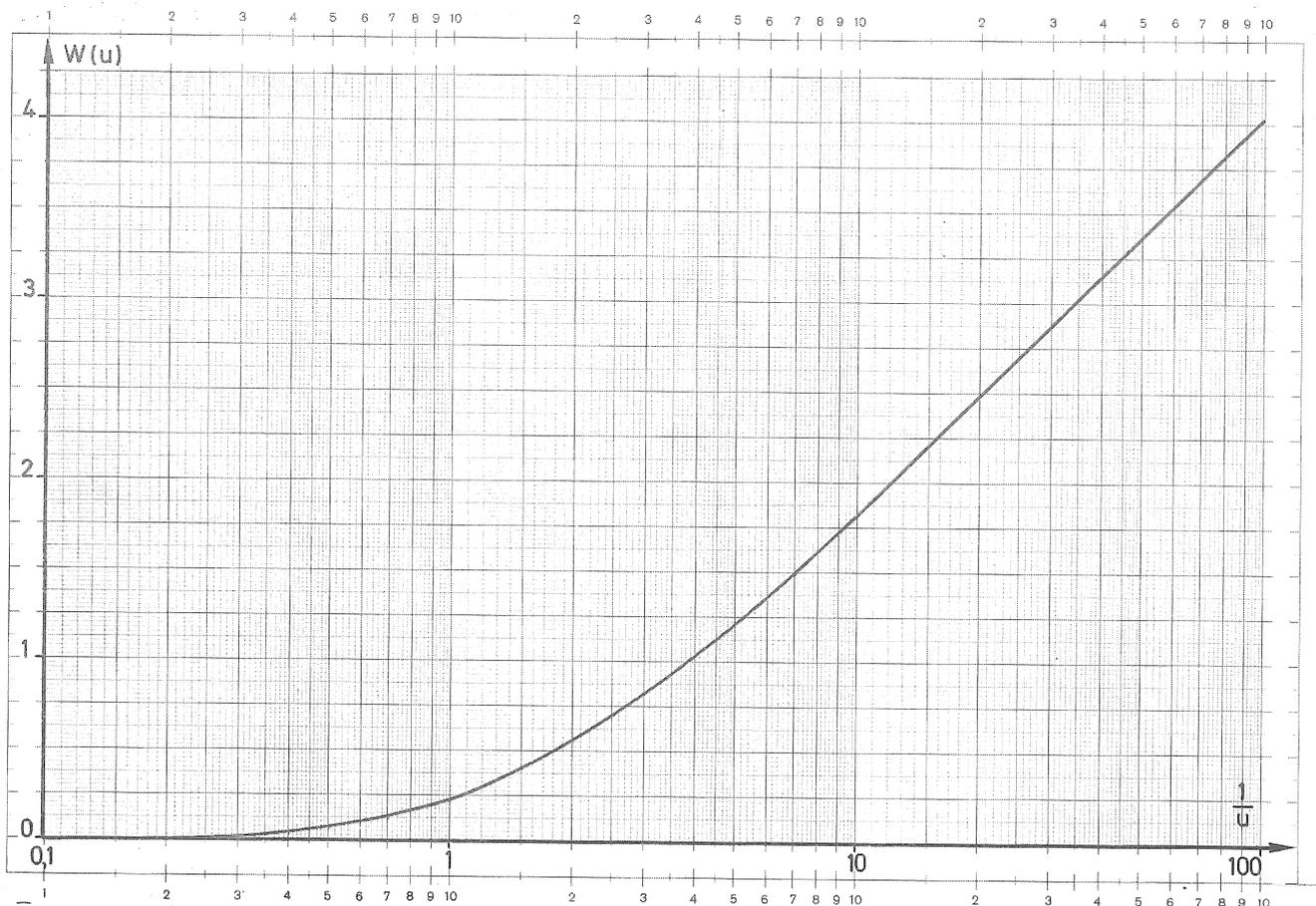


Fig. 2 - W(u)

3.3 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 étudie 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).

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

On remarque qu'il s'agit d'une fonction analytique parfaitement définie.

On peut la mettre sous la forme

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

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

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

Le graphique de la figure 3 donne l'allure de cette fonction pour différentes valeurs de A

On remarque que la vitesse de descente est pratiquement nulle pendant un certain temps et donc, qu'en fonction de l'éloignement du point considéré au puits, il faut attendre que ce temps soit écoulé pour que l'effet du pompage se manifeste. 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 remarque également que la surface sous-tendue par ces courbes représente l'abaissement de la nappe aquifère puisque cette grandeur est l'intégrale de la vitesse.

Les courbes ne se coupent jamais car au fur et à mesure qu'on s'éloigne du point de pompage, l'abaissement et la vitesse d'abaissement de la hauteur piézométrique diminuent.

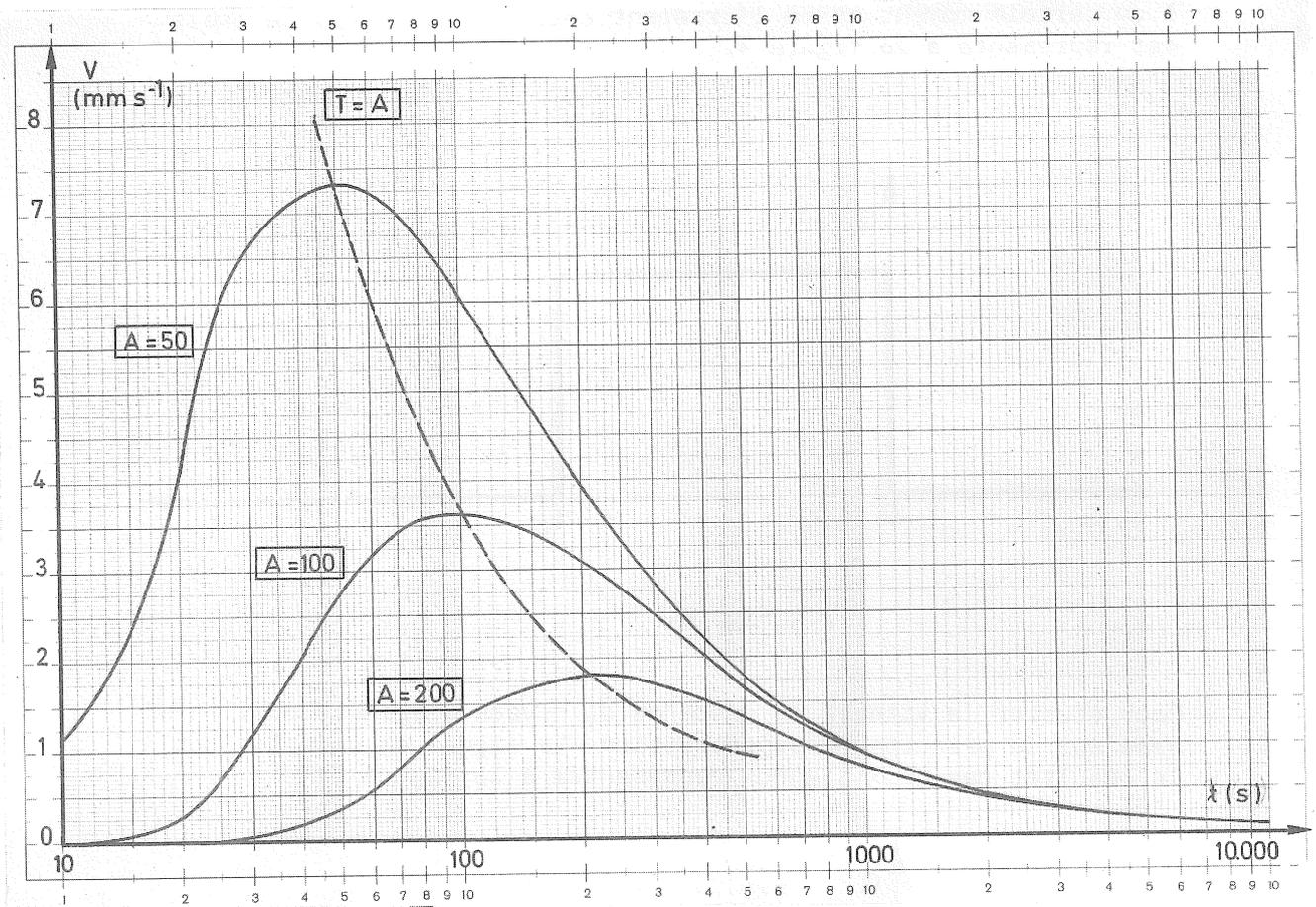


Fig. 3 - $V = \frac{e^{-\frac{A}{t}}}{T}$

3.4 Réponse de la vitesse de variation 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 est représenté à la figure 4.

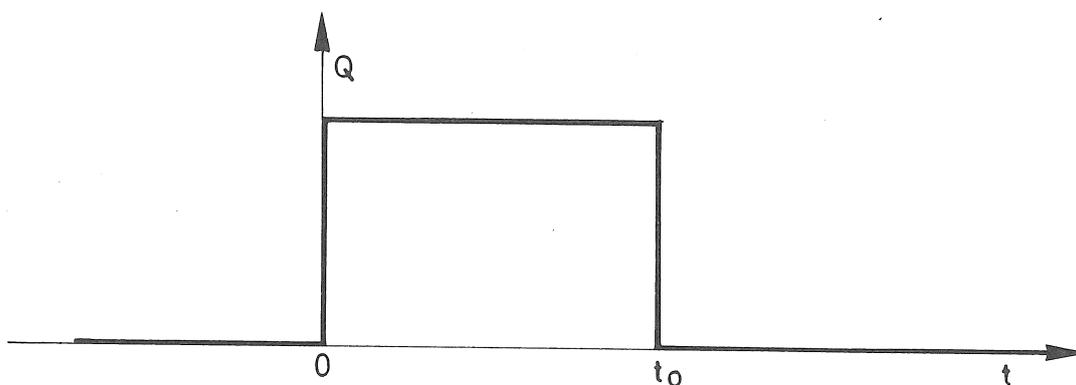


Fig. 4.

Pour étudier la vitesse de descente du niveau piézométrique, on se base sur le principe de superposition. Le signal en question est le résultat des deux signaux représentés à la figure 5.

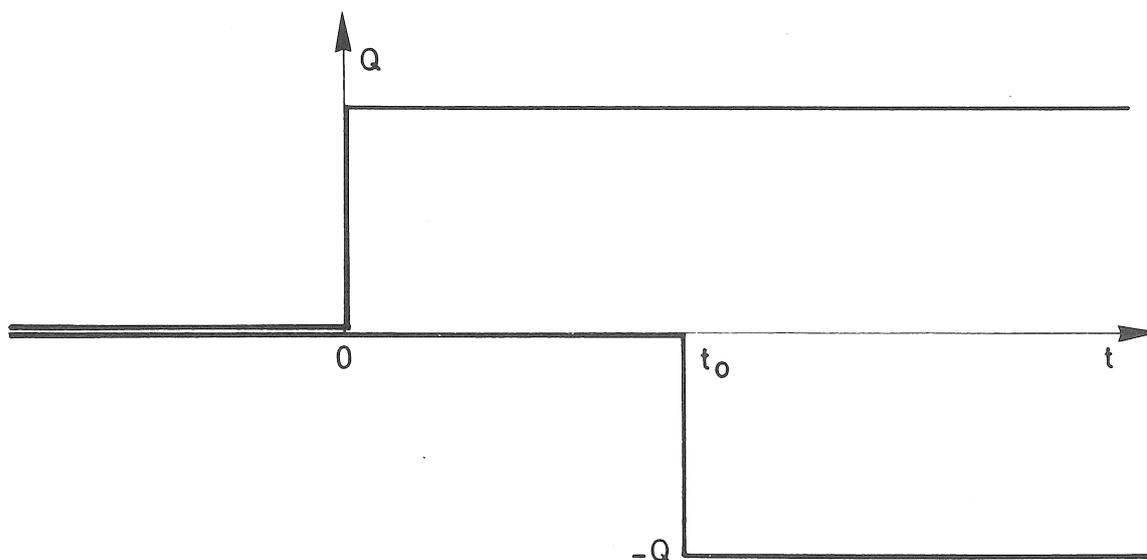


Fig. 5.

Comme nous connaissons la solution fondamentale pour ces deux signaux distincts, il suffit 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

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

La solution au signal 2 est

$$Z_2 = -C \frac{e^{-\frac{A}{t-t_0}}}{t-t_0} \quad \text{pour } t > t_0$$

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

$$Z^* = \frac{Q}{4\pi kH} \left(\frac{e^{-\frac{A}{t+t_0}}}{t+t_0} - \frac{e^{-\frac{A}{t}}}{t} \right) \quad (13)$$

On étudie maintenant le moment où la vitesse s'annule, c'est-à-dire le moment où, suite à ce signal de pompage particulier, le niveau cesse de descendre pour remonter par la suite.

A ce moment l'expression (13) se réduit à

$$\frac{e^{-\frac{A}{t+T_0}}}{t+T_0} = \frac{e^{-\frac{A}{t}}}{t} \quad (14)$$

et on remarque que la variable kH (transmissivité) n'apparaît plus.

L'expression (14) peut aussi s'écrire

$$\ln \frac{t+T_0}{t} = A \left(\frac{1}{t} - \frac{1}{t+T_0} \right)$$

3.5 Résolution de l'équation $\ln \frac{t + T_0}{t} = A \left(\frac{1}{t} - \frac{1}{t + T_0} \right)$

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

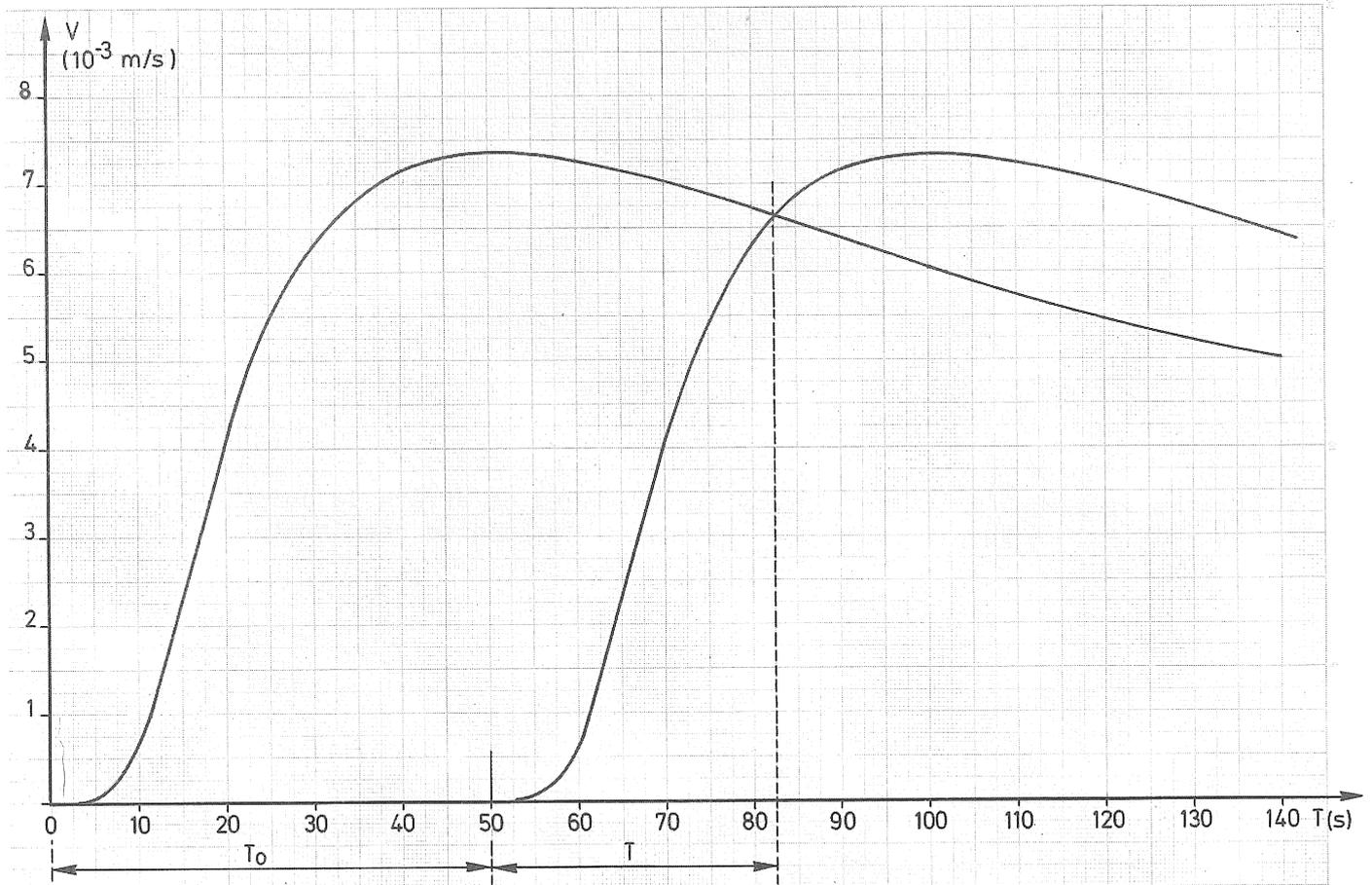


Fig. 6.

$$\left. \begin{array}{l} A = 50 \\ T_0 = 50 \end{array} \right\} \rightarrow T = 32,5$$

Etant donné le nombre des valeurs que peuvent prendre les paramètres A et T_0 , on a préféré résoudre l'équation (14) au moyen de l'ordinateur par la méthode de Newton-Raphson.

Les valeurs de T en fonction de A pour différentes valeurs de T_0 ont été mises sous forme de tableau (tableau 2, p. 18).

En portant A en fonction de T pour différentes valeurs de T_0 (fig. 7, p. 19), on remarque que les solutions pour une valeur donnée du rapport $\frac{T_0}{A}$ s'alignent sur des droites parallèles à la droite $T = A$.

Il en résulte que si on connaît la valeur de T pour un couple de valeurs T_0 et A , on peut connaître toutes les valeurs de T pour le rapport $\frac{T_0}{A}$ observé en ce point en fonction de A .

En conclusion, par la mise en évidence du rôle que joue la variable adimensionnelle $\frac{T_0}{A}$ on élimine un paramètre et on peut présenter la solution sous trois formes :

$$\frac{T_0}{A} \text{ en fonction de } \frac{T}{T_0}$$

$$\frac{T}{A} \text{ en fonction de } \frac{T}{T_0}$$

$$\frac{T + T_0}{A} \text{ en fonction de } \frac{T}{T_0}$$

Les solutions adimensionnelles sont représentées sur la partie gauche de la figure 9 (p. 25).

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

$$\frac{e^{-\frac{A}{T+T_0}}}{T+T_0} = \frac{e^{-\frac{A}{T}}}{\frac{T}{A}}$$

ou

$$\frac{e^{-\frac{\frac{A}{T}}{1+\frac{T_0}{T}}}}{1+\frac{T_0}{T}} = \frac{e^{-\frac{A}{T}}}{\frac{T}{A}}$$

qui est une relation liant univoquement $\frac{A}{T}$ à $\frac{T}{T_0}$

Tableau 2 - Valeurs de T pour différents A et T₀

T T ₀ \ A	1	2	5	10	20	50	100	200	500	1.000	2.000	5.000	10.000
1	0,6508	1,581	4,535	9,51	19,48	49,5	100	200	500	1.000	2.000	5.000	10.000
2	0,4958	1,302	4,130	9,07	19,02	49	99	200	500	1.000	2.000	5.000	10.000
5	0,3399	0,9020	3,254	7,917	17,7	47,55	97,4	198	500	1.000	2.000	5.000	10.000
10	0,2667	0,6799	2,479	6,51	15,81	45,35	95,1	194,8	495	1.000	2.000	5.000	10.000
20	0,2185	0,5337	1,855	4,96	13,01	41,3	90,7	190	490	990	2.000	5.000	10.000
50	0,1763	0,4128	1,334	3,39	9,02	32,54	79	177	475	974	1.980	5.000	10.000
100	0,1542	0,3527	1,092	2,67	6,80	24,8	65	158	453	951	1.948	4.950	10.000
200	0,1372	0,3083	0,9249	2,18	5,37	18,6	49,6	130	413	907	1.902	4.900	9.900
500	0,1199	0,2650	0,7708	1,76	4,13	13,3	34	90	325	791	1.770	4.755	9.740
1.000	0,1097	0,2399	0,6858	1,54	3,53	10,9	26,7	68	248	651	1.581	4.535	9.510
2.000	0,1011	0,2193	0,6185	1,37	3,08	9,2	21,8	53,4	186	496	1.302	4.130	9.070
5.000	0,0917	0,1972	0,5483	1,20	2,64	7,7	17,6	41,3	133	340	902	3.254	7.907
10.000	0,0871	0,1834	0,5054	1,097	2,40	6,9	15,4	35,3	109	267	680	2.479	6.508

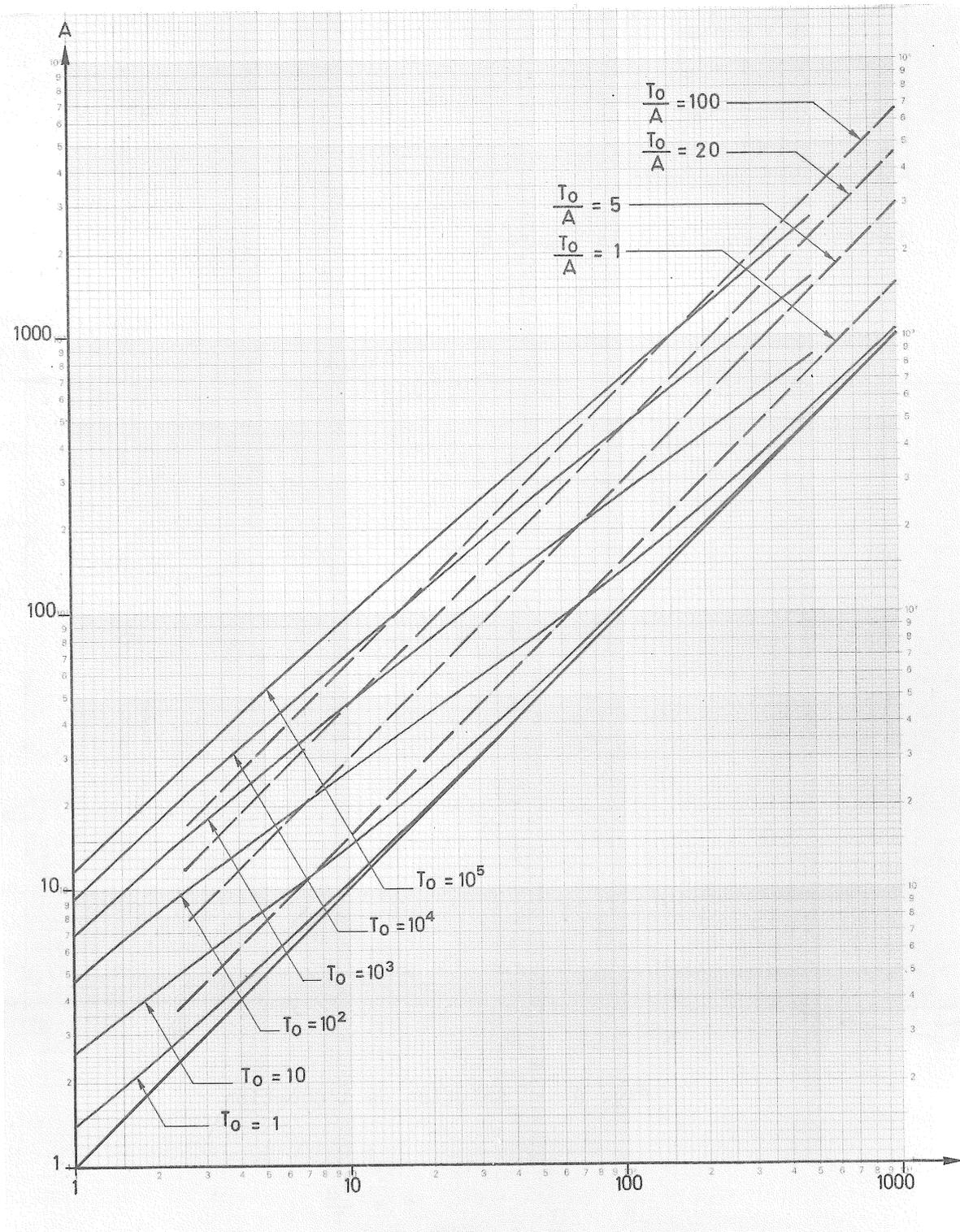


Fig.7 - Résolution de l'équation

$$\ln \frac{T + T_0}{T} = A \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T + T_0} \right)$$

En effet, en explicitant, on obtient

$$\frac{T}{A} = \frac{1 - \frac{1}{1 + \frac{T_0}{T}}}{\ln \left(1 + \frac{T_0}{T} \right)}$$

(15)

fonction reproduite à la figure 8.

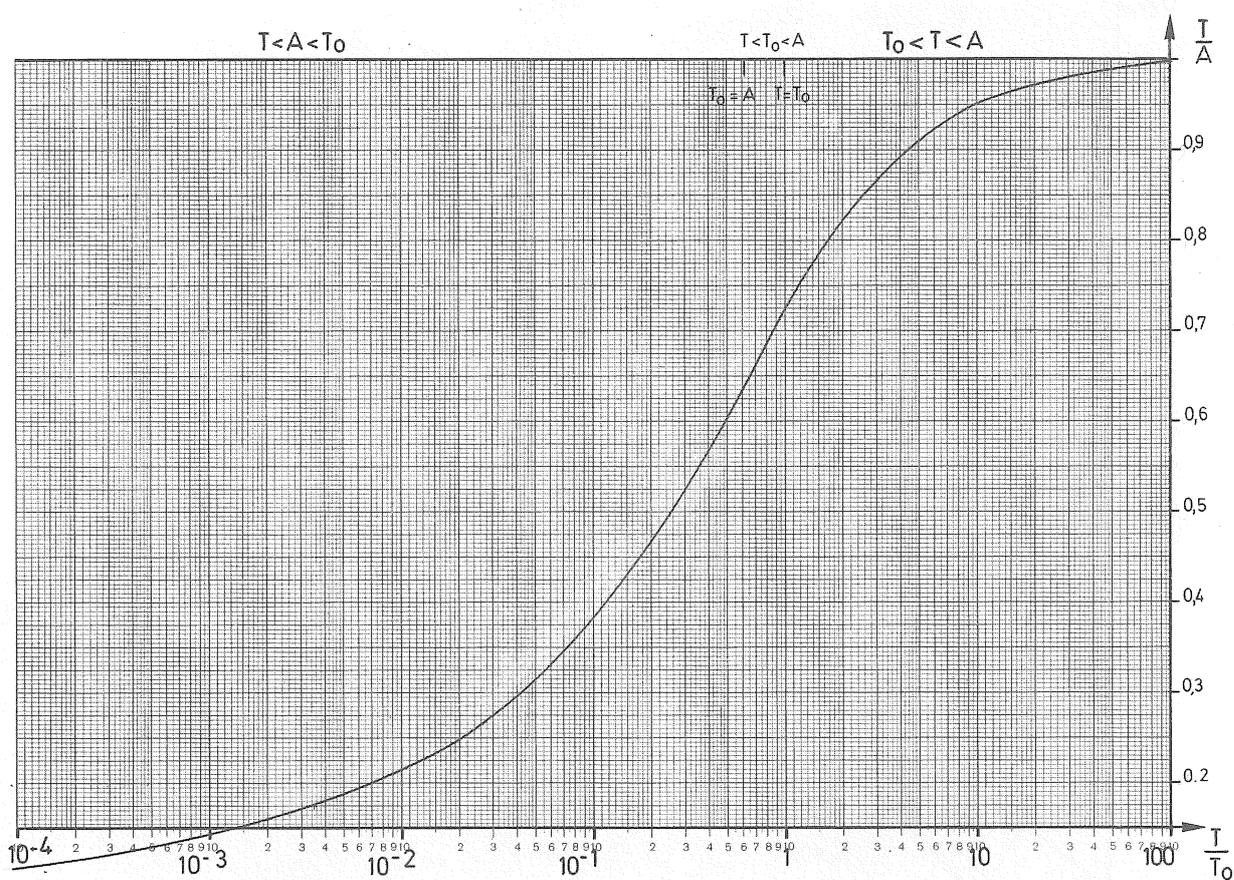


Fig. 8 - Solution de l'équation

$$\frac{T}{A} = \frac{1 - \frac{1}{1 + \frac{T_0}{T}}}{\ln \left(1 + \frac{T_0}{T} \right)}$$

De la même façon, on peut obtenir $\frac{T + T_0}{A} = \frac{T}{A} \left(1 + \frac{T_0}{T}\right)$.

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

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

3.6 Exploitation des résultats de l'analyse théorique

3.61 Mesure du coefficient d'emmagasinement

Si, à la suite d'un pompage de durée T_0 , on parvient à mesurer le temps T nécessaire pour 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 aquifère puisque c'est le paramètre essentiel permettant de calculer le rayon d'influence selon la méthode de Jacob.

En effet, $R_{\text{influence}} = 1,5 \sqrt{\alpha t}$

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,

$$\alpha = \frac{kE}{n_e} = \frac{kH}{S} = \frac{T}{S} \quad (16)$$

avec T transmissivité
 S 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, égal à 0,5 à 2 % dans les limons et à 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} .

3.62 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, d'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 (§3.2, p. 9).

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

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

$$\xi = C \left[-E_i \left(-\frac{A}{T} \right) + E_i \left(-\frac{A}{T+T_0} \right) \right] \quad (17)$$

Etant donné que la mesure de $\frac{T_0}{T}$ donne directement $\frac{A}{T}$ et $\frac{A}{T+T_0}$,

il est très facile de déterminer l'expression entre crochets et, moyennant la mesure de ξ pour $t = T$, d'évaluer C .

Enfin, on estime la transmissivité par l'expression

$$kH = \frac{Q}{4\pi C} = \frac{Q \left[W \frac{(T+T_0)}{A} - W \frac{(T_0)}{A} \right]}{4\pi \xi} \quad (18)$$

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 de la nappe aquifère.

ξ au temps T_0 est donné par l'expression

$$\xi_0 = C \left[-E_i \left(-\frac{A}{T_0} \right) \right] = C W \left(\frac{T_0}{A} \right)$$

Puisque la valeur de $\frac{T}{T_0}$ précède celle de $\frac{T_0}{A}$, on obtient

$$kH = \frac{Q W \left(\frac{T_0}{A} \right)}{4\pi \xi_0}$$

3.7 Présentation des résultats

3.71 Abaque de la figure 9

L'abaque de la figure 9 se compose de deux parties :

- à gauche, $\frac{T_0}{A}$, $\frac{T}{A}$, $\frac{T+T_0}{A}$ en fonction de $\frac{T}{T_0}$

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

L'ordonnée est commune pour $\frac{t}{A}$, $\frac{T_0}{A}$, $\frac{T}{A}$ et $\frac{T+T_0}{A}$

L'abscisse en bas porte la valeur de $\frac{T}{T_0}$

L'abscisse en haut porte la valeur de W

Les trois échelles sont logarithmiques.

3.72 Exemple

Supposons qu'on réalise pendant 10 min un débit de 2 l/s (7,2 m³/h) et qu'on mesure à 20 m du puits un abaissement piézométrique de 1 m à 10 min et de 1,6 m à 16 min 30 s.

Les données sont les suivantes :

$$T_0 = 600 \text{ s}$$

$$T = 300 \text{ s}$$

$$\xi_0 = 1 \text{ m}$$

$$\xi_m = 1,6 \text{ m}$$

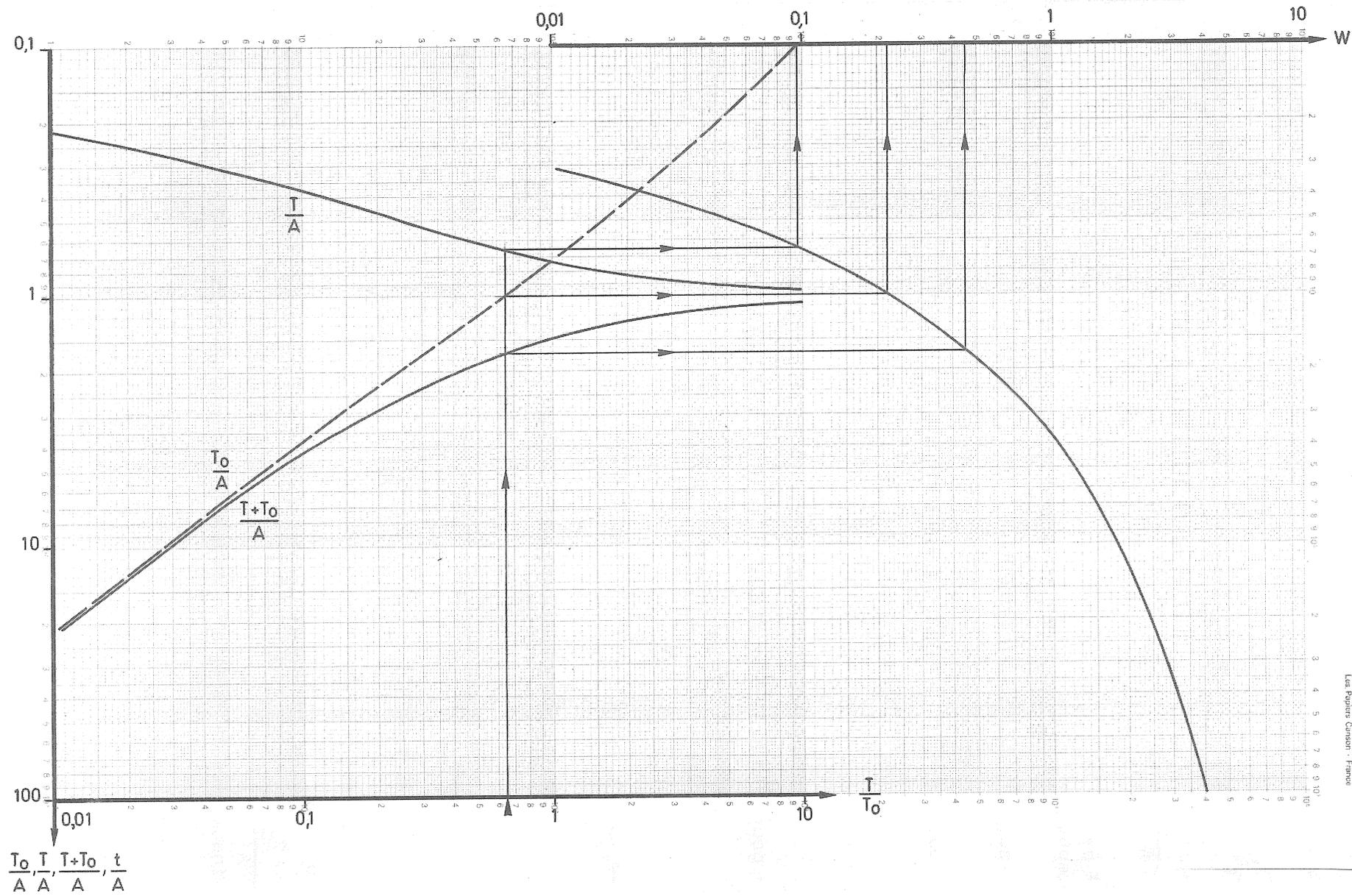
$$Q = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$r = 20 \text{ m}$$

On résoud le problème comme suit.

On calcule $\frac{T}{T_0} = 0,65$.

On trace, à partir de cette valeur définie sur l'abscisse basse de l'abaque de la figure 9, une verticale qui intercepte les trois courbes de gauche en trois points :



Les Editions Carsson - France

Fig. 9. $\frac{T_0}{A}, \frac{T}{A}, \frac{T+T_0}{A}$ fonctions de $\frac{T}{T_0}$
 W fonction de $\frac{t}{A}$

$$\left. \begin{aligned} \frac{T}{A} &= 0,65 \\ \frac{T_0}{A} &= 1 \\ \frac{T + T_0}{A} &= 1,65 \end{aligned} \right\} \rightarrow A = 600 \text{ s}$$

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

- pour $\frac{T}{A} = 0,65$, $W = 0,095$

- pour $\frac{T + T_0}{A} = 1,65$, $W = 0,450$

$\rightarrow \Delta W = 0,355$

$$kH = \frac{2 \cdot 10^{-3} \times 0,355}{4\pi \times 1,6} = 3,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

- pour $\frac{T_0}{A} = 1$, $W = 0,22$

$$kH = \frac{2 \cdot 10^{-3} \times 0,22}{4\pi \times 1} = 3,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

La valeur du coefficient d'emmagasinement est alors

$$S = \frac{4AkH}{r^2} = \frac{4 \times 600 \times 3,5 \cdot 10^{-5}}{(20)^2} = 2 \cdot 10^{-4}$$

Il s'agit donc d'une nappe captive.

3.73 Abaque final

En répétant pour différentes valeurs de $\frac{T}{A}$, le calcul de W_0 (W pour la valeur correspondante de $\frac{T_0}{A}$) et de W_m (différence entre W pour $\frac{T + T_0}{A}$ et W pour $\frac{T}{A}$), il est possible de présenter les résultats finaux sous la forme d'un abaque unique commode à utiliser (fig.10).

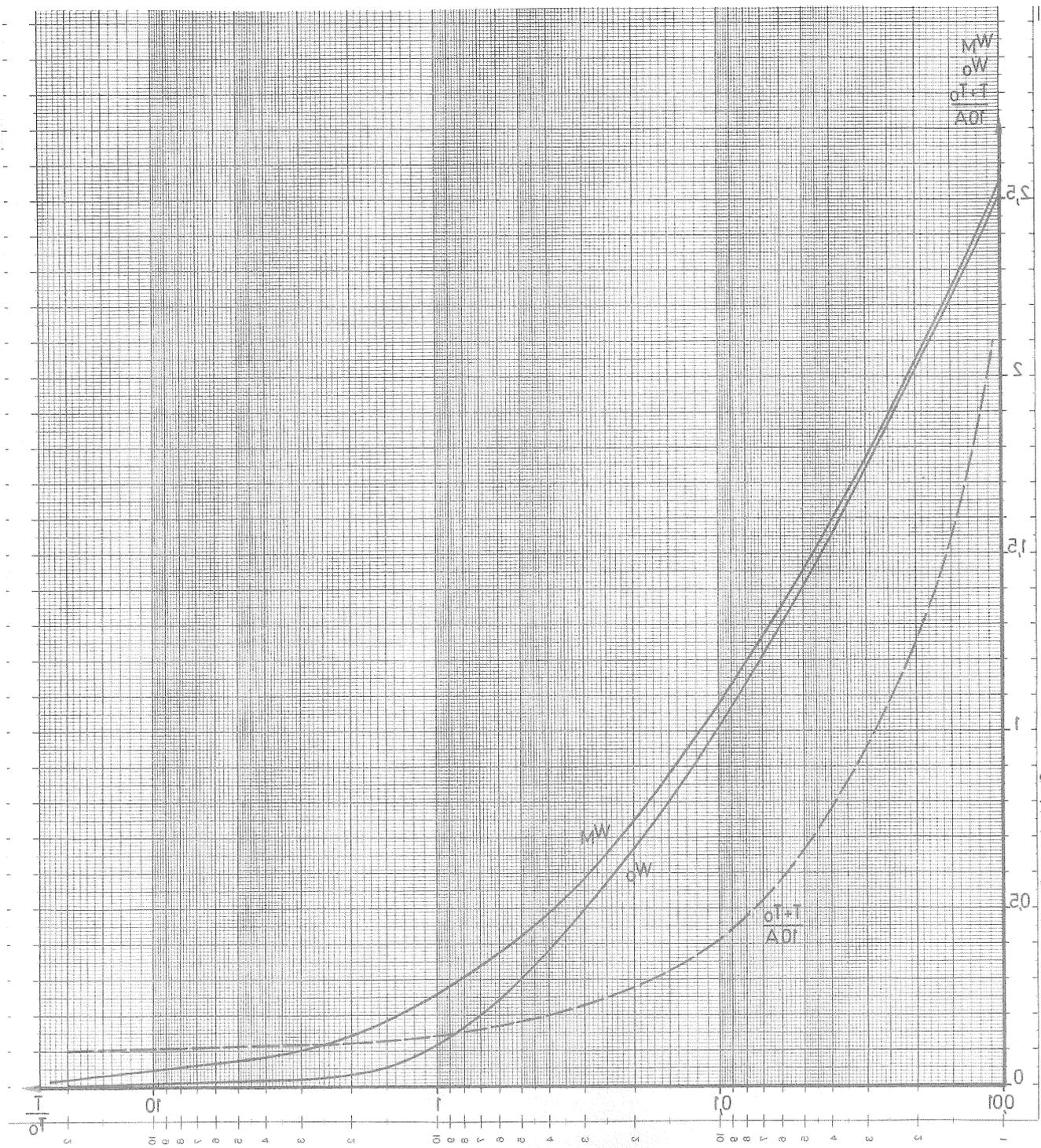


Fig. 10 - Abaque pour la méthode du niveau stationnaire

Les valeurs de W_m , W_0 et $\frac{T+T_0}{10A}$ sont portées sur l'abaque de la figure 10 en fonction de $\frac{T}{T_0}$ (échelle logarithmique).

On se réfère à l'exemple du § 3.72.

$$\frac{T}{T_0} = 0,65 \text{ donne directement}$$

$$\frac{T+T_0}{10A} = 0,165$$

$$W_0 = 0,22$$

$$W_m = 0,365$$

valeurs qui permettent de poursuivre facilement les calculs de KH et de S .

On remarque que la valeur de KH est obtenue directement, c'est-à-dire sans l'intermédiaire de S , alors qu'avec les méthodes classiques, au contraire, un système d'équations à deux inconnues est résolu graphiquement, soit en traçant la droite (approximation logarithmique), soit en traçant la courbe $(\xi, \frac{r_2}{t})$.

3.8 Domaine d'applicabilité

3.81 Types de nappes aquifères

Pour se trouver dans les conditions d'application de la méthode du niveau stationnaire, il faut que le rapport $\frac{T}{T_0}$ soit compris entre 0,1 et 10. En effet, en dessous de 0,1, la différence entre W_r et W_0 n'est pas assez sensible tandis que pour $\frac{T}{T_0} > 10$, la valeur de W_r n'est plus assez grande. Idéalement, on cherchera à se rapprocher de $\frac{T}{T_0} \approx 1$, puisque W_0 et W_r sont sensibles et bien distincts, tandis que la précision de mesure des temps T et T_0 sera la même.

Dans le cas $\frac{T}{T_0} = 1$, on a $T = T_0 \approx 0,73 A$

Si 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 est ainsi diminué), on adoptera 40 secondes comme valeur minimale de A .

Afin de déterminer le type de nappe aquifère auquel 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'emménagement élevé et faible (tableau 3).

Tableau 3 - Valeurs de A pour différents types de nappes aquifères

A (s)	Nappe libre (r en m)		Nappe captive (r en m)	
	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
Transmissivité faible kH = 10 ⁻⁵ m ² /s	1.000 r ²	5.000 r ²	100 r ²	0,1 r ²

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 transmissivité élevée, la valeur minimale de r sera de 3 à 6 m et tout piézomètre plus éloigné permettra de mesurer facilement T et T_0 . 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 on s'éloigne du puits, les valeurs T et T_0 seront très grandes.

Dans ce cas, on adopte un faible temps de pompage comparé à A (par exemple $T = \frac{A}{10} = 100 r^2$, 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 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 .

3.82 Rapidité de la méthode de mesure

Dans les conditions idéales qu'on peut espérer 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 $\frac{C}{A}$ nécessaire pour obtenir un régime quasi permanent est de 50 à 100, on conclut que la méthode est 20 à 100 fois plus rapide que les méthodes classiques de détermination des paramètres kH et S .

3.83 Sous-sol hétérogène

Dans le cas d'un sous-sol hétérogène, on recommande l'installation représentée à la figure 11.

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

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

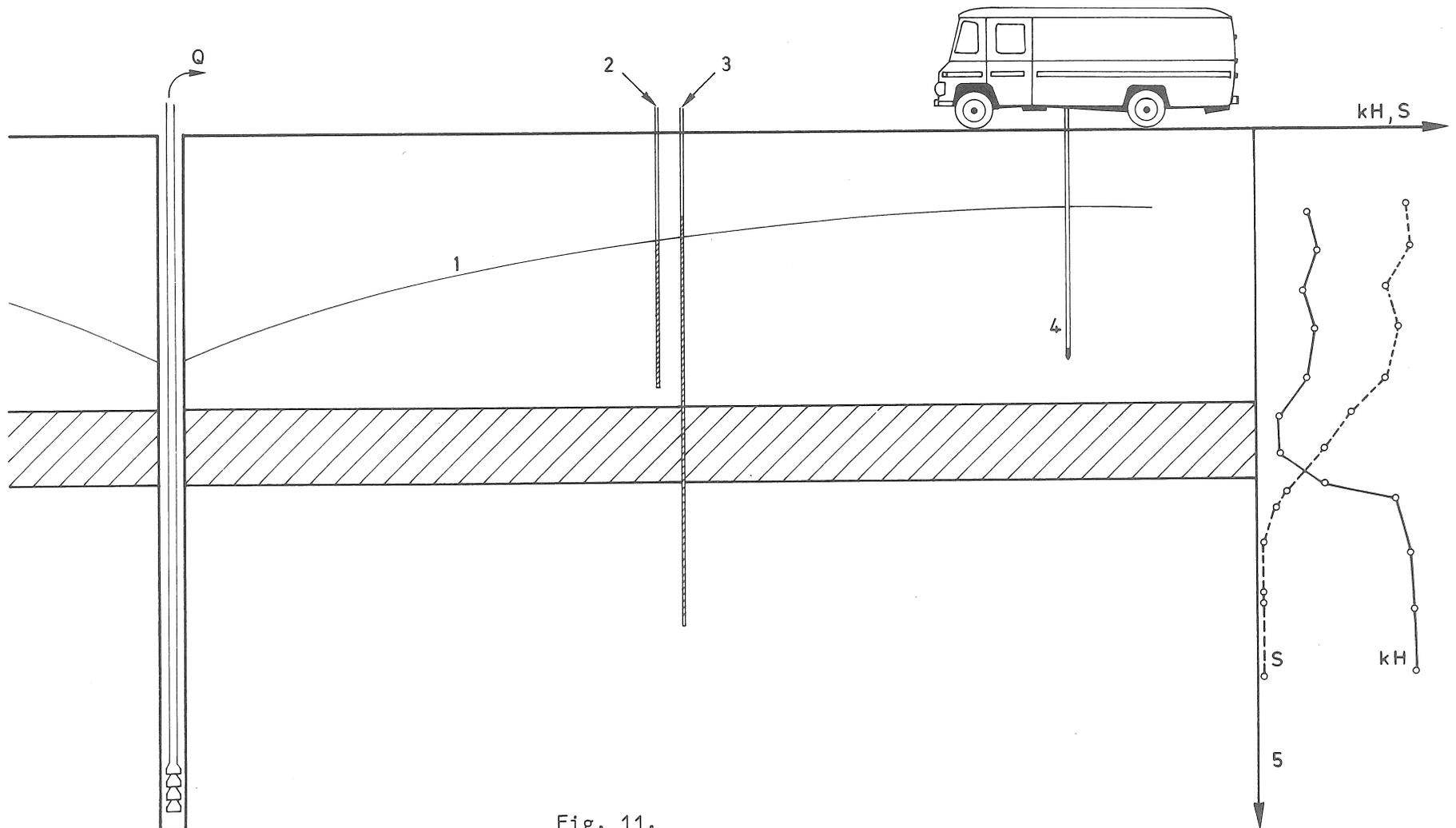


Fig. 11.

1. surface libre
2. piézomètre nappe libre
3. piézomètre nappe captive
4. piézomètre à faible temps de réponse
5. profondeur

4. METHODE DU NIVEAU DE RETOUR

4.1 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 lorsqu'on arrête le pompage. Etant donné les faibles temps nécessaires pour faire les mesures, elle s'appuie sur la formulation en régime transitoire.

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

Lorsqu'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 :

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

avec Q débit de la pompe
 kH transmissivité
 t temps
 ζ variable d'intégration
 r distance
 $\alpha = \frac{kH}{S}$
 S coefficient d'emmagasinement

Pour simplifier les écritures, on pose $\frac{r^2}{4\alpha} = A$

$$W(u) = W\left(\frac{A}{T}\right) = \frac{A}{T} \int_0^\infty \frac{e^{-\omega}}{\omega} d\omega$$

La valeur de $W\left(\frac{A}{T}\right)$ est une intégrale logarithmique dont les valeurs ont été données dans le tableau 1 (p.11) et dont le graphique est représenté sur la figure 2 $\left(\frac{T}{A} = \frac{1}{U}\right)$ (p. 11).

Pour une valeur donnée de A (par exemple $A = 1$ s) et en choisissant $Q = 4\pi kH$, le niveau piézométrique en fonction du temps peut être représenté par le graphique de la figure 12 (p. 34).

Lorsque la pompe fonctionne seulement pendant un temps T_0 , on peut obtenir l'évolution du niveau piézométrique en superposant les solutions fondamentales.

La première a pour origine des temps $t = 0$ et la seconde, comptée négativement, $t = T_0$. Il faut en effet remarquer qu'un débit constant de $t = 0$ à $t = T_0$ est la somme d'un débit constant débutant au temps $t = 0$ et d'une injection de même débit débutant au temps $t = T_0$.

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 (p. 34). On remarque que le niveau continue à descendre pendant un certain temps pour atteindre un minimum et remonter ensuite en repassant notamment par le niveau défini par l'arrêt de la pompe.

L'équation définissant le temps R pour lequel cette condition est réalisée, est

$$\frac{Q}{4\pi kH} \int_{T_0}^{T_0 + R} \frac{e^{-\frac{r^2}{4\alpha\zeta}}}{\zeta} d\zeta = \frac{Q}{4\pi kH} \int_0^R \frac{e^{-\frac{r^2}{4\alpha\zeta}}}{\zeta} d\zeta \quad (18)$$

Etant donné qu'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 $\frac{T_0}{A}$.

$\frac{T_0}{A}$ 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 $\frac{R}{T_0}$ correspond une seule valeur de $\frac{T_0}{A}$ et de $\frac{R}{A}$.

Dès lors, connaissant $\frac{R}{T_0}$ et en faisant appel à ces solutions, on peut obtenir $\frac{T_0}{A}$ et $\frac{R}{A}$ qui donnent directement la valeur de A (T_0 et R sont mesurés sur chantier).



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

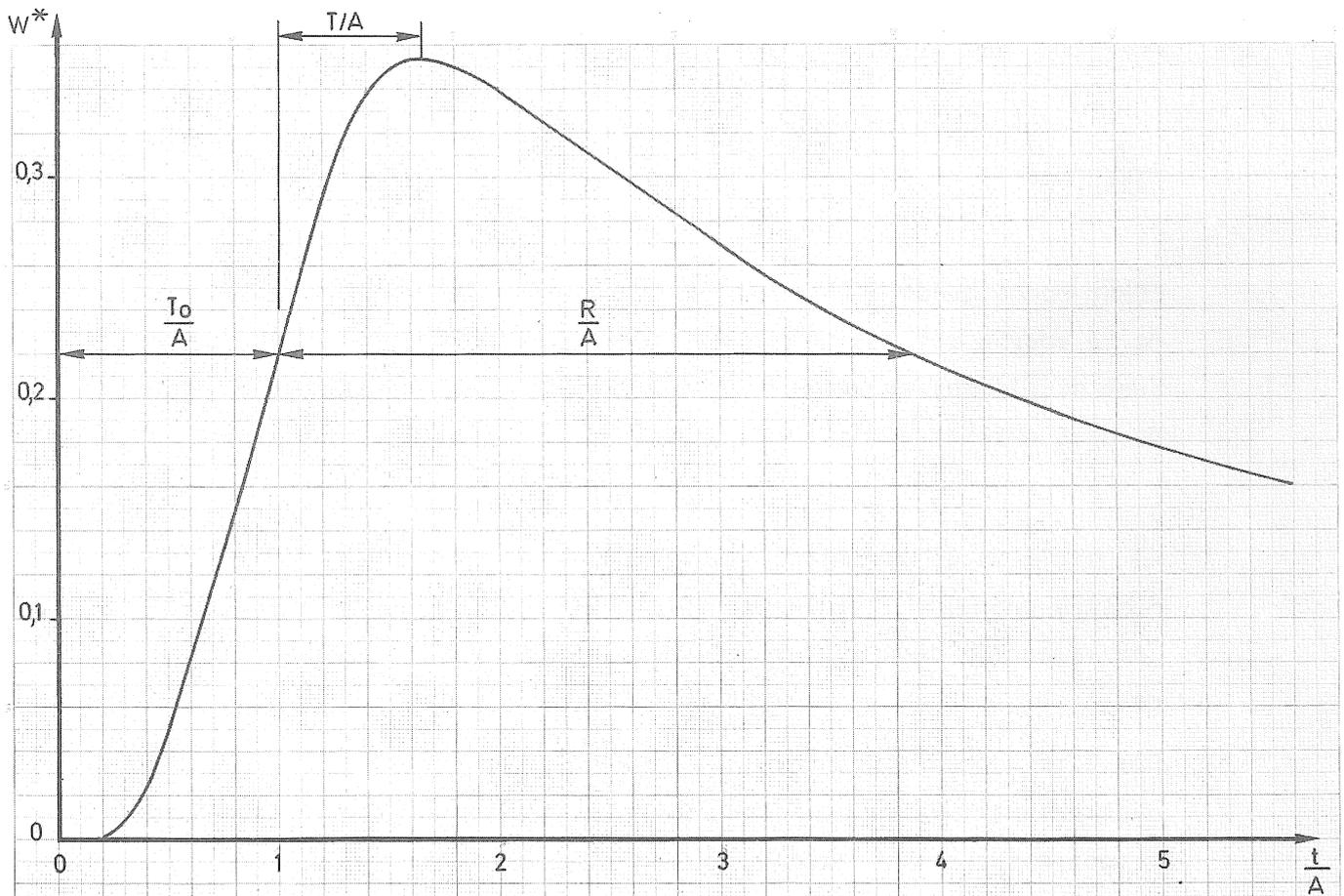


Fig. 13 $W^*(\frac{t}{A})$ pour $\frac{I_0}{A} = 1$

De plus, à une valeur du rapport $\frac{R}{T_0}$ correspond une seule valeur de $W\left(\frac{T_0}{A}\right)$. Il en découle que, connaissant $\frac{R}{T_0}$, on peut, en faisant appel à la solution $W = W\left(\frac{T_0}{A}\left(\frac{R}{T_0}\right)\right)$, obtenir la valeur de W et partant, grâce à la mesure et au choix de $\xi(T_0)$, obtenir l'expression

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

et dès lors

$$kH = \frac{Q}{4\pi} \frac{W}{\xi_0}$$

4.3 Résolution de l'équation fondamentale

En opérant dans l'équation fondamentale (18) la substitution $\zeta = Aw$

où $A = \frac{r^2}{4\alpha}$, on obtient :

$$\int_{\frac{T_0}{A}}^{\frac{T_0 + R}{A}} \frac{e^{-\frac{1}{w}}}{w} dw = \int_0^R \frac{e^{-\frac{1}{w}}}{w} dw$$

$\frac{1}{t} e^{-\frac{1}{t}}$ est une fonction proportionnelle à la vitesse de descente du niveau piézométrique.

Posons $v(t) = \frac{1}{t} e^{-\frac{1}{t}} = \frac{1}{t e^{-\frac{1}{t}}}$ où v est indépendante de A .

On peut réécrire l'équation :

$$\int_0^{\frac{T_0 + R}{A}} v(t) dt - \int_0^{\frac{T_0}{A}} v(t) dt = \int_0^{\frac{t}{A}} v(t) d(t)$$

ou encore

$$W\left(\frac{T_0 + R}{A}\right) - W\left(\frac{T_0}{A}\right) = W\left(\frac{R}{A}\right)$$

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 $W \frac{(T_0 + R)}{A} - W \frac{(T_0)}{A}$ et $W \frac{(R)}{A}$ calculées sous forme de séries.

Les résultats sont donnés dans le tableau 4.

Afin d'étudier l'interdépendance des paramètres on a porté en graphique les variables suivants :

$$\frac{R}{A} = F\left(\frac{T_0}{A}\right) \text{ (fig. 14, p. 38)}$$

On remarque que pour une valeur de A donnée (une nappe aquifère définie et un piézomètre désigné), R croît au fur et à mesure que T_0 décroît. Ceci veut dire que, si sur chantier on obtient une valeur de R trop petite pour être mesurée avec précision, il convient de raccourcir le temps de pompage T_0 .

$$\frac{R}{A}, \frac{T_0}{A}, \frac{R + T_0}{A} = F\left(\frac{R}{T_0}\right) \text{ (fig. 15, p. 39)}$$

Etant donné que les variables $\frac{R}{A}$ et $\frac{T_0}{A}$ sont déterminés univoquement, le rapport $\frac{R}{T_0}$ a été choisi comme paramètre significatif du problème.

Outre les courbes $\frac{R}{A}$ et $\frac{T_0}{A}$, on a représenté la courbe de $\frac{R + T_0}{A}$ parce les valeurs fluctuent dans des ordres de grandeur plus restreints et permettent de définir les conditions optimales de travail.

On a donc représenté la courbe $\frac{R + T_0}{A}$ pour pouvoir calculer la valeur de A. En effet, $R + T_0$ est le temps total mis à faire la mesure.

On remarque que ce temps total est minimum pour un rapport de $\frac{R}{T_0}$ égal à 1 et qu'en outre la courbe est symétrique par rapport à un axe vertical tracé pour cette valeur.

On peut donc déduire que les conditions optimales de travail sont rencontrées pour une valeur du rapport de $\frac{R}{T_0}$ comprise entre 0,1 et 10, ce qui correspond au domaine de plus grande précision de la mesure de $\frac{R}{T_0}$.

Tableau 4 - Valeurs de W , $\frac{R}{T_0}$ et $\frac{R + T_0}{A}$

pour différentes valeurs de $\frac{T_0}{A}$

$\frac{T_0}{A}$	$\frac{(R + T_0)}{A}$	$\frac{R}{T_0}$	W
0,15	632	4.213	$0,227 \cdot 10^{-3}$
0,20	170	850	$1,16 \cdot 10^{-3}$
0,25	65	260	$3,8 \cdot 10^{-3}$
0,30	34	112	$8,6 \cdot 10^{-3}$
0,40	15,2	37	$25 \cdot 10^{-3}$
0,50	9,4	17,8	$48,9 \cdot 10^{-3}$
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	$17,85 \cdot 10^{-3}$	2,468
40	40,2851	$7,13 \cdot 10^{-3}$	3,137
60	60,255	$4,25 \cdot 10^{-3}$	3,534
80	80,237	$2,96 \cdot 10^{-3}$	3,817
100	100,225	$2,25 \cdot 10^{-3}$	4,038

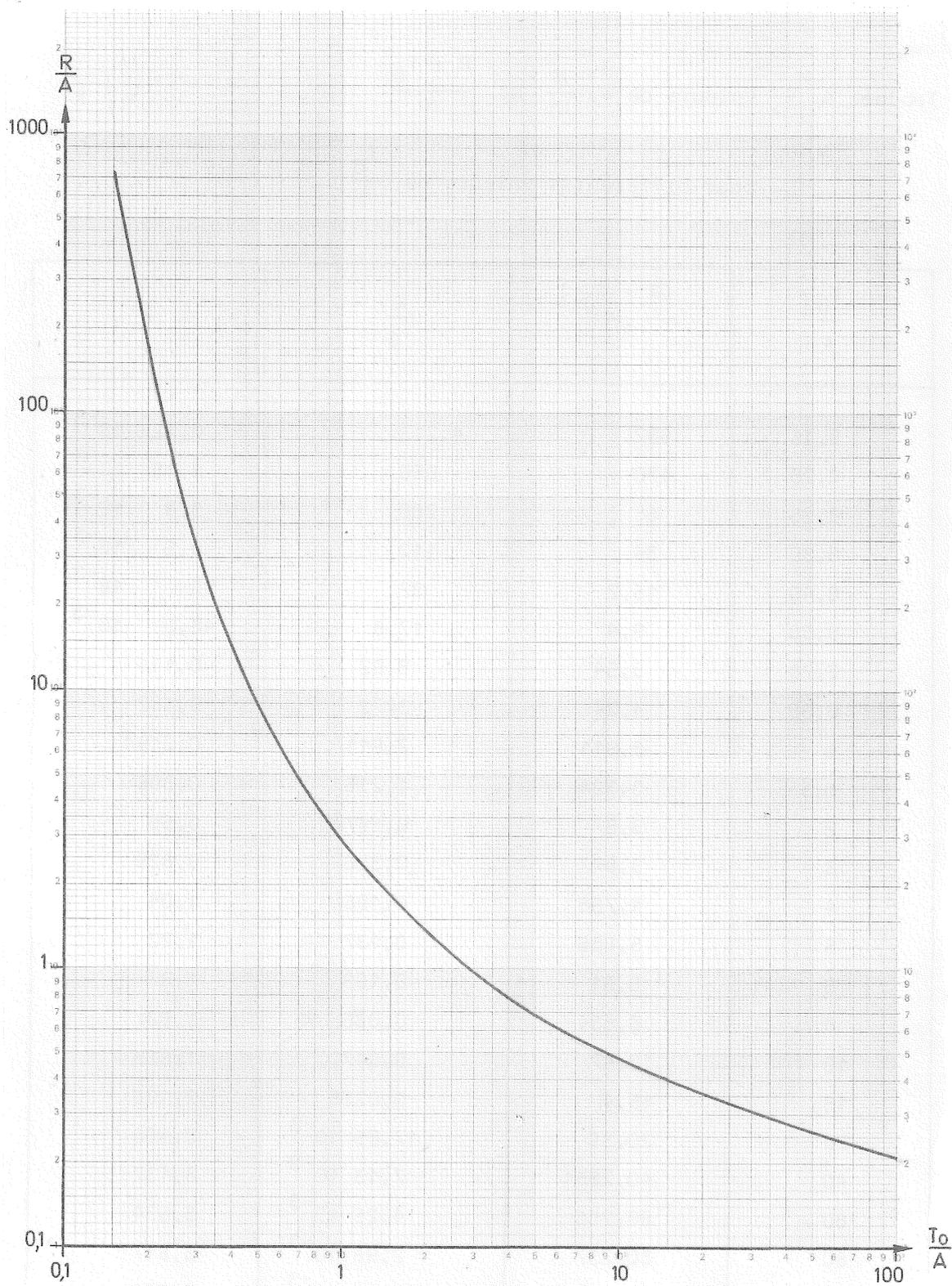


Fig. 14 - $\frac{R}{A} = F\left(\frac{T_0}{A}\right)$

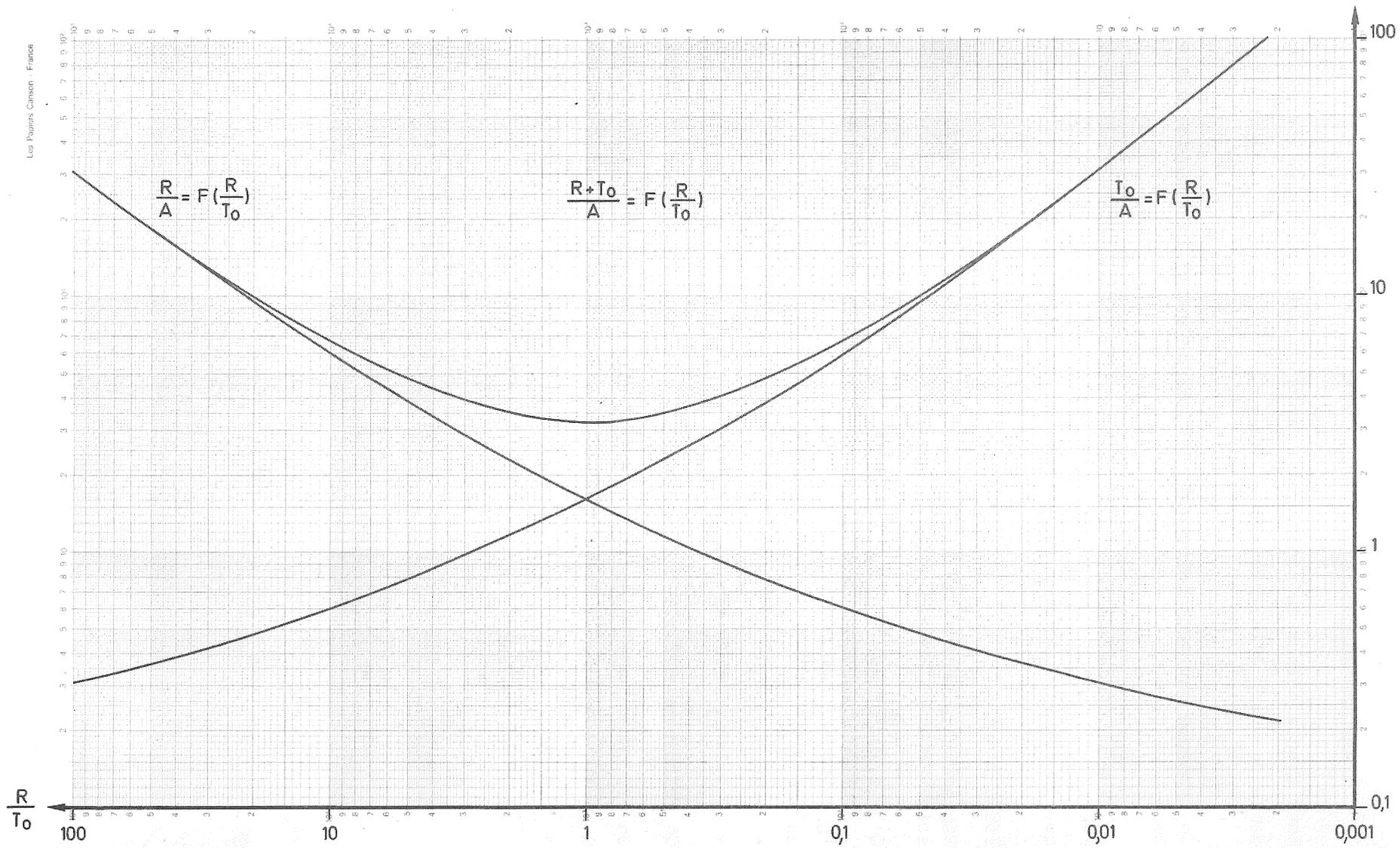


Fig. 15.

4.4 Présentation des résultats. Abaque final (fig. 16,)

Pour chaque valeur du rapport $\frac{R}{T_0}$, on a calculé la valeur correspondante de W par l'intermédiaire de $\frac{A}{T_0}$.

On remarque que pour le domaine optimal défini ci-dessus, la valeur de W oscille entre 1,5 et 0,1.

Pour $\frac{R}{T_0} = 1$, $W = 0,45$ et le temps R est 20 à 50 fois plus court que le temps nécessaire pour s'assurer du mouvement quasi permanent.

Exemple

Reprenons le même exemple que pour la première méthode (§ 3.72, p. 24), soit

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

$$T_0 = 600 \text{ s} = 10 \text{ min}$$

$$\Delta h = 1 \text{ m}$$

$$r = 20 \text{ m}$$

$$R = 1.740 \text{ s} = 29 \text{ min}$$

$$\text{On calcule } \frac{R}{T} = 2,9$$

On lit pour cette valeur sur l'abaque de la figure 16 :

$$R + T_0 = 3,9 A$$

$$W = 0,22$$

On obtient dès lors

$$A = \frac{R + T_0}{3,9} = 600 \text{ s}$$

$$kH = \frac{Q W}{A\pi \Delta h} = \frac{2 \cdot 10^{-3} \times 0,22}{4\pi \times 1} = 3,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

et

$$S = \frac{4 A kH}{r^2} = \frac{4 \times 600 \times 3,5 \cdot 10^{-5}}{(20)^2} = 2 \cdot 10^{-4}$$

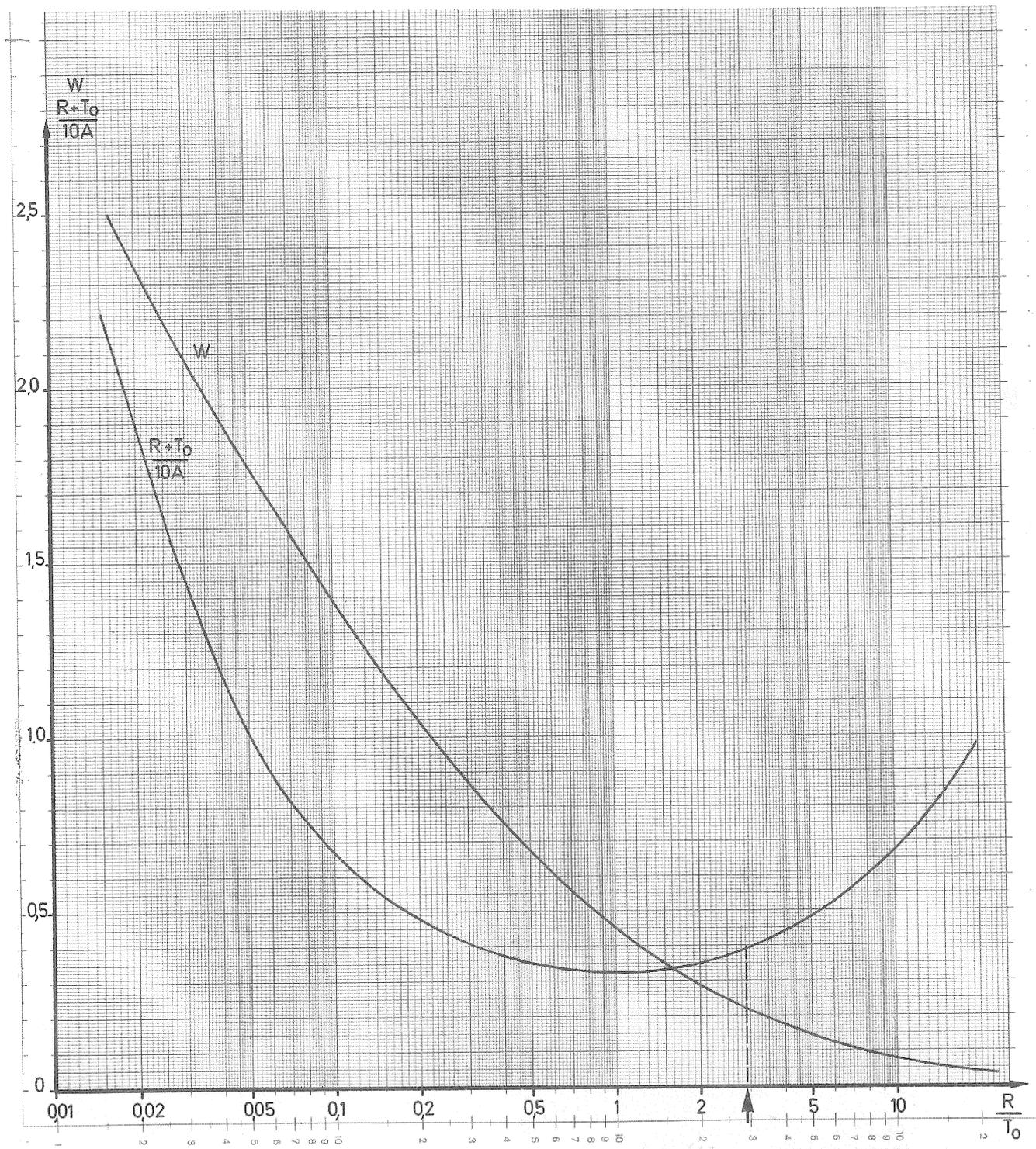


Fig. 16 - Abaque pour la méthode du niveau de retour.

4.5 Domaine d'applicabilité

La condition optimale de réalisation d'un essai est réalisée lorsque $R = T_0 = 1,6 A$.

Si on adopte la limite inférieure de 30 s pour mesurer avec précision les temps, la valeur de A doit être égale à 20 s environ. Ceci permet d'utiliser la méthode du niveau de retour pour des nappes aquifères pour lesquelles de faibles valeurs de A sont inévitables (nappe captive de transmissivité élevée et de faible coefficient d'emmagasinement).

Des temps de pompage faibles par rapport à la valeur de A sont à déconseiller car ils s'accompagnent de plus grandes valeurs de $\frac{R}{T_0}$ et donc d'un temps total de mesure plus élevé.

5. COMPARAISON DES DEUX METHODES DE MESURE

La méthode du niveau stationnaire est toujours plus rapide que la méthode du niveau de retour. Elle est particulièrement intéressante pour de grandes valeurs de A (ou du rapport $\frac{r^2 S}{4kH}$) (fig. 17).

Par contre, l'utilisation pratique de la seconde méthode est plus aisée. Alors que la première méthode requiert une instrumentation plus sophistiquée (l'enregistrement est recommandable), 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 (voltmètre ou 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 note le temps. On attend que le niveau remonte et que le voyant s'allume à nouveau. On arrête alors le chronomètre.

Lorsqu'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 faisant une règle de trois sur la valeur de l'abaissement arbitraire du départ, il est possible d'obtenir l'abaissement pour lequel le temps d'exécution des mesures est minimum. On remarque qu'en milieu homogène, cet abaissement est indépendant de l'éloignement du piézomètre du puits.

Il est possible, moyennant plusieurs mesures avec le même piézomètre, de vérifier si les valeurs de A et de kH sont reproductibles. Lorsque les valeurs obtenues sont trop dispersées, les hypothèses de départ ne sont pas vérifiées.

Enfin, si on applique conjointement les deux méthodes, les contrôles sont plus nombreux.

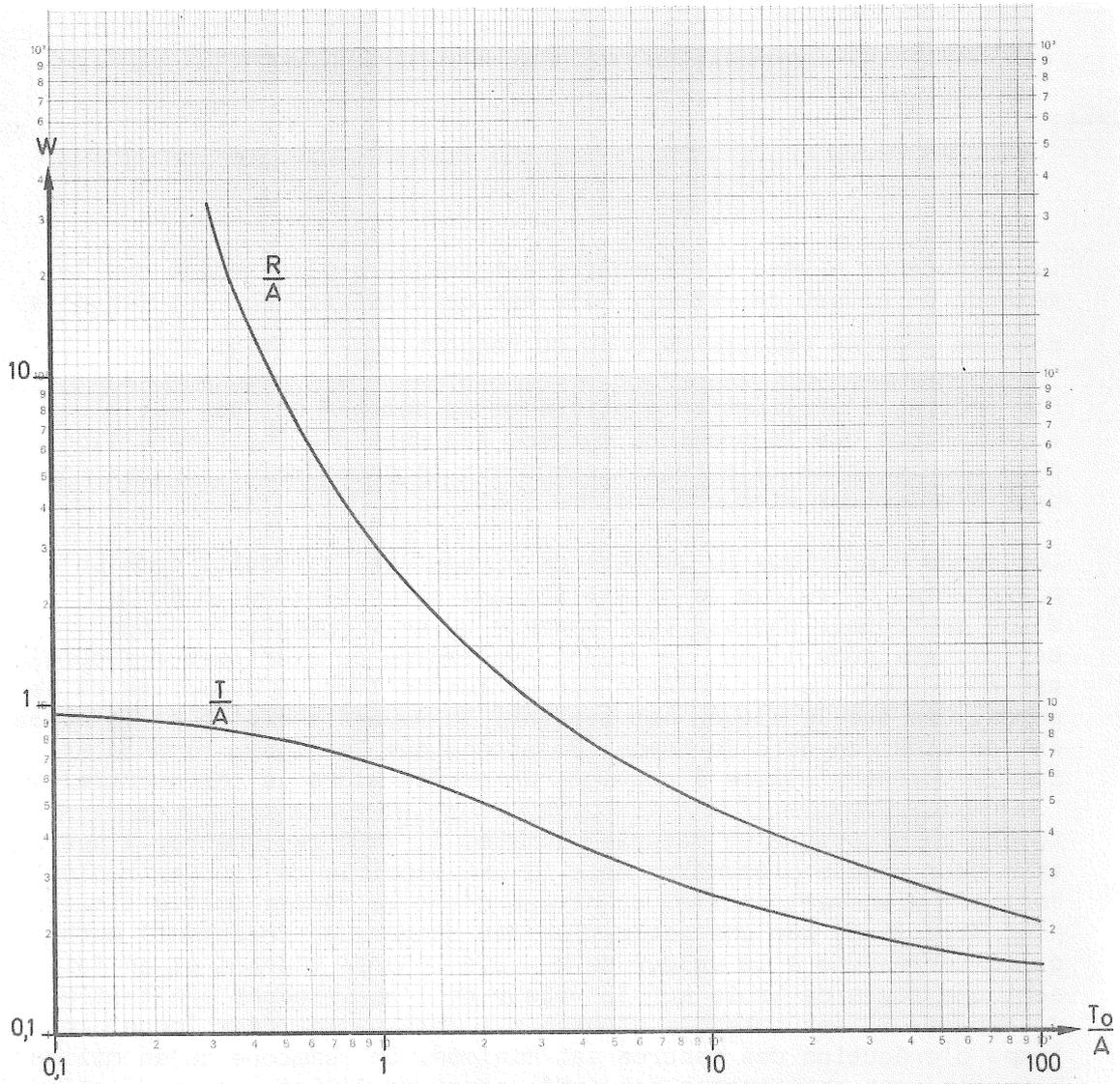


Fig. 17 - Comparaison des deux méthodes de mesure.

6. 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 de mesure 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 (T_0) et le rabattement atteint lors de l'arrêt du pompage (ξ_0).

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 $\frac{T}{T_0}$, 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 ξ_0 .

Ici aussi moyennant le calcul du paramètre adimensionnel $\frac{R}{T_0}$, on obtient par un autre abaque les valeurs de KH et de S .

Grâce aux expériences réalisées sur divers chantiers, 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 T_0 étaient exactes.

Les valeurs de transmissivité obtenues sont parfaitement confirmées par les méthodes classiques d'analyse. Les valeurs du coefficient d'emmagasinement obtenues sont plus grandes que celles découlant des méthodes classiques.

Pour les sites étudiés, le rapport des deux valeurs pouvait aller jusqu'à 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 deux méthodes de mesure sont utilisées conjointement, de nombreuses vérifications permettent de s'assurer de la valeur des paramètres de base. On a pu ainsi déterminer qu'en règle générale, la méthode du niveau stationnaire était plus stable que celle du niveau de retour.

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 aquifère
 - 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 aquifères homogènes horizontalement (extension accrue moyennant l'utilisation de piézomètres à faibles temps de réponse)
- simplicité des mesures
- rapidité du procédé particulièrement appréciable pour les sites où des tassements dus aux rabattements sont à craindre (faibles rabattements mis en oeuvre) ainsi que pour les sites soumis à l'influence de la marée (corrections faciles ou négligeables)
- possibilité d'obtention d'un profil plutôt que d'une analyse globale
- obtention d'un indicateur des dangers de tassements (valeur de S à court terme)
- obtention directe d'un paramètre déterminant le rayon d'influence au sens de Jacob
- 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).

BIBLIOGRAPHIE

1. Castany, G
Traité pratique des eaux souterraines. Paris, Dunod, 1963.
2. De Wiest, J.M.
Geohydrology. New York, Wiley & Sons, 1965.
3. Kruseman, G.P. et De Ridder, N.A.
Analysis and evaluation of pumping test data. Wageningen,
International Institute for Land Reclamation and Improvement,
Bulletin nr. 11, 1976.
4. Schneebeili, G.
Hydraulique souterraine. Paris, Eyrolles, 1966.
5. Terzaghi, K.
Mécanique des sols. Paris, Dunod, 1951.