

MINISTÈRE DE L'INDUSTRIE ET DE LA RECHERCHE

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

B.P. 6009 - 45018 Orléans Cédex - Tél.: (38) 63.00.12

ÉTABLISSEMENT DU PROGRAMME DES POMPAGES D'ESSAI

(2ème édition revue et complétée)

par

J. FORKASIEWICZ

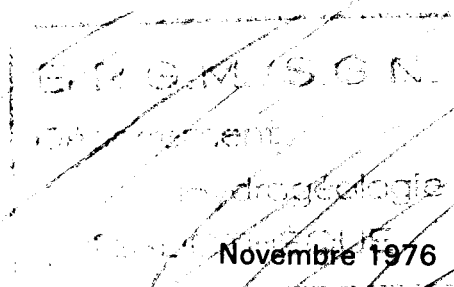


Département géologie de l'aménagement

Hydrogéologie

B.P. 6009 - 45018 Orléans Cédex - Tél.: (38) 63.00.12

76 SGN 473 AME



- R E S U M E -

Le programme de réalisation d'un pompage d'essai, c'est-à-dire le choix du débit pompé, de la durée du pompage, du dispositif d'observation et des mesures à faire, doit être fixé en fonction du but assigné à l'essai - qui doit donc être défini - et des conditions hydrogéologiques locales - qui doivent donc être connues ou présumées -. Il n'existe pas, en conséquence de programme-type universel.

On propose ici, à l'attention des opérateurs ou des projeteurs de pompages d'essai un certain nombre de règles et de conseils propres à orienter la mise au point de programmes adaptés aux cas qui se présentent, à prévoir les moyens nécessaires et à estimer le coût des essais, enfin à permettre d'apprécier dans quelle mesure les contraintes pratiques ou économiques qui limitent souvent ces opérations n'en restreignent pas trop la validité. Ce rapport édité la première fois en 1970 (70 SGN 115 HYD) est ici révisé et complété.

Cette étude a été réalisée dans le cadre des travaux méthodologiques du Département Géologie de l'Aménagement, Service Hydrodynamique.

S O M M A I R E

	Page
RESUME	1
INTRODUCTION	3
PRINCIPES GENERAUX	5
NOTATIONS EMPLOYEES	8
1. RECHERCHE DES PARAMETRES DU SYSTEME AQUIFERE	9
1.1. <u>Nappe captive infinie</u>	16
1.2. <u>Nappe captive infinie, aquifère fissuré</u>	17
1.3. <u>Nappe captive semi-infinie</u>	20
1.4. <u>Nappe semi-captive, infinie</u>	22
1.5. <u>Nappe semi-captive, semi-infinie</u>	23
1.6. <u>Nappe libre infinie</u>	26
1.7. <u>Nappe libre semi-infinie</u>	
2. RECHERCHE DES CARACTERISTIQUES DE L'OUVRAGE DE POMPAGE	28
2.1. <u>Nappe captive</u>	28
2.2. <u>Nappe libre</u>	28
3. POMPAGE D'ESSAI EN REGIME PERTURBE	29
3.1. <u>Types de perturbations pouvant influencer un pompage d'essai</u>	29
3.2. <u>Principe de l'interprétation</u>	29
3.3. <u>Mesures supplémentaires nécessaires en pompage perturbé</u>	30
3.4. <u>Cas particulier des aquifères profonds</u>	31

INTRODUCTION

M. S. HANTUSH, référence /1/, p. 141 a très justement fait observer qu'"il n'existe pas de règles spécifiques pouvant s'appliquer à tous les types de pompages d'essai. Chaque pompage est mené selon certaines conditions prédominantes qui se retrouvent rarement sinon jamais identiques pour deux essais différents. Etant donné les incertitudes et la variabilité des facteurs employés rien ne peut remplacer l'expérience et le jugement des personnes chargées de conduire ces essais".

Les hydrogéologues doivent se pénétrer de cette idée. Aucun programme type de pompage d'essai ayant la commodité et la valeur d'une recette universelle n'existe et il faut se garder de toute routine dans ce domaine.

Trop souvent les restrictions constatées aux possibilités d'interpréter des données résultant de pompages d'essai, et parfois l'impossibilité de toute interprétation, sont dues à l'inadaptation du programme de l'opération à l'objectif envisagé et aux conditions locales.

Mais s'il faut abandonner une simplification excessive, on ne peut se contenter par ailleurs de ramener la programmation des pompages d'essai au traitement de cas d'espèces ne se basant sur aucune ligne directe. Des indications constructives doivent être fournies aux hydrogéologues praticiens.

On s'est efforcé ici de formuler les principes généraux qui nous paraissent les plus essentiels et quelques règles et conseils propres à orienter les hydrogéologues dans le choix du programme le mieux approprié et dans la prévision des moyens et des coûts à projeter.

Les indications données suivent un plan méthodique inévitablement empreint de schématisme. Elles doivent être considérées surtout comme des recommandations qu'il convient d'adapter avec esprit critique à chaque cas particulier, plutôt que comme des instructions rigides.

Ce rapport se relie à deux autres exposant les modalités d'exécution des pompages d'essai (G. TRUPIN, référence /3/) et les méthodes d'interprétation des données pour le calcul des paramètres des aquifères (J. FORKASIEWICZ, référence /4/), et il les complète.

Ce rapport est une oeuvre collective. La mise au point de sa première version (J. FORKASIEWICZ - réf. /2/) fut le résultat de plusieurs séances de travail au département d'hydrogéologie, avec la participation de M. BONNET et J. MARGAT et sous la direction de E. BERKALOFF.

La deuxième édition qui est présentée ici, est une version entièrement révisée et complétée du premier rapport.

Ce travail a été réalisé dans le cadre des études générales méthodologiques du Département Géologie de l'Aménagement.

BIBLIOGRAPHIE

Voir le "Guide bibliographique méthodique sur l'interprétation des données des pompages d'essai (évaluation des paramètres des aquifères)" annexé au rapport B.R.G.M. 72 SGN 273 AME (référence /4/) (Note N.244 HYD. Août 1970).

PRINCIPES GENERAUX

Le programme d'un pompage d'essai aussi bien que les méthodes d'interprétation des mesures faites doivent être adaptées aux types d'informations recherchées, c'est-à-dire à des buts qu'il convient de définir clairement avant d'opérer un pompage.

Trois sortes d'objectifs principaux sont, selon les cas, assignés à un pompage d'essai :

- I - Recherche des paramètres du système aquifère
- II - Recherche des "caractéristiques" de l'ouvrage de pompage
- III- Buts particuliers s'ajoutant à la recherche des paramètres, tels que l'évaluation :
 - . des effets des limites
 - . du colmatage des berges d'une rivière
 - . de l'hétérogénéité de l'aquifère

N.B. : Ces objectifs sont énumérés par ordre d'importance, mais l'ordre chronologique correspondant à celui des opérations, lorsque plusieurs objectifs sont recherchés successivement, est en pratique le plus couramment :

II, I, III.

Cette succession suppose néanmoins un espacement suffisant des opérations dans le temps. S'il n'est pas possible, pour des raisons économiques de séparer par une durée de remontée suffisante les pompages d'essai de puits à plusieurs "paliers" (II) du pompage d'essai de plus longue durée (I), il est préférable de commencer par ce dernier et d'enchaîner par les paliers de débit de plus courtes durées (c'est-à-dire de conserver l'ordre I, II, III), le premier pompage fournissant dans son début un premier point de la courbe de relation "débit/rabatement" au bout de temps égaux. Mais cela risque de faire écourter l'observation de la remontée des niveaux après le premier pompage.

En pratique, il est difficile de concilier l'indépendance des essais opérés pour atteindre les buts I et II avec leur enchaînement continu en vue d'écourter la durée totale des opérations. Les maîtres d'oeuvre et les opérateurs doivent se convaincre qu'il existe un seuil de durée, donc de coût, au-dessous duquel l'objectif I ne pourra pas être valablement atteint en même temps que l'objectif II.

L'objectif I qui sera principalement considéré ici, sera traité en premier.

Le programme d'un pompage d'essai doit fixer les éléments principaux suivants :

1. Choix du site
2. Caractéristiques de l'ouvrage de pompage
3. Piézomètres
4. Débit de pompage
5. Durée de pompage
6. Choix de l'époque

La détermination de ces éléments est fonction des objectifs du pompage et de l'aquifère étudié. Il est donc nécessaire de définir a priori les conditions hydrogéologiques et hydrodynamiques de la formation aquifère qui sera testée avant de faire le programme de pompage d'essai. Cette connaissance permettra de classer l'aquifère dans un type schématique, par exemple :

- 1) nappe captive infinie, c'est-à-dire ayant des épontes imperméables et sans limites latérales proches,
- 2) nappe captive infinie, aquifère fissuré
- 3) nappe captive semi-infinie, c'est-à-dire ayant des épontes imperméables et une limite latérale proche,
- 4) nappe semi-captive infinie, c'est-à-dire ayant des épontes semi-perméables,
- 5) nappe semi-captive semi-infinie,
- 6) nappe libre infinie,
- 7) nappe libre semi-infinie.

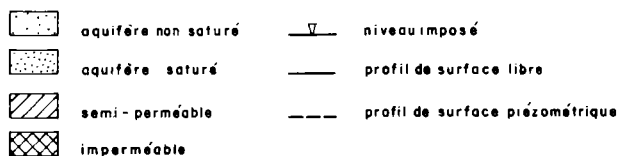
cf. planche ci-contre.

La présente note se limite aux objectifs n° I et II et aux systèmes aquifères évoqués ci-dessus.

-7-
Types de systèmes aquifères

types de nappes	schémas	exemples	
1 - nappe captive infinie *			
2 - nappe captive infinie * aquifère fissuré			
3 - nappe captive semi.infinie			
4 - nappe semi.captive infinie* 1 ^{er} cas : avec nappe libre sus-jacente (à charge supérieure ou inférieure à celle de l'aquifère semi - captif).			
2 ^e cas : sans nappe libre sus-jacente			
5 - nappe semi.captive semi.infinie (le 1 ^{er} cas est seul représenté)			
6 - nappe libre infinie *			
7 - nappe libre semi.infinie			

* une nappe peut être considérée comme infinie tant que l'effet d'une limite n'intervient pas



NOTATIONS EMPLOYEES

Q	=	débit de pompage
t_p	=	durée de pompage
s	=	rabattement
r_p	=	rayon du puits de pompage
r	=	distance du point considéré à l'axe du puits de pompage
d	=	distance d'un piézomètre à une limite
D	=	distance de l'ouvrage de pompage à une limite
K_h	=	coefficient de perméabilité horizontale de la couche aquifère
K_v	=	coefficient de perméabilité verticale de la couche aquifère
K'	=	coefficient de perméabilité verticale de l'éponte semi-perméable
b	=	épaisseur de la couche aquifère
b'	=	épaisseur de l'éponte semi-perméable
$T=K_h b$	=	transmissivité de la couche aquifère
S	=	coefficient d'emmagasinement instantané de la couche aquifère
S'	=	coefficient d'emmagasinement de l'éponte semi-perméable ou coefficient d'emmagasinement retardé de la couche aquifère en nappe libre
R	=	"rayon d'action" du puits
$\frac{K'}{b'}$	=	paramètre de drainance
$B' = \frac{T}{\alpha S}$	=	facteur d'égouttement des nappes libres
$t_c = \frac{25r_p^2}{T}$	=	durée de pompage au bout de laquelle l'effet de capacité est négligeable
$t_{pp} = \frac{Sb}{2K_v}$	=	durée de pompage au bout de laquelle l'effet de pénétration partielle de l'ouvrage de captage est négligeable
$t_i = 1,78 \frac{D^2 S}{T}$	=	temps d'intersection, en diagramme semi-logarithmique, de la droite de Jacob avec la droite suivante de pente double ou avec l'horizontale (cas de nappe ayant une limite latérale proche)
t_{wt}	=	durée de pompage au bout de laquelle l'effet de l'égouttement dans le cas d'une nappe libre est négligeable
$\frac{1}{\alpha}$	=	indice de retard dû à l'effet d'égouttement

1. RECHERCHE DES PARAMETRES DU SYSTEME AQUIFERE

1.1. Nappe captive infinie

c'est-à-dire ayant des épontes imperméables et sans limite latérale proche.

1.1.1. Choix du site

Le site d'une station de pompage doit remplir dans la mesure du possible, les conditions suivantes :

1. Homogénéité du terrain aquifère
2. Faible gradient hydraulique
3. Absence de captages d'eau en exploitation, proches(ou d'ouvrage de rejet ou d'injection)
4. Possibilité d'évacuation des eaux de pompage
5. Accès facile pour le personnel et le matériel
6. Ne pas être situé à proximité de voies de chemin de fer ou de routes à grandes circulations (les vibrations produites par le passage des véhicules lourds peuvent entraîner des fluctuations de niveau piézométrique)

1.1.2. Caractéristiques de l'ouvrage de pompage

Diamètre : Le diamètre doit être déterminé en fonction de deux nécessités :

1. Celle de loger la pompe, avec un espace suffisant pour son installation et son fonctionnement.

Il est recommandé de laisser au moins, un jeu de 25 mm (1') entre le corps de pompe et le tubage. Par ailleurs, il faut prévoir où placer entre la colonne ascensionnelle de la pompe et le tubage un "tube guide de mesure" qui permet d'effectuer des mesures de niveau à l'abri des chutes d'eau.

Le tableau 1 donne les diamètres des tubages à employer d'après les débits que l'on pense obtenir compte tenu des groupes électropompes à moteur immergé couramment utilisés en forages d'eau.

2. Celle d'assurer le rendement hydraulique de l'ouvrage.

En ce qui concerne le rendement, il faut savoir que si le diamètre de l'ouvrage et donc de la crépine a peu d'influence sur le débit capté par l'ouvrage - débit spécifique - (en doublant le diamètre, on n'accroît le débit que de 10 % environ), il joue par contre un rôle important dans les pertes de charge et par conséquent dans la limitation du débit extrait par pompage (voir tableau 2).

Profondeur et longueur de la crépine :

Lorsque l'aquifère n'est pas très profond, l'ouvrage est poursuivi jusqu'au mur de l'aquifère et crépiné sur toute son épaisseur. Ainsi les écoulements sont uniquement horizontaux au voisinage de l'ouvrage (et par conséquent les corrections tenant compte de l'influence de la pénétration partielle) et on capte le maximum du débit pour un rabattement donné.

Tableau 1

Diamètres des tubages à choisir en fonction du débit de pompage prévu (comptenu des dimensions des électropompes à moteur immergé)

Débit en m ³ /h	Diamètre intérieur des tubages à employer
Moins de 25	150 mm
de 25 à 45	200 mm
de 40 à 100	250 mm
de 90 à 160	300 mm
de 150 à 220	350 mm
de 210 à 320	400 mm
de 300 à 450	500 mm
de 400 à 750	600 mm
Plus de 750	750 mm

Tableau 2

Pertes de charge en mm par mètre linéaire, à 20°C en fonction du débit Q et du diamètre nominal des tubages et crépines (d'après M. Gosselin).

Q en l/s	DIAMETRE DES TUBAGES (en pouces)									
	6	7	8	9 1/4	10	12	14	15	16	18
100		85,00	40,00	22,00	11,00	4,5	2,2	1,6	1,2	0,7
80		55,00	26,00	14,00	7,5	3,1	1,45	1,1	0,8	0,5
60	70,0	32,00	16,00	8,2	4,7	1,9	0,95	0,67	0,5	0,32
40	35,0	16,00	7,8	4,0	2,5	1,0	0,48	0,35	0,24	0,16
20	10,0	4,7	2,5	1,2	0,8	0,32	0,16	0,12	0,08	0,05
10	2,8	1,4	0,6	0,3	0,25	0,1	0,05	0,035	0,025	0,016
5	0,8	0,37	0,18	0,09	0,08	0,023	0,016	0,012		

1.1.3. Piézomètres

Nombre : Le nombre des piézomètres est fonction du problème étudié, mais le plus souvent des crédits alloués. Aussi dans les pages suivantes nous mentionnerons le nombre minimal nécessaire au calcul des paramètres.

Dans le cas d'une nappe captive homogène et infinie, ce nombre minimal est 1. Il est bien évident que, dans tous les cas, plus le nombre des piézomètres est grand, plus l'interprétation est sûre.

Distance : D'une façon générale, les piézomètres ne doivent pas être placés ni trop près de l'ouvrage de pompage (pour éviter l'influence des pertes de charges parasites qui peuvent apparaître au voisinage du forage) ni trop loin (pour que les effets du pompage soient mesurables).

Dans tous les cas la distance minimale d'un piézomètre au forage doit être de 5 m.

$$r_{\min} > 5 \text{ m}$$

De plus, dans le cas d'un forage incomplet et d'un piézomètre incomplet également, cette distance minimale doit obéir à la règle suivante :

$$r_{\min} > 1,5 b \sqrt{k_h / k_v} \quad \text{ou} \quad r_{\min} > 1,5 b \text{ (si l'aquifère est isotrope)}$$

(Pour un piézomètre complet crépiné sur toute l'épaisseur de la couche $r_{\min}$ peut être inférieur à 1,5 b).

Dans le cas des forages très profonds, même s'ils sont complets, il est préférable que $r_{\min}$ soit supérieur à 1,5 b à cause des risques de déviation du tubage.

On observera alors la règle suivante :

Le risque de déviation étant de l'ordre de 1/50 de la profondeur p de la couche, il est nécessaire que $r_{\min}$ soit supérieur à 0,04 p . Il y a donc deux conditions à satisfaire :

$$r_{\min} > 1,5 b$$

$$r_{\min} > 0,04 p$$

N.B. : D'après ces règles, la seconde condition est satisfaite implicitement si la première est vérifiée tant que p est $< 37,5 b$. On voit qu'en pratique on ne doit se préoccuper de la seconde condition que pour les couches aquifères profondes peu épaisses : moins de 30 m. En effet pour $b = 30$ m, il faut que p soit $> 1\ 125$ m pour avoir $0,04 p > 1,5 b$.

La distance maximale d'un piézomètre au forage sera fonction de l'étendue du domaine que l'on souhaite explorer. D'après E. Berkaloff l'éloignement du piézomètre extérieur doit être de l'ordre de $1/3$ du rayon d'exploration (ici on ne peut pas dissocier la durée de pompage et la distance des points d'observation : plus le piézomètre est éloigné, plus il faut pomper longtemps pour déterminer une baisse de niveau mesurable).

$$r_{\max} \approx 1/3 R \text{ expl.}$$

Dans le cas de plusieurs piézomètres leurs distances respectives au forage doivent respecter la règle suivante :

$$\frac{r_{(i+1)}}{r_i} > 3$$

Profondeur : Si l'aquifère testé est uniforme et homogène et le forage complet, il suffit que le piézomètre traverse la partie supérieure de la couche aquifère. En général, une longueur crépinée de 0,5 à 1 m est suffisante pour un piézomètre.

Lorsque le forage est incomplet et que le piézomètre ne peut pas être placé à $r > 1,5 b \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$ il faut que ce dernier soit complet c'est-à-dire cré-

piné sur toute l'épaisseur de la couche captée.

1.1.4. Débit de pompage

Il doit obéir à deux conditions :

- être le plus fort possible, mais compatible avec le rabattement maximal acceptable (le toit de l'aquifère ne doit être dénoyé en aucun point)
- pouvoir être maintenu constant pendant toute la durée de pompage (la tolérance de variation du débit sera de 5 %)

1.1.5. Durée de pompage

Lorsque l'ouvrage de pompage est complet c'est-à-dire pénètre totalement dans la nappe testée) il suffit de dépasser l'effet de capacité de l'ouvrage, d'au moins un cycle logarithmique, c'est-à-dire :

$$t_p > 10 t_c$$

$$\text{où } t_c = \frac{25r_p^2}{T}$$

avec r_p - rayon du puits ou forage

T - transmissivité supposée

ceci dans le cas d'un puits ou forage parfait sans perte de charge.

En réalité (forage avec perte de charge) l'effet de capacité peut être 3 fois plus long, par conséquent il vaut mieux prévoir :

$$t_p > 30 t_c$$

Le tableau de la page suivante et l'abaque de l'annexe 1 montrent comment varie t_c dans la gamme courante des valeurs de T et de r_p .

L'examen rapide du tableau et de l'abaque fait ressortir que :

- en forage de petit diamètre avec $r_p < 0,1$ m captant les couches de transmissivité moyenne et surtout forte, supérieure à $2,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, la durée de pompage t_c à partir de laquelle l'influence de l'effet de capacité de l'ouvrage de pompage est négligeable peut être considérée elle aussi comme négligeable devant l'imprécision habituelle des mesures du temps de pompage

Durée de pompage t_c à partir de laquelle l'influence
de l'effet de capacité du puits est négligeable *

Couche aquifère de transmissivité	Rayon usuel de		
	piézomètres	forages	puits traditionnels
	$r_p = 0,05 \text{ m}$	$r_p = 0,20 \text{ m}$	$r_p = 1,0 \text{ m}$
très faible $T = 0,1 \text{ m}^2/\text{h} = 2,8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$	0 h 38 mn	10 h	250 h
faible $T = 1 \text{ m}^2/\text{h} = 2,8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$	4 mn	1 h	25 h
moyenne $T = 10 \text{ m}^2/\text{h} = 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$	23 sec	6 mn	2 h 30 mn
forte $T = 100 \text{ m}^2/\text{h} = 2,8 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$		36 sec	15 mn
très forte $T = 1000 \text{ m}^2/\text{h} = 2,8 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$			1 mn 30 sec

* Rapport DS 66 A 128 "Effet de capacité des puits sur la dépression du niveau piézométrique"
par E. BERKALOFF

- dans les puits traditionnels de rayon r_p voisin de 1 m captant des couches de faible et surtout de très faible transmissivité, inférieure à $2,8.10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, cette durée devient prohibitive pour tout essai ayant pour but l'évaluation des paramètres de la couche aquifère.

On se servira de l'abaque de l'annexe 1 pour trouver rapidement t_c en fonction de T et de r_p .

Lorsque l'ouvrage de pompage est incomplet et que l'on n'est pas sûr que les piézomètres éventuels s'affranchissent de l'effet de pénétration partielle, il faut prévoir une durée de pompage suffisamment longue pour pouvoir interpréter correctement les données de pompage (référence /7/).

Cette durée devrait être supérieure à au moins 10 fois $t_{pp} = \frac{Sb}{2K_v}$, où t_{pp} est le temps au bout duquel l'effet parasite de la pénétration partielle de l'ouvrage de captage devient négligeable.

$$\text{Donc : } t_p > 10 t_{pp}$$

Pour prévoir cette durée, il est nécessaire de connaître au moins approximativement les 3 paramètres : S , b et K_v (toujours inférieur à K_h excepté les cas où la crépine n'est pas située dans les couches, les plus perméables et le cas des captages dans le milieu fissuré).

Deux abaques présentées en annexe 2 et 3 permettent de déduire $t_{pp} = \frac{Sb}{2K_v}$:

- le premier, en fonction du rapport $\frac{S}{K_v}$ pour différentes valeurs de b
- le second, en fonction du produit Sb pour différentes valeurs de K_v .

1.1.6. Choix de l'époque du pompage

La seule recommandation pratique est d'éviter les périodes de fortes variations barométriques. En tous cas, il est préférable de les mesurer (barographe).

1.2. Nappe captive infinie, aquifère fissuré /12/-

1.2.1. Choix du site

1.2.2. Caractéristiques de l'ouvrage de pompage

1.2.3. Piézomètres

1.2.4. Débit de pompage

1.2.5. Durée de pompage

mêmes recommandations
qu'au § 1.1.1., 1.1.2.,
1.1.3. et 1.1.4. -

Pour pouvoir interpréter correctement un pompage d'essai en milieu fissuré, il faut respecter deux conditions :

- 1) avoir des mesures des rabattements précises dès le début de pompage
(à partir de 30 secondes au moins)
- 2) avoir une durée suffisante de pompage.

Dans le cas des fissures parallèles à direction horizontale prédominante cette durée t doit obéir aux conditions :

$$t > 10 \left[\frac{1}{20} \times \frac{S(r-r_f)^2}{T} \right] \text{ (pour appliquer la méthode bi-logarithmique)}$$

et $t > 10 \text{ Max} \left[\frac{S_b}{2K_v}, 12,5 \frac{S(r^2+r_f^2)}{T} \right] *$ (pour appliquer la méthode semi-logarithmique)

où r_f = rayon de la fracture en communication avec le puits, dans le cas d'une fracture unique

ou rayon d'une fracture "équivalente" à déduire des essais, dans le cas des petites fissures parallèles.

Dans le cas des fissures parallèles à direction verticale prédominante, cette durée doit être :

$$t > 10 \left[10^{-2} \frac{Sx_f^2}{T} \right] \text{ (méthode bi-logarithmique)}$$

* ici t doit être $>$ à 10 fois le plus grand des deux facteurs

et $t > 10 \quad 12,5 \frac{Sx^2}{T} \left[\left(\frac{r}{X_f} \right)^2 + \frac{1}{3} \right]$ (méthode semi-logarithmique)

ou X_f = demi-longueur de la fracture en communication avec le puits,
dans le cas d'une fracture unique

ou demi-longueur d'une fracture "équivalente" à déduire des essais.

1.3. Nappe captive semi-infinie

c'est-à-dire dont les épontes sont imperméables et ayant latéralement une limite imperméable ou à niveau imposé.

1.3.1. Choix du site

Les conditions évoquées au § 1.1.1. doivent être respectées. De plus, pour pouvoir observer le régime transitoire non influencé par la limite dans une nappe captive, il faut que l'ouvrage de pompage soit à une distance relativement grande de cette limite.

Pour évaluer cette distance D, on peut se servir de l'expression approchée suivante :

$$D > \frac{22,4 r_p}{\sqrt{S}}$$

(cette expression découle de la condition : $t_* > 10 t_c$ évoquée au § 1.2.5.)

1.3.2. Caractéristiques de l'ouvrage de pompage

Mêmes conseils qu'au § 1.1.2.

1.3.3. Piézomètres

Nombre : Lorsque l'on prévoit un effet de limite rapide, plusieurs piézomètres, au moins deux, sont nécessaires pour le calcul des paramètres et ils seront alignés de préférence sur l'axe parallèle à la limite.

Distance : Les règles énoncées au § 1.1.3. à propos de la distance minimale et du rapport des distances de deux piézomètres sont valables.

En ce qui concerne la distance maximale E. Berkloff conseille de ne pas placer de piézomètres à plus de $D/2$ du forage (D étant la distance du forage à la limite). Cette condition risque dans certains cas d'être contradictoire avec les règles plus importantes :

$$r > 1,5 b \quad \text{et} \quad \frac{r_{(i+1)}}{r_i} > 3$$

La recherche des paramètres dans le cas présent sera rarement dissociée de la recherche de l'effet de la limite présumée (relations avec un cours d'eau, colmatage des berges, confirmation de la distance à la limite, etc..). Dans ce but, il sera préférable de placer un ou plusieurs piézomètres dans la zone proche de la limite et notamment sur l'axe passant par le forage et perpendiculaire à celle-ci.

Si la limite est constituée par une rivière incomplète (qui n'atteint pas le substratum de la formation aquifère) le piézomètre le plus proche de la rivière doit se trouver à :

$$d > 1,5 b$$

d = distance du piézomètre à la berge

Quand les crédits le permettent, il est utile dans le cas d'une rivière proche dont le rôle n'est pas connu d'avance, de placer un piézomètre de l'autre côté de la rivière.

1.3.4. Débit de pompage

Mêmes conseils qu'au paragraphe 1.1.4.

1.3.5. Durée de pompage

Lorsque le puits est complet, deux effets supplémentaires doivent être considérés (voir fig. 1) :

- effet de capacité du puits
- effet de la limite.

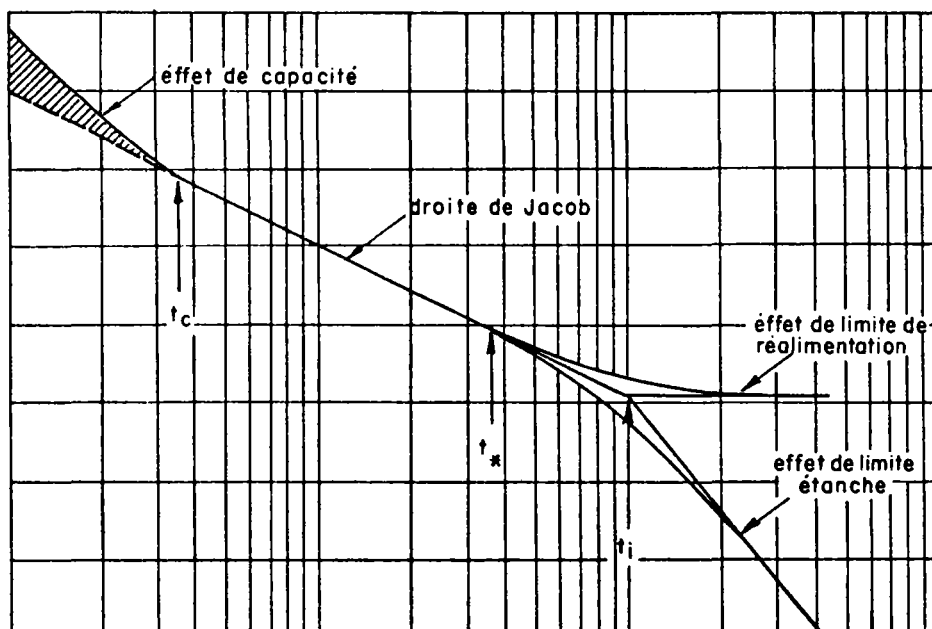


fig. 1

Pour pouvoir déterminer les paramètres de la couche testée, le régime transitoire non influencé par ces deux effets doit durer au moins un cycle logarithmique, il faut en conséquence que :

$$t_* > 10 t_c \quad (1)$$

où $t_* \approx 0,3 t_i \approx 0,5 \frac{D^2 S}{T}$ = temps approximatif du début de l'influence de la limite (cf. fig. 1)
mesurée au puits de pompage (1)

avec $t_i = 1,78 \frac{D^2 S}{T}$ (voir notations employées)

et $t_c = \frac{25r_p^2}{T}$ (voir § 1.1.5.)

Pour que la condition (1) soit satisfaite, il faut que :

$$\frac{0,5D^2 S}{T} > 10 \frac{25r_p^2}{T}$$

$$\text{donc } D > r_p \sqrt{\frac{500}{S}}$$

Ceci revient à fixer une distance minimale entre l'ouvrage de pompage et la limite.

REMARQUE : Lorsque la limite est constituée par un cours d'eau affecté par un colmatage partiel, l'influence de cette limite est retardée et D peut être inférieur à $r_p \sqrt{\frac{500}{S}}$.

Si le but du pompage est en plus la reconnaissance de la limite il faut que :

$$t_p > 10 t_i$$

Lorsque le puits est incomplet et que les piézomètres risquent d'être influencés par l'effet de sa pénétration partielle il faut que :

$$t_* > 10 t_{pp} \text{ (voir § 1.1.5.)}$$

(1) Un calcul identique peut être fait en considérant l'apparition de l'influence de la limite à un piézomètre et donc la distance r_i du piézomètre au puits "image".

Pour conclure on peut dire que :

- la durée de pompage doit être assez grande pour s'affranchir de l'effet de capacité et de l'effet de pénétration partielle (si le puits est incomplet) qui influencent le début de l'évolution des rabattements
- il faut éviter de placer la station de pompage trop près d'une limite, afin que l'influence de celle-ci ne soit pas trop rapide.

1.3.6. Choix de l'époque de l'essai

Aux recommandations évoquées § 1.1.6., il faut ajouter de choisir une période pendant laquelle le plan d'eau libre éventuel limitant la nappe, a un niveau peu variable.

1.4. Nappe semi-captive, infinie

c'est-à-dire ayant des épontes semi-perméables et sans limite latérale proche.

1.4.1. Choix du site

Mêmes recommandations qu'au § 1.1.1.

1.4.2. Caractéristiques de l'ouvrage de pompage

Mêmes recommandations qu'au § 1.1.2.

1.4.3. Piézomètres

Nombré : Lorsqu'on craint une stabilisation rapide (par drainance) 2 piézomètres au moins, placés à des distances différentes par rapport au forage, sont nécessaires.

Pour faciliter l'interprétation il est souhaitable de réaliser aussi des piézomètres crépinés dans la ou les couches susceptibles de fournir l'eau, par drainance, à l'aquifère testé.

Distance : Mêmes règles qu'au § 1.1.3.

1.4.4. Débit de pompage

Mêmes conseils qu'au § 1.1.4.

1.4.5. Durée de pompage

Pour s'affranchir de l'effet de capacité de l'ouvrage de pompage et éventuellement de l'effet de pénétration partielle, les règles :

$$t_p > 10 t_c$$

et $t_p > 10 t_{pp}$ (si le forage est incomplet et si les piézomètres risquent d'être influencés par la pénétration partielle)

énoncées au § 1.1.5. doivent être respectées.

Mais de plus dans ce type de nappe on doit s'attendre à ce que l'évolution des rabattements soit influencée par un débit retardé provenant soit des épontes semi-perméables, soit d'un aquifère sous ou susjacent, soit des deux à la fois.

Suivant les conditions aux limites de l'éponte semi-perméable, le débit retardé alimentera constamment ou temporairement la nappe soumise au pompage et provoquera après un certain temps une stabilisation définitive ou temporaire (ou seulement un ralentissement temporaire) de l'évolution des rabattements.

Dans le 1er cas, seule l'expérience des essais antérieurs peut guider raisonnablement dans le choix de la durée optimale de pompage. En général, elle devrait être longue (72 heures au moins).

Dans le 2ème cas, la durée de pompage doit être suffisamment longue pour saisir la phase finale de l'évolution des rabattements et pouvoir calculer T et $(S+S')$. Cette durée peut être approchée à partir de la transcription suivante :

$$t_p > 10 \left[\frac{2b'S'}{K'} \right] \quad (\text{référence /4/})$$

REMARQUE : Lorsque cette durée est très longue (éponte semi-perméable épaisse et relativement imperméable) et dépasse en temps raisonnable de pompage, on traitera le cas comme celui d'une nappe captive infinie en négligeant la présence des semi-perméables.

1.4.6. Choix de l'époque de l'essai

Même conseil qu'au § 1.1.6.

1.5. Nappe semi-captive, semi-infinie

c'est-à-dire limitée verticalement par une éponte semi-perméable et latéralement par une limite imperméable ou à niveau imposé.

1.5.1. Choix du site

Mêmes recommandations qu'au § 1.2.1. (voir aussi § 1.4.5.)

1.5.2. Caractéristiques de l'ouvrage de pompage

Diamètre : Il sera déterminé en fonction de deux conditions énoncées au § 1.1.2.

Profondeur et longueur de la crépine : Le schéma hydrogéologique étant suffisamment complexe, un forage complet s'impose pour éviter les effets de pénétration partielle qui pourraient être une cause supplémentaire de difficultés d'interprétation des données de pompage.

1.5.3. Piézomètres

L'interprétation de ce schéma compliqué ne peut être faite qu'avec plusieurs piézomètres situés à des distances différentes du forage et de la limite. Pour déterminer ces distances, suivre les règles énoncées au § 1.2.3. Une autre façon de lever certaines indéterminations entre différentes interprétations possibles est de placer les piézomètres supplémentaires dans les couches sus ou sous-jacentes susceptibles de fournir par drainance un débit retardé à l'aquifère testé.

1.5.4. Débit de pompage

Mêmes conseils qu'au § 1.1.4.

1.5.5. Durée de pompage

Ce schéma hydrogéologique compliqué suppose que l'évolution des rabattements pendant le pompage pourrait être influencé par :

- l'effet de capacité du puits ou forage (si T faible et r_p grand)
- l'effet de débit retardé
- l'effet de limite latérale.

Il est évident que si tous ces effets influencent en même temps l'évolution des rabattements, son interprétation sera quasi impossible.

Aussi il faut s'efforcer de séparer ces effets. Lorsque la recherche des paramètres (T , S , K'/b' ou $(S+S')$) est primordiale, il ne faut pas que l'influence de la limite latérale soit trop rapide et se superpose sur celle du débit retardé. On placera donc la station de pompage suffisamment loin de la limite de manière qu'elle n'influence que la fin de pompage. ($t_i \approx t_p$). La durée de pompage à prévoir sera en générale longue (suivre les conseils donnés au § 1.3.5. pour une nappe semi-captive infinie).

Lorsque la reconnaissance de l'effet de limite (recherche de l'alimentation de la nappe soumise au pompage par un cours d'eau voisin, par ex.) prévaut sur la recherche des paramètres de la nappe, on pourra placer la station de pompage près de la limite.

Dans ce cas, il suffit que la durée de pompage :

$$t_p > 10 t_i$$

1.5.6. Choix de l'époque de l'essai

Mêmes recommandations qu'en § 1.2.6.

1.6. Nappe libre infinie

1.6.1. Choix du site

Les conditions 1, 2, 3, 5 et 6 du § 1.1.1. doivent être remplies dans la mesure du possible.

1.6.2. Caractéristiques de l'ouvrage de pompage

Diamètre : Voir § 1.1.2.

Profondeur et longueur de la crépine : L'ouvrage de pompage traversera de préférence complètement * la couche aquifère et sera crépiné sur toute son épaisseur.

1.6.3. Piézomètres

Nombre : Un piézomètre, au minimum, est nécessaire, mais il est évident que plus le nombre de piézomètres est grand plus l'interprétation est sûre.

* (excepté toutefois, la partie supérieure que l'on prévoit de dénoyer pendant le pompage).

Distance : Pour le cas où l'on a affaire à un milieu isotrope et à des piézomètres complets, les règles citées au § 1.1.3. et concernant :

- 1) la distance minimale : $r_{\min} > 5 \text{ m}$
(et si le forage et les piézomètres sont incomplets $r_{\min} > 1,5 \text{ b}$)
- 2) la distance maximale : $r_{\max} \approx 1/3 \text{ Rayon d'exploration}$
- 3) le rapport des distances : $\frac{r_{(i+1)}}{r_i} > 3$

s'appliquent.

Si la station de pompage se trouve dans une zone de fort gradient hydraulique, les piézomètres seront placés sur un axe perpendiculaire à la direction d'écoulement. Quand les moyens financiers permettent de réaliser plus de trois piézomètres et que l'on veut vérifier l'hypothèse d'homogénéité de l'aquifère, on peut placer les piézomètres sur plusieurs axes. Dans le cas des milieux anisotropes où l'on veut appliquer des méthodes nécessitant l'observation des charges à divers niveaux de la couche, il faut judicieusement concilier la distance r et la profondeur d'observation p en étudiant a priori la forme de la loi de variation de la charge $h(r, p)$ donnée dans le schéma envisagé.

Profondeur : En règle générale, si l'on recherche essentiellement la transmissivité ($K_h \times b$, avec $K_h =$ perméabilité horizontale), et dans l'ignorance de l'homogénéité verticale de la couche aquifère, il est recommandé que les piézomètres soient aussi semblables que possible au puits de pompage (c'est-à-dire complets).

Toutefois on peut également mettre en place des piézomètres volontairement incomplets (voire quasi-ponctuels) dans le but d'utiliser certaines méthodes d'interprétation qui tiennent compte de l'anisotropie des terrains et de l'aspect tridimensionnel des écoulements (méthode de DAGAN par exemple /9/ /10/ ou de NEUMAN /11/.

Enfin, si l'on est certain d'avoir affaire au point d'observation à un milieu isotrope et/ou à des écoulements quasi bidimensionnels, on peut par souci d'économie, se contenter de piézomètres "superficiels" mais toujours suffisamment profonds pour pénétrer d'au moins 1 m dans la partie saturée de la nappe.

1.6.4. Débit de pompage

Le rabattement final tolérable qui va commander le choix du débit n'est pas indépendant de la méthode d'interprétation. Ainsi :

- l'application de la méthode de THEIS et JACOB exige :

$$s_{\text{final}} < 0,1 b$$

où à la rigueur

$$s_{\text{final}} < 0,3 b \text{ si on opère sur les rabattements corrigés } s_c *$$

- au delà, il est nécessaire de faire appel aux nappes libres et aux méthodes spéciales évoquées dans le rapport cité en référence /6/.

Au cas où il y a des piézomètres ces règles ne sont pas obligatoires pour l'ouvrage de pompage. Le rabattement final dans le puits doit alors satisfaire les règles du paragraphe 1.1.4.

1.6.5. Durée de pompage

On appliquera les règles énoncées au § 1.1.5.

Cependant si l'on peut craindre un effet de retard dû à l'égouttement, on devra tenir compte de ce phénomène de la façon suivante :

Ici comme dans le cas de drainance, seule l'expérience des essais précédents peut nous guider dans le choix d'une durée optimale. Toutefois si on a une idée de la valeur probable de T et de S' (à défaut d'estimation de S' on peut prendre 10 %) on peut faire un calcul approché de t_{wt} (temps au bout duquel l'influence de l'égouttement est négligeable) en se basant sur la relation entre t_{wt} et $\frac{r}{B}$ établie par BOULTON.

La procédure de calcul est la suivante :

1°) En connaissant la nature lithologique de la formation aquifère on estimera $\frac{1}{\alpha}$ appelé "indice de retard" d'après la figure 2

2°) En ayant T, S' et $\frac{1}{\alpha}$ on calculera $B = \sqrt{\frac{T}{S'} \cdot \frac{1}{\alpha}}$ et $\frac{r}{B}$

avec r = distance au puits de pompage

3°) En se servant de la relation entre αt_{wt} et $\frac{r}{B}$ (voir figure 3) on trouvera $t_{wt} = \frac{1}{\alpha} \cdot x$

x est donné par la courbe de la relation.

La durée de pompage t_p sera égale ou supérieure à $10 t_{wt}$:

$$t_p > 10 t_{wt}$$

* On rappelle que : $s_c = s_{\text{mesuré}} - \frac{(s_{\text{mesuré}})^2}{2 b}$

1.6.6. Choix de l'époque :

Il est indispensable d'éviter les périodes pluvieuses.

1.7. Nappe libre semi-infinie

1.7.1. Choix du site

Suivre les conseils 1, 2, 3, 5 et 6 du § 1.1.1. et respecter si possible la condition :

$$D > \frac{22,4r_p}{\sqrt{S}}$$

mentionnée au § 1.2.1.

1.7.2. Caractéristiques de l'ouvrage de pompage

Mêmes conseils qu'au § 1.5.2.

1.7.3. Piézomètre

Nombre : Mêmes conseils qu'au § 1.2.3.

Distance :

Profondeur et longueur crépinée : On doit conseiller de prévoir la même que celle de l'ouvrage de pompage.

1.7.4. Débit de pompage

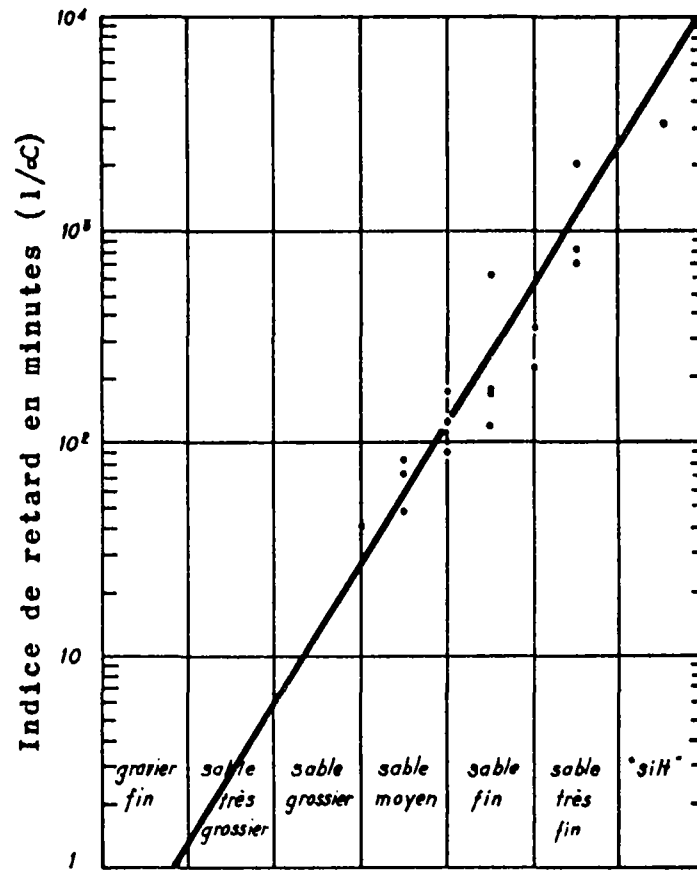
Suivre les conseils du § 1.5.4.

1.7.5. Durée de pompage

Suivre les règles du § 1.2.5.

1.7.6. Choix de l'époque de l'essai

Il faudra choisir une période sans pluie et sans passage d'une crue dans la rivière.



Nature lithologique de la formation aquifère

Fig. 2

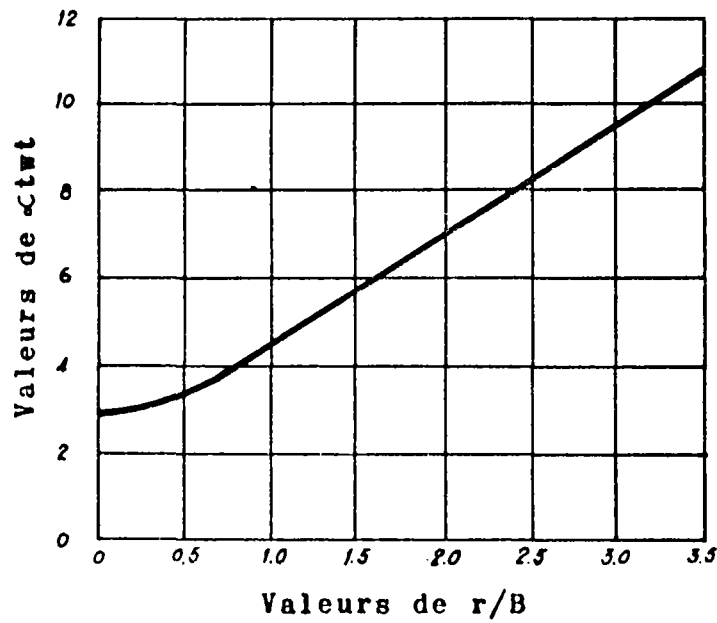


Fig. 3

2. RECHERCHE DES CARACTERISTIQUES DE L'OUVRAGE DE POMPAGE

Etant donné que ces essais ont pour but de tester l'ouvrage en vue de déterminer les pertes de charges dans le puits - ou forage - et dans son environnement immédiat, (ils seront effectués après le développement de l'ouvrage) les conditions aux limites du système aquifère ne rentrent pas en compte. Nous ne considérons que deux cas :

2.1. Nappe captive

*

On effectuera trois paliers de débit (théoriquement deux suffiraient) de durées égales, 1 heure par exemple, séparés par des arrêts de même durée (durée totale de l'essai = 5 heures et même moins si le pompage de longue durée s'enchaîne immédiatement, c'est-à-dire si le dernier palier devient la 1ère heure du pompage de longue durée).

On commencera de préférence par le débit le plus faible de la pompe et le débit maximal (le 3ème Q_3 de préférence) doit dénoyer presque les crêpines.

2.2. Nappe libre

On effectuera le plus de paliers possibles à différentes profondeurs et en augmentant le débit. En général il est conseillé de réaliser d'autant plus de paliers que la formation est supposée plus hétérogène. Les paliers seront de même durée et séparés par des arrêts de durée égale.

Les débits seront choisis de manière que le Q_1 soit le plus faible (de la pompe) et $Q_{\max}$ celui qui baisserait la hauteur de la nappe de 75 % (0,75 b).

* Une procédure analogue est envisageable pour les ouvrages jaillissants en réalisant des paliers de rabattement, c'est-à-dire des paliers de niveau imposé (voir rapport référence /8/).

3. POMPAGE D'ESSAI EN REGIME PERTURBE

3.1. Types de perturbations pouvant influencer un pompage d'essai

Les rabattements observés pendant le pompage peuvent être perturbés par des facteurs étrangers au pompage dont on ne peut tenir compte dans les méthodes d'interprétation.

Ces facteurs peuvent être de deux types :

facteurs naturels tels que :

- variation de pression atmosphérique qui peut engendrer d'une part des fluctuations cycliques de faible amplitude ("marées barométriques") et d'autre part des variations irrégulières de plus grande amplitude correspondant aux perturbations atmosphériques,
- variations du niveau d'un plan d'eau libre en communication avec la nappe. De même, ces variations peuvent être cyclique ("marées marines") ou accidentelles (crue)
- "marées terrestres" qui peuvent induire des fluctuations périodiques dans le cas des nappes captives profondes

et facteurs artificiels tels que :

- pompage (s) voisin (s) en régime non permanent
- recharge artificielle pouvant être provoquée par le rejet des eaux du pompage ou apport par excédents d'irrigation
- variations de niveau d'un plan d'eau libre (lachée, éclusage).

3.2. Principe de l'interprétation

L'interprétation des données d'un pompage d'essai perturbé est fondée sur le principe de superposition des écoulements. Ce principe bien connu peut être exprimé ainsi : La réaction d'un système aquifère soumis à des conditions variées et simultanées est la somme des réponses indépendantes et relatives à chacune des conditions élémentaires.

Dans le cas d'un pompage en régime perturbé, le rabattement observé résulte donc de la somme des deux effets :

- effet du pompage du débit constant
- effet de la perturbation.

$$s_{obs} = s_p + \Delta h$$

où s_{obs} = rabattement observé

s_p = rabattement dû au pompage

Δh = variation positive ou négative du niveau due à la perturbation.

Si l'on peut déterminer par un moyen approprié les effets dus à la perturbation, on peut déduire le rabattement provoqué par le pompage par simple soustraction du rabattement observé de l'effet parasite :

$$s_p = s_{obs} - \Delta h$$

s_p = rabattement dû aux seuls effets du pompage, appelé aussi rabattement corrigé.

3.3. Mesures "supplémentaires" nécessaires en pompage perturbé

Pour pouvoir interpréter les données d'un pompage d'essai en régime perturbé, il est nécessaire d'effectuer en plus des mesures habituelles relatives au pompage (débit, rabattement) des observations supplémentaires relatives aux variations du niveau de la nappe en période non influencée par le pompage.

On recommande donc de :

- commencer les mesures du niveau piézométrique dans les piézomètres et le forage quelques jours avant le démarrage de pompage et de les poursuivre durant quelques jours après la remontée.
- observer simultanément, (avant, pendant et après la durée du pompage d'essai) le facteur perturbant (pression atmosphérique, amplitude des marées, niveau du cours d'eau voisin, pluviomètre, débit de pompage d'un forage voisin etc..)*

Toutefois, dans certains cas (variations cycliques du niveau dues à l'influence des marées terrestres ou barométriques) on peut se servir des observations anciennes à condition que ces observations permettent d'établir une relation liant les effets à leur cause. La plus simple serait une relation linéaire du type :

* Un programme de calcul permet d'effectuer automatiquement les corrections des effets parasites (disponible au département SGN/AME).

$$\frac{\Delta h}{\Delta P} \approx C^{te}$$

où ΔP = amplitude de la perturbation

Δh = amplitude du niveau piézométrique causée par cette perturbation.

On signale aussi, que des enregistrements en continu sont nécessaires lorsqu'il s'agit de variations cycliques de courte période.

Enfin si l'on craint des fluctuations générales de la nappe, principalement celles provoquées par sa recharge verticale ou sa vidange naturelle, on doit conseiller de prévoir un piézomètre supplémentaire suffisamment éloigné pour que l'influence du pompage y soit négligeable.

3.4. Cas particulier des aquifères profonds

Dans le cas particulier des aquifères profonds (plusieurs centaines de m) où les différences de température et de salinité de l'eau peuvent modifier sa densité et sa viscosité dans une mesure non négligeable, les corrections des rabattements observés avant **interprétation** s'impose.

Pour effectuer ces corrections, il faut procéder à des mesures de température avant pompage (variation verticale dans le forage au repos), pendant le pompage (évolution de la température de l'eau pompée) et après arrêt de pompage ; en outre il faut contrôler l'évolution de la salinité en cours de pompage.

Ces méthodes de correction font l'objet d'un rapport distinct :

M. VANDENBEUSCH " *Essais et Mise en production des aquifères profonds*
Rapport N° 2 - Corrections de salinité, pression,
température sur les mesures piézométriques par
M. VANDENBEUSCH ".

(76 SGN 482 AME)

REFERENCES

/1/ M.S. HANTUSH (1964)

Hydraulique des puits - traduction BRGM
Rapport BRGM DS 67 A 119 - 1964

/2/ J. FORKASIEWICZ (1970)

Etablissement du programme des pompages d'essai
Rapport BRGM 70 SGN 115 HYD -
et Bull. BRGM III *Hydrogéologie*, 1970 n° 1.

/3/ G. TRUPIN (1969)

Manuel pratique des pompages d'essai (2ème édition)
Rapport BRGM 69 SGL 258 HYD

/4/ J. FORKASIEWICZ (1972)

Interprétation des données de pompage d'essai
pour l'évaluation des paramètres des aquifères -
Aide Mémoire (2ème édition revue et complétée)
Rapport BRGM 72 SGN 273 AME -

/5/ W.C. WALTON (1970)

Ground water resource evaluation
Mc Graw-Hill Book Company - New-York 1970

/6/ M. BONNET, J. FORKASIEWICZ, P. PEAUDCERF (1970)

Méthodes d'interprétation de pompages d'essai en nappe libre
Rapport BRGM 70 SGN 359 HYD -

/7/ J. FORKASIEWICZ, P. PEAUDCERF (1973)

Effet de la pénétration partielle d'un puits de pompage sur
l'évolution des rabattements
Rapport BRGM 73 SGN 441 AME -

/8/ J. FORKASIEWICZ, J. MARGAT, P. PEAUDCERF

Essais sur les forages artésiens jaillissants et sur les sources
Rapport BRGM 76 SGN 349 AME

/9/ G. DAGAN (1967)

A method of determining the permeability and effective porosity
of unconfined anisotropic aquifers
Water Resources Research vol. 3 n° 4 p. 1059-1071

/10/ R. DEGALLIER (1969)

Application de la méthode de Dagan à une nappe libre anisotrope
pénétrée partiellement
C.R. Congr. nat. hydrogéol. H. Schoeller, Bordeaux
Mémoires BRGM, n°76 p. 241 - 256

/11/ P. NEUMAN (1975)

Analysis of mapping data for anisotropic unconfined aquifers
considering delayed gravity response
Water Resources Research vol. 11 n° 2 p. 229-342

/12/ A.C. GRINGARTEN (1976)

Interprétation des pompages d'essai en milieu fissuré
Rapport BRGM (édition prévue fin 1976) 76 SGN 494 AME

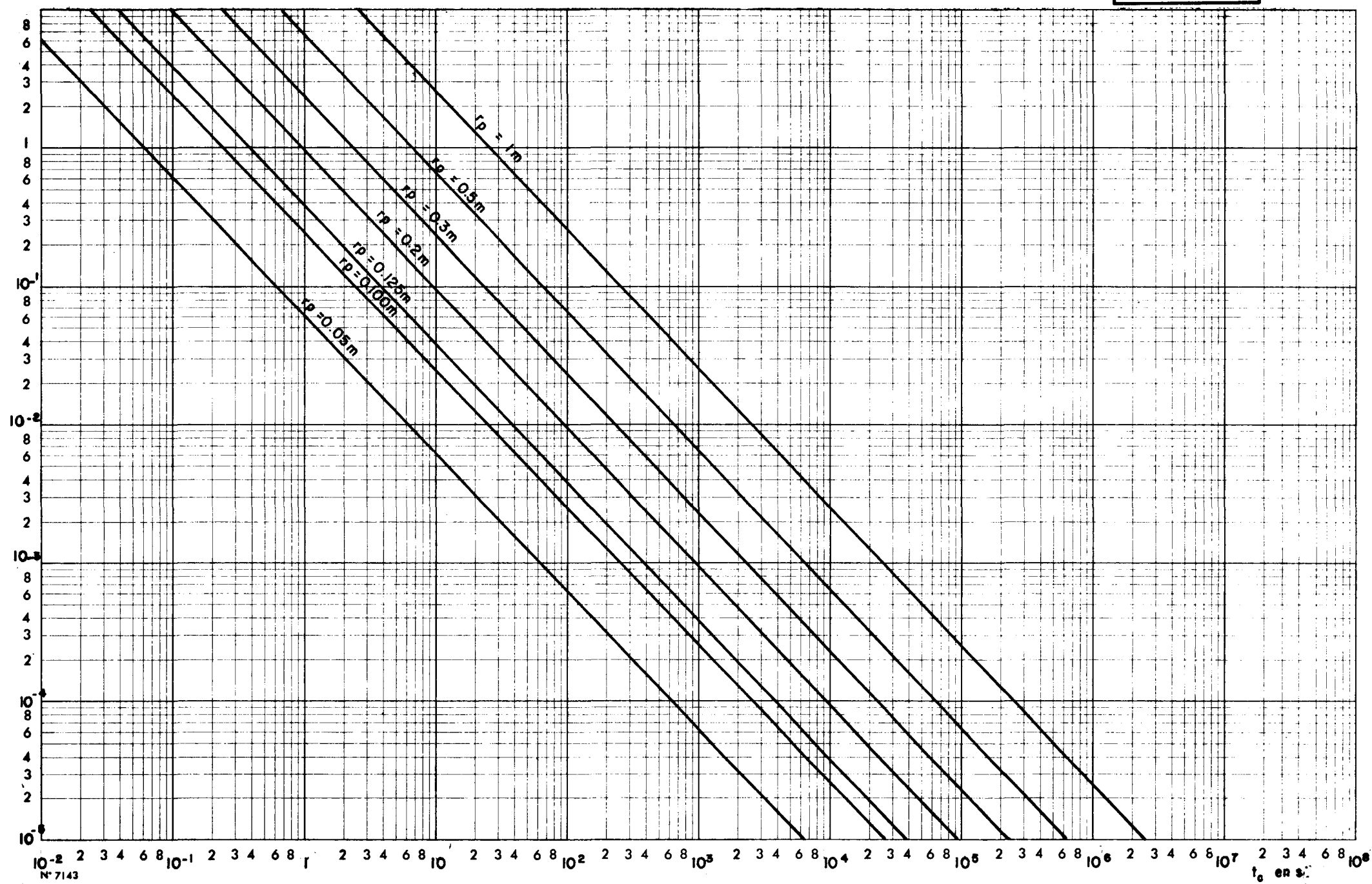
/13/ G.P. KRUSEMAN, N.A. DE RIDDER (1974)

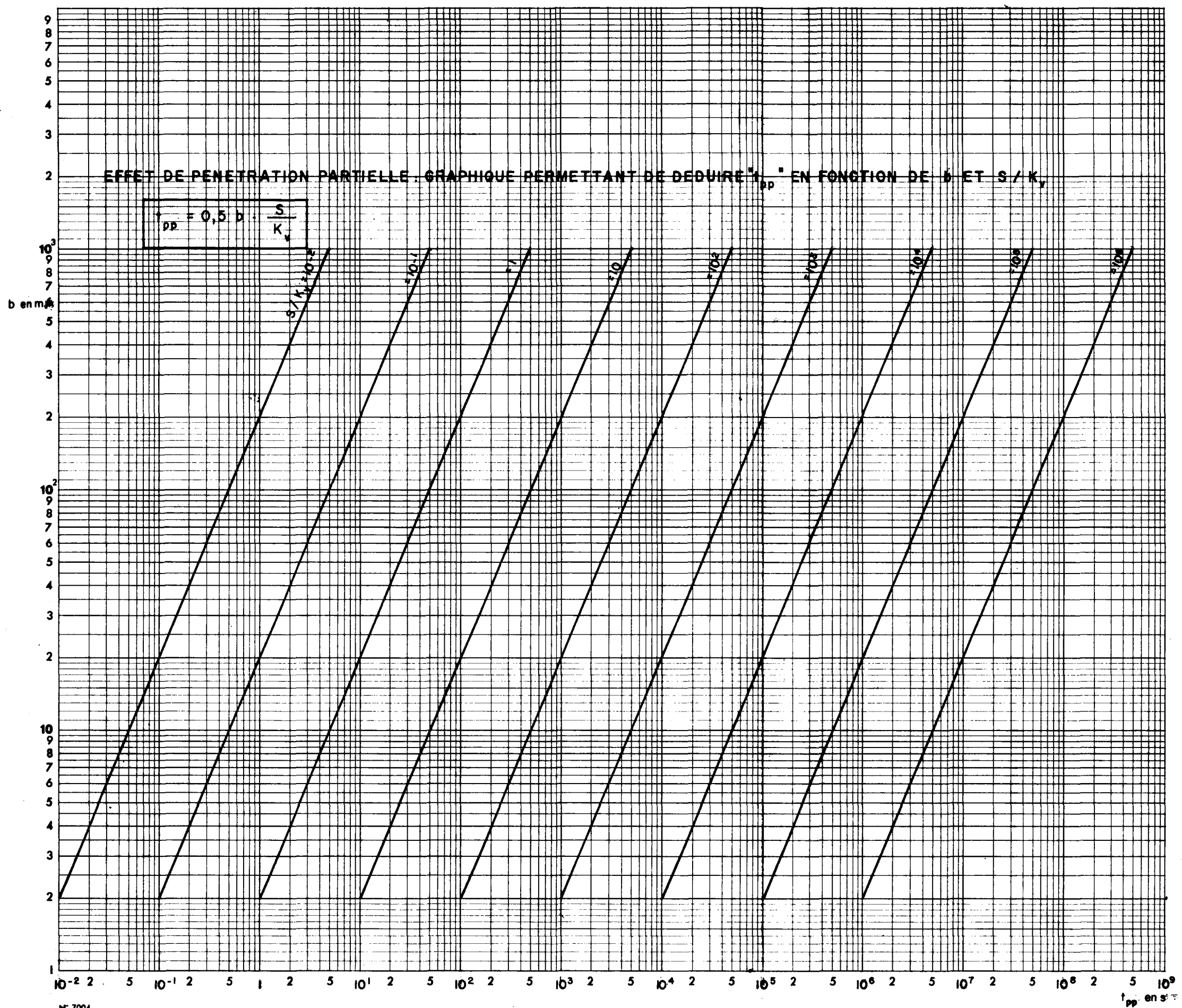
Interprétation et discussion des pompages d'essai
traduc. A. MEILHAC
(Intern. Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen
Bull. 11 F. ; traduction française du Bull-11, 1973).

EFFET DE CAPACITE : GRAPHIQUE PERMETTANT DE DEDUIRE t_c en fonction de T pour : $0,05 \text{ m} < r_p < 1,0 \text{ m}$

$$t_c = \frac{25r_p^2}{T}$$

T en m^2/s





EFFET DE PENETRATION PARTIELLE : GRAPHIQUE PERMETTANT DE DEDUIRE " t_{pp} " EN FONCTION DE " Sb " ET K_v 