

8 2 4

C AFW 76

AFRICAIN D'ÉTUDES HYDRAULIQUES
(C I E H)

EVALUATION DU DEBIT D'EXPLOITATION DES PUIITS DANS LES REGIONS A SUBSTRATUM CRISTALLIN D'AFRIQUE TROPICALE

par

le Bureau d'Etudes de Géologie Appliquée
(BURGEAP)



824-AFW76
9742

827
AEW

9742

COMITÉ INTER-AFRICAIN D'ÉTUDES HYDRAULIQUES

ÉVALUATION DU DÉBIT D'EXPLOITATION DES PUIITS
DANS LES RÉGIONS À SUBSTRATUM CRISTALLIN
D'AFRIQUE TROPICALE

Rapport de Synthèse

International Centre
for Community Water Supply

R. 206 - E. 223
Avril 1976

SOMMAIRE

	Page
<i>AVANT-PROPOS</i>	
<i>RÉSUMÉ DE L'ÉTUDE</i>	
<u>PREMIÈRE PARTIE - ÉTUDE THÉORIQUE ET SIMULATION DES ESSAIS DE PUITES SUR MODÈLE</u>	
<u>1.1. MÉTHODES USUELLES D'ÉVALUATION DU DÉBIT D'UN PUITES</u>	1
1.1.1. Méthode employée par les puisatiers	
1.1.2. Méthode de PORCHET	2
1.1.3. Méthodes de calcul du débit d'un puits basées sur la théorie de l'écoulement vers un puits en milieu homogène et en régime permanent	3
1.1.4. Méthodes basées sur la théorie de l'écoulement vers un puits en régime transitoire	3
<u>1.2. RÉALISATION DU MODÈLE</u>	5
1.2.1. Ecoulement autour d'un puits en milieu peu perméable	6
1.2.2. Equations de l'écoulement	6
1.2.3. Discretisation de l'équation et résolution numérique	7
1.2.4. Exemples de calcul	10
<u>1.3. CONSTRUCTION DES ABAQUES</u>	10
1.3.1. Abaque d'interprétation d'un essai de débit de courte durée.	10
1.3.1.1. Description de l'essai type	10
1.3.1.2. Réalisation pratique et interprétation des essais	11
1.3.1.3. Débit du puits à la fin de l'essai type	13
1.3.1.4. Influence des écarts entre les paramètres réels et ceux des abaques	14
1.3.2. Abaques donnant l'évolution du débit d'un puits exploité à son maximum, pendant huit mois de saison sèche, en présence d'une fluctuation naturelle du niveau de la nappe.	15
1.3.2.1. Construction des abaques	15
1.3.2.2. Influence des divers paramètres sur le débit des puits à long terme.	16

1.4. DETERMINATION DU DEBIT EXPLOITABLE D'UN OUVRAGE

- | | |
|---|----|
| 1.4.1. Débit exploitable d'un ouvrage | 18 |
| 1.4.2. Hauteur d'eau à laisser dans l'ouvrage en fin de chantier pour garantir un débit d'exploitation. | 19 |

DEUXIÈME PARTIE - APPLICATION DES MÉTHODES D'INTERPRÉTATION À UNE TRENTAINE DE PUIITS SITUÉS EN HAUTE VOLTA ET CÔTE D'IVOIRE

2.1. <u>DESCRIPTION DES MISSIONS</u>	20
2.2. <u>CHOIX ET DESCRIPTION DES SITES D'ESSAIS</u>	21
2.3. <u>INTERPRETATION DES ESSAIS</u>	26
2.3.1. Interprétation des essais effectués en 1ère phase	26
2.3.2. Interprétation des essais effectués en 2ème phase	28
2.3.3. Analyse des fluctuations du niveau piézométrique observées entre les deux phases d'essais - Comparaison avec les fluctuations enregistrées sur quelques bassins versants d'Afrique de l'Ouest.	
2.3.4. Analyse des débits mesurés lors des deux phases d'essais	33
2.3.4.1. Débit des puits lors de la 1ère phase d'essais	33
2.3.4.2. Comparaison du débit des puits entre la 1ère et la 2ème phase d'essais	33
2.3.4.3. Débit exploitable des puits utilisés	35
<u>CONCLUSION</u>	37

Liste des Annexes

- | | | |
|-------------------|---|---|
| <u>ANNEXE I</u> | - | ABAQUES D'INTERPRETATION DES ESSAIS DE DEBIT DE COURTE DUREE |
| <u>ANNEXE II</u> | - | EVOLUTION DU DEBIT D'UN PUIITS EN FONCTION DE LA FLUCTUATION SAISONNIERE DE LA NAPPE |
| <u>ANNEXE III</u> | - | Liste caractéristique des puits étudiés
Résultats de la campagne d'essais de débit |
| <u>ANNEXE IV</u> | - | LA METHODE DE PORCHET
d'après R. BREMOND (GAUTHIER-VILLARS 1965)(doc. n° 6) |

BIBLIOGRAPHIE

LISTE DES FIGURES
(dans le texte)

- Figure 1 Méthode de PORCHET - Simulation sur modèle des débits pendant la phase de pompage et de remontée.
- Figure 2 Rabattement autour d'un puits après deux heures de pompage.
- Figure 3 Rabattement final autour d'un puits maintenu à niveau constant pendant 8 mois.
- Figure 4 Débit d'exhaure nécessaire pour vidanger en 2 heures une citerne cylindrique verticale.
- Figure 5 Influence de la hauteur mouillée initiale H_m et de la perméabilité K sur le débit instantané.
- Figure 6 Influence du temps de pompage et du diamètre du puits sur la forme des courbes de remontée.
- Figure 7 Influence du coefficient d'emmagasinement et du débit de pompage sur la forme des courbes de remontée.
- Figure 8 Historique du pompage simulé sur modèle pour la construction des abaques II.
- Figure 9 Position schématique du niveau piézométrique au voisinage d'un puits dans diverses conditions d'exploitation.
- Figure 10 Courbe caractéristique de la pompe (Plongex type 55 D 211).
- Figure 11 Situation géographique et climatologique des puits étudiés
- Figure 12 Rappel des profils type d'altération du socle.
- Figure 13 Bassin de Korhogo - Exemples de diagrammes de fluctuation de niveaux piézométriques.

LISTE DES TABLEAUX

<u>TABLEAU 1</u>	Hauteur d'eau à laisser dans l'ouvrage en fin de chantier pour garantir un débit exploitable donné.
<u>TABLEAU 2</u>	Situation géographique et climatique de puits étudiés.
<u>TABLEAU 3</u>	Situation géomorphologique des puits étudiés.
<u>TABLEAU 4</u>	Situation géologique des puits étudiés.
<u>TABLEAU 5</u>	Classement des puits étudiés par hauteur d'eau.
<u>TABLEAU 6</u>	Classement des puits étudiés par profondeur de niveau statique sous le sol.
<u>TABLEAU 7</u>	Résultats de l'interprétation des essais de débit effectués en début de saison sèche.
<u>TABLEAU 8</u>	Résultats de l'interprétation des essais de débit effectués en fin de saison sèche.
<u>TABLEAU 9</u>	Fluctuation du niveau de la nappe entre les deux phases d'essai.
<u>TABLEAU 10</u>	Comparaison des fluctuations observées sur les puits visités aux fluctuations enregistrées sur quelques bassins versants témoins.
<u>TABLEAU 11</u>	Débits classés mesurés lors de la première phase d'essais.
<u>TABLEAU 12</u>	Comparaison des débits enregistrés aux deux phases d'essais sur quelques puits.
<u>TABLEAU 13</u>	Débit exploitable théorique de 14 puits visités, comparé au débit instantané de début de saison sèche.

LISTE DES SYMBOLES UTILISÉS

Hm	(m)	Hauteur mouillée initiale du puits
N.S.	(m)	Niveau statique
r	(m)	Rayon du puits
D	(m)	Diamètre du puits
Qp	(m ³ /h ou l/h)	Débit de pompage théorique
Qpr	(m ³ /h ou l/h)	Débit de pompage réel moyen
QN	(m ³ /h ou l/h)	Débit fourni par la nappe
Qi	(m ³ /h ou l/h)	Débit instantané à la fin de l'essai de débit type
s	(m)	Rabattement
sth	(m)	Rabattement théorique
t	(s)	Temps compté depuis le début du pompage
h	(m)	Potentiel hydraulique
T	(m ² /s)	Transmissivité de l'aquifère
K	(m/s)	Perméabilité de l'aquifère
A	(m ⁻¹)	Coefficient d'emmagasinement par unité de volume
S	(sans dim.)	Coefficient d'emmagasinement au voisinage de la surface libre (= porosité efficace).
Δh	(m)	Fluctuation naturelle du niveau de la nappe.
λ	= $\frac{\Delta H}{H_m}$	Fluctuation relative du niveau de la nappe.

AVANT - PROPOS

L'étude comparative des puits et des forages dans les régions à substratum cristallin d'Afrique de l'Ouest (8), confiée par le Comité Inter Africain d'Etudes Hydrauliques (financement FAC) au BURGEAP en 1970-71 avait mis en relief les faits suivants :

- Les essais de réception effectués sur différents puits sont peu comparables et généralement peu significatifs : la surestimation du débit des ouvrages paraît être la règle générale. Les critères d'appréciation objectifs concernant le débit exploitable dans les puits creusés dans les régions à substratum cristallin, manquent donc à peu près totalement.

- Les méthodes habituelles d'essai de débits conviennent mal aux puits de grand diamètre foncés dans des formations à faible perméabilité. Il faut donc mettre au point des méthodes plus spécifiques et mieux adaptées.

- Les importantes fluctuations de niveau de la nappe qu'on enregistre dans les formations cristallines d'Afrique tropicale provoquent une variation considérable du débit exploitable, de sorte qu'un essai ne permet de déterminer le débit exploitable dans le puits que pour l'état de la nappe au moment de l'essai. Il est par conséquent nécessaire d'extrapoler les résultats d'essai à l'époque des basses eaux en tenant compte à la fois de la fluctuation naturelle du niveau de la nappe et du rabattement dû au puisage lui-même.

Le but de la présente étude réalisée en 1974-75 est de mettre au point une méthode pratique permettant :

- pour les puits terminés, de prévoir le débit exploitable à l'époque de l'étiage de la nappe, à partir des données d'un essai rapide, effectué à un moment quelconque.

- pour les puits en cours, de déterminer à partir des données d'un essai rapide, effectué en cours de travaux, la profondeur qui devra être donnée à l'ouvrage pour lui assurer un débit suffisant à la période des basses eaux.

(8) voir bibliographie

L'étude réalisée pour le C.I.E.H. a comporté trois phases principales :

- Une phase sur le terrain de 4 mois et demi au cours de laquelle une trentaine de puits situés en Haute Volta et en Côte d'Ivoire ont été testés en début et en fin de saison sèche. Le matériel acheté par BURGEAP pour réaliser ces essais a été remis au C.I.E.H. à la fin de la campagne.

- Une phase d'analyse mettant en oeuvre un modèle de simulation des écoulements tridimensionnels au voisinage d'un puits et aboutissant à la construction d'abaques.

- Une phase d'interprétation des essais effectués sur le terrain à l'aide des abaques.

Au cours de cette étude, de nombreux organismes nous ont apporté leurs concours et nous tenons à remercier vivement tous ceux qui ont facilité notre tâche, particulièrement :

- MM. GAGARA, CALES, BENAMOUR du C.I.E.H.
- MM. BRINDAMOUR et MARY du H.E.R. de Haute Volta
- MM. KAKADIE et BOURGEOIS du Service Hydraulique de Côte d'Ivoire.
- MM. BELIARD et CASANOVA du Laboratoire de Géologie de la Faculté des Sciences d'Abidjan
- MM. LENOIR et CAMUS de l'ORSTOM à Abidjan.
- M. BILLIAUT de l'A.V.B.
- MM. BERARD et SOLAGES de l'A.V.V.

✻

✻

✻

RESUME DE L'ETUDE

Pour des puits foncés dans des terrains peu perméables (tels ceux du substratum cristallin de l'Afrique de l'Ouest), les méthodes classiques d'interprétation d'essais de débit ne sont guère applicables car elles négligent l'effet de capacité du puits et la tridimensionalité des écoulements au voisinage du puits.

La mise au point d'une méthodologie d'essai différente des méthodes usuelles apparaît donc nécessaire dans le but de déterminer le débit exploitable d'un ouvrage.

Elle consiste, moyennant certaines hypothèses restrictives – auxquelles il faut se ramener si on ne veut pas multiplier à l'excès le nombre de paramètres à déterminer la perméabilité K de l'aquifère à partir d'un essai type de courte durée : dans ce but, une série d'abaques a été calculée au moyen d'un modèle de simulation de l'écoulement tenant compte des effets tridimensionnels, de puits et de surface libre. La perméabilité K étant ainsi déterminée, une deuxième série d'abaques calculée au moyen du même modèle de simulation, permet de déterminer le débit exploitable à long terme en fonction de la hauteur mouillée dans le puits au repos, et en fonction des fluctuations saisonnières naturelles de la nappe.

Les utilisateurs de la méthode peuvent se ramener directement aux abaques calculés dans le présent rapport pour différents jeux de paramètres sans avoir recours au modèle mathématique employé pour les construire.

Il résulte de l'examen de ces abaques un certain nombre de remarques d'intérêt général :

- le débit à long terme d'un puits augmente de 25% environ lorsque son diamètre passe de 0,90 mètre à 1,80 mètre,
- le débit maximum d'un puits diminue environ de 30% entre 2 heures de pompage et huit mois en l'absence de toute fluctuation de la nappe,
- les hauteurs d'eau à laisser dans un puits, pour un débit d'exploitation donné, en fin de chantiers peuvent être déterminés à l'aide de la deuxième série d'abaques.

L'étude a fait l'objet d'une application pratique assez développée sur une trentaine de puits situés en Haute Volta et en Côte d'Ivoire. Au cours de deux missions sur le terrain (l'une au début, l'autre à la fin de la saison sèche), des essais ont été pratiqués suivant une norme appropriée à l'utilisation des abaques.

Les abaques tracés à l'aide du modèle, ont permis d'interpréter 15 essais sur les 33 réalisés en début de saison sèche et de déduire un " débit instantané", une valeur de perméabilité et un " débit exploitable ". Pour ces 15 essais, il s'agit de puits foncés dans des terrains à faible perméabilité (de 10^{-7} à 10^{-5} m/s) et de débit inférieur à 1,5 m³/h.

Pour les essais qui n'ont pu faire l'objet d'une interprétation rigoureuse, deux raisons principales peuvent être invoquées :

- soit les essais ont été pratiqués sur des puits exploités, et le niveau initial ne représentait pas le niveau statique,

- soit le milieu aquifère était plus complexe que celui représenté sur le modèle et comportait une hétérogénéité verticale se traduisant par la présence d'un niveau de circulation préférentielle beaucoup plus perméable.

La réalisation des deux missions avait pour but d'appréhender la différence du débit exploitable en début et en fin de saison sèche. Dans la majorité des puits testés, la fluctuation saisonnière de la nappe a été faible entre les deux dates d'essais, et le puits n'était pas exploité à sa capacité maximum (c'est-à-dire que la hauteur d'eau dans le puits était bien supérieure à 1 mètre). Pour ces deux raisons, les différences de débit exploitable en début et en fin de saison sèche sont peu sensibles, mais elles sont en général du même ordre de grandeur que celles calculées à l'aide des abaques. Cependant, pour les puits où il existe une hétérogénéité verticale nous avons constaté que le débit exploitable décroît vite au début de la saison sèche si le niveau fortement perméable est situé dans la zone de battement du niveau piézométrique, ou au contraire, qu'il reste pratiquement constant si le niveau fortement perméable est situé à une profondeur suffisamment grande par rapport à la zone de dénoyage de l'aquifère.

* * *

*

PREMIÈRE PARTIE

**ÉTUDE THÉORIQUE ET SIMULATION DES
ESSAIS DE PUIITS SUR MODÈLE**

1.1. METHODES USUELLES D'EVALUATION DU DEBIT D'UN PUIITS

Il convient de préciser au départ que le débit d'un puits n'est pas une grandeur physique intrinsèque et constante, mais qu'il dépend de l'historique des prélèvements antérieurs exercés sur le puits. Dans l'ensemble de l'étude, nous avons supposé que le puits étudié est dans un milieu infini homogène et isotrope, et donc que l'écoulement à son voisinage n'est perturbé que par les débits effectivement prélevés au puits et par les possibilités d'alimentation de la nappe par infiltration. La définition du débit exploitable d'un puits tiendra compte en particulier de la durée de la saison sèche (sans alimentation) et des prélèvements antérieurs.

Les essais de puits de courte durée, réalisés à un moment quelconque de l'année, permettent de calculer un débit maximum instantané prélevé dans la nappe, mais il peut être notablement différent du débit exploitable en fin de saison sèche, et même du débit moyen exploitable au cours de l'année.

Le débit exploitable dépend de la configuration de l'ouvrage et des paramètres intrinsèques de l'aquifère : perméabilité, épaisseur, coefficient d'emménagement. Parmi les différentes méthodes usuelles décrites ci-dessous pour interpréter les essais de courte durée, aucune n'est bien adaptée pour déterminer les paramètres hydrodynamiques, et il est donc difficile de les appliquer pour déterminer le débit exploitable d'un ouvrage.

1.1.1. Méthode employée par les puisatiers

Le puits est vidé avec une pompe à débit constant en un temps déterminé. On connaît ainsi le volume d'eau refoulé hors du puits pendant l'essai. En retranchant de ce volume, le volume d'eau contenu dans le puits avant l'essai (1) on obtient le volume écoulé de la nappe vers le puits pendant le temps de l'essai, ce qui donne une première idée du " débit du puits ".

On complète cette donnée en mesurant la vitesse de remontée de l'eau dans le puits pendant des intervalles de temps successifs égaux après l'arrêt du pompage. A chaque valeur de vitesse $\frac{\Delta s}{\Delta t}$ on associe un débit Q_N en écrivant :

$$Q_N = \pi r^2 \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad \begin{array}{l} (r \text{ rayon du puits}) \\ (\Delta s \text{ variation du niveau d'eau pendant le} \\ \text{temps } \Delta t) \end{array}$$

(1) Si le puits comprend un captage avec massif filtrant de graviers, la contribution du volume d'eau contenu au départ dans le massif de gravier peut ne pas être négligeable ; on peut alors l'estimer en multipliant le volume saturé de l'espace annulaire par une porosité de l'ordre de 30%.

La moyenne des débits ainsi obtenus pendant la première heure de remontée fournit une autre approximation du " débit du puits ".

Cette méthode appelle les remarques suivantes :

- Le débit (Q_N) de la plupart des puits forés dans les régions à substratum cristallin d'Afrique de l'Ouest est de l'ordre de quelques centaines de litres/heure, soit moins de 10% des débits de pompage couramment utilisés dans les essais (5 à 30 m³/h).

Pendant la phase de pompage ce débit Q_N , fourni par la nappe, est évalué par différence entre deux quantités du même ordre de grandeur : le débit de pompage (Q_p) et le débit venant de la réserve du puits (Q_R). Ainsi une faible erreur relative sur Q_p et Q_R provenant de l'imprécision dans la détermination du débit pompé ou dans celle du rayon efficace du puits entraîne une forte erreur relative sur Q_N au point que le résultat peut être dépourvu de toute signification. Le débit mesuré pendant la première heure de remontée est donc en général plus significatif.

- Le débit Q_N n'est pas une grandeur liée intrinsèquement à l'ouvrage. Il varie au cours de la vie du puits sous le double effet du puisage prolongé et de la fluctuation saisonnière du niveau de la nappe.

1.1.2. Méthode de PORCHET (annexe IV)

La méthode de PORCHET est un peu plus élaborée ; elle repose sur l'interprétation des courbes de rabattement et de remontée de niveau d'eau dans le puits à la suite d'un essai de pompage à débit constant (Q_p). On admet classiquement que cette méthode permet de calculer pour chaque niveau le débit q utilisable et d'obtenir ainsi une caractéristique de l'ouvrage à la date de l'essai.

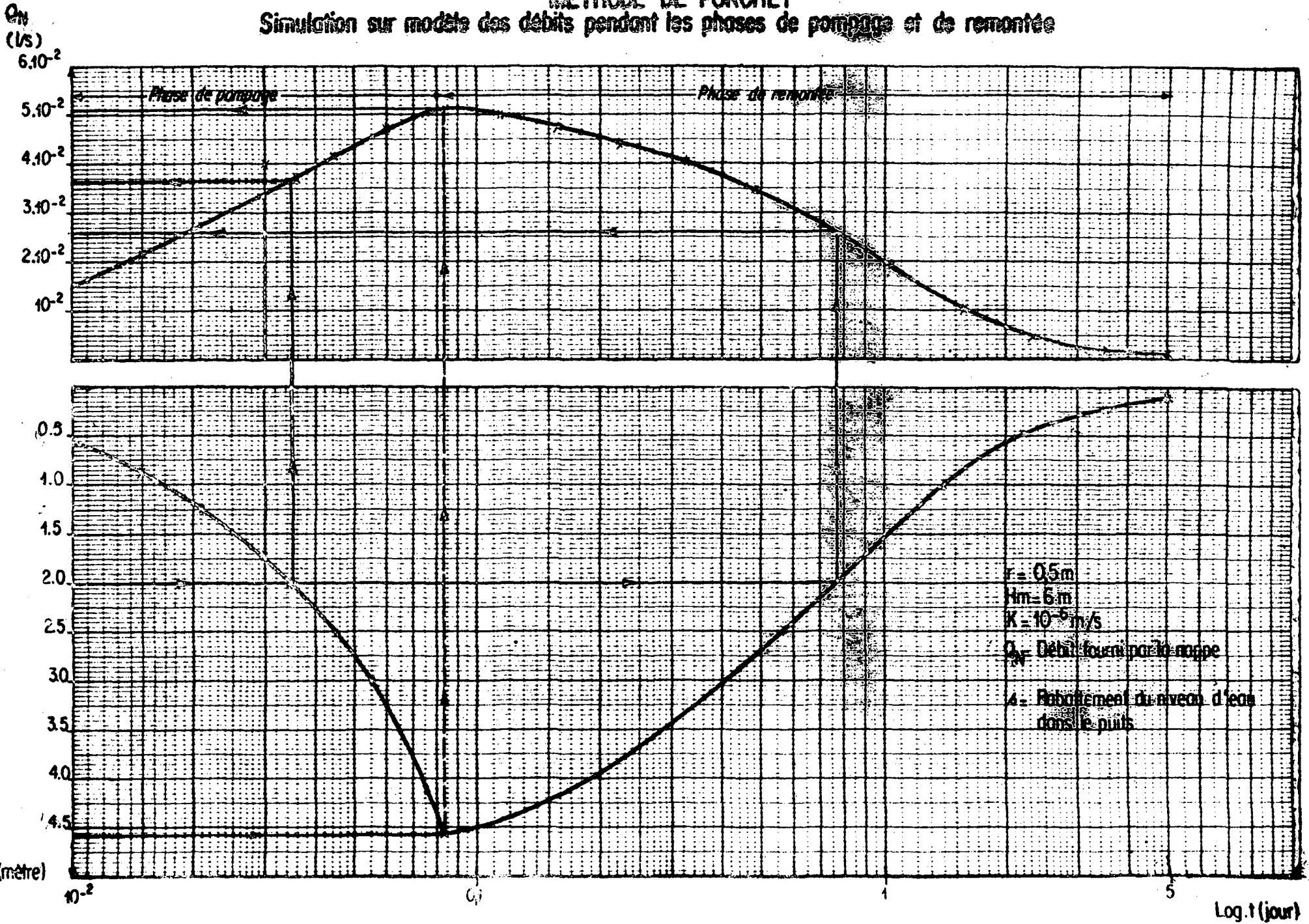
L'hypothèse principale de la méthode est que le débit Q_N de la nappe, pour un rabattement donné, est le même dans la phase de descente et dans la phase de remontée. Cette hypothèse semble injustifiée car on sait que le débit d'alimentation, à rabattement constant, décroît en fonction du temps. La vérification " in situ " de cette hypothèse est délicate voire impossible étant donné la difficulté de mesurer le débit de la nappe pendant la phase de descente.

Un résultat obtenu par modèle mathématique est représenté sur la Fig. 1. Nous avons reporté en fonction du logarithme du temps le débit de la nappe Q_N et le rabattement s calculés pendant un pompage de 2 heures à débit constant suivi d'une remontée de 5 jours.

Au voisinage de l'arrêt du pompage ($s = 4,5$ m) Q_N est le même dans les phases de descente et de remontée. Par contre pour $s = 2$ m les débits diffèrent de 25% pendant le pompage et à la remontée.

MÉTHODE DE PORCHET

Simulation sur modèle des débits pendant les phases de pompage et de remontée



La méthode de PORCHET n'est donc exacte qu'au moment de l'arrêt du pompage. Elle fournit une valeur de " débit maximal instantané " du puits.

1.1.3. Méthodes de calcul du débit d'un puits basées sur la théorie de l'écoulement vers un puits en milieu homogène et en régime permanent (9)

Il s'agit de formules proposées par différents auteurs à la suite de DUPUIT pour calculer en fonction du rabattement stabilisé le débit d'un puits de géométrie donnée pénétrant partiellement ou totalement dans la nappe, creusé dans un milieu aquifère donné, lorsqu'un régime permanent est établi.

L'intérêt de ces formules est limité pour deux raisons :

- Elle nécessitent la connaissance de la perméabilité K de l'aquifère, inconnue a priori.

- Elles supposent qu'un régime permanent est établi, ce qui ne peut être le cas qu'à proximité d'une zone de réalimentation de l'aquifère (mare, retenue derrière un barrage, marigot permanent) et au bout d'un temps de pompage assez long. De plus, ces méthodes théoriques, de même que les méthodes pratiques décrites précédemment, ne permettent pas de déterminer l'évolution transitoire du débit au cours du temps et donc de connaître le débit réellement exploitable en régime continu.

1.1.4. Méthodes basées sur la théorie de l'écoulement vers un puits en régime transitoire

1.1.4.1. Les méthodes les plus couramment employées pour interpréter un essai de pompage en régime transitoire se prêtent très mal au cas d'un puits à grand diamètre : l'équation de THEIS (1935) ou son approximation logarithmique (JACOB, 1950) ne sont applicables que pour un rayon du puits infiniment petit. Elles négligent donc l'effet de capacité qui est un phénomène prépondérant dans le cas des puits à grand diamètre.

La méthode de HANTUSH (1964) pour un puits de diamètre fini, suppose que le débit entrant dans le puits est égal au débit pompé, ce qui n'est pas le cas.

1.1.4.2. PAPADOPOULOS et COOPER (1967) ont cherché à remédier à ces difficultés en prenant en compte un effet de puits transitoire (14). Ils proposent des abaques d'interprétation d'essai de débit sur un puits à grand diamètre permettant de déterminer la transmissivité T de l'aquifère. Ils montrent aussi que l'effet de capacité du puits est négligeable au bout d'un temps $t > 2500 D^2/4T$, D étant le diamètre du puits. Pour $D = 1$ mètre, $T = 25 \cdot 10^{-6}$ m²/s (valeur moyenne pour les puits d'Afrique de l'Ouest), on trouve $t > 30$ jours. On trouverait un temps trois fois plus long dans le cas d'un puits de diamètre 1,80 m. La durée d'un tel essai serait prohibitive.

Cette méthode a été testée avec succès (13) dans le cas de 6 puits à grand diamètre (1,80 m à 4,80 m) foncés dans des alluvions près de Madras (Indes). Les transmissivités étaient assez élevées ($1,2 \cdot 10^{-3}$ à $5,3 \cdot 10^{-2}$ m²/s).

1.1.4.3. Critique de la méthode de PAPADOPOULOS - COOPER

La méthode de PAPADOPOULOS - COOPER est la mieux adaptée à l'interprétation d'essais de débits sur des puits à grand diamètre foncés dans des milieux à bonne perméabilité. L'hypothèse commune sur laquelle reposent les méthodes de THEIS et PAPADOPOULOS - COOPER est de supposer négligeable la composante verticale de l'écoulement au voisinage du puits. Cette hypothèse est acceptable dans le cas de puits à grand diamètre foncés dans des terrains à bonne perméabilité (10^{-5} à 10^{-2} m/s), mais dans le cas des puits foncés dans des terrains à faible perméabilité (10^{-5} à 10^{-8} m/s) cas le plus courant en Afrique de l'Ouest, cette hypothèse n'est plus valable : l'alimentation du puits pendant un pompage se produit en grande partie le long d'une surface de suintement (paroi dénoyée du puits) ainsi que par le fond (1).

(1) Une telle surface de suintement a été observée dans certains puits par des venues d'eau situées nettement au-dessus du niveau dynamique de pompage. Elle peut être simulée soit par méthodes analogiques (14), soit par modèle mathématique. Dans le cadre de la présente étude, un seul essai (n° 24) nous fournit une indication sur l'existence d'une surface de suintement grâce à la présence d'un piézomètre situé à 7 m du puits. En fin d'essai les rabattements étaient respectivement de 5,70 m et 0,15 m dans le puits et dans le piézomètre. L'interprétation de la réponse du piézomètre par la méthode de JACOB conduit à un rabattement théorique de 1,70 m à la paroi du puits. Une telle différence (4 m) entre les rabattements réels et théoriques dans le puits ne peut être expliquée par les seules pertes de charges " anormales " au voisinage du puits. Ces dernières sont en effet liées aux vitesses de circulation ; elles sont donc faibles étant donné la faible perméabilité du milieu (10^{-6} m/s dans ce cas).

D'autres observations relatives à l'existence d'une surface de suintement ont été faites dans des régions cristallines aux Indes et sont rapportées par E.A. SAMMEL (15).

1.2. REALISATION DU MODELE

La détermination du débit exploitable dans un puits foncé dans un terrain à faible perméabilité passe par deux stades qui seront étudiés l'un après l'autre :

- Détermination des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère, en particulier de la perméabilité K au moyen d'un essai de pompage de courte durée.

- Calcul du débit exploitable en fonction des caractéristiques du puits, du terrain et des variations naturelles du niveau de la nappe.

Cette méthode en deux stades s'inspire de l'étude du mécanisme physique de l'écoulement de l'eau dans un milieu poreux. Le premier stade permet de calculer les coefficients hydrodynamiques du milieu, le deuxième stade permet de calculer l'évolution du débit d'exploitation en faisant des hypothèses sur les conditions aux limites. Il ne s'agit donc pas d'une simple extrapolation d'un essai d'une durée de l'ordre de deux heures à une durée de l'ordre de 8 mois. L'évolution du débit à long terme est calculée en supposant réunies deux hypothèses :

- le milieu est homogène, infini et isotrope,
- l'évolution naturelle du niveau de la nappe est connue.

En fait, ces deux hypothèses ne sont pas toujours satisfaites et elles le sont d'autant moins que la période au cours de laquelle on veut connaître l'évolution du débit est longue ; en effet, lors d'un essai de courte durée la partie de l'aquifère intéressée par le pompage est localisée autour du puits, et on peut raisonnablement supposer que l'homogénéité de l'aquifère est effective sur un volume relativement restreint autour du puits ; par contre lorsque la durée du pompage devient plus grande, les effets du pompage se font ressentir plus loin et plus profondément, si bien que, si on se trouve en présence de couches profondes différentes de la couche superficielle dans laquelle le puits est creusé, ou si le milieu vient à changer pour une raison géomorphologique, les hypothèses ne sont plus satisfaites.

Cette difficulté est inhérente aux terrains à faible perméabilité. En effet dans les aquifères de bonne qualité, les essais de durée relativement courte suffisent souvent à tester les aquifères, car la nappe réagit au loin en très peu de temps et le pompage a souvent vite fait d'intéresser une zone suffisamment grande correspondant à un bassin possible de réalimentation.

Cette critique étant faite au départ, il n'y a évidemment aucun moyen de contourner cette difficulté et on est obligé de faire une hypothèse sur la pérennité des conditions aux limites. L'hypothèse la plus simple est de supposer le milieu homogène, infini et isotrope.

Cette méthode qui sera exposée en détail dans ce rapport, n'est pas la seule façon d'essayer de résoudre le problème. On pourrait également employer une méthode statistique basée sur un grand nombre d'expériences in situ et établir une loi de corrélation entre les débits exploitables et différentes variables telles que profondeur et diamètre du puits, rapport du débit d'essai au rabattement etc. Cette deuxième méthode n'est pas développée dans notre étude car il aurait fallu un grand nombre de données pour établir les lois statistiques, et les coefficients de régression partielle auraient été vraisemblablement difficiles à calculer, étant donné que dans cette méthode, comme dans la précédente, les variables sur l'hétérogénéité du terrain n'auraient pu être prises en compte puisqu'on ne les connaît pas a priori.

Avant d'exposer les deux stades de la méthode, il convient d'étudier le mécanisme des écoulements autour d'un puits dans un milieu peu perméable.

1.2.1. Écoulement autour d'un puits en milieu peu perméable

L'écoulement est radial (l'axe du puits vertical étant un axe de symétrie), tridimensionnel (le potentiel hydrodynamique n'est pas le même le long d'une même verticale : l'écoulement n'est donc pas cylindrique), à surface libre (le milieu aquifère se dénoie en surface, en particulier au voisinage du puits), à surface de suintement le long de la paroi du puits (le niveau d'eau dans le puits se trouve plus bas que le niveau d'eau de la surface libre au voisinage du puits).

1.2.2. Equations de l'écoulement

L'écoulement monophasique en milieu poreux est régi par l'équation de diffusivité qui s'écrit :

$$\operatorname{div} \overline{K \operatorname{grad} h} = A \frac{\partial h}{\partial t} + q$$

avec K : perméabilité du milieu aquifère (coefficient de DARCY)
dimension LT^{-1}

A : coefficient d'emménagement par unité de volume : dimension L^{-1}

h : potentiel hydrodynamique : dimension L

q : débit d'échange avec le milieu extérieur par unité de volume :
dimension T^{-1}

En écoulement radial l'équation s'écrit :

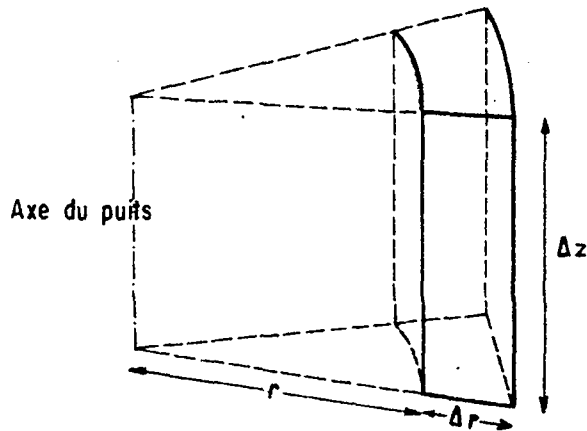
$$K \left[\frac{\partial^2 h}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial r} \right] = \frac{\partial h}{\partial t} + q$$

avec z : coordonnée dans le sens vertical

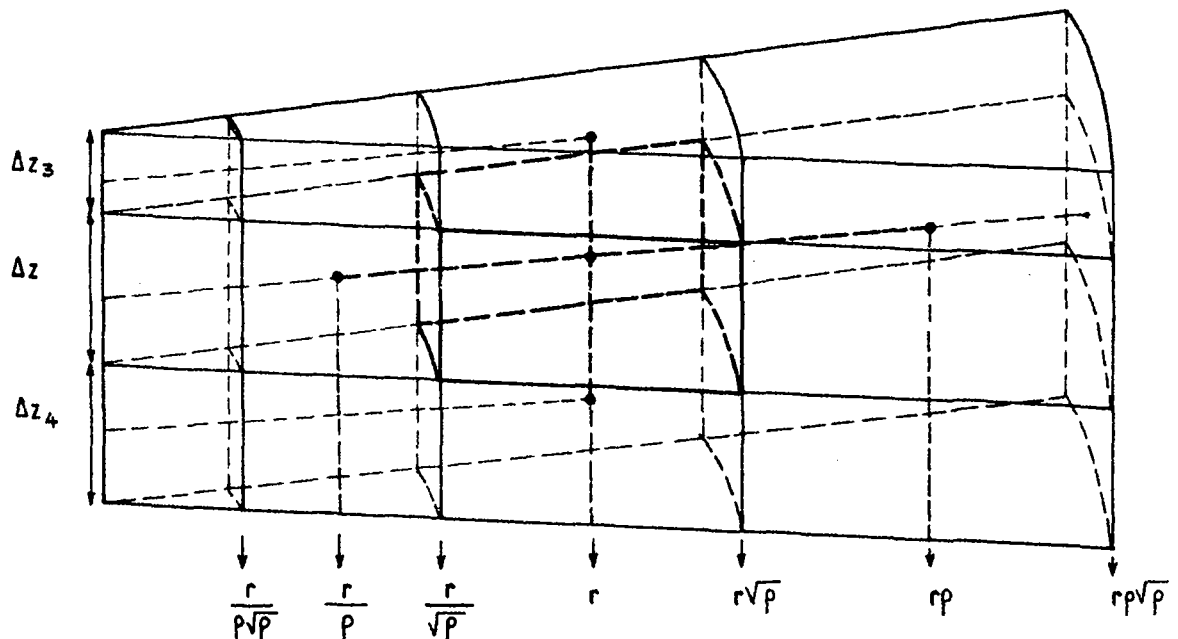
r : distance d'un point à l'axe de symétrie.

1.2.3. Discretisation de l'équation et résolution numérique

L'équation précédente est valable pour un volume infinitésimal ayant la forme d'un secteur d'anneau cylindrique de hauteur Δz et de largeur Δr lorsque Δz et Δr tendent vers zéro.



La discrétisation consiste à l'appliquer à un volume de même forme, mais de dimensions finies. Sachant que le rabattement autour d'un puits évolue logarithmiquement en fonction de la distance, nous choisissons de découper l'espace en cylindres dont les rayons croissent géométriquement avec une raison ρ . L'axe oz est découpé en plans horizontaux distants d'une longueur Δz .



On peut exprimer le potentiel h d'une maille dont le centre est distant de r de l'axe de symétrie en fonction des potentiels h_1, h_2, h_3, h_4

$$h_1 : \text{ maille voisine de gauche dont le centre est distant de } r - \frac{r}{\rho} = r \left(1 - \frac{1}{\rho} \right)$$

$$h_2 : \text{ maille voisine de droite dont le centre est distant de } r\rho - r = r(\rho - 1)$$

$$h_3 : \text{ maille voisine du dessus dont le centre est distant de } \frac{\Delta z + \Delta z_3}{2}$$

$$h_4 : \text{ maille voisine du dessous dont le centre est distant de } \frac{\Delta z + \Delta z_4}{2}$$

Ecrivons que la somme des flux au travers des facettes de la maille est égale au débit d'échange avec l'extérieur augmenté du débit emmagasiné.

$$F_G + F_D + F_H + F_B = F_E + q \quad (1)$$

Flux entrant par la facette cylindrique de gauche :

$$F_G = K \times 2\pi \frac{r}{\sqrt{\rho}} \times \frac{h - h_1}{r - \frac{r}{\rho}} \Delta z = K \times 2\pi \sqrt{\rho} \times \frac{h - h_1}{\rho - 1} \Delta z$$

Flux entrant par la facette cylindrique de droite :

$$F_D = K \times 2\pi r \sqrt{\rho} \times \frac{h - h_2}{r\rho - r} \Delta z = K \times 2\pi \sqrt{\rho} \times \frac{h - h_2}{\rho - 1} \Delta z$$

Flux entrant par la facette du dessus :

$$F_H = K \times 2\pi \frac{r\sqrt{\rho} + \frac{r}{\sqrt{\rho}}}{2} \times \left(r\sqrt{\rho} - \frac{r}{\sqrt{\rho}} \right) \frac{h - h_3}{\frac{\Delta z + \Delta z_3}{2}} = K \times 2\pi r^2 \left(\rho - \frac{1}{\rho} \right) \frac{h - h_3}{\Delta z + \Delta z_3}$$

Flux entrant par la facette du dessous :

$$F_B = K \times 2\pi r^2 \left(\rho - \frac{1}{\rho} \right) \frac{h - h_4}{\Delta z + \Delta z_4}$$

Flux emmagasiné :

$$F_E = A \times 2\pi \frac{r\sqrt{\rho} + \frac{r}{\sqrt{\rho}}}{2} \times \left(r\sqrt{\rho} - \frac{r}{\sqrt{\rho}} \right) \Delta z (h - h_0) = A \times \pi r^2 \left(\rho - \frac{1}{\rho} \right) \Delta z (h - h_0)$$

(h_0 : potentiel initial dans la maille)

L'équation 1, lorsqu'on remplace les flux par leur expression en fonction du potentiel, est une équation linéaire en h . Cette équation étant écrite pour chaque maille, la fonction h peut être calculée en résolvant le système d'équations linéaires.

Pour tenir compte de la surface libre, les mailles situées au-dessus sont déconnectées et les mailles contenant la surface libre ont les caractéristiques suivantes :

- Leur coefficient d'emmagasinement n'est plus $A\Delta z$ par unité de surface mais $A\Delta z + S$, S étant le coefficient d'emmagasinement représentant la porosité du terrain.

- Les flux d'échange de gauche et de droite ne sont plus proportionnels à Δz mais à $h_0 - z$, z étant la cote du plancher de la maille.

Le système d'équation prend également en compte les conditions aux limites de l'écoulement aux puits :

- $q =$ constante dans la maille correspondant au fond du puits = débit pompé.

- Pour les mailles de puits situées au-dessus de la précédente, elles peuvent être dans trois états différents :

- vides : elles sont déconnectées du calcul
- suintantes : elles sont à potentiel imposé $h = z$
- pleines d'eau : elles sont au potentiel de la maille du fond du puits.

Aux mailles du puits les coefficients de l'équation sont modifiés pour tenir compte de la forme géométrique du puits et du fait qu'il n'y a pas de milieu poreux à l'intérieur du puits :

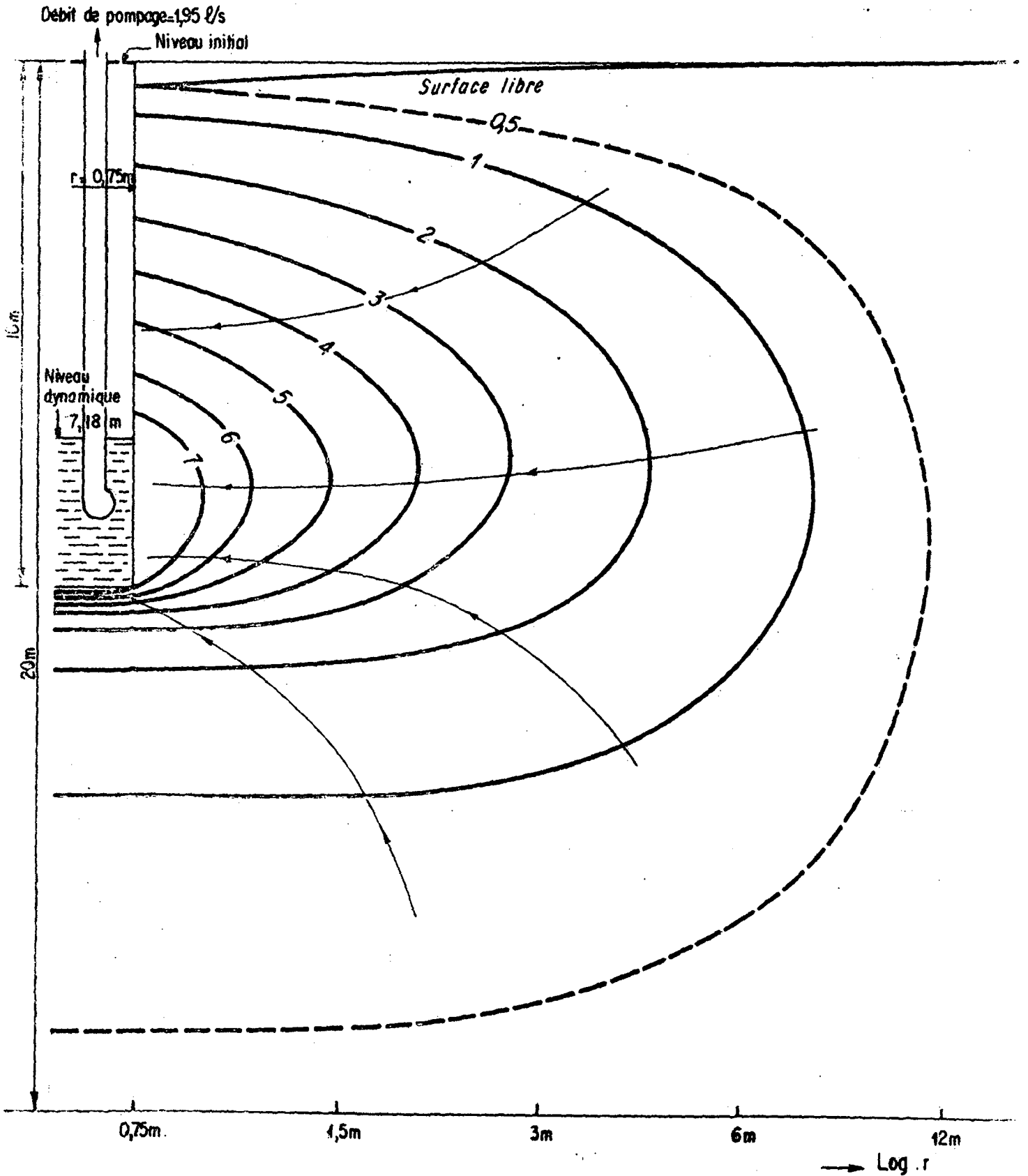
- les perméabilités verticales sont infinies entre deux mailles mouillées.

- le facteur $\left(\rho - \frac{1}{\rho} \right)$ disparaît dans les termes FH, FG, et FE pour tenir compte de l'espace circulaire du puits.

Fig.2

RABATTEMENT AUTOUR D'UN PUIS À APRÈS 2 HEURES DE POMPAGE
DANS UN AQUIFÈRE DE PERMÉABILITÉ $K=10^{-6} \text{ m/s}$

- 1 — Courbe equipotentielle
- Ligne de courant



- le coefficient ρ est remplacé par $\sqrt{\rho}$ dans les termes FG et FD.
- le coefficient d'emmagasinement est égal à 1 dans la maille de puits à surface libre.

Le système d'équations linéaires est résolu à chaque pas de temps en tenant compte des commutations de surface libre et des conditions de suintement sur la paroi du puits.

1.2.4. Exemples de calcul

Premier exemple

Un puits de diamètre 1,50 mètre, de 10 mètres de profondeur, est pompé à un débit constant de 1,95 l/s, dans un terrain aquifère de 20 mètres d'épaisseur et de perméabilité $K = 10^{-6}$ m/s ; le rabattement au bout de deux heures, au puits et en tout point de l'aquifère est donné figure 2.

On constate qu'en deux heures, la surface libre n'est pratiquement pas descendue et que la surface de suintement existe sur toute la hauteur dénoyée du puits. A 12 mètres du puits, les rabattements sont encore négligeables.

Deuxième exemple

Un puits de diamètre 1,50 mètre, de 16 mètres de profondeur, est maintenu pendant huit mois à un rabattement de 14 mètres par rapport au niveau initial ; le rabattement au bout de 8 mois en tout point du domaine aquifère est donné figure 3.

Au bout de huit mois l'aquifère s'est dénoyé mais il existe toujours une surface de suintement importante. Le rabattement est d'environ 3 mètres à 12 mètres du puits.

Dans les deux exemples, le coefficient d'emmagasinement dû à la variation de niveau de la surface libre est de 5%.

1.3. CONSTRUCTION DES ABAQUES

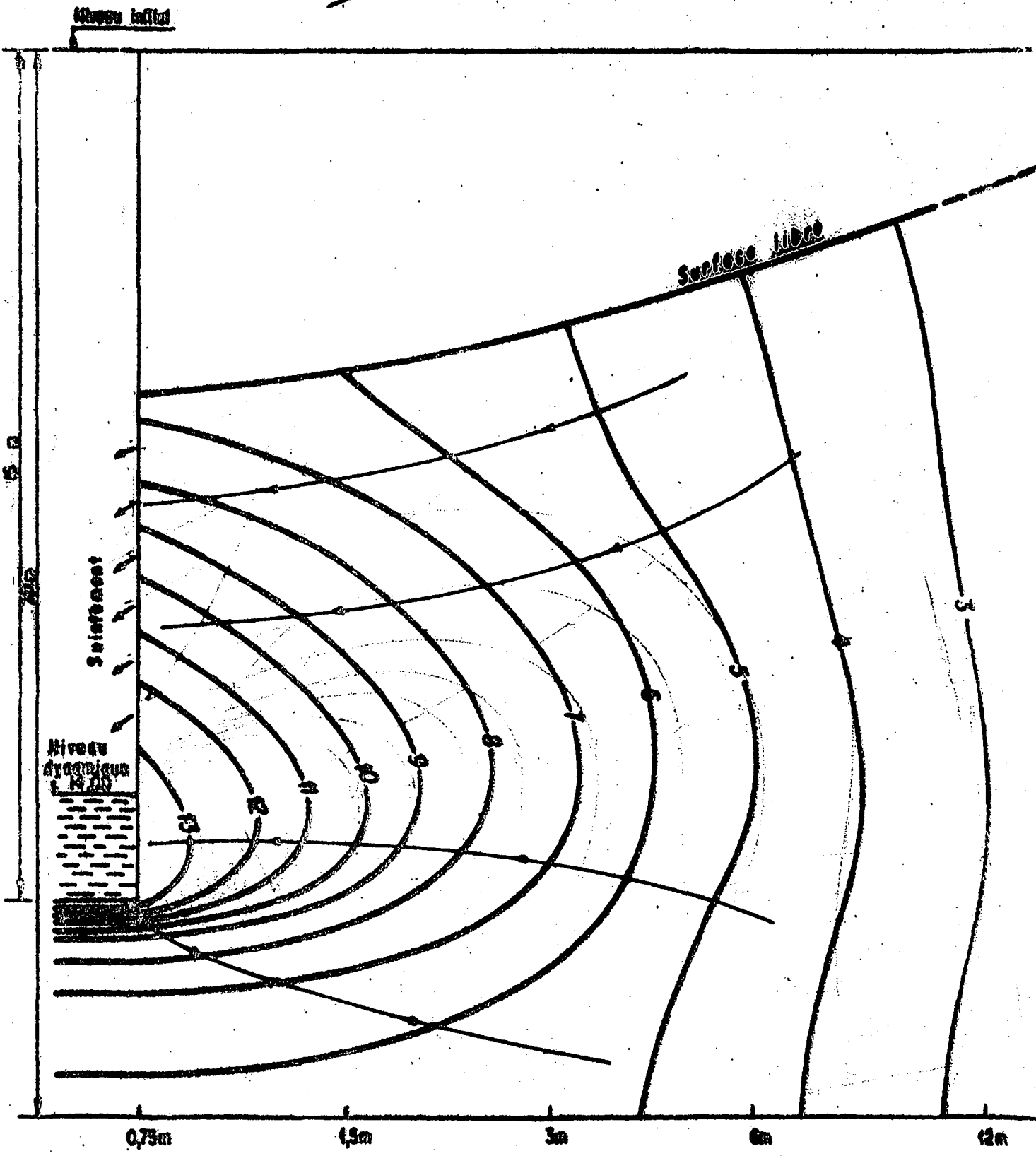
1.3.1. Abaque d'interprétation d'un essai de débit de courte durée

1.3.1.1. Description de l'essai type

Un essai de pompage de deux heures à débit constant — dont la mise en oeuvre " in situ " est très simple — a été simulé sur le modèle.

**RABATTEMENT FINAL AUTOUR D'UN Puits MANTENU A NIVEAU CONSTANT
PENDANT 8 MOIS DANS UN AQUIFERE DE PERMEABILITE $K = 10^{-6} \text{ m/s}$**

--- Courbe equipotentielle
--- Ligne de courant



Le débit de pompage Q_p est déterminé à partir des caractéristiques géométriques du puits : il est égal au débit qui permettrait de vider le puits jusqu'à 1 m du fond (1) en deux heures, s'il n'y avait pas de réalimentation provenant de l'aquifère.

Le rabattement transitoire (s) pendant le pompage et pendant les 5 premiers jours de remontée est calculé sur le modèle.

Deux séries d'abaques (annexe I) ont été construites sur papier semi logarithmique pour les deux diamètres de puits rencontrés le plus fréquemment 1 m et 1,80 m. Les courbes représentent l'évolution du rabattement relatif ($H_m - 1$) en fonction du temps.

Elles sont indexées :

- sur une gamme de hauteurs mouillées initiales (H_m) allant de 3 m à 12 m.
- sur une gamme de perméabilités (K) allant de $3,5 \cdot 10^{-7}$ à $7 \cdot 10^{-6}$ m/s

1.3.1.2. Réalisation pratique et interprétation des essais

La réalisation et l'interprétation des essais nécessitent la connaissance des paramètres suivants :

- Diamètre du puits (D)
- Niveau statique de la nappe (NS)
- Hauteur mouillée initiale (H_m)

Les deux derniers paramètres doivent être mesurés avant le début de l'essai. Il faut attendre, pour cela, que le puits ait repris son niveau d'équilibre. Connaissant ces trois paramètres, on calcule le débit de pompage (Q_p) à imposer par la formule :

$$Q_p = \frac{1}{2} (H_m - 1) \frac{\pi D^2}{4} \quad (1) \quad (H_m \text{ et } D \text{ en m, } Q_p \text{ en m}^3/\text{h})$$

(1) Lors des essais, il faut éviter de dénoyer la pompe, et par conséquent, il convient de conserver au fond du puits une hauteur d'eau que nous avons estimée à 1 m.

L'abaque de la Fig. 4 donne le débit de pompage en fonction du rabattement théorique (hauteur mouillée initiale moins 1 m) et du diamètre du puits : ainsi pour $H_m = 6$ et $D = 1,80$, le débit de pompage à imposer est $Q_p = 6,15$ m³/h.

En fait, le débit de la pompe n'étant pas toujours réglé exactement à la valeur Q_p prévue, il convient d'effectuer des mesures régulières du débit d'exhaure au cours des essais pour connaître le débit réel moyen de (1) pompage Q_{pr} .

- Rabattement théorique (sth) : c'est celui que l'on aurait obtenu au bout de 2 heures si le puits se comportait comme une citerne sans réalimentation par la nappe.

Connaissant le débit réel de pompage Q_{pr} on retrouve le rabattement théorique sth en inversant la formule (1).

$$sth = 8 \frac{Q_{pr}}{\pi D^2}, \text{ ou en utilisant l'abaque de la Fig. 4.}$$

- Evolution du rabattement (s) en fonction du temps pendant les 2 heures de pompage et 24 heures de remontée:

On mesure régulièrement le niveau d'eau dans le puits, toutes les 10 minutes par exemple pendant le pompage et les deux premières heures de remontée, puis toutes les heures en espaçant de plus en plus les mesures vers la fin de la remontée.

L'interprétation d'un essai de débit s'effectue de la manière suivante :

- Utiliser un papier calque semi-logarithmique avec le même pas et les mêmes échelles horizontales et verticales que celui utilisé pour les abaques.

- Tracer sur ce papier le rabattement relatif s/sth , mesuré lors de l'essai réel, en fonction du temps compté depuis le début du pompage.

- Superposer la courbe obtenue à l'abaque correspondant à la hauteur mouillée la plus proche de celle du puits (en confondant les échelles horizontales et verticales). La courbe de l'abaque se superposant à la courbe réelle correspond à la perméabilité cherchée. Au besoin, il faut interpoler sur l'abaque entre les valeurs de K.

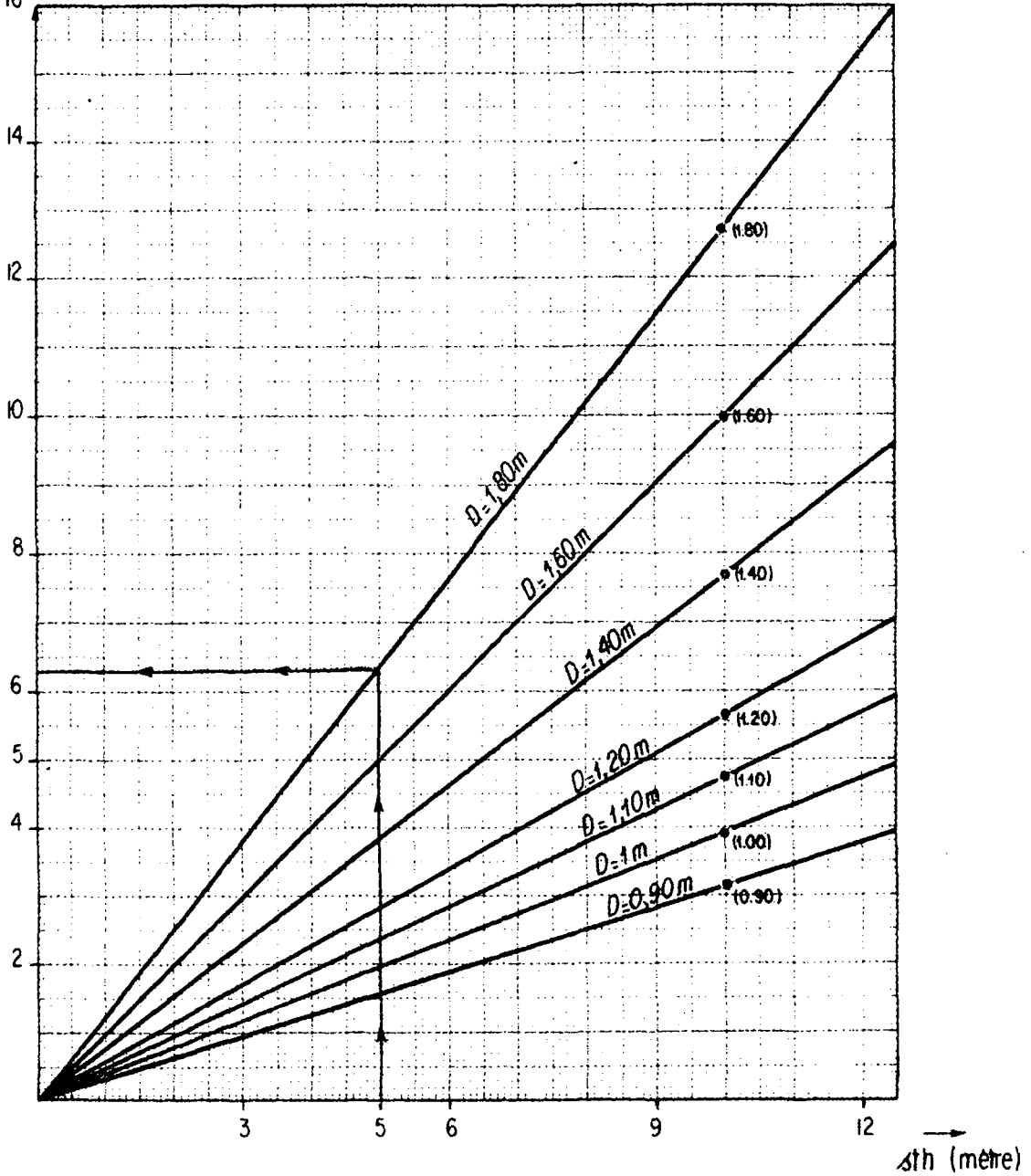
(1) Le débit de la pompe diminuant quand la hauteur d'eau dans le puits diminue, il faut faire une moyenne des mesures de débits effectuées en début, milieu et fin d'essai.

**DÉBIT D'EXHAURE NÉCESSAIRE
POUR VIDANGER EN 2 HEURES UNE CITERNE CYLINDRIQUE VERTICALE**

Q_p
(m^3/h)
16

D = Diamètre de la citerne

Δsth = Rabattement dans la citerne au bout de 2 heures



1.3.1.3. Débit du puits à la fin de l'essai type

Le débit Q_i fourni par la nappe au moment de l'arrêt du pompage est une grandeur caractéristique instantanée du puits. Il peut servir à faire des comparaisons sur différents puits testés dans les mêmes conditions. Ce débit se lit directement sur la courbe de remontée de niveau (tangente à l'origine de la courbe $s(t)$). On peut en trouver une valeur approchée en calculant, le débit fourni par la nappe dans le puits pendant la première heure de remontée suivant le pompage : cette valeur n'est satisfaisante que si la perméabilité du puits est faible ($K < 5 \cdot 10^{-6}$ m/s). Pour de plus fortes valeurs de perméabilité, le débit moyen fourni pendant une heure de remontée devient nettement inférieur au débit instantané mesuré à l'arrêt du pompage.

Le débit instantané d'un puits dépend essentiellement de trois paramètres : diamètre et hauteur mouillée initiale du puits, perméabilité du terrain.

- Diamètre du puits

La comparaison entre les résultats obtenus pour $D = 1$ m et $D = 1,80$ m montrent que le débit instantané d'un puits de diamètre 1,80 m est supérieur de 35 % toutes choses égales par ailleurs au débit d'un puits de diamètre 1 mètre.

- Hauteur mouillée initiale et perméabilité du terrain

Les courbes de la Fig. 5 représentent le débit instantané d'un puits en fonction de la hauteur d'eau initiale H_m . Elle sont indexées sur 4 valeurs de perméabilité.

Le débit du puits Q_i se lit sur l'une ou l'autre des échelles verticales, suivant que le diamètre du puits est 1m ou 1,80 m. On s'aperçoit que le débit Q_i est proportionnel :

- à la perméabilité du terrain ;

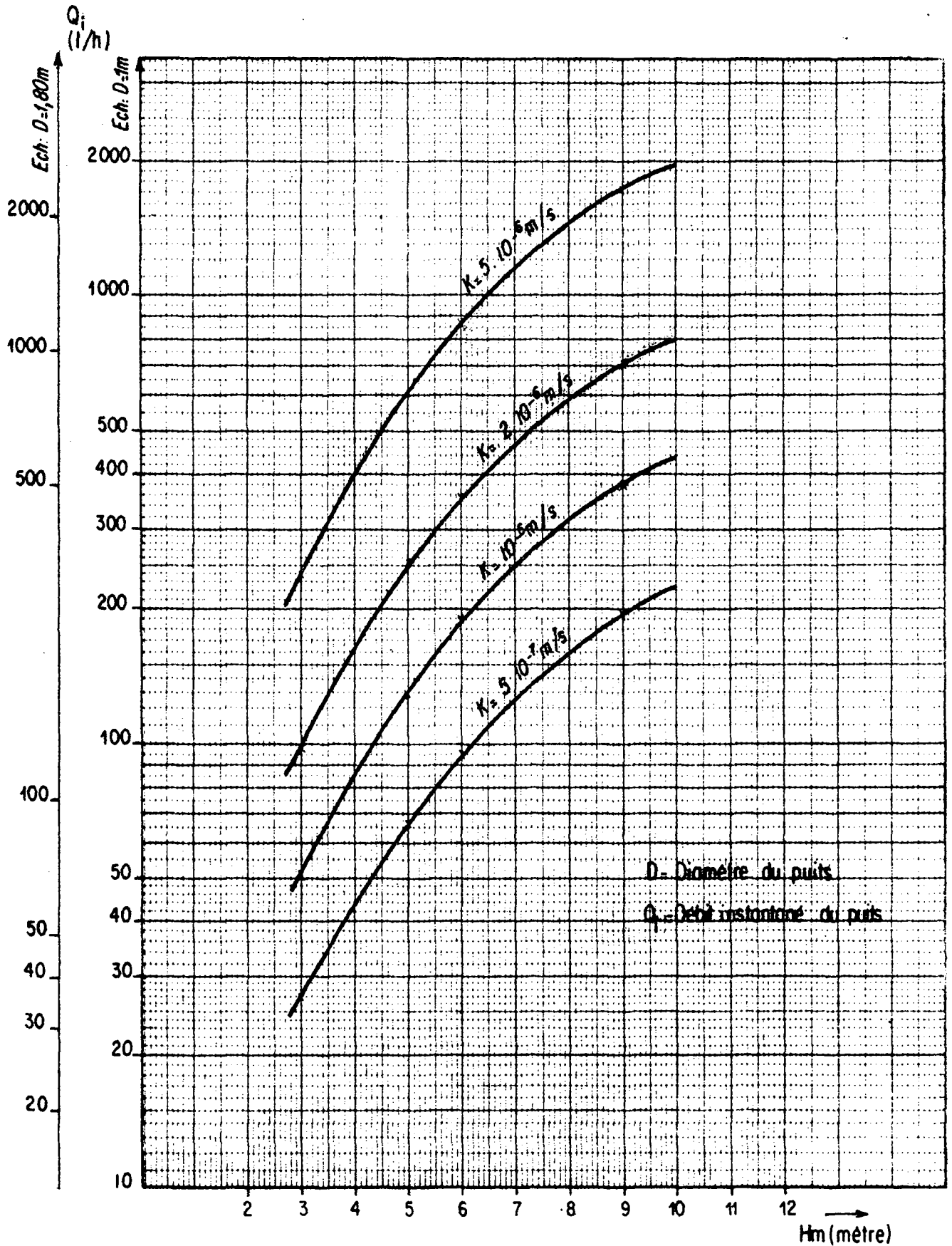
- à une puissance de la hauteur mouillée comprise entre 1 et 2. Le meilleur ajustement a été obtenu pour 1.8.

Ainsi l'ordre de grandeur du débit Q_i pour les perméabilités $< 5 \cdot 10^{-6}$ m/s peut être approché par la formule :

$$Q_i = C^{te} \times K \times H_m^{1.8}$$

pour $K = 10^{-6}$ m/s, $H_m = 6$ m, $Q_i = 5,2 \cdot 10^{-5}$ m³/s. D'où $C^{te} = 2$ unités MKS

INFLUENCE DE LA HAUTEUR MOUILLÉE INITIALE H_m
 ET DE LA PERMÉABILITÉ K SUR LE DÉBIT INSTANTANÉ D'UN PUIT



D'où la formule :

$$Q_i = 2 K H_m^{1.8} \quad \text{pour } D = 1 \text{ m}$$

$$Q_i = 2,7 K H_m^{1.8} \quad \text{pour } D = 1,80 \text{ m}$$

Q_i = débit du puits en fin d'essai type en m³/s.

K = perméabilité en m/s.

H_m = hauteur mouillée initiale en m.

1.3.1.4. Influence des écarts entre les paramètres réels et ceux des abaques.

L'essai d'application de ces abaques à 24 cas réels nous a conduit à rechercher l'influence de la variation de certains paramètres sur la forme des courbes de remontée de niveau.

- Diamètre du puits :

Si le diamètre du puits est supérieur de 10% à celui utilisé pour construire l'abaque (1,10 m au lieu de 1 m), la superposition conduit à une valeur de K trop faible d'environ 20% (Fig. 6, courbes II, III, IV)

- Durée du pompage :

Si le pompage dure 1/2 h au lieu de 2 heures à un débit Q_p 4 fois plus fort, l'erreur sur le rabattement dans des conditions moyennes de perméabilité ($1,5 \cdot 10^{-6}$ m/s), est inférieure à 2% au bout de 2 h après le début du pompage (Fig. 6, courbes I et II). Les abaques sont donc utilisables dans ce cas, mais pour les faibles perméabilités seulement ($K < 5 \cdot 10^{-6}$ m/s).

- Hauteur mouillée initiale

Les abaques ont été tracés pour toutes les valeurs entières de hauteurs mouillées allant de 2 à 12 m. L'écart entre la hauteur mouillée réelle et celle de l'abaque utilisé sera donc toujours inférieur à 1 m. L'erreur qui en résulte sur la détermination de K est négligeable.

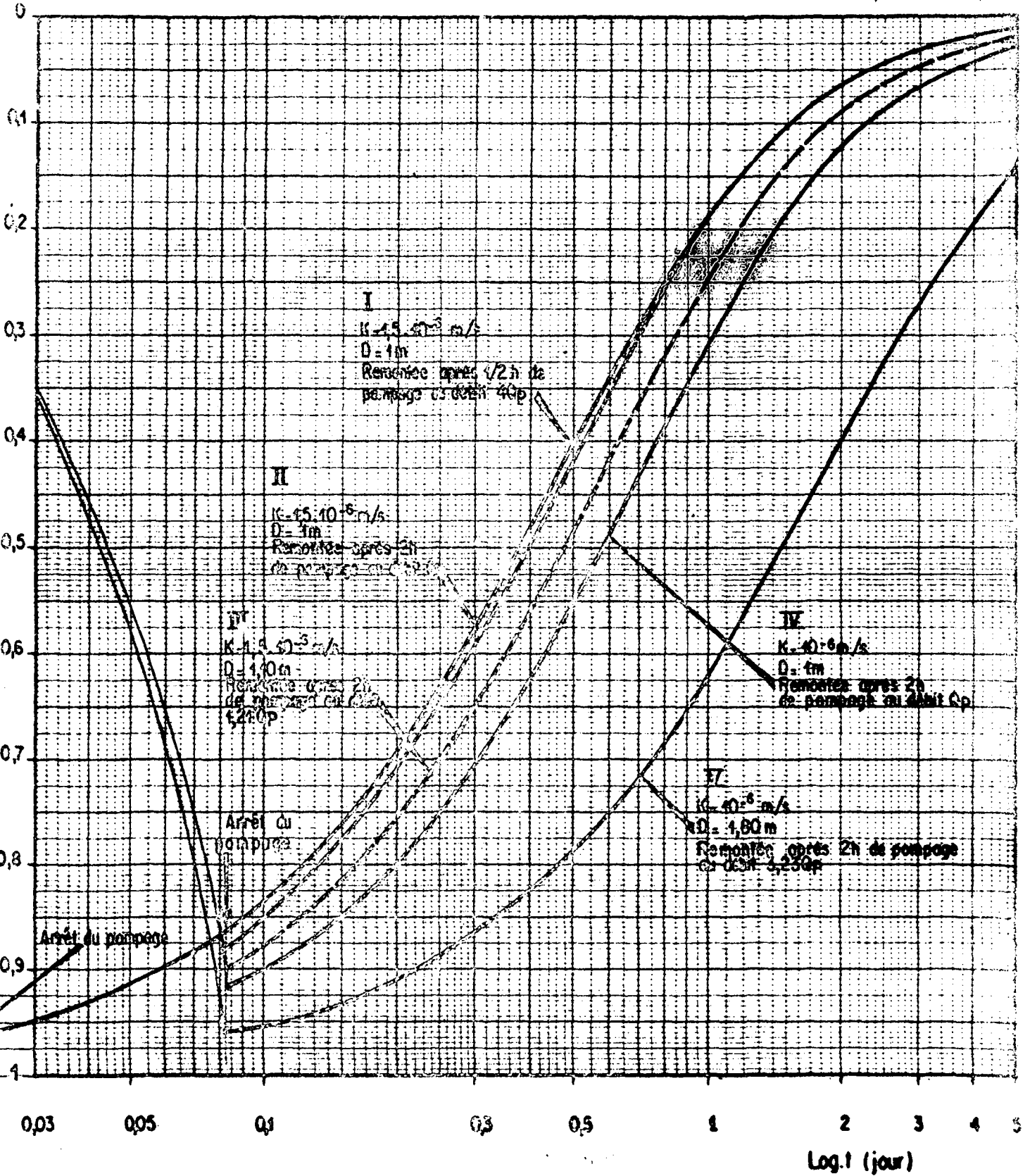
- Débit de pompage

Le paramètre s_{th} est proportionnel au débit de pompage Q_p . Le rabattement instantané s dépend lui aussi du débit de pompage. Aussi un faible écart (de l'ordre de 10%) entre le débit de pompage réel Q_{pr} et le débit de pompage théorique Q_p a une influence négligeable sur le rapport s/s_{th} , et donc sur la forme de la courbe de remontée.

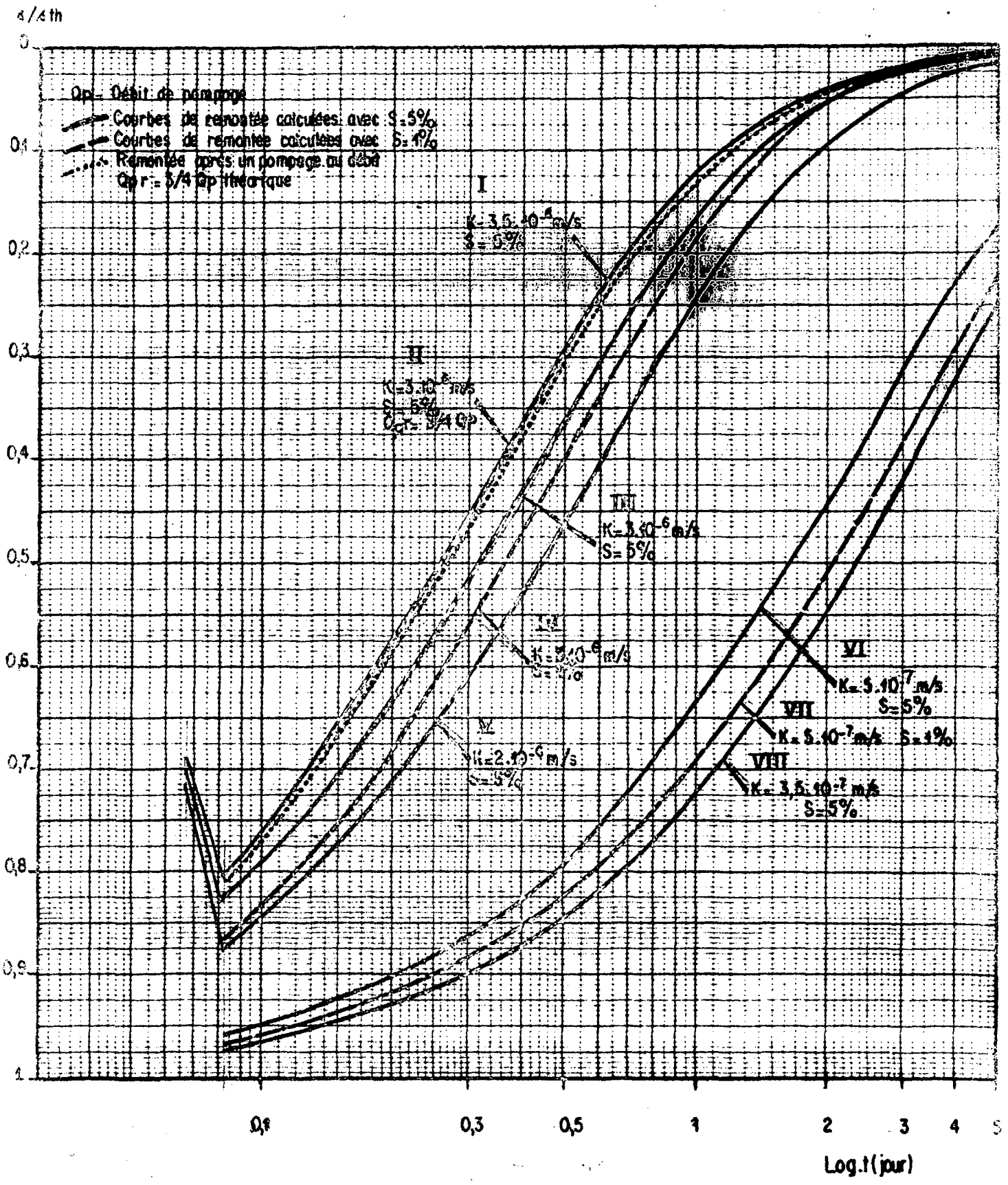
Pour un écart de débit plus important Q_p réel = 3/4 Q_p théorique l'interprétation conduit à une valeur de perméabilité 15% plus faible (Fig. 7, courbes I, II, III).

**INFLUENCE DU TEMPS DE POMPAGE
ET DU DIAMÈTRE DU PUIT SUR LA FORME DES COURBES
DE REMONTÉE**

s/s_0



**INFLUENCE DU COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT
ET DU DÉBIT DE POMPAGE SUR LA FORME DES COURBES DE REMONTÉE**



- Coefficient d'emmagasinement (Fig. 7 , courbes III à VIII)

Le coefficient d'emmagasinement S choisi pour le modèle est 5%. Si l'on prend 1% au lieu de 5% le rabattement au bout de 2 heures de pompage est plus fort d'environ 5%. La remontée est plus rapide. Une superposition de la courbe obtenue pour $S = 1\%$ avec les abaques conduit à une valeur de perméabilité inférieure d'environ 20%.

1.3.2. Abaques donnant l'évolution du débit d'un puits exploité à son maximum, pendant huit mois de saison sèche, en présence d'une fluctuation naturelle du niveau de la nappe

1.3.2.1. Construction des abaques

L'évolution en fonction du temps du débit d'un puits exploité à son maximum pendant huit mois de saison sèche est calculée sur le modèle

Historique du pompage simulé sur modèle pour la construction des abaques

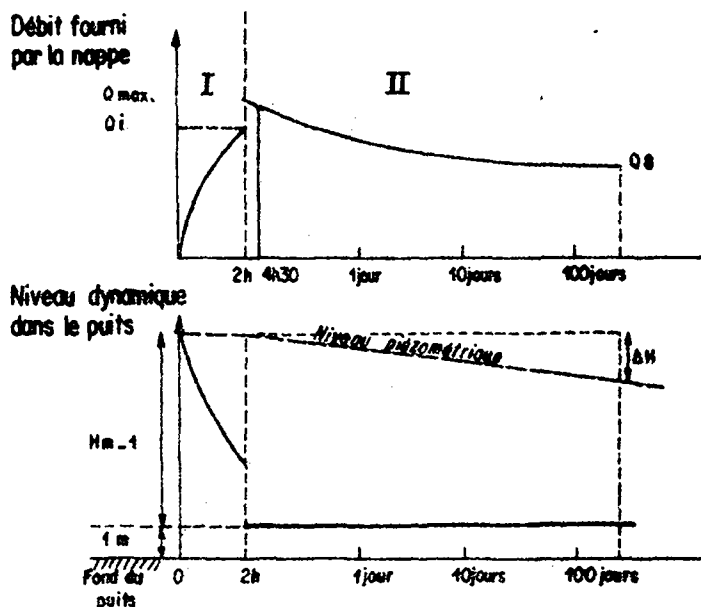


Fig.8

L'historique de pompage simulé est le suivant (Fig. 8):

- Phase I : Après l'essai de pompage type de deux heures à débit constant (tel que décrit en 1.3.1.1.), le niveau d'eau dans le puits est rabattu instantanément jusqu'à 1 mètre du fond.

- Phase II : Puits exploité à son maximum pendant 8 mois de saison sèche. Le niveau d'eau est maintenu à 1 mètre du fond du puits par un puisage continu décroissant en fonctions du temps.

Pendant cette phase, le niveau statique de la nappe décroît linéairement en fonction du temps. La variation du niveau statique (c'est-à-dire la fluctuation naturelle qui s'exercerait sur la nappe non soumise à pompage) entre le début et la fin de la phase II est notée ΔH et correspond à une durée de 8 mois.

Une série d'abaques (cf. annexe II) a été tracée. Les courbes représentent l'évolution du débit d'un puits exploité à son maximum pendant huit mois de saison sèche.

Les courbes sont indexées :

- Sur 3 valeurs de hauteur mouillée initiale H_m
- Sur 4 valeurs de perméabilité K .
- Sur 3 valeurs de fluctuation relative du niveau statique $\lambda = \frac{\Delta H}{H_m}$

Une simple translation de l'échelle des débits permet de passer du puits de rayon 0,5 m au puits de rayon 0,90 m.

Le débit initial de référence, que l'on comparera au débit à 8 mois, est celui fourni par le puits 2 heures après l'établissement du rabattement maximum constant. Il peut être notablement inférieur au débit maximum instantané du puits dans le cas des puits de relativement bonne perméabilité ($> 5 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$)

1.3.2.2. Influence de divers paramètres sur le débit des puits à long terme

- Diamètre du puits

La comparaison entre les résultats obtenus pour des puits de diamètre 1 m et 1,80 m montre que le débit exploitable d'un puits de diamètre 1,80 m est supérieur de 25% toutes choses égales par ailleurs, au débit d'un puits de diamètre 1 m.

- Exploitation du puits et fluctuation saisonnière du niveau statique

L'examen des abaques de l'annexe II montre qu'en l'absence de fluctuation saisonnière de la nappe, quelles que soient la hauteur mouillée initiale H_m et la perméabilité K du terrain, le débit d'un puits a diminué de 33% au bout de 8 mois d'exploitation maximale. Selon que la fluctuation de la nappe ΔH est égale au quart ou à la moitié de la hauteur mouillée initiale du puits, la diminution du débit du puits devient égale respectivement à 55% et 80%.

Ainsi pour un puits de diamètre $D = 1 \text{ m}$, de hauteur mouillée initiale $H_m = 6 \text{ m}$, foncé dans un terrain de perméabilité $K = 10^{-6} \text{ m/s}$, on obtient les résultats suivants :

	Débit initial (l/h)	Débit au bout de 8 mois (l/h) Puits inexploité	Débit au bout de 8 mois (l/h) Exploitation max.
$\Delta H = 0$	190	190	120
$\Delta H = 1,50\text{m}$	190	110	85
$\Delta H = 3 \text{ m}$	190	50	40

Le débit d'un tel puits est divisé par 5 au bout de 8 mois d'exploitation maximale avec 3 m de fluctuation de niveau statique. La Fig. 9 représente schématiquement la position du niveau piézométrique au voisinage du puits à des dates différentes.

1.4. DETERMINATION DU DEBIT EXPLOITABLE D'UN OUVRAGE

1.4.1. Nous avons vu que la réalisation d'un essai type conduit à la détermination d'un " débit caractéristique instantané " du puits (débit fourni par la nappe au moment de l'arrêt du pompage).

Le débit exploitable d'un ouvrage est celui que fournira le puits en fin de saison sèche. L'extrapolation du débit instantané au débit exploitable de l'ouvrage dépend de l'époque à laquelle cet essai a été effectué. Trois cas peuvent être envisagés :

- L'essai est réalisé en début de saison sèche(1) (octobre à décembre)

Le débit exploitable est fourni par l'abaque II à l'aide des paramètres (2) suivants :

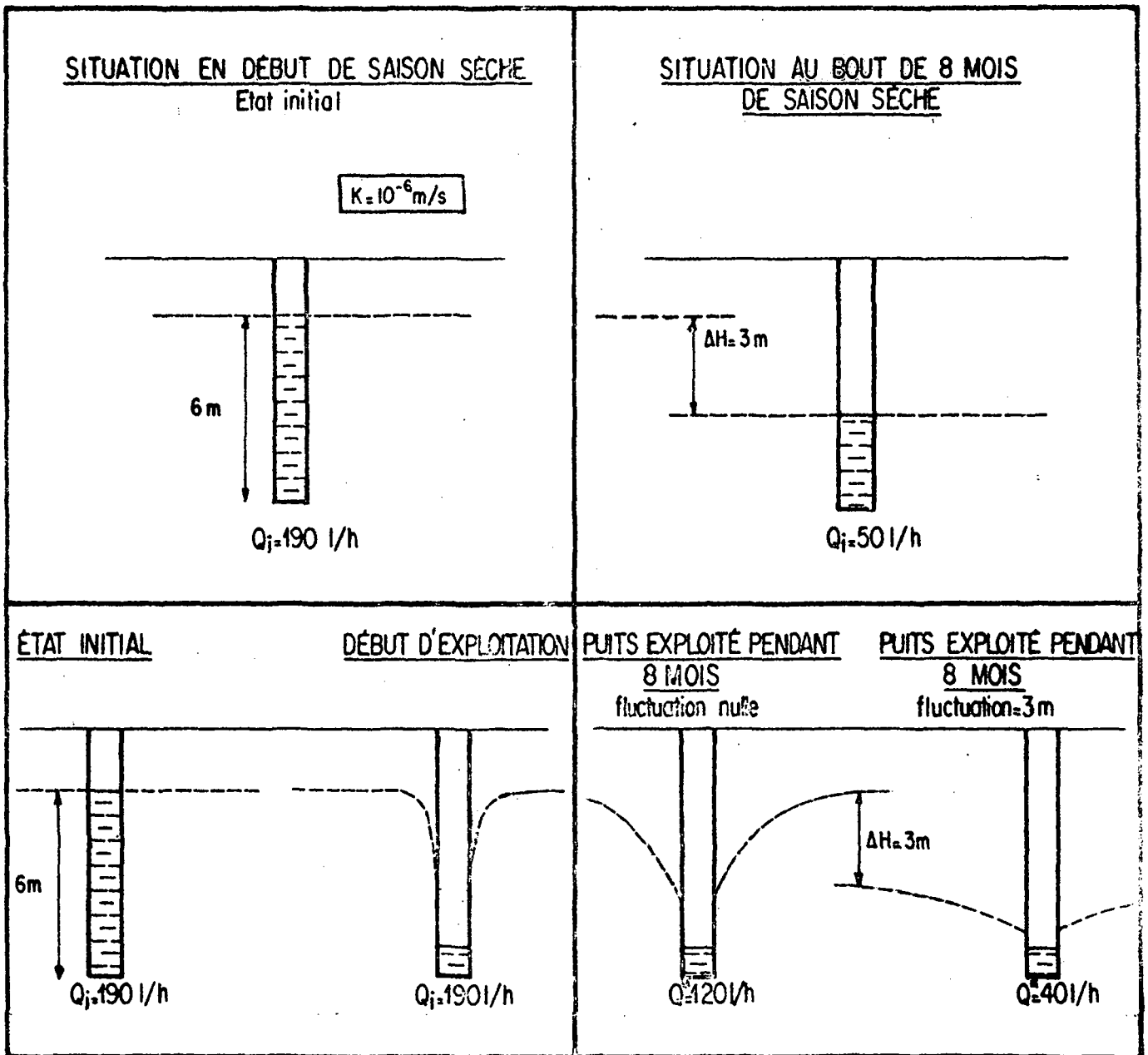
(1) Le découpage proposé de la saison sèche en trois périodes est valable surtout en Haute Volta où la saison sèche dure effectivement 8 mois de Novembre à Juin. La méthode reste cependant valable dans d'autres régions. Il conviendrait mieux, par ailleurs, de parler "d'étiage de la nappe" plutôt que de " fin de saison sèche ", étant donné que certains puits ont leur niveau d'étiage en pleine saison des pluies.

(2) Si les paramètres H_m , K , λ , déterminés au cours des essais ne sont pas ceux choisis pour la construction des abaques, il convient d'interpoler entre les valeurs lues sur l'abaque.

**POSITION SCHEMATIQUE DU NIVEAU PIÉZOMÉTRIQUE
AU VOISINAGE D'UN PUIS DANS DIVERSES CONDITIONS D'EXPLOITATION**

Q_j = Débit instantané du puits

Q^* = Débit d'épuisement (rabattement constant) au bout de 8 mois d'exploitation



- H_m : hauteur mouillée du puits au repos au début de l'essai.
- K : perméabilité déduite de l'essai
- $\lambda = \frac{\Delta H}{H_m} \cdot \Delta H$ est la fluctuation probable de la nappe entre

la date de l'essai et la fin de la saison sèche; ce paramètre est à évaluer par une enquête sur les puits voisins en utilisant quelques critères définis plus loin.

Le débit exploitable est lu sur la courbe choisie à l'abscisse $t = 8$ mois.

- L'essai est réalisé au milieu de la saison sèche (janvier à avril)

Les paramètres H_m , K , et ΔH sont déterminés comme précédemment. Connaissant ΔH , il convient d'extrapoler linéairement pour trouver la hauteur mouillée qu'il y aurait eu dans le puits en début de saison sèche H_{m1} , ainsi que la fluctuation linéaire totale de la nappe ΔH_1 ; d'où le paramètre $\lambda = \frac{\Delta H_1}{H_{m1}}$. Le débit exploitable du puits est obtenu à l'aide des abaques en utilisant les paramètres H_{m1} , K , λ .

Supposons par exemple qu'un essai réalisé en février sur un puits de diamètre 1m, de hauteur d'eau $H_m = 5$ m, conduise à une valeur de perméabilité $K = 10^{-6}$ m/s. Le débit instantané est donc d'environ 130 l/h (Fig. 5).

Supposons d'autre part que la fluctuation résiduelle de niveau statique soit évaluée à 1 m en 4 mois, soit 0,25 m/mois. La hauteur d'eau dans le puits extrapolée au début de la saison sèche en (octobre) est $H_{m1} = 6$ m. La fluctuation linéaire totale de la nappe est $\Delta H_1 = 2$ m. D'où $\lambda = 0,33$.

Le débit exploitable d'un tel puits, lu sur l'abaque de l'annexe III pour $H_{m1} = 6$ m, $K = 10^{-6}$ m/s en interpolant entre les valeurs $\lambda = 0,25$ et $\lambda = 0,50$, est de 70 l/h soit environ 1,5 m³/jour.

- L'essai est réalisé en fin de saison sèche (mai, juin)

Dans ce cas la fluctuation résiduelle de la nappe est vraisemblablement faible vis-à-vis de la hauteur d'eau du puits. On peut considérer que le débit obtenu en fin d'essai, minoré d'environ 30% pour tenir compte de l'exploitation future du puits, représente le débit exploitable.

1.4.2. Hauteur d'eau à laisser dans l'ouvrage en fin de chantier pour garantir un débit d'exploitation - Tableau 1.

Q/l/h exploitable recherché	K m/s	5.10 ⁻⁶		2.10 ⁻⁶		10 ⁻⁶		5.10 ⁻⁷	
		D=1 m	D=1,80m	D=1m	D=1,80m	D=1m	D=1,80m	D=1m	D=1,80m
100	$\Delta H = 0$	2,50	2,0	4,0	3,50	5,50	4,50	8	7
	$\Delta H = 1,5$	4	3,50	5,50	5,0	7,0	6,0	9,50	8,50
	$\Delta H = 3$	5,50	5,0	7,0	6,50	8,50	7,50	11	10
250	$\Delta H = 0$	4	3,50	6,0	5,0	9,0	7,50	>12	
	$\Delta H = 1,5$	5,50	5,0	7,5	6,5	10,5	9,0		
	$\Delta H = 3$	7	6,5	9	8,0	12	10,5		
500	$\Delta H = 0$	5,50	4,50	9,50	8,0	> 12			
	$\Delta H = 1,5$	7	6	11	9,50				
	$\Delta H = 3$	8,50	7,50	12,50	11				
1000	$\Delta H = 0$	8,0	7,0	>12					
	$\Delta H = 1,5$	9,5	8,50						
	$\Delta H = 3$	11	10						

Le tableau 1, déduit des abaques de l'annexe II donne les hauteurs d'eau à laisser en fin de chantier dans un ouvrage selon le débit exploitable recherché. Les chiffres sont calculés pour un ouvrage de diamètre 1 mètre et de diamètre 1,80 mètre.

Les hauteurs d'eau trouvées tiennent compte de la diminution du débit due à une exploitation maximale pendant 8 mois. Elles dépendent de la perméabilité du terrain K et de la fluctuation probable de la nappe ΔH entre l'époque de la fin du chantier et la fin de la saison sèche, ces deux paramètres étant inconnus au moment du creusement du puits.

K peut être estimé par un essai de débit type réalisé en cours de fonçage lorsque le puits a une hauteur d'eau suffisante (3 m). Cet essai ne renseignera cependant que sur la perméabilité des 3 m de terrains noyés déjà traversés. ΔH est estimé comme précédemment.

L'examen du tableau 1 montre que pour des valeurs moyennes de perméabilité (2 à 5.10⁻⁶ m/s) un puits ne peut donner 100 l/h en continu que s'il a 3 m de hauteur d'eau au minimum, et l'on ne peut obtenir 1 m³/h en continu qu'avec 10 à 15 m de hauteur d'eau.

DEUXIÈME PARTIE

APPLICATION DES MÉTHODES D'INTERPRÉTATION À UNE TRENTAINE
DE PUIITS SITUÉS EN HAUTE VOLTA ET COTE D'IVOIRE

2.1. DESCRIPTION DES MISSIONS

La méthode d'interprétation exposée dans la première partie a été testée sur 33 puits, dont 15 en Haute Volta et 18 en Côte d'Ivoire, pendant la saison sèche 1974-75. Deux missions d'une durée totale de 4 mois et demi ont été réalisées successivement.

Le premier mois (20 octobre au 20 novembre 1974) a été consacré aux préparatifs de la mission :

- Dédouanement du matériel et achats complémentaires (10 jours)
- Rassemblement de la documentation existante, concernant en particulier les coupes de puits et les mesures de fluctuation naturelle de niveau de nappe, auprès des organismes compétents à Abidjan, Bouaké, Korhogo, Ouagadougou (5 jours).
- Tournée sur le terrain pour choisir les sites d'essais (15 jours).

Au cours de cette première tournée, 70 puits ont été visités parmi lesquels 33 furent retenus pour des essais.

- La première phase d'essais, effectuée dans le sens Ouagadougou - Abidjan s'est déroulée du 20 novembre au 20 janvier. Au cours de cette phase un essai de débit type (2 h de pompage, mesure de la remontée pendant 24 h) a été réalisé sur chaque puits, ce qui représente environ 1 essai tous les deux jours.

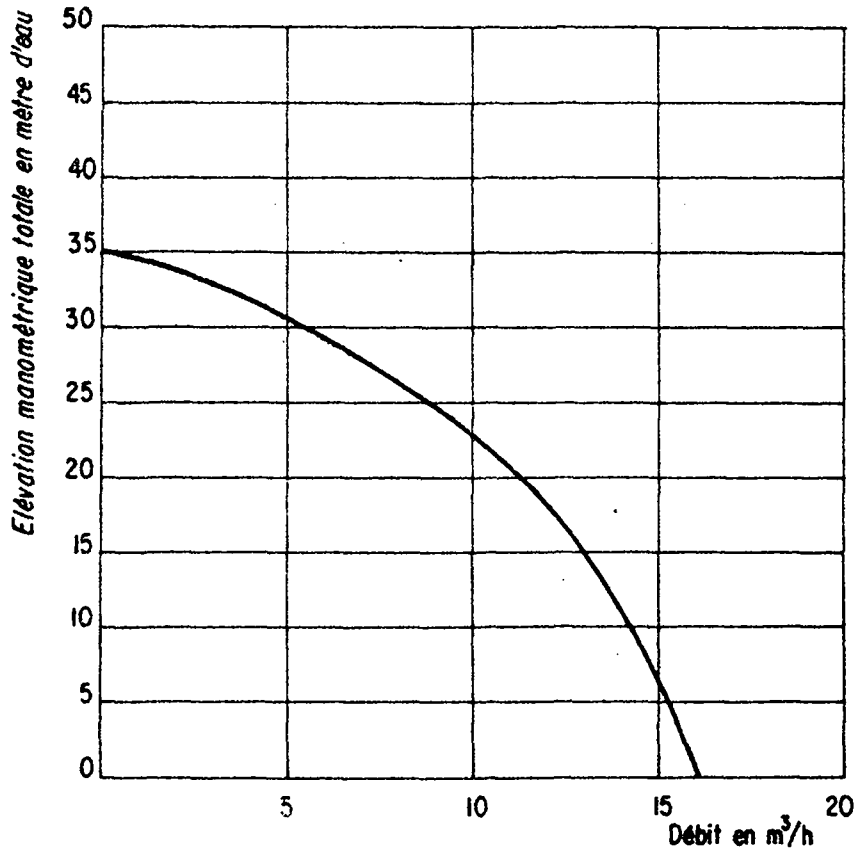
- La deuxième phase d'essais, effectuée dans le sens Abidjan - Ouagadougou s'est déroulée du 15 avril au 30 mai. Le débit de ces mêmes puits a été déterminé à nouveau ; et dans 16 cas, un essai de débit type a été à nouveau effectué. Les dates de cette deuxième phase d'essais ont été imposées par la venue précoce des pluies en Côte d'Ivoire.

L'équipe chargée de la réalisation des essais était composée d'un ingénieur, assisté d'un chauffeur mécanicien et d'un manoeuvre, se déplaçant dans une 404 bâchée, avec le matériel suivant :

- Groupe électrogène diesel BERNARD moteurs n° W.71 T 495
- Pompe électrique DELOULE type plongex 55 D. 211, débitant 14 m³/h pour 10 m de refoulement (coupe caractéristique Fig. 10), avec 40 m de tuyaux et accessoires.
- Limnigraphe OTT, type R 16 à axe vertical (1)
- Sonde électrique ROSSIGNOL,
- Fût de 100 litres pour la mesure des débits,
- Cantines, matériel de couchage, 6 jerrycans pour l'eau et les carburants.

(1) Un deuxième limnigraphe, à axe horizontal, nous a été prêté par la Direction de l'Hydraulique de Ouagadougou pour la durée de la deuxième phase d'essais.

Fig.10

COURBE CARACTÉRISTIQUE DE LA POMPE PLONGEX TYPE 55 D 2II2.2. CHOIX ET DESCRIPTION DES SITES D'ESSAIS

Les puits choisis devaient répondre aux critères suivants :

- Puits possédant un cuvelage à barbacanes ou une colonne de captage indépendante de telle manière que l'alimentation se fasse à la fois à travers les parois latérales et le fond du puits.
- Coupe géologique connue.
- Fluctuations naturelles de la nappe si possible connues.

Cette dernière condition nous a conduit à choisir des puits dans les bassins versants de Korhogo et Sakassou étudiés par le laboratoire d'Hydrologie de l'ORSTOM à Abidjan, et dans le bassin de Diaman Sakassou étudié par le laboratoire de Géologie de la Faculté des Sciences d'Abidjan (2).

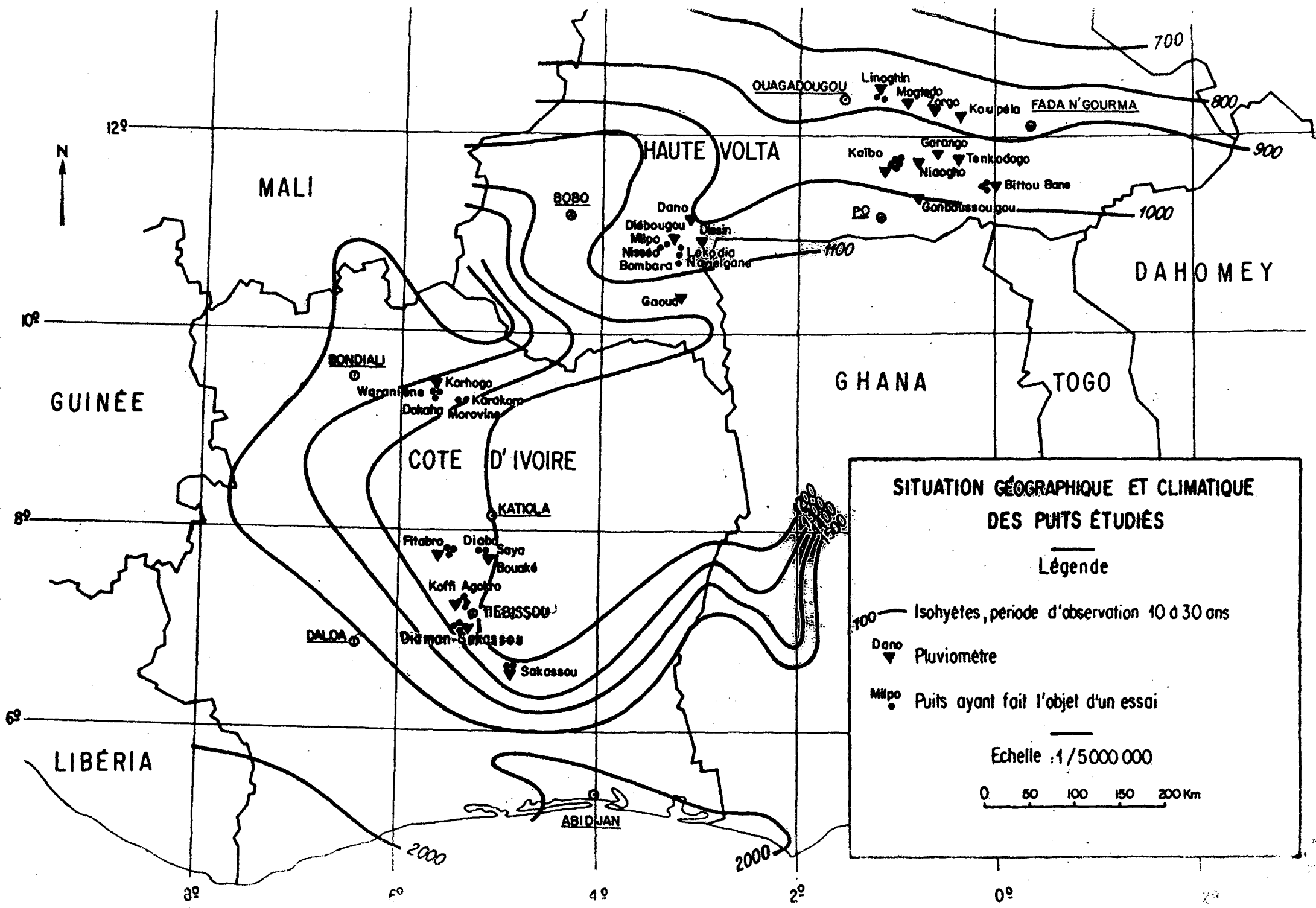
D'autre part, les puits répondant aux deux premiers critères étaient essentiellement les puits creusés par les administrations ou les entreprises.

Il importait enfin que les caractéristiques des ouvrages soient les plus variées possibles (hauteur d'eau, horizon capté, profondeur du niveau statique, situation géologique et géomorphologique).

Les 33 puits retenus, dont les caractéristiques complètes sont données en annexe III, sont classés ci-dessous par situations géographique, géomorphologique et géologique ainsi que par hauteur d'eau et profondeur du niveau statique.

Tableau 2 - Situation géographique et climatique des puits étudiés (Fig. 11)

Situation géographique	Pluviométrie moyenne sur 10 à 30 ans (mm)	Pluviométrie moyenne en 1974 (mm)	Nombre de puits	Observations	
Villages dépendant de l'Autorité pour l'Amenagement des Vallées des Voltas (Haute Volta)	Région de Linoghin	850	838	2	-
	Région de Manga & Tenkodogo	950	975	8	-
Région de Diébougou (Haute Volta)	1.100	1.000	5	-	
Région de Korhogo (Cote d'Ivoire)	1.400	1.380	5	dont 3 puits sur le bassin versant étudié par l'ORSTOM	
Région de Bouaké (Cote d'Ivoire)	1.200	1.203	2	-	
Villages dépendant de l'Autorité pour l'Amenagement de la Vallée du Bandama (Cote d'Ivoire)	Région de Béoumi	1.250	1.234	3	-
	Région de Tiebissou	1.250	1.044	6	-
Bassin versant de Sakassou Région de Dimbokro (Cote d'Ivoire)	1.200	1.214	2	Puits de mesures (non cuvelés) surveillés par l'ORSTOM	



SITUATION GÉOGRAPHIQUE ET CLIMATIQUE DES PUIES ÉTUDIÉS

Légende

- Isohyètes, période d'observation 10 à 30 ans
- Dano ▼ Pluviomètre
- Mipo ● Puits ayant fait l'objet d'un essai

Echelle : 1/5 000 000

0 50 100 150 200 Km

Les puits étudiés se situent dans deux zones climatiques distinctes :

- Sud-Est et Sud de la Haute Volta :

La hauteur de pluie annuelle (850 à 1.100 mm en moyenne) est répartie sur 4 mois (juin à septembre) pendant lesquels la nappe se recharge. Pendant les 8 mois de saison sèche qui suivent, la baisse de niveau de la nappe varie entre 0 et 20 m suivant les endroits.

- Zone centrale de la Côte d'Ivoire

La hauteur de pluie annuelle (1.200 à 1.400 mm en moyenne) est répartie en deux saisons :

Une petite saison des pluies (mars à mai) pendant laquelle il tombe 300 à 500 mm, suivie d'une relative saison sèche en juin-juillet, puis d'une grande saison des pluies (août à octobre) pendant laquelle il tombe entre 500 et 1.000 mm. La véritable saison sèche ne dure que 4 mois (novembre à février).

L'alimentation par la pluie étant plus continue qu'en Haute Volta, les fluctuations annuelles de niveau de la nappe sont plus faibles (0 à 10 m à notre connaissance). La comparaison région par région de la pluviométrie annuelle moyenne et de la pluviométrie de 1974 montre que l'année 1974 a été une année de pluviométrie normale dans la plupart des cas. La pluviométrie n'a été déficitaire par rapport à la moyenne qu'à Diébougou (déficit 100 mm) et dans la région de Tiébissou (déficit 200 mm).

Tableau 3 - Situation géomorphologique des puits étudiés

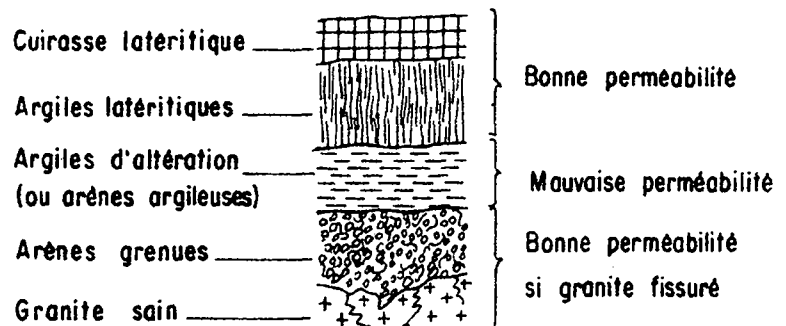
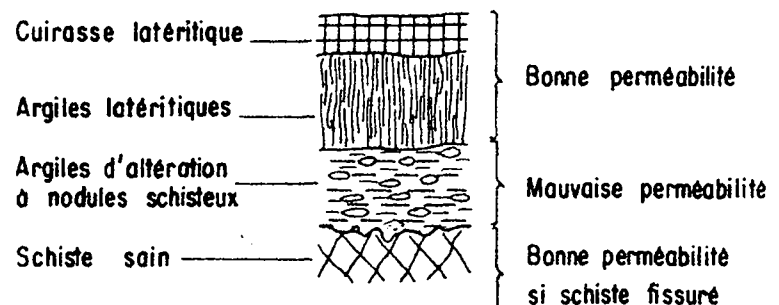
Situation géomorphologique	Nombre de puits
Bas fond sec (BFS)	6
Bas fond humide (BFH)	5
Mi-pente (MP)	12
Plateau (P)	10

Tableau 4 - Situation géologique des puits étudiés

Nature géologique de l'aquifère capté	Symbole	Nombre de puits
Argiles latéritiques	L	1
Argiles latéritiques et argiles d'altération des granites	L+AAγ	3
Argiles latéritiques et arènes grenues	L+ AG	3
Argiles d'altération des granites	AAγ	9
Arènes grenues (altération de granites)	AG	8
Granite ou amphibolites fissurés	γ	3
Argiles d'altération des schistes	AAS	6

Rappel des profils type d'altération du socle

Fig.12

Profil d'altération des granitesProfil d'altération des schistes

La situation géomorphologique des puits étudiés se répartit à peu près également entre bas fonds, versants et plateau (tableau 3). Ces puits captent la nappe dans divers horizons géologiques (tableau 4) correspondant aux profils classiques d'altération du socle cristallin rappelés à la figure 12.

Tableau 5 - Classement des puits étudiés par hauteur d'eau

Hauteur d'eau en début de saison sèche	Nombre de puits
1 à 4 m	8
4 à 7 m	12
7 à 11 m	10
> 11 m	3

Hauteur d'eau moyenne : 6,45 m

Tableau 6 - Classement des puits étudiés par profondeur du niveau statique sous le sol

Profondeur du niveau statique sous le sol en début de saison sèche	Nombre de puits
0 à 5 m	8
5 à 10 m	10
10 à 15 m	12
15 à 20 m	3

Profondeur moyenne du niveau statique sous le sol : 9,10 m

2.3. INTERPRETATION DES ESSAIS

2.3.1. Interprétation des essais effectués en 1ère phase

Les résultats de l'interprétation des 33 essais sont classés dans le tableau 7 :

- 18 essais n'ont pu être interprétés à l'aide des abaques. Dans les 9 premiers cas les raisons sont liées aux conditions dans lesquelles se sont déroulés les essais. Il est donc possible d'y remédier.

Dans les 9 autres cas, les hypothèses sur lesquelles le modèle est basé (faible perméabilité, perméabilité homogène le long du profil vertical) se sont avérées trop éloignées de la réalité.

- 15 essais ont été interprétés à l'aide des abaques. La superposition a permis de déduire une valeur de perméabilité de l'aquifère. Les courbes réelles cependant, ne se superposent pas parfaitement aux courbes théoriques (voir annexe III).

Les principales causes d'écarts sont les suivantes :

- Causes liées au déroulement des essais :
 - erreur due à une variation brusque du débit de pompage Q_p (essai n° 25)
 - effet d'un puisage antérieur se superposant à l'effet du pompage et niveau statique du puits inconnu (essai n° 20).
- Causes liées à la non conformité du puits ou du terrain aux hypothèses générales du modèle.
 - coefficient d'emmagasinement du terrain plus faible que celui du modèle (n°s 5, 6).
 - nappe semi captive (n°s 1, 20, 22)
 - réduction du diamètre au fond du puits (n°s 1 ?, 16)
 - meilleure perméabilité dans le haut du profil (n°s 17, 28, 18)

Tableau 7 - Résultat de l'interprétation des essais de débit effectués en début de saison sèche.

		n° d'essai	Observations		
Essais non interprétables	Raisons liées au déroulement de l'essai	9 } 12 }	Cable du limnigraphe a sauté au début de la remontée		
		11 } 15 }	Hauteurs d'eau importantes. Débit de la pompe insuffisant pour vider le puits en 2 heures		
		7 } 13 } 14 } 26 } 28 }	Puits fortement exploités. Niveau statique inconnu		
		Modèle inadapté	2 } 8 }	Stabilisation en cours de pompage → Perméabilités en dehors de la gamme étudiée.	
			16	Diamètre du captage < Diamètre cuvelage	
			1 } 6 } 20 } 22 }	Nappe semi captive dans les arènes grenues	
			17 } 27 }	Niveau à forte perméabilité dans le haut du profil (argiles latéritiques).	
			Essais interprétables	K déduite m/s	
		~ 8.10 ⁻⁶		3	Coefficient d'emmagasinement réel plus faible que celui du modèle
		7.10 ⁻⁶		4	
1,7.10 ⁻⁶	5				
1,5.10 ⁻⁵	10				
~ 1,8.10 ⁻⁶	25				
~ 10 ⁻⁵	21	Meilleure perméabilité dans le haut du profil			
7.10 ⁻⁶	18				
8.10 ⁻⁶	19				
3.10 ⁻⁶	23				
1,5.10 ⁻⁶	24				
3.10 ⁻⁶	29				
5.10 ⁻⁶	30				
2.10 ⁻⁶	31				
2,5.10 ⁻⁶	32				
10 ⁻⁷	33				

2.3.2. Interprétation des essais effectués en 2ème phase.

Les 33 puits testés en début de saison sèche ont été visités lors de la 2ème phase d'essais.

- Sur 12 puits les essais n'ont pas été repris : seul le niveau statique a été contrôlé. Il s'agit de puits éliminés lors de la 1ère phase d'essais (n°s 2, 8, 12 - cf. tableau 7), de puits inutilisés ayant subi une très faible variation de niveau statique entre nos deux passages (n°s 19, 25, 27, 28, 31, 32, 33), enfin du cas où un puits voisin semblable a fait l'objet d'un essai (n°s 3 et 24):

- Sur 5 puits fortement exploités (n°s 1, 7, 9, 14, 29) seule la remontée de niveau pendant la nuit a pu être enregistrée.

- Sur 16 puits un essai type a été à nouveau effectué. Les résultats de l'interprétation de ces 16 essais sont classés dans le tableau 8. Dans 7 cas, pour des raisons liées soit aux conditions de l'essai, soit aux hypothèses restrictives du modèle, il n'a pas été possible de déduire une valeur de perméabilité de l'aquifère.

9 essais ont été interprétés à l'aide des abaques. La perméabilité trouvée est la même que celle déduite des premiers essais dans 5 cas. Elle est plus faible dans 1 cas (n° 18). Dans les trois autres cas (n°s 13, 17, 26), la 1ère phase d'essai n'avait pas conduit à une valeur de perméabilité de l'aquifère.

Tableau 8 - Résultats de l'interprétation des essais effectués en fin de saison sèche - Interprétation de la 2ème phase d'essais

		n° d'essai	Observations
Essais non interprétables	Modèle ina- dapté	16 6	Ø captage < Ø cuvelage nappe semi captive
	Raisons liées au déroulement de l'essai	11 15	Débit de la pompe insuffisant
		20 21 22	
	Essais interprétables	K déduite m/s	13 17 26
5,5.10 ⁻⁶ 3.10 ⁻⁶			
7.10 ⁻⁶ 1,7.10 ⁻⁶ 5.10 ⁻⁶		4 5 30	
~ 1,5.10 ⁻⁵ 3.10 ⁻⁶			10 23
3.10 ⁻⁶		18	Perméabilité plus faible en 2ème phase.

2.3.3. Analyse des fluctuations du niveau piézométrique observées entre les deux phases d'essais - Comparaison avec les fluctuations enregistrées sur quelques bassins versants d'Afrique de l'Ouest.

Tableau 9 - Fluctuation du niveau de la nappe entre les deux phases d'essais

Amplitude de la fluctuation	Nombre de puits
0 à 0,50 m	7
0,50 à 1 m	12
1 à 2 m	9
2 à 3 m	3
inconnue	2

Les fluctuations observées entre les deux phases d'essai (tableau 9) ont été de faible amplitude (0,10 m à 3 m — moyenne 0,90 m). L'intervalle entre les deux périodes d'essais n'a en effet représenté qu'une partie de la saison sèche (3 à 6 mois suivant les cas). D'autre part, les premiers essais ont eu lieu fin novembre, c'est-à-dire après les deux premiers mois de saison sèche pendant lesquels la baisse de niveau de la nappe est la plus rapide.

Sur la figure 13, sont reportés des diagrammes de fluctuations de niveau piézométrique enregistrés sur le bassin versant de Korhogo (Cote d'Ivoire) (7) où des essais de puits ont été réalisés : sauf pour les puits profonds, dont la fluctuation de niveau est plus régularisée et décalée dans le temps, il apparaît que la fluctuation est rapide pendant les deux premiers mois suivant la fin des pluies, après quoi elle varie plus lentement et plus ou moins linéairement en fonction du temps. Les observations effectuées sur trois autres bassins versants (1) en Cote d'Ivoire et au Dahomey montrent également un tarissement beaucoup plus rapide de la nappe dans les deux premiers mois de saison sèche.

Nous avons donc cherché à caractériser sur les sites d'essais de puits la variation de niveau de la nappe au bout des 6 mois de saison sèche pendant lesquels la fluctuation est sensiblement linéaire, et à comparer ces résultats à ceux obtenus sur les quelques bassins versants témoins. Les résultats sont consignés dans le tableau 10.

En ce qui concerne les puits visités pour les besoins de l'étude, la baisse de la nappe après novembre (colonne 3), a été obtenue en divisant la fluctuation de niveau mesurée (ΔH) par le temps séparant les deux mesures (3 à 6 mois). On en déduit par extrapolation la variation de niveau au bout de 6 mois de saison sèche (colonne 4) pour tous les puits visités. La fluctuation mesurée sur les puits n°s 19 et 33 n'a pas de véritable signification car le niveau piézométrique a remonté peu avant notre deuxième tournée à la suite de fortes pluies.

(1) Bassins versants de Sakassou étudiés par l'ORSTOM d'Abidjan, de Diaman Sakassou (2) étudiés par le laboratoire de Géologie de la Faculté des Sciences d'Abidjan, de Parakou (Dahomey) étudié par F. LELONG (10) (11).

Tableau 10 - Comparaison des fluctuations observées sur les puits visités aux fluctuations enregistrées sur quelques bassins versants témoins.

Profondeur du niveau statique	PUITS VISITES POUR LES BESOINS DE L'ETUDE				BASSINS VERSANTS TEMOINS D'AFRIQUE DE L'OUEST								
	n° du puits	Baisse de la nappe après novemb. m/mois	Variation de niveau au bout de 6 mois (extrapolation).	Observations	Lieu	Baisse de la nappe après novemb. m/mois	Variation du niveau piézomét. au bout de 6 mois (m)	Fluctuation totale de la nappe la même année (m)					
0 à 5	6	0,23	1,40	B.V. de Sakassou.	Korhogo (1962 à 1965)	0,10	0,60	2,50					
	11	0,10	0,60			Diaman-Sakassou(1973)		0,12	0,10	2,70			
	25	0,05	0,30		Sakassou (1974)						0,08	1,90	
	27	0,12	0,70										2,50
	28	0,08	0,50										
	32	0,18	1,10										
	33	0,01	-										
5 à 10	5	0,34	2,00	B.V. de Sakassou	Korhogo (1962 à 1965)	0,20	1,50	4					
	7	0,08	0,50			Diaman-Sakassou(1973)		0,25	0,23	5 à 8			
	9	0,25	1,50		Parakou (1963-1964)						0,25	7	
	10	0,19	1,15										1,50
	14	0,21	1,30										
	15	0,42	2,50									
	17	0,20	1,20										
	20	0,20	1,20										
19	0,03	-											
10 à 15	4	0,22	1,30	B.V. de Korhogo	Korhogo (1962 à 1965)	0,65	4,00	4,50					
	8	0,12	0,70										
	13	0,42	2,50										
	16	0,67	4,00									
	18	0,39	2,30									
	21	0,27	1,60						1,70				
	22	0,20	1,20										
	23	0,13	0,80										
	24	0,14	0,80										
	29	0,28	1,70									
30	0,21	1,30										
31	0,27	1,60										
15 à 20	1	0,02	0,12	Fluctuation décalée dans le temps ?	Korhogo (1962 à 1965)	0,45*	2,70	3,00					
	2	0,08	0,50									
	3	0,23	1,50										

* pour les puits profonds de Korhogo il s'agit de la baisse de la nappe pendant 6 mois après janvier.

Les fluctuations de très faibles amplitudes sur les puits numéros 1 et 2 où la nappe est à plus de 15 m de profondeur ne peuvent être expliquées en l'absence de mesures continues dans l'intervalle. Une explication possible serait que ces puits réagissent comme les puits profonds de Korhogo, c'est-à-dire avec un décalage de plusieurs mois par rapport aux autres puits.

La comparaison entre les fluctuations observées sur les puits visités et sur les bassins témoins conduit aux remarques suivantes :

- nappes à faible profondeur (0 à 5 m) (puits situés en zone de bas fond). Les fluctuations entre novembre et mai sont du même ordre de grandeur dans tous les sites étudiés (0,10 m/mois, soit 0 à 1 m en 6 mois).

- nappe à profondeur moyenne (5 à 10 m) (puits situés en zone de bas fond ou à mi-pente). Les fluctuations entre novembre et mai sont du même ordre de grandeur dans tous les sites étudiés (0,25 m/mois soit 1 à 2 m en 6 mois).

- nappes plus profondes (10 à 20 m) (puits situés à mi-pente ou sur le plateau). Les fluctuations entre novembre et mai, ou pour les puits plus profonds entre février et août, sont plus fortes à Korhogo (0,45 à 0,65 m/mois, soit 2 à 4 m en 6 mois) que dans les autres sites (1 à 2 m en 6 mois), ce qui tendrait à prouver que les puits profonds de Korhogo représentent une exception.

Remarquons cependant que si les fluctuations naturelles de la nappe qui risquent de se produire entre la réalisation d'un essai de débit type et la fin de la saison sèche, ont une amplitude relativement faible (0 à 4 m), elles ne sont représentatives que des quelques sites étudiés. De plus, à ces fluctuations annuelles se superposent des fluctuations pluriannuelles pouvant atteindre 5 à 10 m (1) à long terme dont il serait bon de tenir compte lors de la réalisation des ouvrages de captage.

L'analyse des facteurs influençant la fluctuation des nappes a été abordée par quelques auteurs, mais reste encore vague étant donné le peu de mesures dont on dispose. Elle nécessite la connaissance des fluctuations journalières d'un grand nombre de puits pendant plusieurs années dans des sites de structure géologique connue, associée à la mesure de la pluviométrie sur chaque bassin versant étudié. Dans l'état actuel des connaissances, et en l'absence de mesures régulières au voisinage de la plupart des puits étudiés il semble donc dangereux de vouloir donner une explication plus approfondie des fluctuations constatées.

(1) Dans la région du Yatenga la nappe a baissé de 5 à 6 m sur les plateaux et de 1 à 2 m dans les points bas depuis 1966 à la suite de la sécheresse récente.

2.3.4. Analyse des débits mesurés lors des deux phases d'essais

2.3.4.1. Débit des puits lors de la 1ère phase d'essais

Les débits mesurés lors de la 1ère phase d'essais sont classés dans le tableau 11.

Tableau 11 - Débits classés mesurés lors de la 1ère phase d'essais

Débit des puits en 1ère phase (l/h)	Nombre de puits	Nombre d'essais qui ont été interprétés à l'aide du modèle en 1ère ou 2ème phase
0 - 200	7	5
200 - 500	8	4
500 -1000	6	6
1000 -1500	7	5
≥ 1500	5	0

Les débits des puits visités en début de saison sèche s'évaluent entre 0 et 2 m³/h (exceptionnellement 5 m³/h avec une moyenne de 700 l/h.) La méthode d'essai de débit proposée n'est pas adaptée pour les puits de débit supérieur à 1,5 m³/h. (1).

2.3.4.2. Comparaison du débit des puits entre la 1ère phase et la 2ème phase d'essais

Les débits (en l/h) enregistrés pendant la première heure de remontée, à chacune des deux phases d'essais, sont reportés dans les tableaux de l'annexe III.

Avant d'analyser ces résultats, deux remarques s'imposent :

- Les puits testés se sont avérés exploités bien au-dessous de leur capacité maximale (voir tableau ci-après).

(1) Pour les puits de débit supérieur à 1,5 m³/h, les méthodes classiques d'essai de débit peuvent être appliquées en variant le débit de la pompe.

Exploitation des puits : $\frac{Q \text{ exploité}}{Q_{2\text{ème phase}}}$	0	0 à 0,25	0,25 à 0,50	> 0,50.
Nombre de puits	11	10	5	4

4 puits seulement ont été exploités à plus de 50% de leur débit résiduel de fin de saison sèche.

- D'autre part, les fluctuations de niveau statique entre les deux phases d'essais ont été de faible amplitude (0,90 m en moyenne par rapport à une hauteur d'eau moyenne de 6,50 m).

Pour ces deux raisons, les variations de débit entre les deux phases d'essais sont faibles, et l'influence des deux principaux paramètres (débit d'exploitation du puits, fluctuation saisonnière du niveau statique) est masquée par le " bruit " inhérent aux mesures.

La comparaison des débits enregistrés au deux phases d'essais sur quelques uns des puits testés permet d'obtenir cependant des résultats qualitatifs. Dans le tableau 12 sont reportés pour 7 puits : les fluctuations absolues et relatives du niveau statique entre les deux phases d'essais (colonnes 2 et 3), les débits mesurés en 1ère et 2ème phase (colonnes 4 et 5), le débit théorique de fin de saison sèche - calculé à partir du débit en 1ère phase en considérant seulement l'influence de la fluctuation ΔH - (colonne 6), le débit réellement exploité (colonne 7).

Tableau 12 - Comparaison des débits enregistrés aux deux phases d'essais sur quelques puits

N° du puits	ΔH (m)	$\lambda = \frac{\Delta H}{H_m}$	Q 1ère phase (l/h)	Q 2ème phase (l/h)	Q 2ème phase théorique (l/h)	Débit réellement exploité (l/h)	Observations
5	1,90	0,20	570	470	360	0	-
16	3,0	0,40	400	200	160	100	-
10	1,0	0,38	415	470	200	20	Horizon de forte perméabilité dans le bas du profil
18	1,80	0,25	1800	870	1000	0	Horizon de forte perméabilité dans le haut du profil dénoyé en 2ème phase
1	0,10	0,03	200	340	200	170	Décolmatage ?
7	1,25	0,33 ?	145*	75*	?	80	Puits exploités à leur maximum.
14	1,0	0,25 ?	440	180*	?	150	

* Débit mesuré en fond de puits après puisage journalier

Les puits n°s 5 et 16, pas ou peu utilisés, ont un débit réel de fin de saison sèche supérieur au débit théorique mais du même ordre grandeur. La variation de débit entre les deux phases d'essais (20 et 50%) est due essentiellement à la fluctuation de la nappe.

Puits n° 10, malgré une forte fluctuation de niveau statique ($\lambda = 38\%$) le débit a très peu varié entre les deux phases d'essais. Ce puits capte la nappe dans un niveau de bonne perméabilité (amphibolites fissurées très peu altérées) situé à la base du profil d'altération et qui reste noyé toute l'année. Le débit d'un tel puits ne diminuerait fortement que si l'horizon productif venait à être dénoyé.

Le Puits n° 18, inutilisé, a un débit en 2ème phase inférieur au débit théorique. L'interprétation a montré que la perméabilité au voisinage de ce puits était réduite de moitié en fin de saison sèche. Il s'agit d'un puits dont un niveau supérieur de bonne perméabilité s'est trouvé dénoyé en fin de saison sèche.

Le puits n° 1, a subi une fluctuation quasiment nulle du niveau statique. Pourtant son débit a augmenté de plus de 50% entre les deux phases d'essais. Une explication possible serait que ce puits nouveau ait subi un décolmatage après sa mise en service entre les deux périodes d'essais.

Les puits 7 et 14, ont été exploités à leur maximum pendant toute la saison sèche. Leur débit d'épuisement a diminué respectivement de 50% et 60% au bout d'environ 5 mois.

Ces résultats montrent que l'évolution du débit d'un puits au cours de la saison sèche est influencée non seulement par l'exploitation continue du puits et la fluctuation saisonnière du niveau de la nappe, mais aussi par la variation de perméabilité selon le profil vertical au voisinage du puits.

2.3.4.3. Débit exploitable des puits visités

Le débit exploitable théorique de 14 puits, qui ont fait l'objet en 1ère phase d'un essai de débit interprétable, a été déterminé à l'aide des abaques de l'annexe III. Les résultats sont reportés dans le tableau 13 et comparés aux débits instantanés mesurés lors de la 1ère phase d'essais. Il ressort de ce tableau que, pour de faibles fluctuations relatives de niveau statique (25% de la hauteur mouillée en moyenne), le débit exploitable serait de l'ordre de 70% du débit instantané mesuré en début de saison sèche pour des puits de perméabilité moyenne ($8 \cdot 10^{-6}$ m/s) et de l'ordre de 35% pour des puits de perméabilité plus faible ($\sim 3 \cdot 10^{-6}$ m/s).

Tableau 13 - Débit exploitable de 14 puits visités

n° d'essai	Q exploitable théorique (l/h)	Q lère phase (l/h)	$\frac{Q \text{ exploitable}}{Q \text{ lère phase}}$	Perméabilité (m/s)	$\lambda \frac{\Delta H}{Hm}$
3	500	475	1	$8 \cdot 10^{-6}$	0,35
4	850	830	1	$7 \cdot 10^{-6}$	0,22
10	300	415	0,7	$15 \cdot 10^{-6}$	0,57
19	900	1220	0,75	$8 \cdot 10^{-6}$	0
21	600	1000	0,6	$10 \cdot 10^{-6}$	0,24
23	100	160	0,6	$3 \cdot 10^{-6}$	0,28
30	1000	1430	0,7	$5 \cdot 10^{-6}$	0,15
5	230	570	0,4	$1,7 \cdot 10^{-6}$	0,30
18	430	1800	0,25	$7 \cdot 10^{-6}$	0,44
24	100	320	0,30	$1,5 \cdot 10^{-6}$	0,19
25	500 ?	1040	0,50	$1,8 \cdot 10^{-6}$	0
29	300	665	0,50	$3 \cdot 10^{-6}$	0,29
31	400	940	0,40	$2 \cdot 10^{-6}$	0,2
32	40	175	0,23	$5 \cdot 10^{-6}$	0,35

*

*

*

CONCLUSION

La méthode décrite dans cette étude permet, dans la mesure où le milieu aquifère est homogène dans le sens vertical de donner une bonne interprétation de l'essai de débit type (consistant à vidanger le puits en deux heures) et de définir un débit d'exploitation à long terme en l'absence de fluctuation saisonnière.

Lorsque l'essai de débit type n'a pu être réalisé, ou n'a pu être interprété correctement, ou lorsqu'il existe des fluctuations saisonnières de la nappe mal déterminées, la détermination du débit exploitable à long terme est alors plus difficile.

Dans le cas où les fluctuations saisonnières sont importantes vis à vis de la hauteur d'eau dans le puits, le débit exploitable en dépend pour une large part. Il importe donc de pouvoir les évaluer au préalable d'après des critères dans lesquels interviennent essentiellement des facteurs climatiques hydrogéologiques et géomorphologiques.

Dans cette optique, la création d'un réseau d'observation piézométrique envisagée par le C.I.E.H., doit permettre de déterminer progressivement les facteurs principaux des fluctuations. Sur la base de ces observations, les hydrogéologues pourront ensuite appréhender un type de fluctuations suivant les différents facteurs observés sur le site du puits étudié.

En attendant une étude plus précise de ces phénomènes à l'aide d'un réseau d'observation, le tableau suivant donne une estimation de la fluctuation en fonction de la profondeur du niveau sous le sol :

Profondeur du niveau statique sous le sol	Fluctuation de la nappe pendant les 6 derniers mois de saison sèche m/mois
0-5 mètres	0,10
5 - 10 mètres	0,25
10 - 25 mètres	0,25 pour la plupart des sites 0,25 à 0,60 pour le site de Korhogo

Dans le cas où le milieu est hétérogène dans le sens vertical, c'est-à-dire dans le cas où il est composé d'un ou plusieurs niveaux bien perméables, séparés par des horizons de qualité hydraulique médiocres, les abaques des annexes I et II de la présente étude ne conviennent pas pour interpréter rigoureusement l'essai de débit, ni pour déterminer le débit exploitable à long terme.

Pour remédier à cette carence, on aurait pu imaginer la réalisation d'abaques en plus grand nombre, chacun d'eux étant indexé sur un ensemble de paramètres (épaisseur et perméabilité des différentes couches), mais on se serait heurté aux difficultés suivantes :

- nécessité de réaliser un grand nombre d'abaques représentant un coût élevé, le modèle employé étant par nature assez complexe.

- obtention de courbes de réponse quasi identiques pour des jeux de paramètres très différents.

La deuxième difficulté semble particulièrement insurmontable. En effet, l'interprétation de l'essai de courte durée ne permettrait pas de dire devant quel type d'hétérogénéité on est en présence, et c'est justement de ce type d'hétérogénéité que dépend le débit exploitable à long terme. Autrement dit, la réponse au pompage que constitue la variation de niveau d'eau dans le puits, n'est pas déterminante, et ceci quel que soit le degré de complexité du modèle employé.

Pour cette raison, il ne nous semble pas judicieux d'approfondir à l'avenir les études dans ce sens.

Dans la pratique, l'estimation du débit exploitable d'un puits pourra être faite en adoptant la démarche suivante :

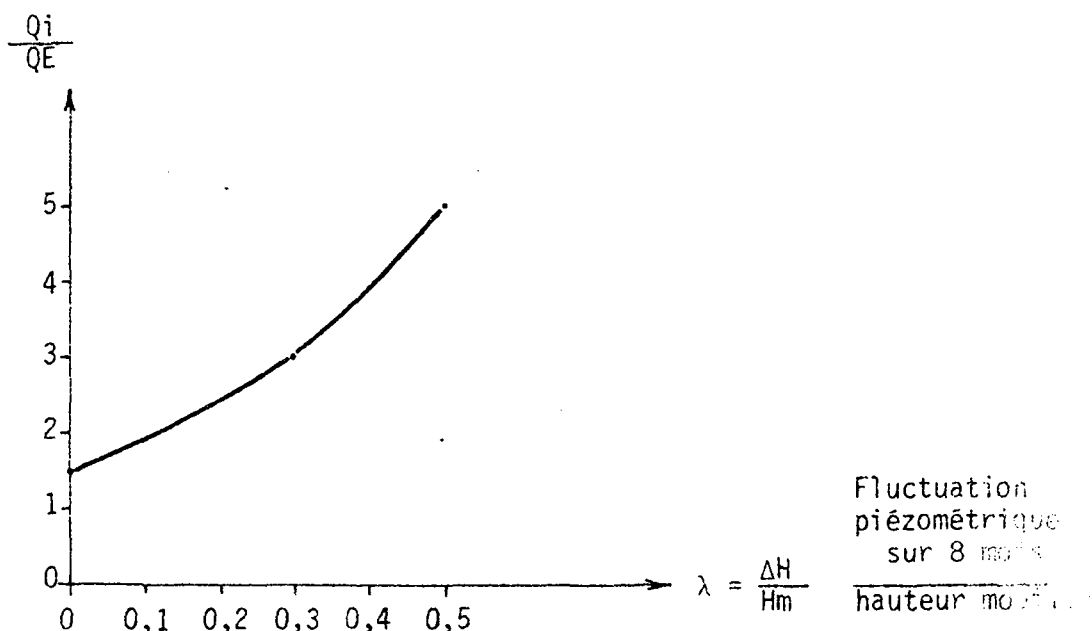
Premier cas : Réalisation d'un essai de débit interprétable

L'interprétation n'est possible que si le puits a repris son niveau statique avant le début de l'essai, si le débit de pompage est correctement adopté et si la remontée du niveau est suivie pendant environ 24 heures. Dans la mesure où l'essai de débit est interprétable à l'aide des abaques de l'annexe I, on en déduit une valeur de perméabilité K de l'aquifère supposée homogène. La connaissance de la hauteur mouillée et de la fluctuation saisonnière permet de déterminer ensuite le débit exploitable en fin de saison sèche.

Deuxième cas : Un essai de débit type n'a pu être réalisé ou il n'est pas interprétable.

Dans ce cas on conservera la notion classique de "débit instantané" qui peut être obtenu en vidant le puits, et en mesurant le rabattement pendant la descente et pendant la première heure de remontée (méthode de PORCHET ou méthode du puisatier). Le passage du débit instantané au débit exploitable peut être appréhendé en adoptant la démarche indiquée ci-après :

- Si le milieu peut être considéré comme homogène, c'est-à-dire si l'hydrogéologue n'a pas constaté, en relevant la coupe du puits, des niveaux aquifères particulièrement favorables, on peut, en première approximation, déterminer le débit exploitable Q_E à partir du débit instantané Q_i d'après le graphique suivant, déduit des différents cas traités sur modèle.



- Si le milieu est hétérogène, trois cas pourront se présenter :

- l'horizon bien perméable est situé en surface : le débit exploitable sera alors très sensible aux fluctuations de nappe et il faut être très prudent dans l'interprétation car le principal niveau aquifère risque de se dénoyer au cours de la saison sèche à la fin de laquelle le débit exploitable pourrait être très faible devant le débit instantané.

- l'horizon bien perméable est situé au fond du puits et ne risque pas d'être dénoyé : le débit exploitable sera environ 15 fois inférieur au débit instantané quelles que soient les fluctuations.

- enfin le milieu est régulièrement hétérogène : on peut se ramener au cas du milieu homogène, et le débit exploitable peut être déduit avec plus ou moins de certitude du graphique ci-dessus.

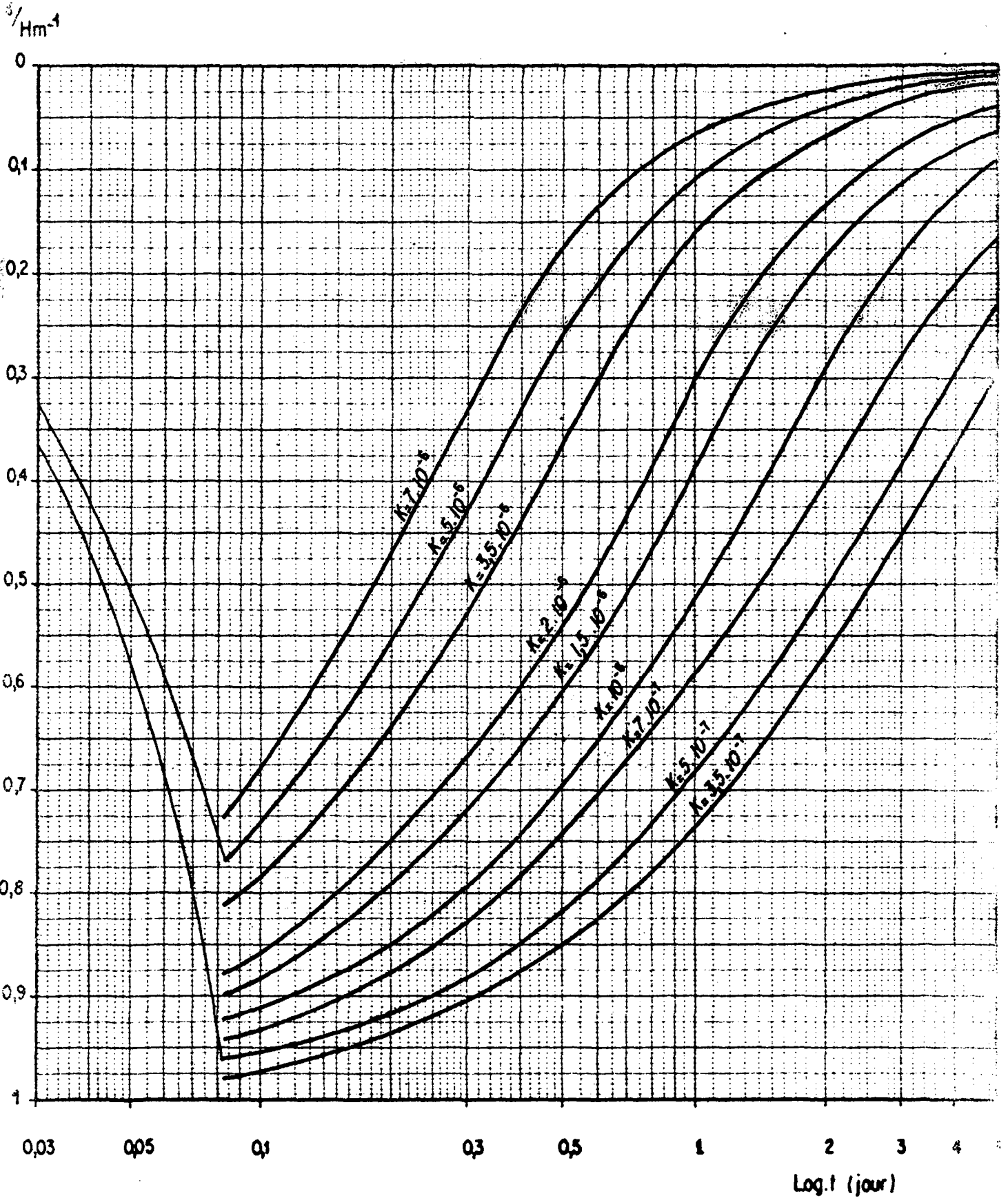
Etude et rapport de : J.F. BERAUD
M. CLOUET D'ORVAL
D. FOUGEIROL

ANNEXE I

ABAQUES D'INTERPRÉTATION
DES ESSAIS DE DÉBIT DE COURTE DURÉE

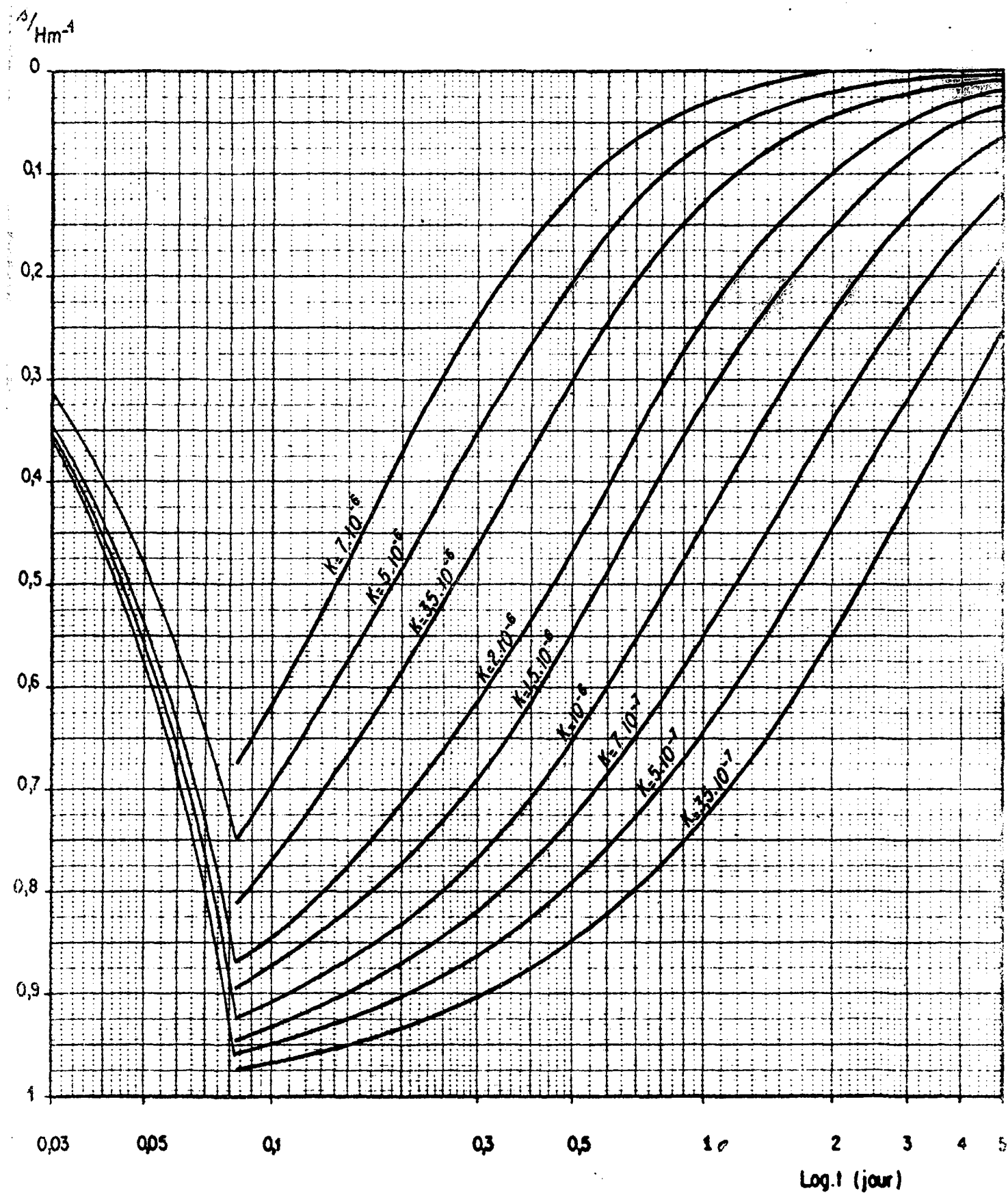
ABAQUES D'INTERPRÉTATION DES ESSAIS DE DÉBIT DE COURTE DURÉE

$r = 0,5 \text{ m}$ $H_m = 2 \text{ m}$



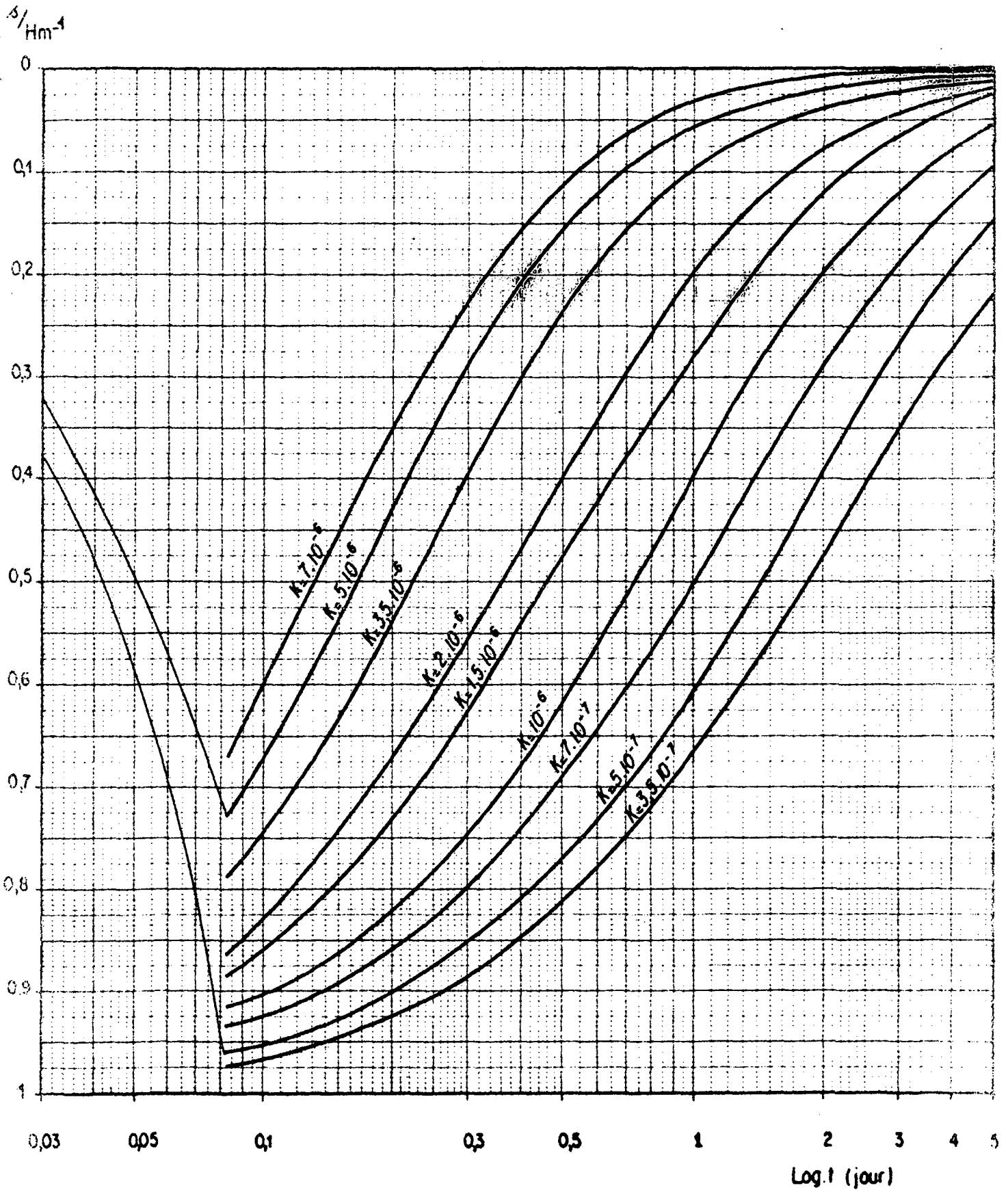
ABAQUES D'INTERPRÉTATION DES ESSAIS DE DÉBIT DE COURTE DURÉE

$r = 0,5 \text{ m}$ $Hm = 3 \text{ m}$



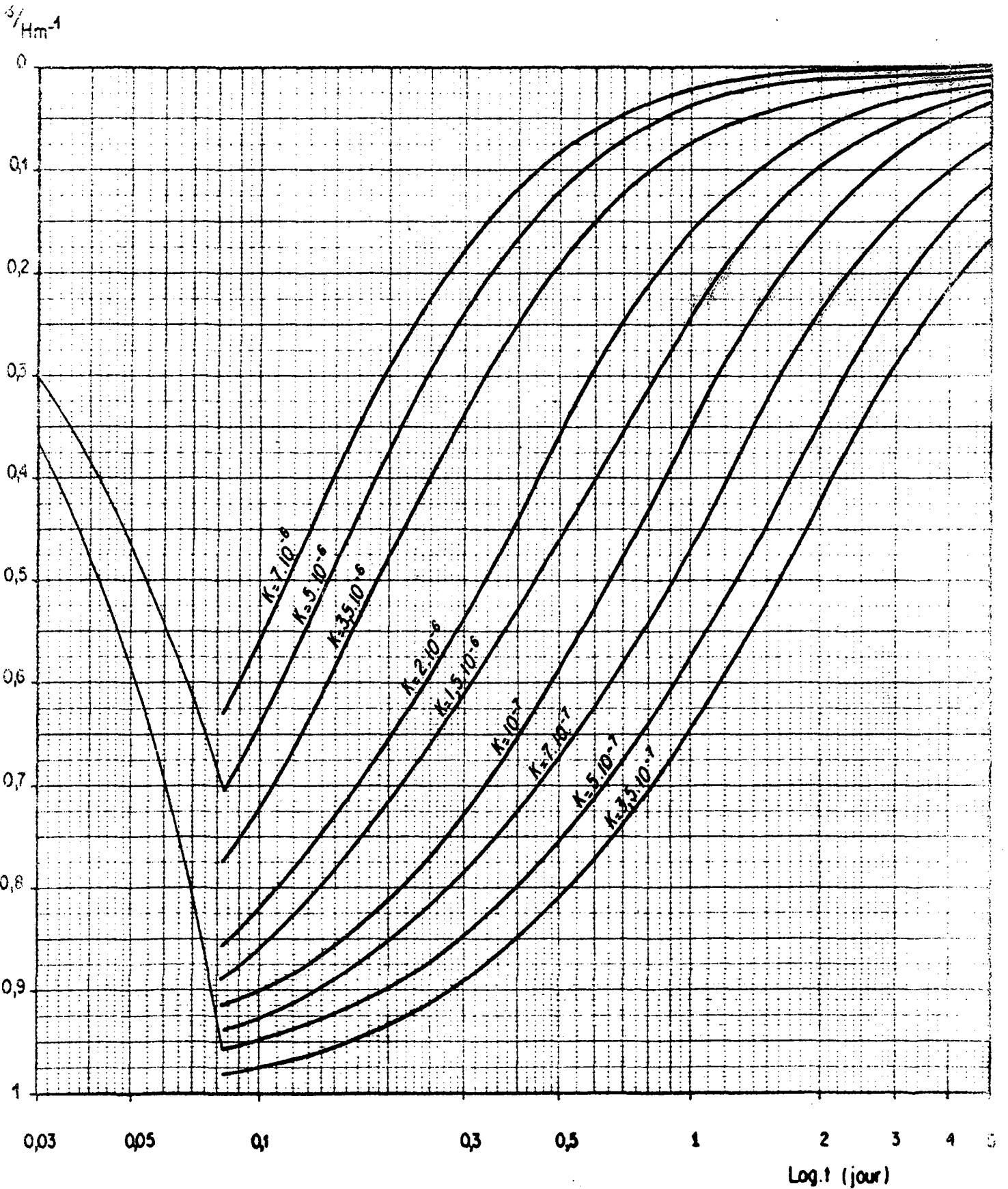
ABAQUES D'INTERPRÉTATION DES ESSAIS DE DÉBIT DE COURTE DURÉE

$r = 0,5 \text{ m}$ $H_m = 4 \text{ m}$



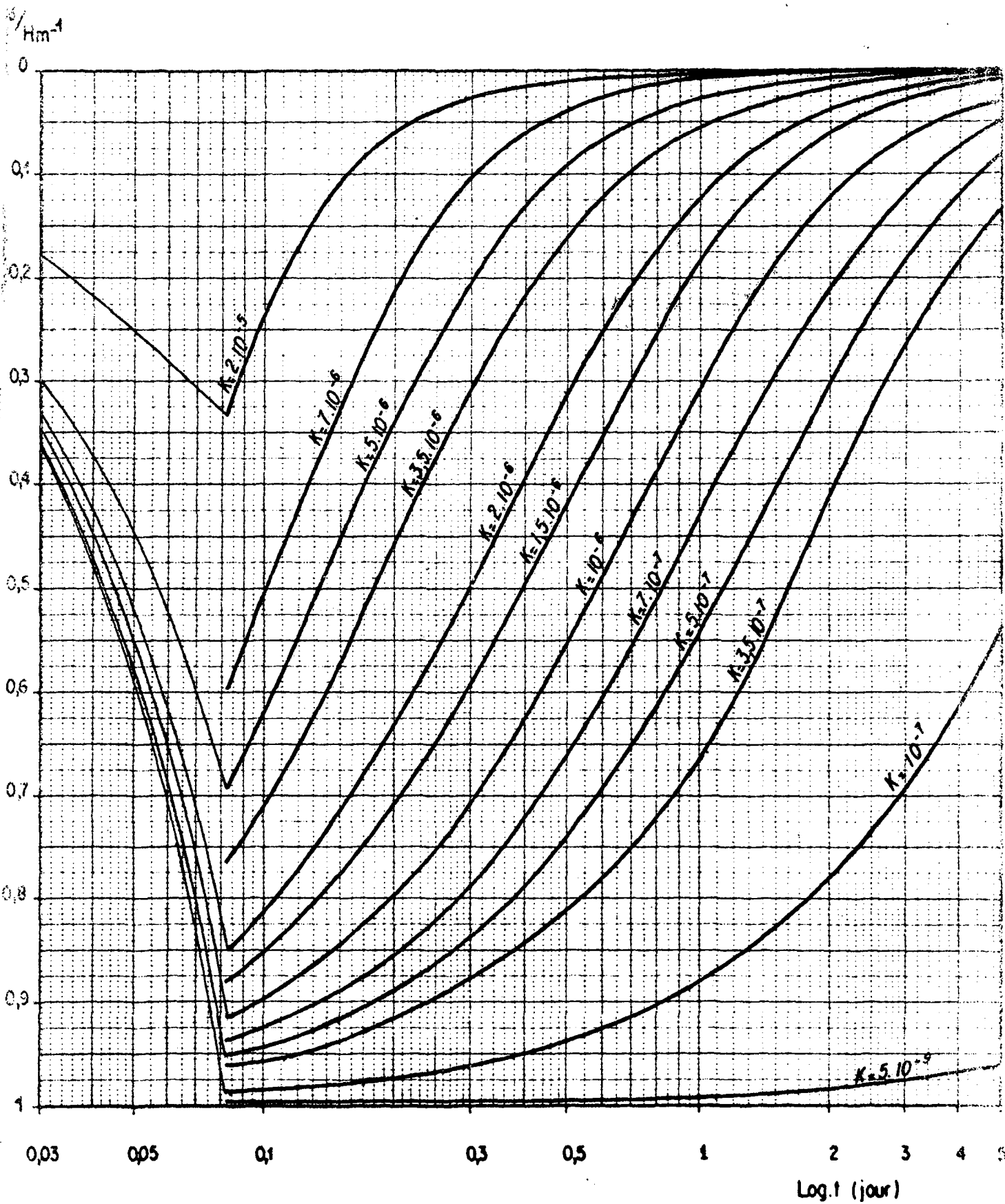
ABAQUES D'INTERPRÉTATION
DES ESSAIS DE DÉBIT DE COURTE DURÉE

$r = 0,5 \text{ m}$ $H_m = 5 \text{ m}$



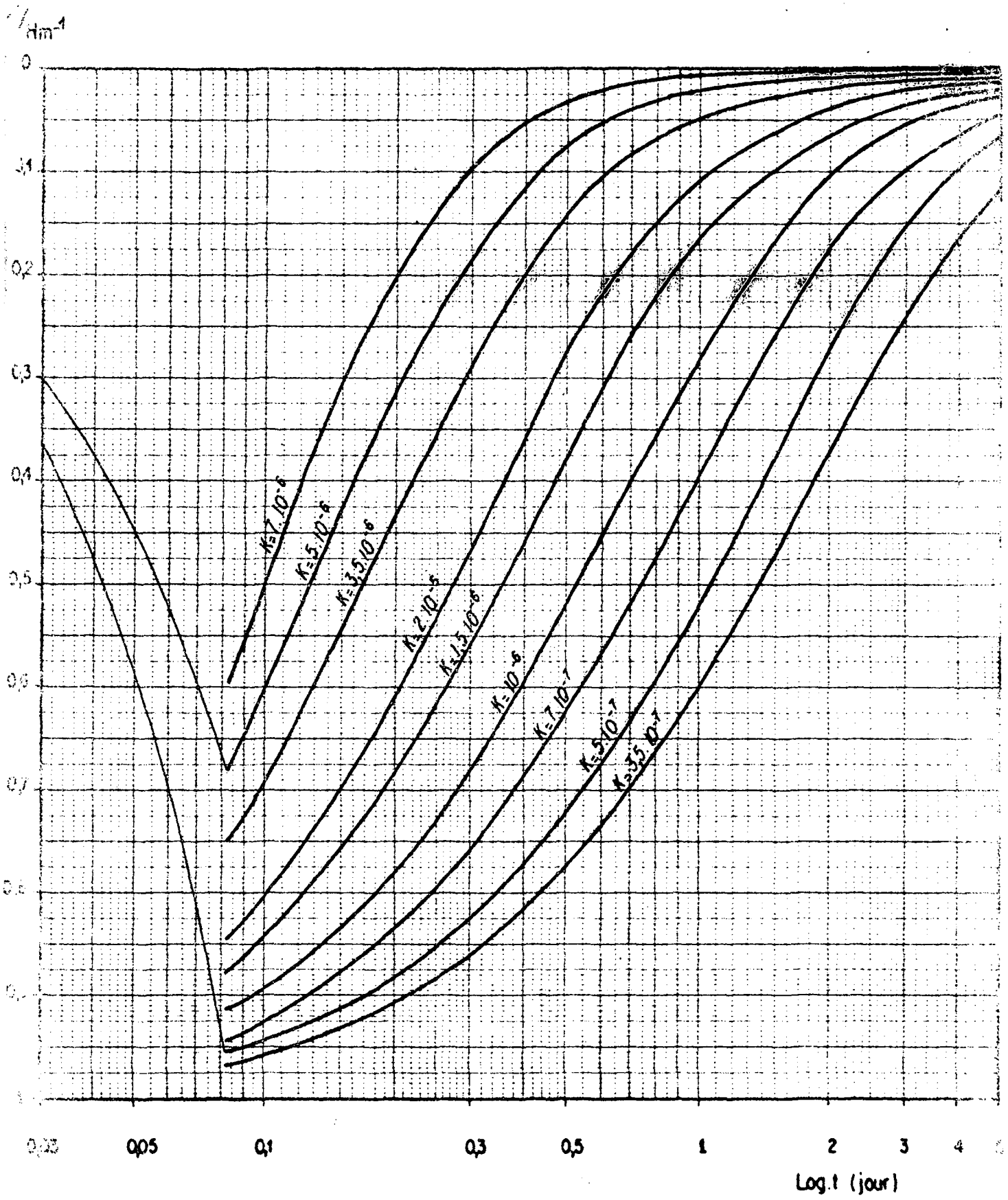
ABAQUES D'INTERPRÉTATION DES ESSAIS DE DÉBIT DE COURTE DURÉE

$r = 0,5 \text{ m}$ $Hm = 6 \text{ m}$



ABAQUES D'INTERPRÉTATION
DES ESSAIS DE DÉBIT DE COURTE DURÉE

$r = 0,5 \text{ m}$ $Hm = 7 \text{ m}$

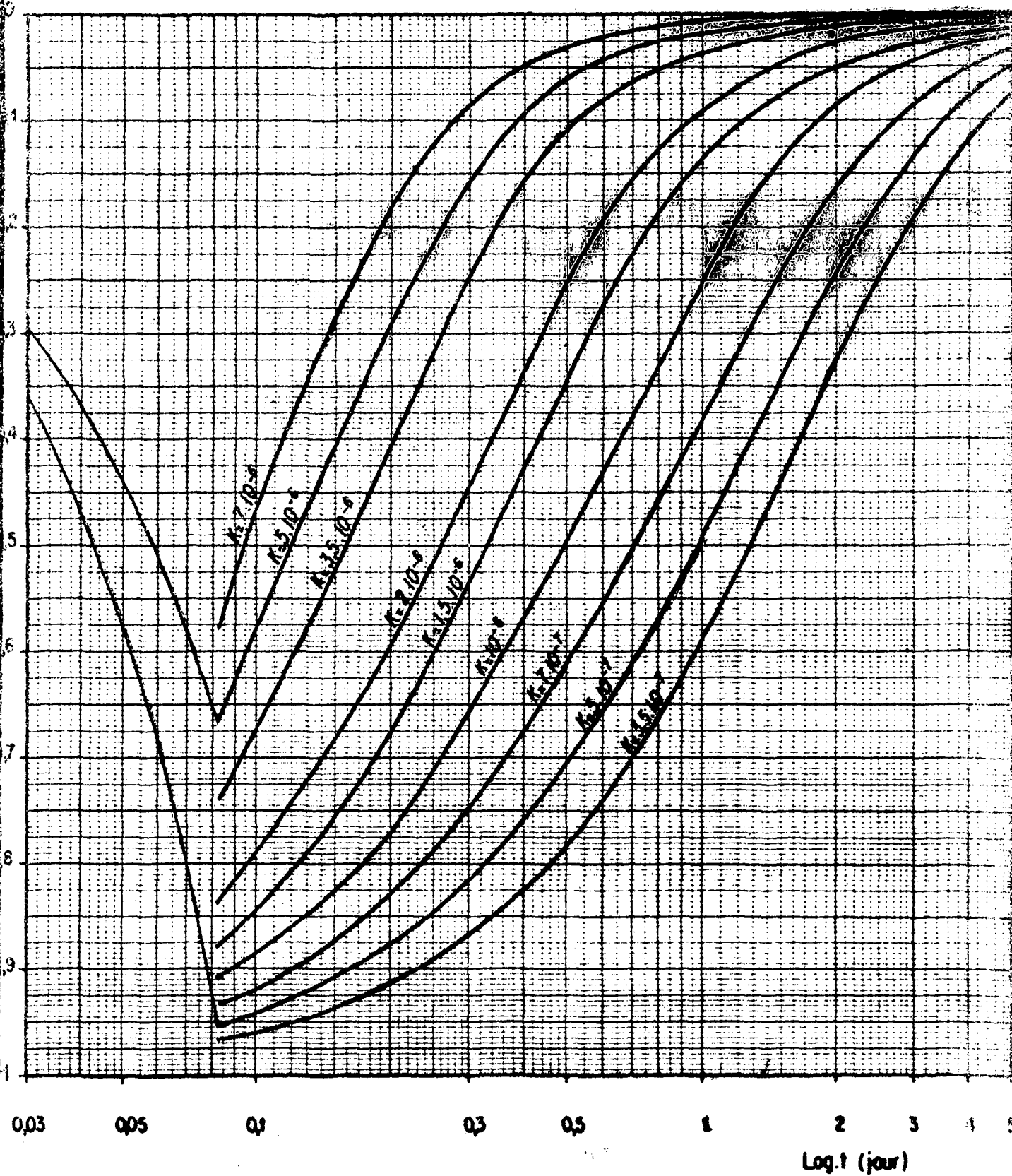


ABAQUES D'INTERPRÉTATION DES ESSAIS DE DÉBIT DE COURTE DURÉE

$r = 0,5 \text{ m}$

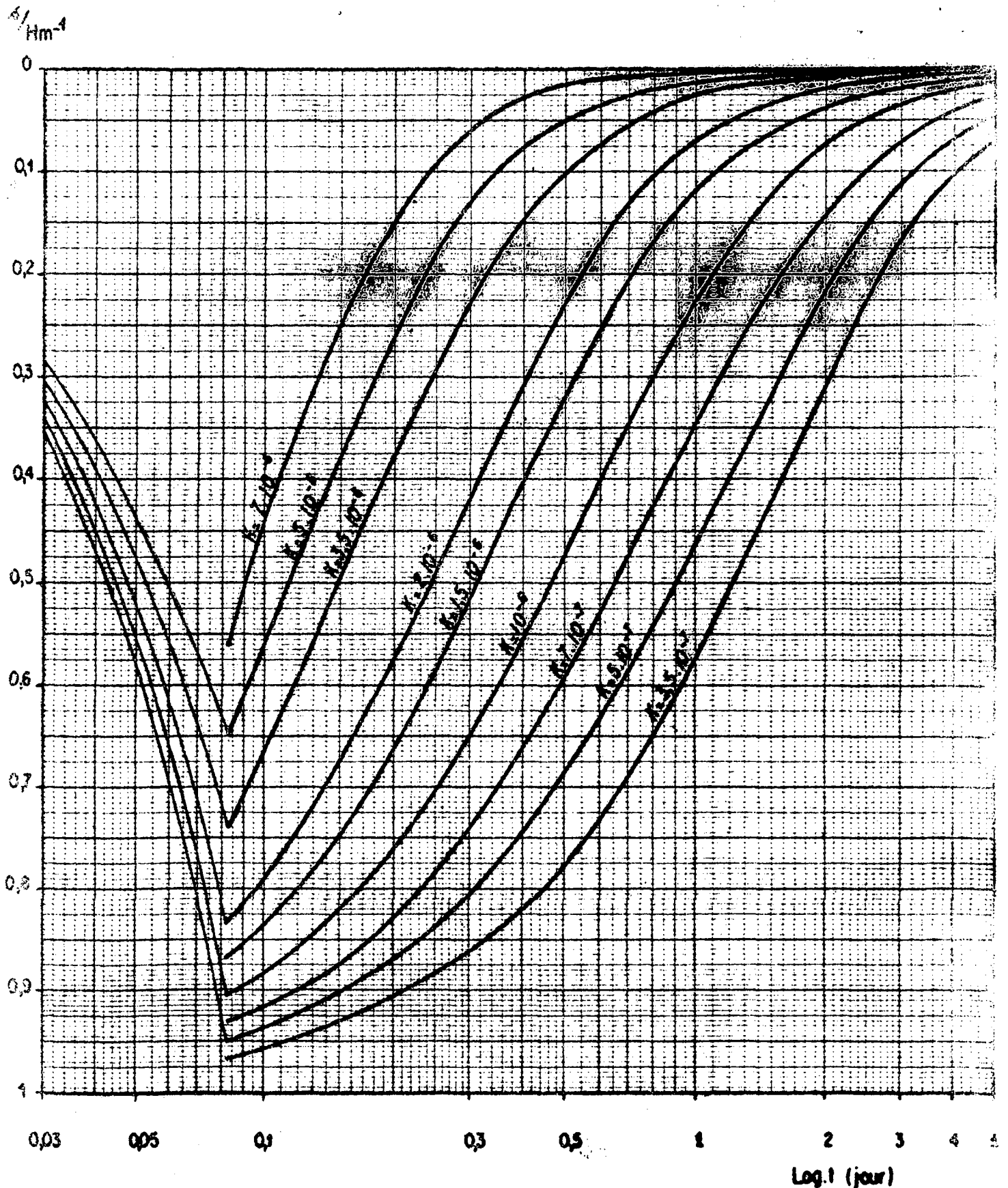
$H_m = 8 \text{ m}$

$h \text{ m}^{-1}$



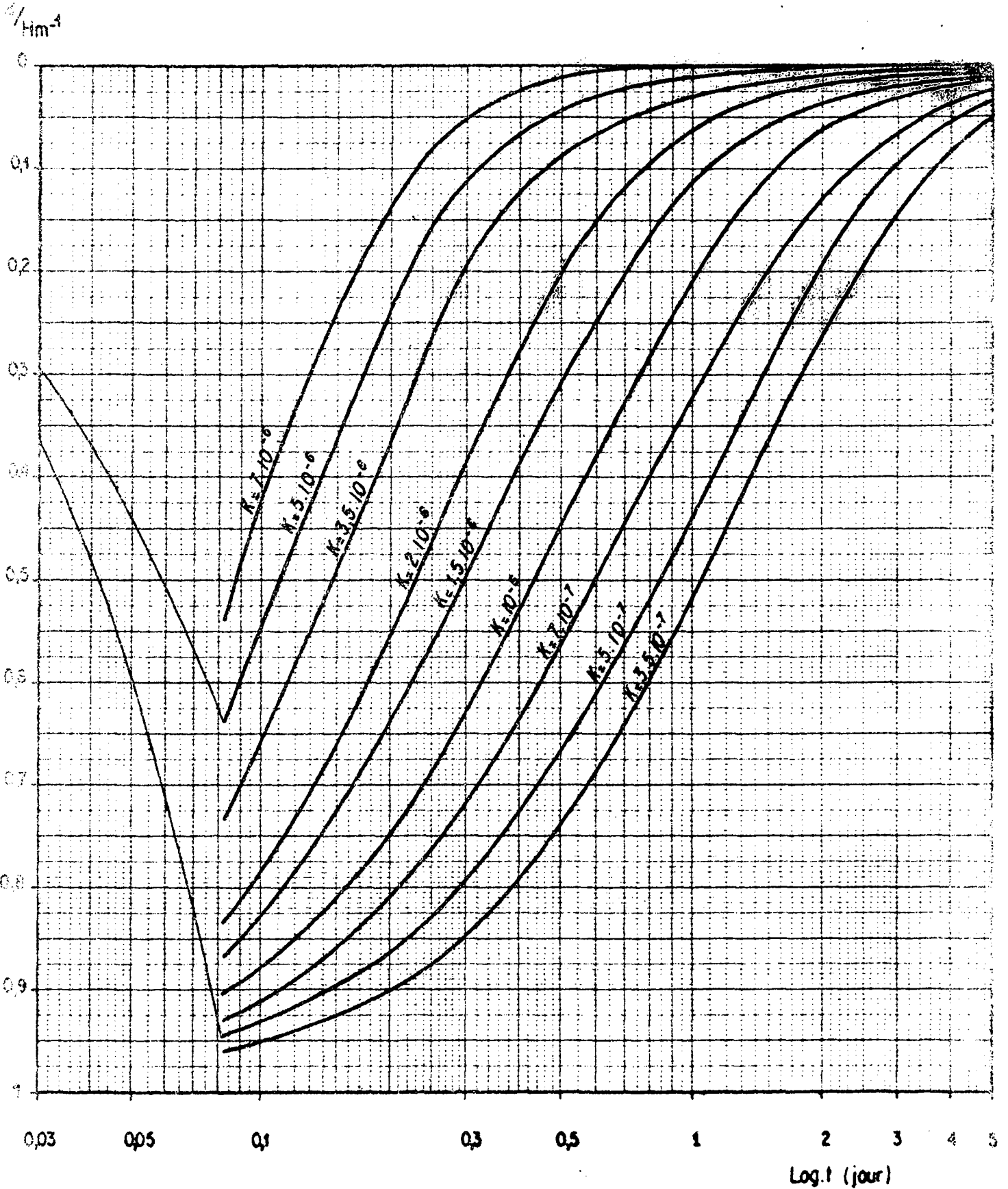
ABAQUES D'INTERPRÉTATION DES ESSAIS DE DÉBIT DE COURTE DURÉE

$r = 0,5 \text{ m}$ $H_m = 9 \text{ m}$



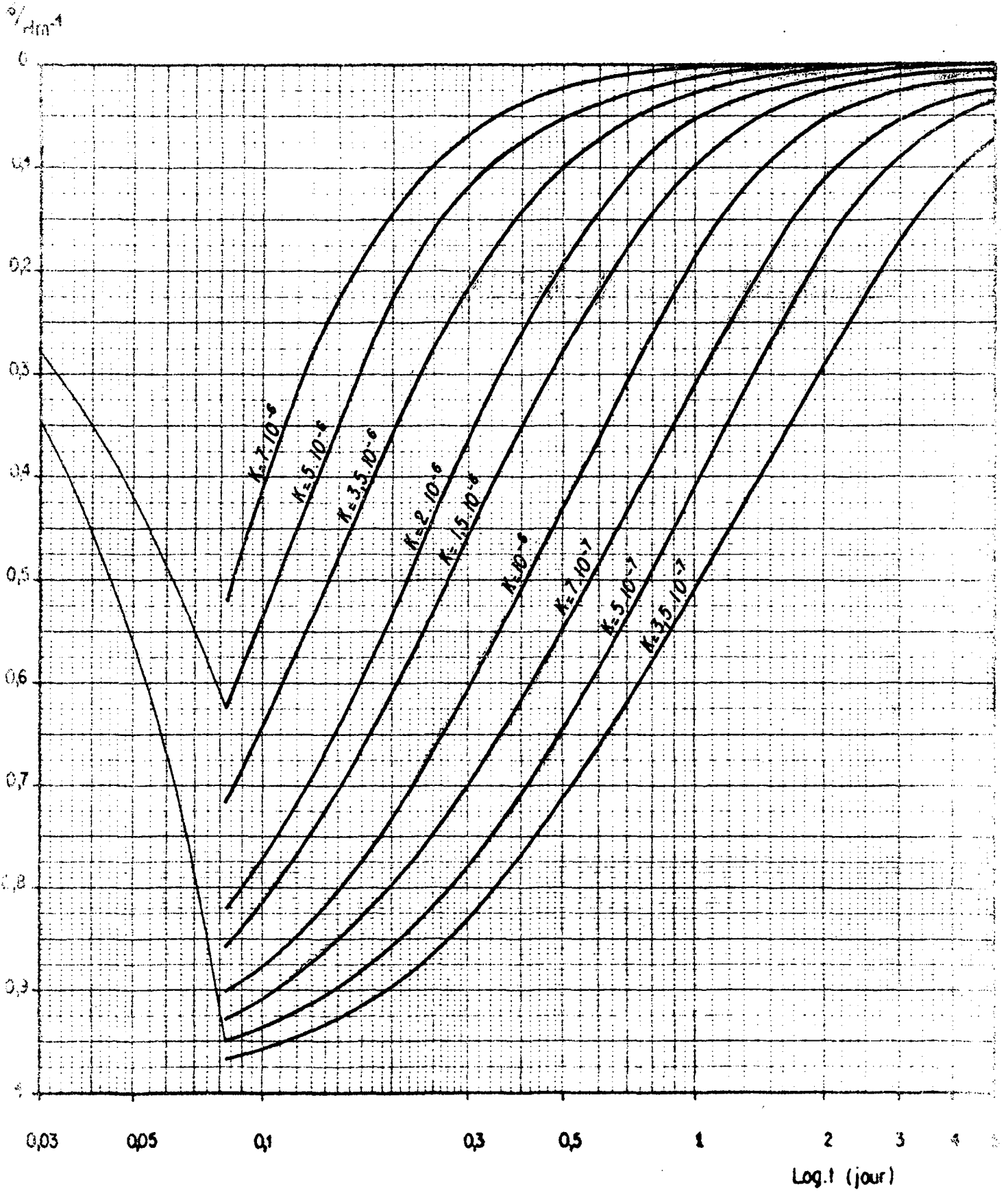
ABAQUES D'INTERPRÉTATION DES ESSAIS DE DÉBIT DE COURTE DURÉE

$r = 0,5 \text{ m}$ $H_m = 10 \text{ m}$



ABAQUES D'INTERPRÉTATION DES ESSAIS DE DÉBIT DE COURTE DURÉE

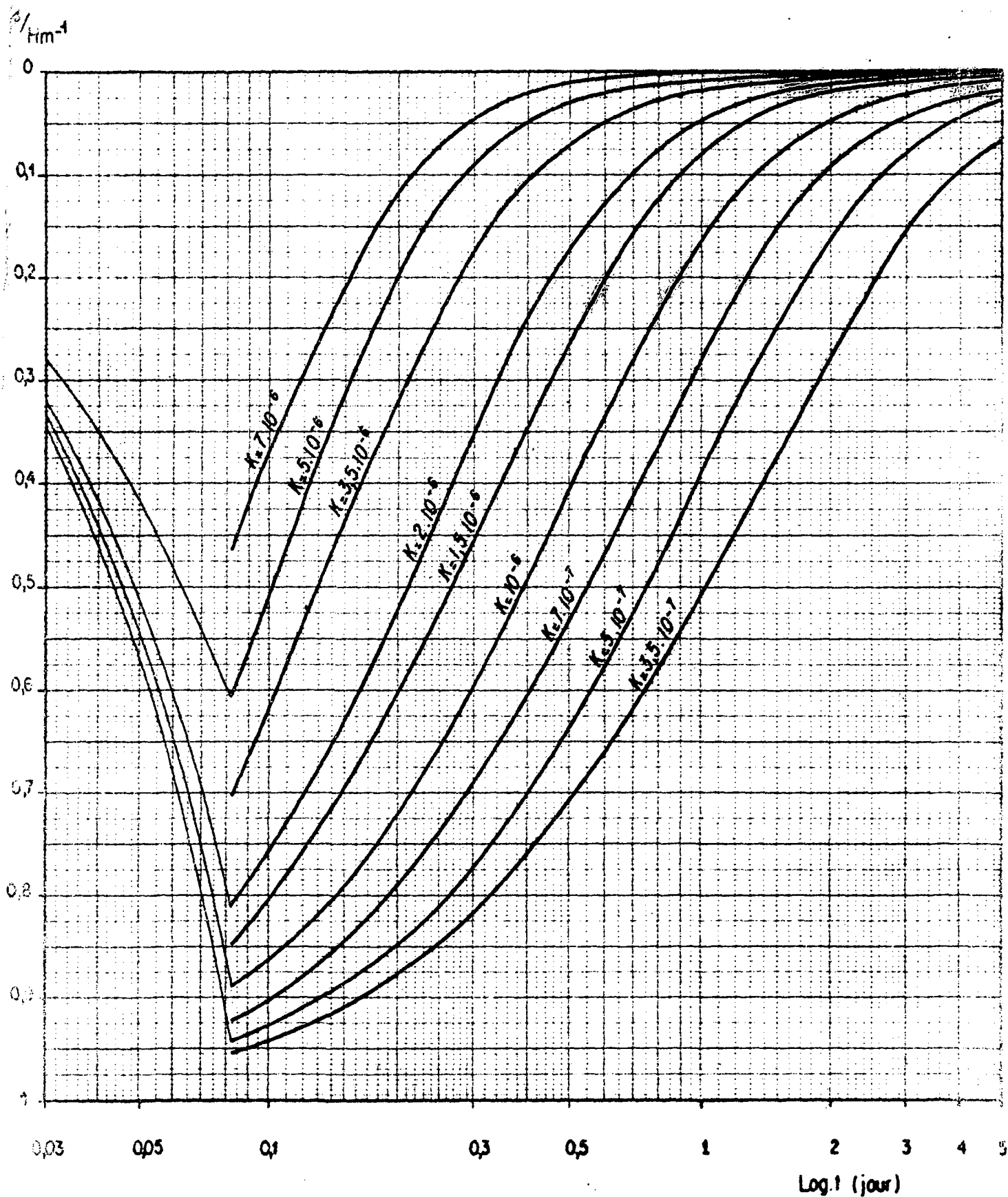
$r = 0,5 \text{ m}$ $Hm = 11 \text{ m}$



ABAQUES D'INTERPRÉTATION DES ESSAIS DE DÉBIT DE COURTE DURÉE

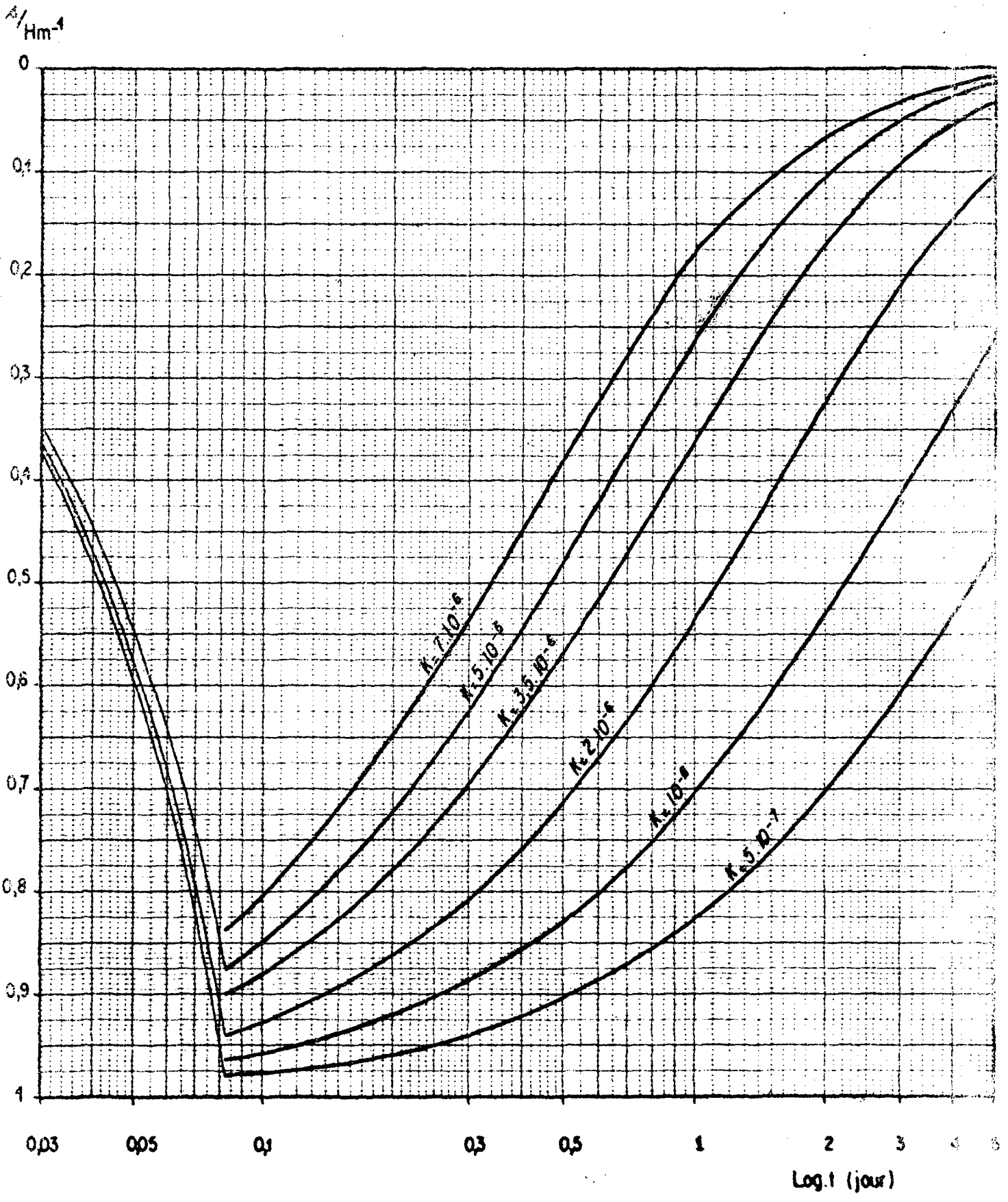
$r = 0,5 \text{ m}$

$H_m = 12 \text{ m}$



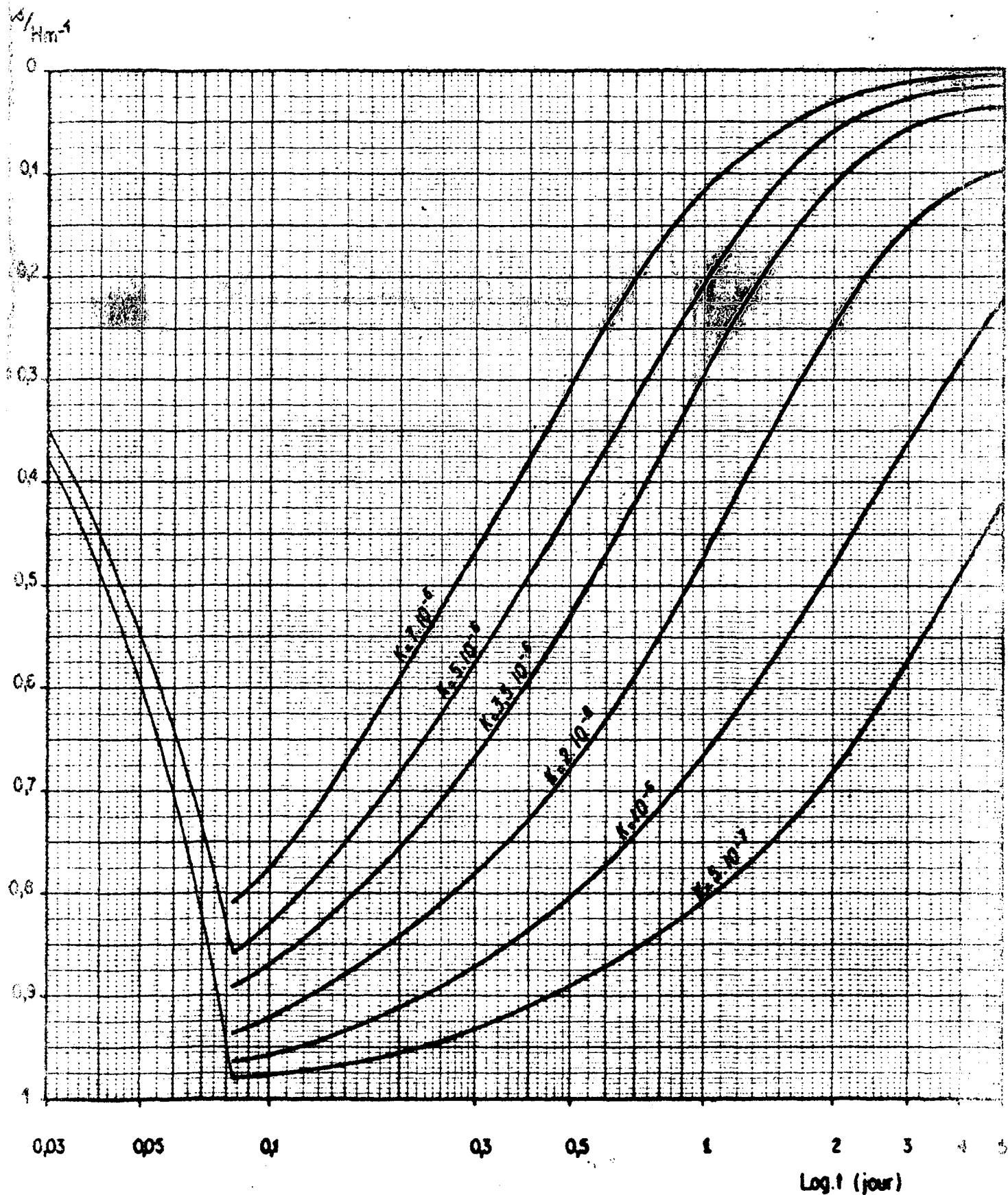
ABAQUES D'INTERPRÉTATION DES ESSAIS DE DÉBIT DE COURTE DURÉE

$r = 0,9 \text{ m}$ $H_m = 3 \text{ m}$



ABAQUES D'INTERPRÉTATION DES ESSAIS DE DÉBIT DE COURTE DURÉE

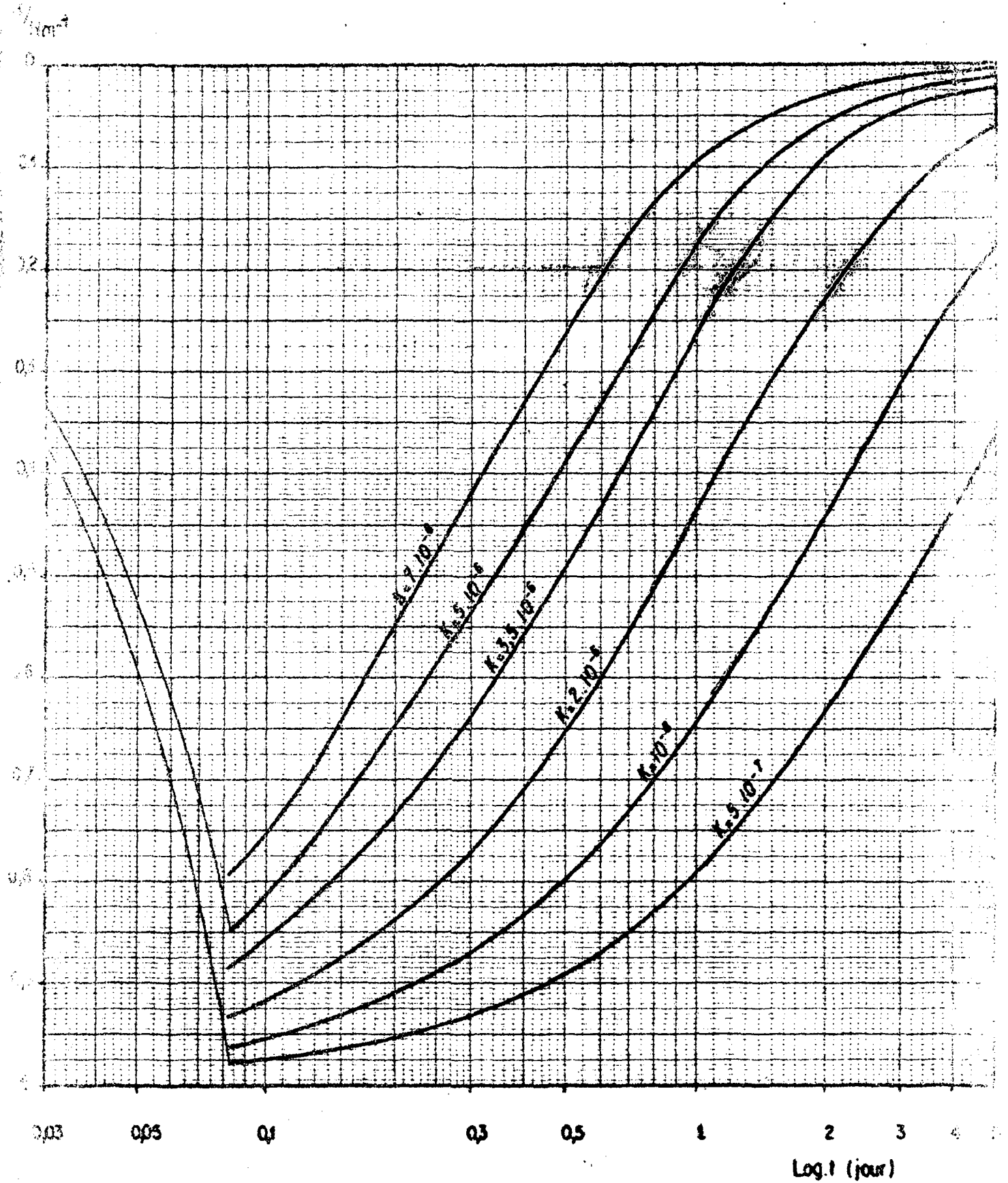
$r = 0,9 \text{ m}$ $H_m = 4 \text{ m}$



ABAQUES D'INTERPRÉTATION DES ESSAIS DE DÉBIT DE COURTE DURÉE

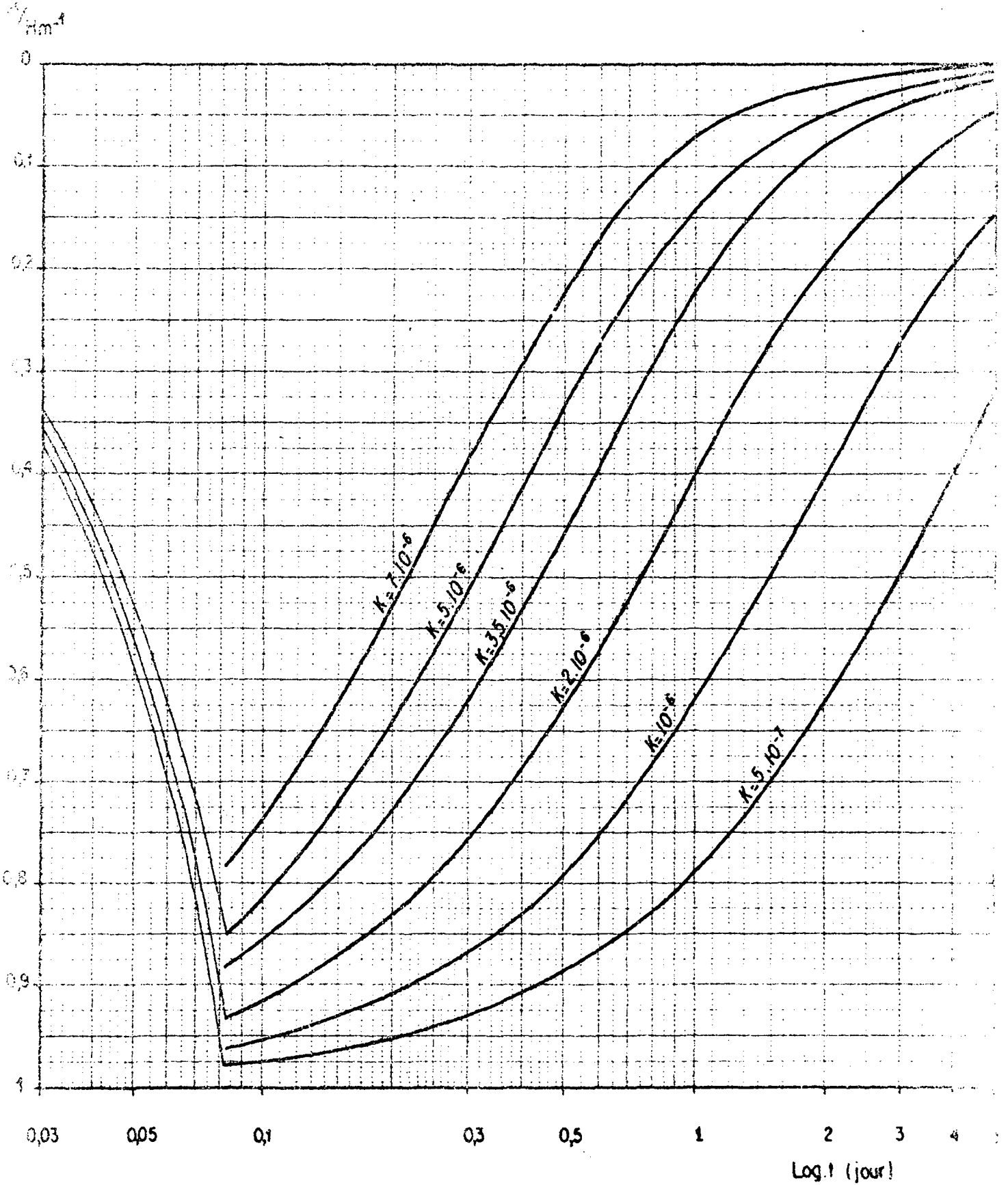
$r = 0,9$ m

$H_m = 5$ m



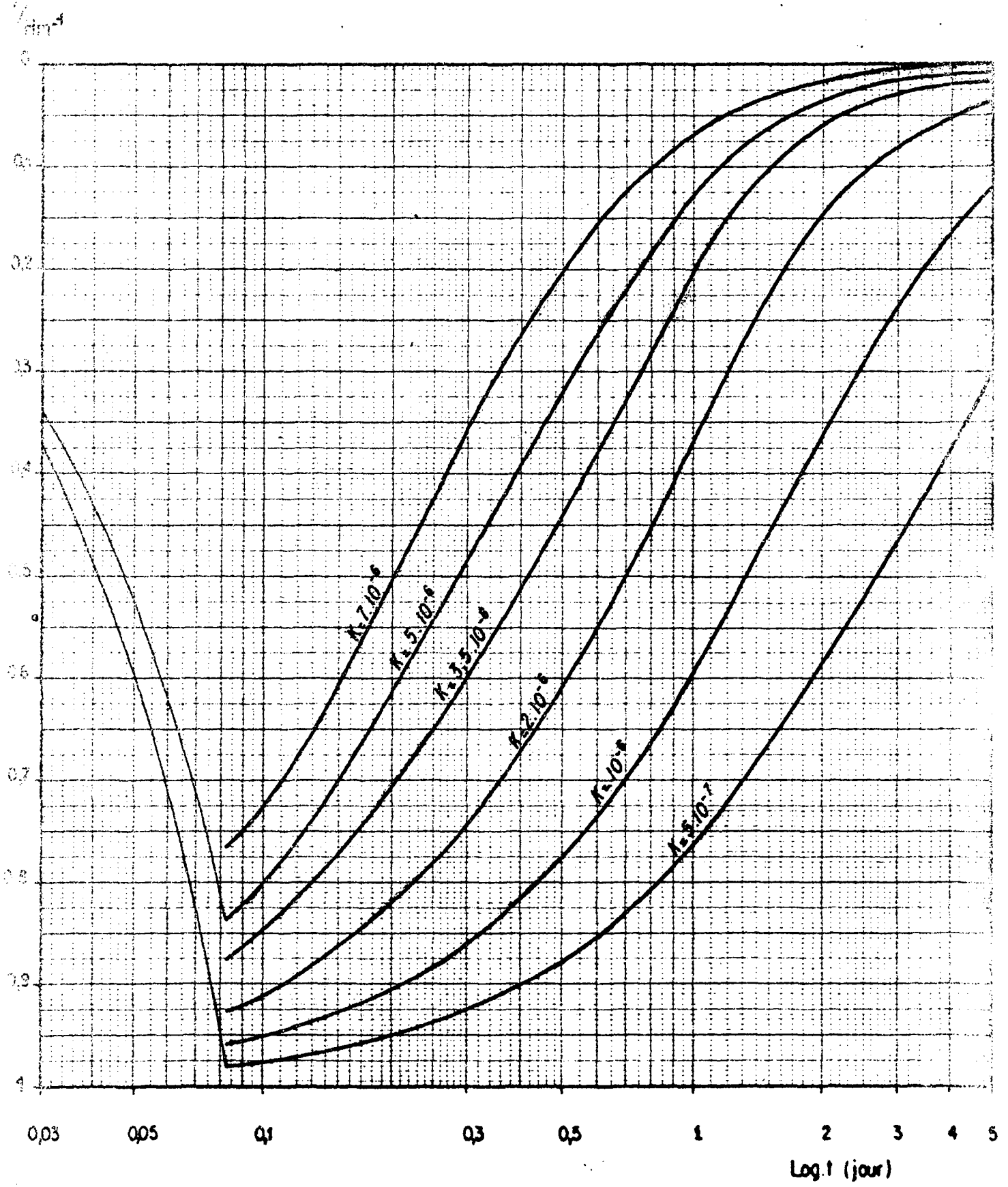
ABAQUES D'INTERPRÉTATION DES ESSAIS DE DÉBIT DE COURTE DURÉE

$r = 0,9 \text{ m}$ $Hm = 6 \text{ m}$



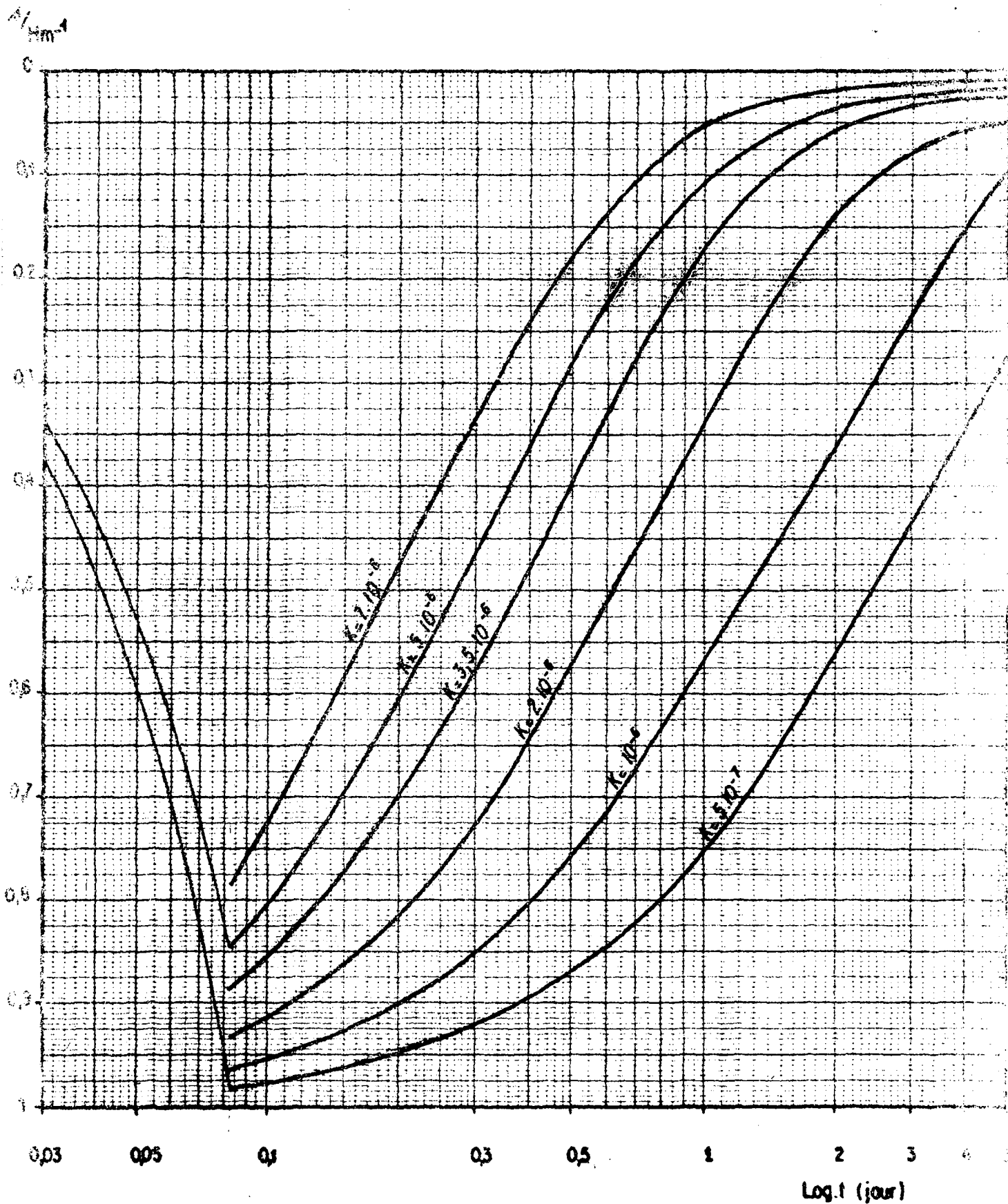
ABAQUES D'INTERPRÉTATION DES ESSAIS DE DÉBIT DE COURTE DURÉE

$r = 0,9 \text{ m}$ $H_m = 7 \text{ m}$



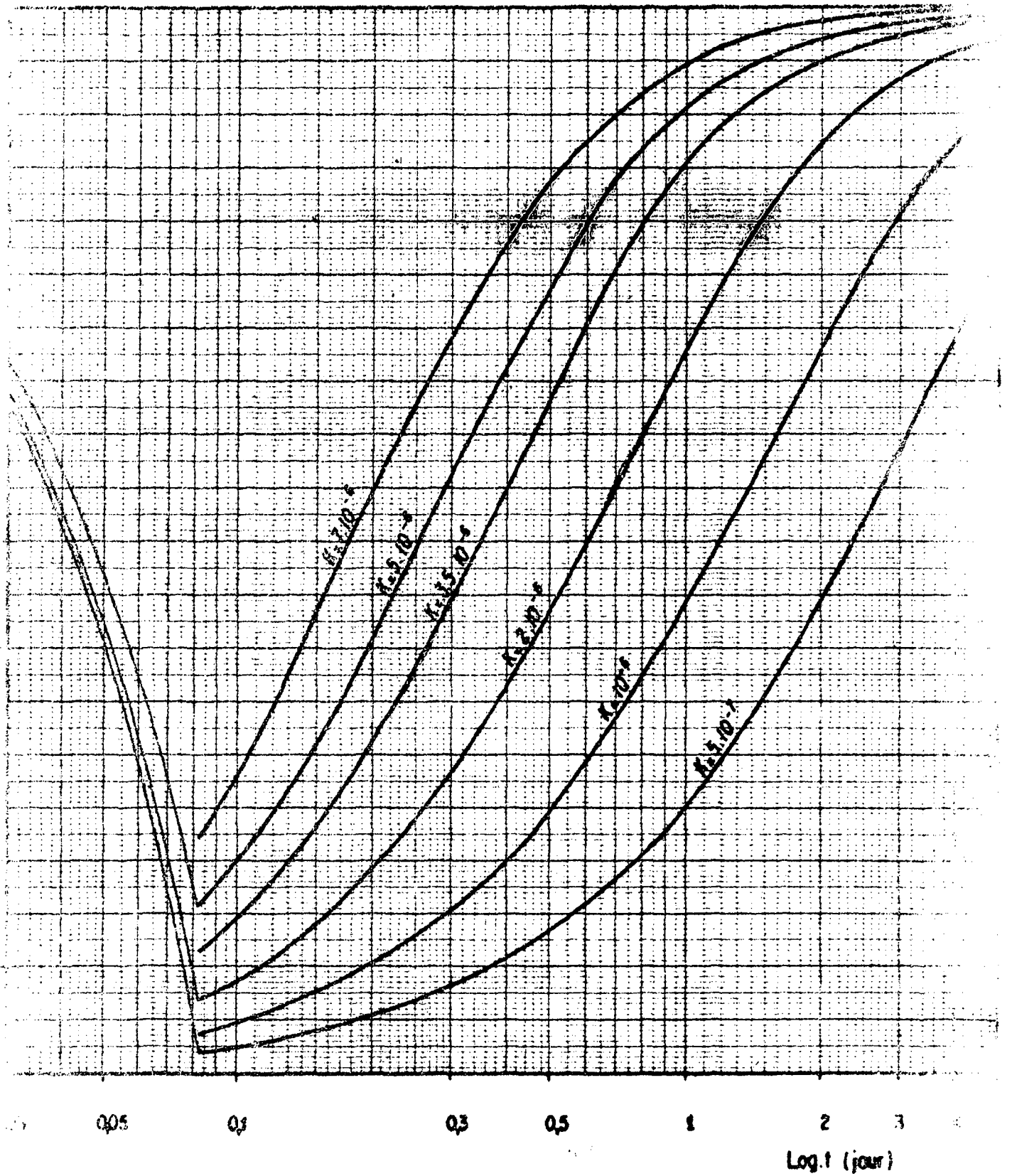
ABAQUES D'INTERPRÉTATION
DES ESSAIS DE DÉBIT DE COURTE DURÉE

$r = 0,9 \text{ m}$ $H_m = 8 \text{ m}$



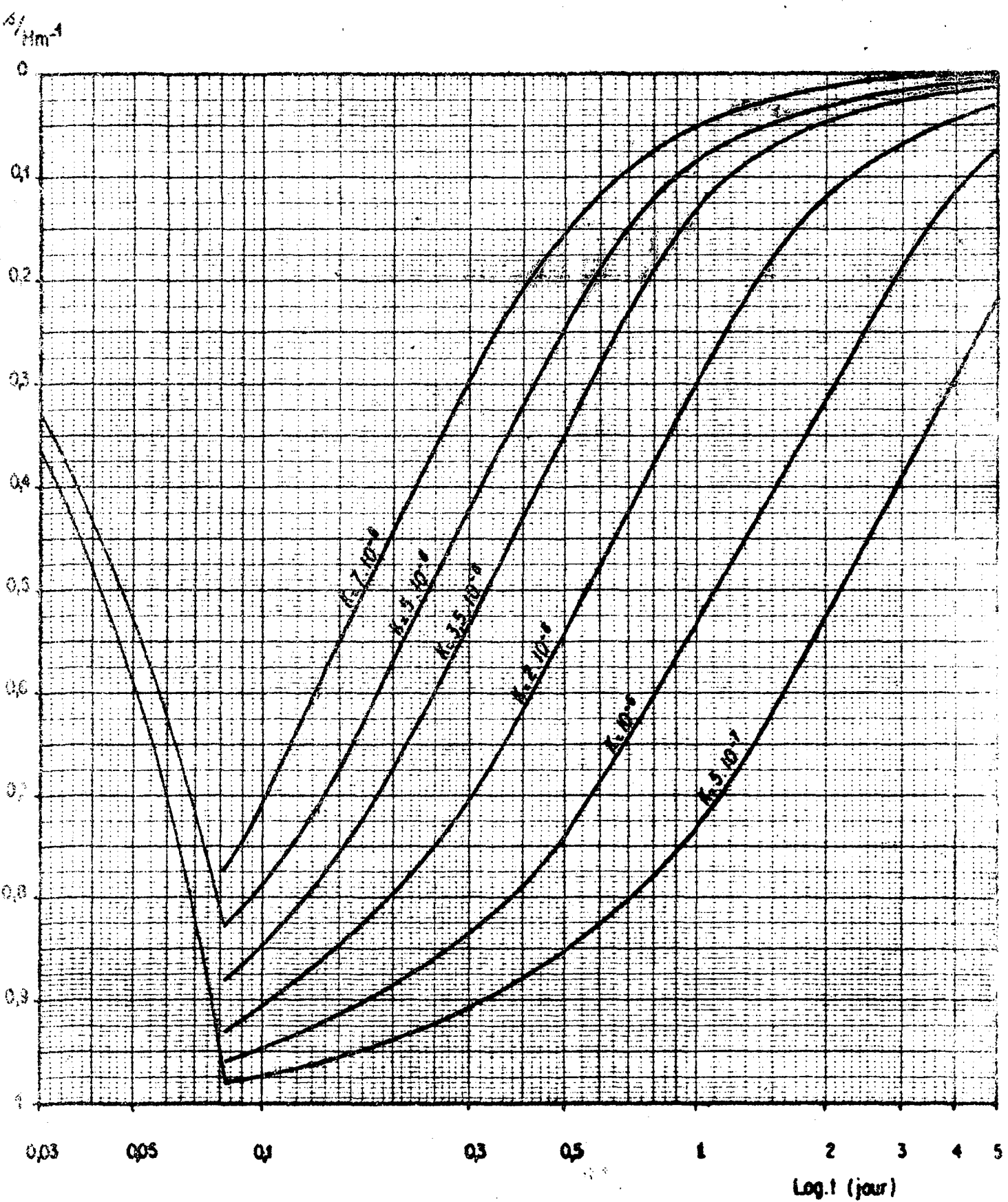
ABAQUES D'INTERPRÉTATION DES ESSAIS DE DÉBIT DE COURTE DURÉE

$r = 0,9 \text{ m}$ $H_m = 9 \text{ m}$



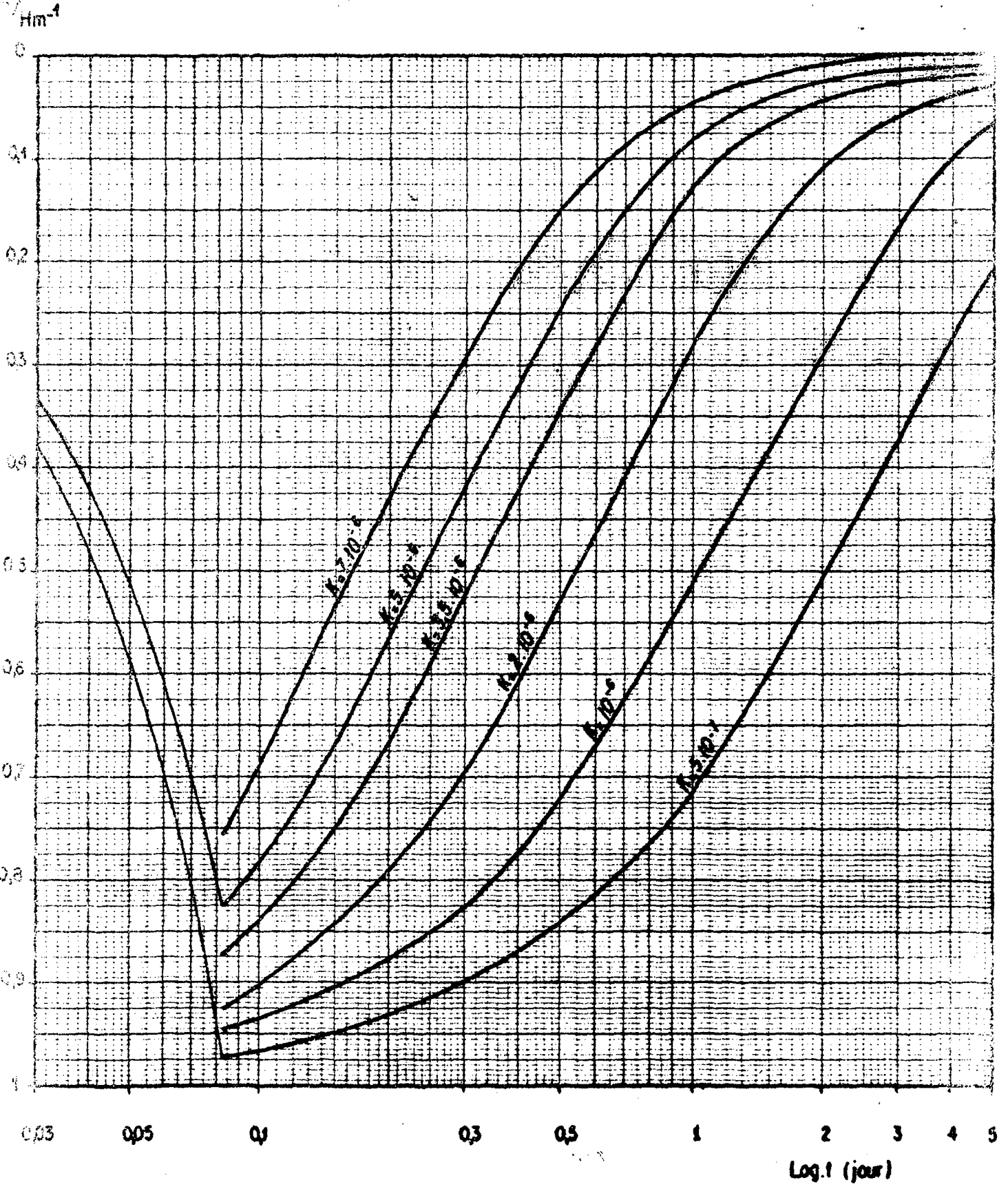
ABAQUES D'INTERPRÉTATION DES ESSAIS DE DÉBIT DE COURTE DURÉE

$r = 0,9 \text{ m}$ $H_m = 10 \text{ m}$



ABAQUES D'INTERPRÉTATION DES ESSAIS DE DÉBIT DE COURTE DURÉE

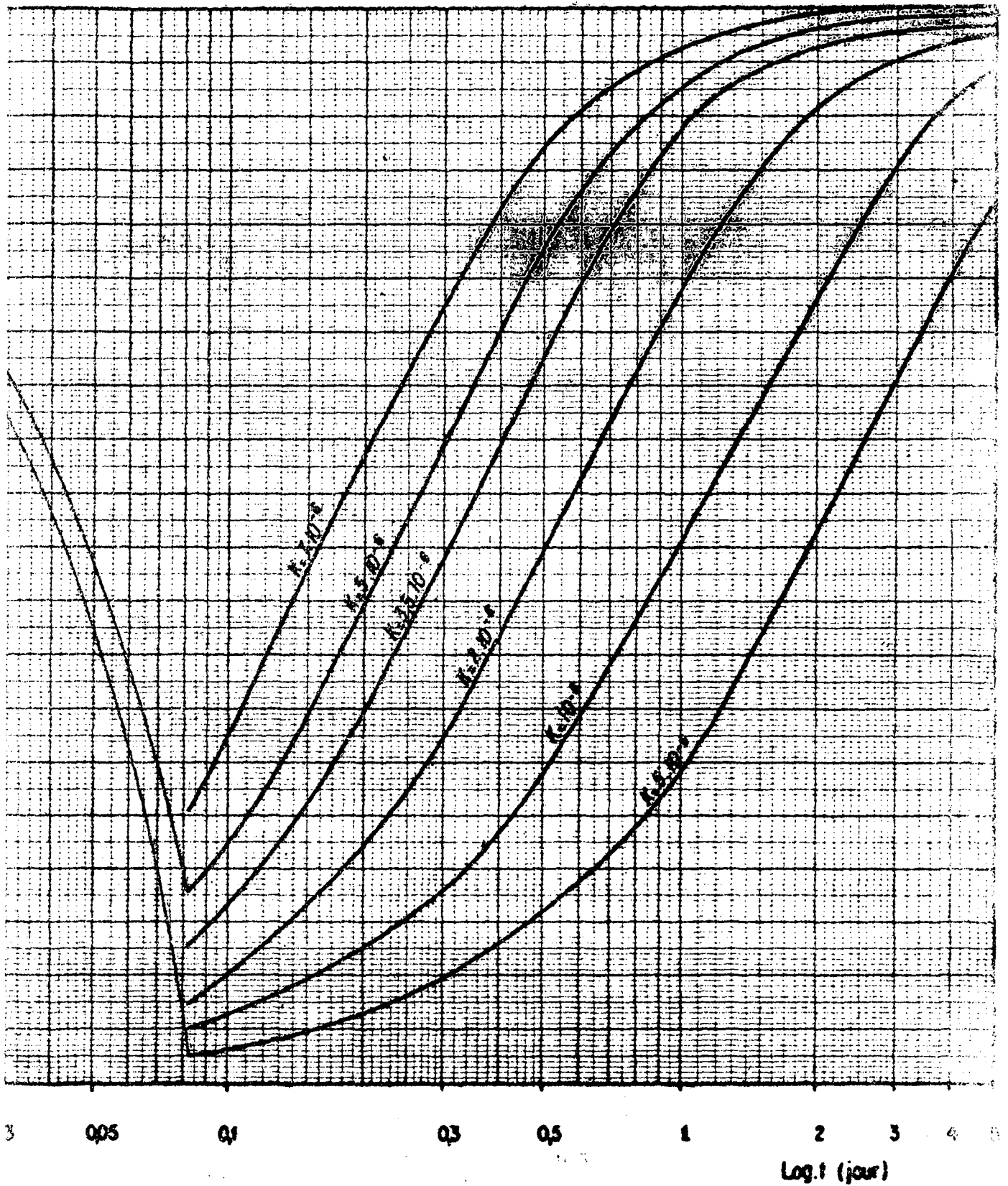
$r = 0,9 \text{ m}$ $H_m = 11 \text{ m}$



ABAQUES D'INTERPRÉTATION DES ESSAIS DE DÉBIT DE COURTE DURÉE

$r = 0,9 \text{ m}$

$H_m = 12 \text{ m}$



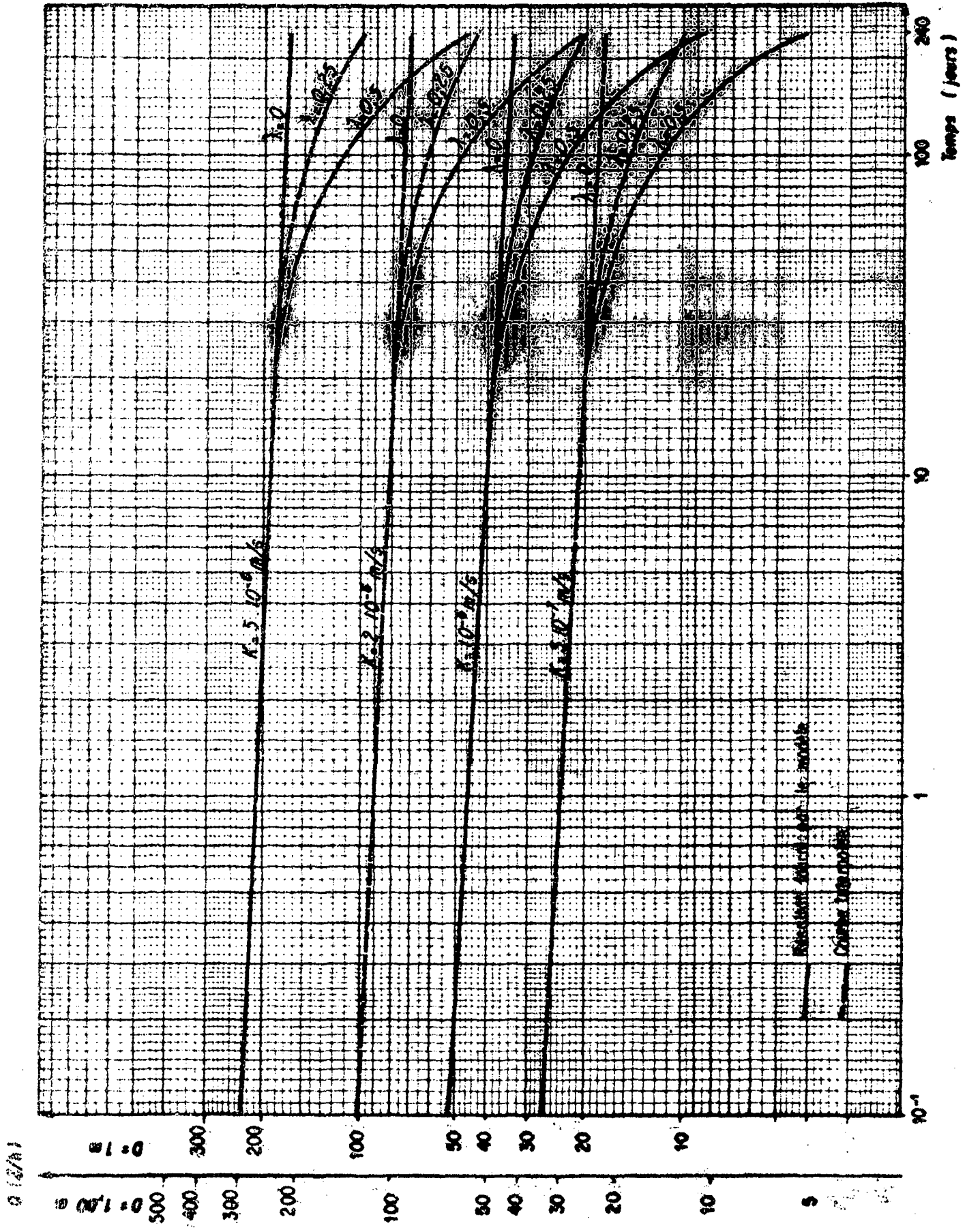
ANNEXE II

EVOLUTION DU DÉBIT D'UN PUIIS EN FONCTION DE LA
FLUCTUATION SAISONNIÈRE DE LA NAPPE

—
PUIIS EXPLOITÉ À RABATTEMENT CONSTANT EN MAINTENANT
UNE HAUTEUR D'EAU DE 1 MÈTRE AU FOND DU PUIIS
—

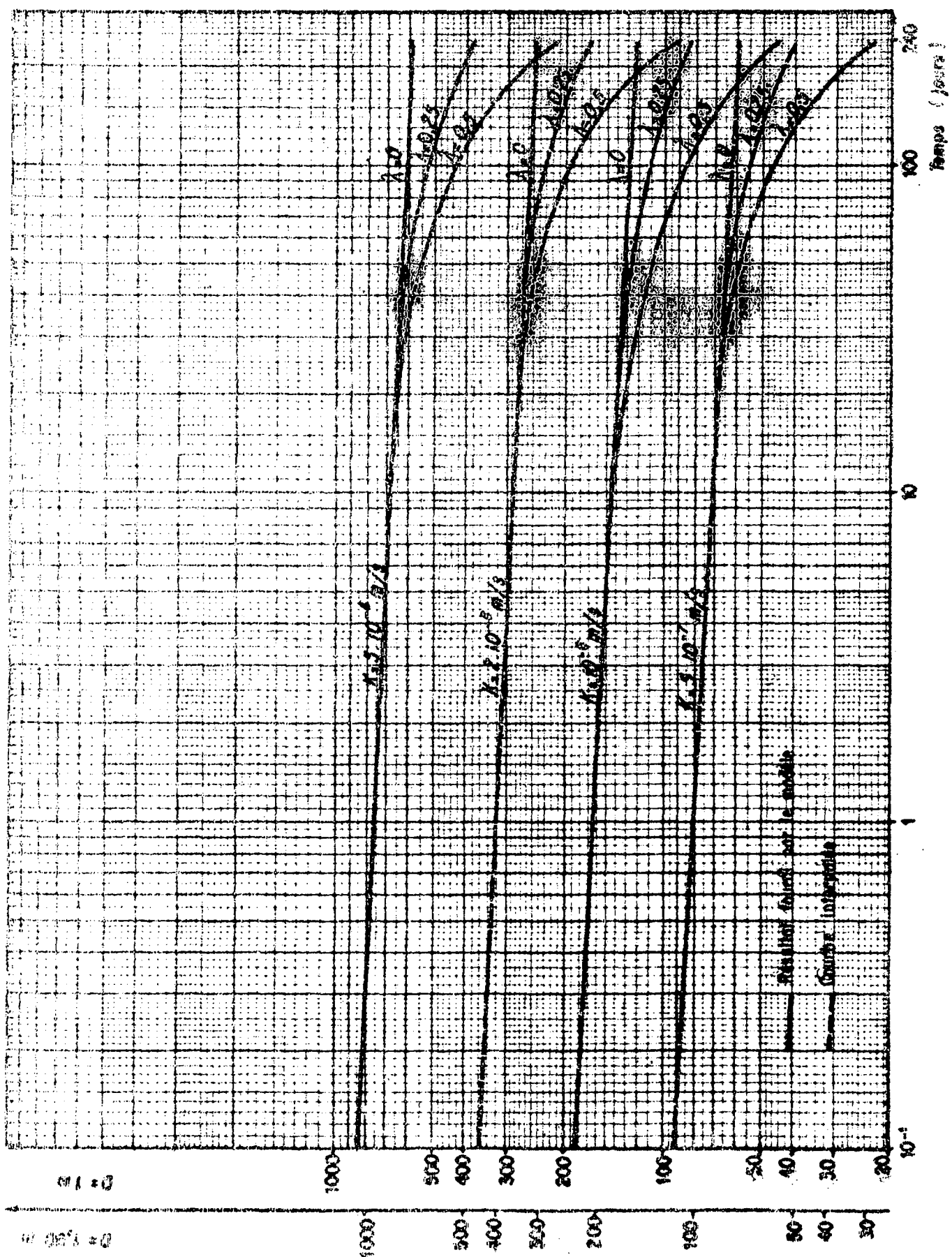
EVOLUTION DU DEBIT D'UN PUIT EN FONCTION DE LA FLUCTUATION SAISONNIERE DE LA NAPPE

Hm = 3



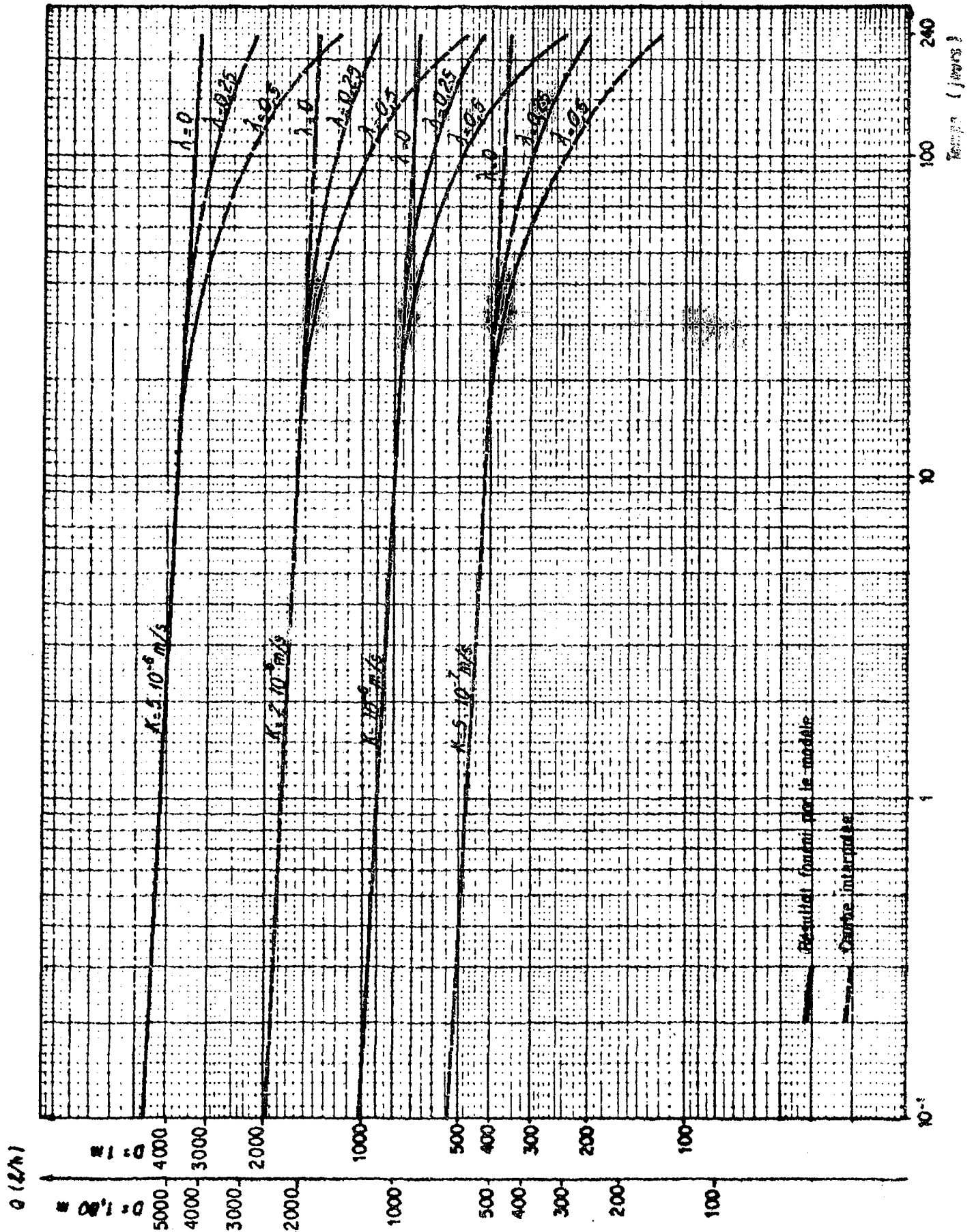
EVOLUTION DU DEBIT D'UN PUIS EN FONCTION DE LA FLUCTUATION SAISONNIERE DE LA NAPPE

Hm = 6



EVOLUTION DU DÉBIT D'UN PUIS EN FONCTION DE LA FLUCTUATION SAISONNIÈRE DE LA NAPPE

Hm = 9



ANNEXE III

LISTE CARACTÉRISTIQUE DES PUIXS ÉTUDIÉS
RÉSULTATS DE LA CAMPAGNE D'ESSAIS DE DÉBIT

N° d'essai	Nom du village	Paramètres intrinsèques			Position géomorphologique (2)	Hauteur captage	Diamètre captage	Débit exploité (l/h)	Fluctuation naturelle Ah (m)	Durée de l'intervalle de 1015
		Prof. totale s/margelle (m)	Ø du cuvelage (m)	Nature de l'aquifère (1)						
1	Linoghin (H.V.)	22,95	1,0	A.G.	B.F.S	3,0	1,0	170	0,10	6
2	Linoghin (H.V.)	21,00	0,9	Y	B.F.S	6,0	0,9	>500 ?	0,50	6
3	Kaibo (H.V.)	21,60	0,9	Y	M.P.	1,60	0,9	130	1,28	5,5
4	Kaibo (H.V.)	22,70	0,9	A.G.	B.F.S	3,0	0,9	130	1,22	5,5
5	Kaibo (H.V.)	18,35	1,0	A.A.Y	M.P.	5,30	1,0	0	1,89	5,5
6	Kaibo (H.V.)	8,25	0,9	A.A.Y	B.F.H	2,20	0,9	0	1,25	5,5
7	Kaibo (H.V.)	11,35	0,9	A.A.S	B.F.H	3,40	0,9	80	~0,45?	5,5
8	Bittou (H.V.)	16,90	1,0	Y	M.P.	4,0	1,0	250	0,65	5,5
9	Bittou (H.V.)	10,75	1,0	A.G.	B.F.S	4,0	1,0	130	1,31	5,5
10	Bittou (H.V.)	8,75	1,0	A.G.	B.F.S	2,0	1,0	20	1,00	5,3
11	Bombara (H.V.)	19,30	1,80	L+AG	B.F.H	4,30	1,0	200	~0,50	4,75
12	Navielgane (H.V.)	21,65	1,8	A.G.	M.P.	6,0	1,0	c	-	-
13	Lokodia (H.V.)	22,76	1,0	A.A.Y	M.P.	-	sans captage	100	2,00	4,75
14	Nisseo (H.V.)	16,40	1,8	A.A.Y	M.P.	6,30	1,10	150	1,00	4,70
15	Milpo (H.V.)	21,20	1,8	A.A.Y	M.P.	5,80	1,0	100	2,00	4,70
16	Waraniene (C.I.)	21,35	1,8	A.A.Y	P	2,0	1,60	100	~3,00	4,50
17	Waraniene (C.I.)	14,20	1,8	L+AG	B.F.S	?	1,8	100	0,90	4,5
18	Dokaha (C.I.)	18,30	1,8	A.G.	P	?	1,8	0	1,77	4,3
19	Morovine (C.I.)	11,40	1,8	L+AG	M.P.	6,0	1,8	c	0,12	4
20	Karakoro (C.I.)	14,35	1,8	A.G.	M.P.	4,50	1,8	200	~0,80?	4
21	Diabo (C.I.)	16,00	1,8	L+AAy	P	4,20	1,6	200	1,10	4
22	Saya (C.I.)	15,60	1,8	L+AAy	P	3,40	1,6	200	~0,80	4
23	Fitabro (C.I.)	14,50	1,0	A.A.S	P	5,0	1,0	20	0,50	3,75
24	Fitabro (C.I.)	16,25	1,1	A.A.S	P	6,20	0,9	0	0,53	3,75
25	Fitabro (C.I.)	12,15	1,1	A.G.	B.F.H	6,50	1,1	c	0,20	3,75
26	Koffi Agokro (C.I.)	13,35	1,8	L+AAy	M.P.	?	1,8	200	remontée	3,5
27	Koffi Agokro (C.I.)	9,20	1,1	L	M.P.	?	1,1	0	0,40	3,5
28	Koffi Agokro (C.I.)	8,30	1,1	A.A.Y	B.F.H	?	1,1	140	~0,30	3,5
29	Diaman Sakassou(CI)	20,70	1,0	A.A.S	P	?	1,1	400	0,90	3,25
30	Diaman Sakassou(CI)	22,90	1,1	S+QZ	P	?	1,1	0	0,67	3,25
31	Diaman Sakassou(C.I.)	20,45	1,1	A.A.S	P	6,10	0,9	0	0,87	3,25
32	Sakassou (C.I.)	7,80	0,8	AAy+AS	P	Pézomètre (ORSTOM)		0,55	0	0
33	Sakassou (C.I.)	3,55	0,9	A.A.Y	M.P.	Pézomètre (ORSTOM)		0,04	0	0

(1) voir nomenclature page 24

(2) voir nomenclature page 23

n° d'essai	Nom du village	1ère phase d'essais							
		Date	Niveau statique s/margelle (m)	Hauteur mouillée (m)	Rabattement (m)	Débit (1ère h. de remontée) (l/h)	Débit spécifique (l/h/m)	Hauteur d'eau résiduelle (m)	Perméabilité m/s
1	Linoghin (H.V.)	20/11/74	19,81	3,14	1,29	200	150	1,85	-
2	Linoghin (H.V.)	22/11/74	16,65	4,35	0,46	(1.500)	-	3,89	-
3	Kaibo (H.V.)	26/11/74	16,22	5,40	1,48	475	320	3,92	~ 8.10 ⁻⁶
4	Kaibo (H.V.)	27/11/74	14,84	7,87	3,40	830	245	4,47	7.10 ⁻⁶
5	Kaibo (H.V.)	28/11/74	9,42	8,92	6,92	570	80	2	1.7.10 ⁻⁶
6	Kaibo (H.V.)	29/11/74	4,47	3,76	3,16	70	20	0,60	-
7	Kaibo (H.V.)	1/12/74	< 6,80	>4,18	2,66	145	(55)	1,52	-
8	Bittou (H.V.)	5/12/74	12,98	3,87	0,17	(5.000)	-	3,70	-
9	Bittou (H.V.)	7/12/74	6,49	4,25	2,17	250	115	2,08	-
10	Bittou (H.V.)	8/12/74	6,09	2,64	0,88	415	470	1,76	~1.5.10 ⁻⁵
11	Bombara (H.V.)	12/12/74	< 3,40	>15,90	8,51	1.270	150	7,39	-
12	Navielgane (H.V.)	13/12/74	3,37	18,28	8,55	1.140	135	13,10	-
13	Lokodia (H.V.)	15/12/74	~11,0	>4,46	3,67	100	30	0,79	~ 10 ⁻⁷ *
14	Nisseo (H.V.)	15/12/74	~10	>3,98	3,22	440	(140)	0,76	-
15	Milpo (H.V.)	17/12/74	< 7,80	>13,41	8,14	680	85	5,27	-
16	Waraniene (C.I.)	20/12/74	13,86	7,49	6,45	400	60	1,04	*
17	Waraniene (C.I.)	21/12/74	7,20	7	4,86	2.080	430	2,14	5.5.10 ⁻⁶
18	Dokaha (C.I.)	22/12/74	11,60	7,22	4,87	1.800	365	2,35	7.10 ⁻⁶
19	Morovine (C.I.)	29/12/74	6,52	4,86	3,28	1.220	395	1,58	8.10 ⁻⁶
20	Karakoro (C.I.)	30/12/74	~6,70	7,67	6,19	1.500	250	1,48	-
21	Diabo (C.I.)	1/1/75	11,80	4,20	1,66	1.000	605	2,54	~ 10 ⁻⁵
22	Saya (C.I.)	2/1/75	11,20	4,45	3,29	1.025	310	1,16	-
23	Fitabro (C.I.)	4/1/75	10,75	3,75	2,41	160	65	1,34	3.10 ⁻⁶
24	Fitabro (C.I.)	5/1/75	10,25	6	5,71	320	55	0,29	1.5.10 ⁻⁶
25	Fitabro (C.I.)	6/1/75	3,75	8,40	7,55	1.040	140	0,85	~ 1.8.10 ⁻⁶
26	Koffi Agokro (C.I.)	8/1/75	< 6,60	>6,73	6,23	500	80	0,50	~ 2.8.10 ⁻⁶
27	Koffi Agokro (C.I.)	9/1/75	4,90	4,26	3,31	330	100	0,95	-
28	Koffi Agokro (C.I.)	11/1/75	< 4,00	>3,88	3,24	140	45	0,64	-
29	Diaman Sakassou (C.I.)	13/1/75	13,00	7,60	5,38	665	125	2,22	3.10 ⁻⁶
30	Diaman Sakassou (C.I.)	14/1/75	12,00	10,87	6,22	1.430	230	4,65	5.10 ⁻⁶
31	Diaman Sakassou (C.I.)	15/1/75	10,18	10,27	7,32	940	130	2,95	2.10 ⁻⁶
32	Sakassou (C.I.)	17/1/75	3,70	4,27	3,08	175	60	1,19	2.5.10 ⁻⁶
33	Sakassou (C.I.)	17/1/75	3,36	1,37	0,97	5	5	0,4	10 ⁻⁷

* obtenue à l'aide de la 2ème phase d'essais

n° d'essai	Nom du village	2ème phase d'essais						
		Date	Niveau statique s/margelle (m)	Hauteur mouillée (m)	Rabatement (m)	Débit (1ère h. de remontée) (1/h)	Débit spécifique (1/h/m)	Hauteur d'eau résiduelle (m)
1	Linoghin (H.V.)	20/5/75	19,91	2,50	1,85	340	190	1,05
2	Linoghin (H.V.)	20/5/75	17,15	3,85	-	-	-	-
3	Kaibo (H.V.)	12/5/75	17,50	4,15	-	-	-	-
4	Kaibo (H.V.)	13/5/75	16,06	6,66	3,80	920	240	2,86
5	Kaibo (H.V.)	14/5/75	11,31	7,10	5,59	470	85	1,41
6	Kaibo (H.V.)	15/5/75	5,72	3,61	2,97	65	20	0,65
7	Kaibo (H.V.)	14/5/75	<7,80	3,75	2,60	75	(33?)	1,18
8	Bittou (H.V.)	18/5/75	13,62	3,22	-	-	-	-
9	Bittou (H.V.)	18/5/75	7,80	2,95	2,45	200	80	0,50
10	Bittou (H.V.)	18/5/75	7,09	1,71	1,05	470	450	0,66
11	Bombara (H.V.)	9/5/75	<4,80	>14,51	6,63	1015	155	7,88
12	Navielgane (H.V.)	-	-	-	-	-	-	-
13	Lokodia (H.V.)	8/5/75	13,0	6,92	6,0	160	25	0,92
14	Nisseo (H.V.)	7/5/75	?	>3,5	3,4	180	(50?)	0,10
15	Milpo (H.V.)	6/5/75	<10,45	>10,75	5,08	430	85	5,67
16	Waraniene (C.I.)	3/5/75	~16,80	4,07	3,07	200	65	1,0
17	Waraniene (C.I.)	3/5/75	8,10	>5,86	4,34	1500	345	1,52
18	Dokaha (C.I.)	2/5/75	13,37	5,45	4,55	870	190	0,90
19	Morovine (C.I.)	1/5/75	6,64	-	-	-	-	-
20	Karakoro (C.I.)	30/4/75	< 8,35	>6,43	5,71	1420	250	0,72
21	Diabo (C.I.)	28/4/75	12,80	3,10	2,00	800	400	0,88
22	Saya (C.I.)	28/4/75	~12	>3,10	2,60	640	320	0,92
23	Fitabro (C.I.)	25/4/75	~10,25	3,10	2,50	130	50	0,60
24	Fitabro (C.I.)	25/4/75	10,78	5,47	-	-	-	-
25	Fitabro (C.I.)	23/4/75	3,95	8,20	-	-	-	-
26	Koffi Agokro (C.I.)	23/4/75	5,20	8,18	6,52	810	125	1,66
27	Koffi Agokro (C.I.)	22/4/75	5,30	3,86	-	-	-	-
28	Koffi Agokro (C.I.)	22/4/75	4,30	3,58	-	-	-	-
29	Diaman Sakassou (C.I.)	20/4/75	~13,90	6,70	4,08	455	(80?)	2,62
30	Diaman Sakassou (C.I.)	20/4/75	12,67	10,25	5,74	1250	220	4,51
31	Diaman Sakassou (C.I.)	20/4/75	11,05	9,37	-	-	-	-
32	Sakassou (C.I.)	16/4/75	4,25	3,72	-	-	-	-
33	Sakassou (C.I.)	16/4/75	3,40	1,33	-	-	-	-

RÉSULTATS DE LA CAMPAGNE D'ESSAIS DE DÉBIT

$K=7.10^{-6}$

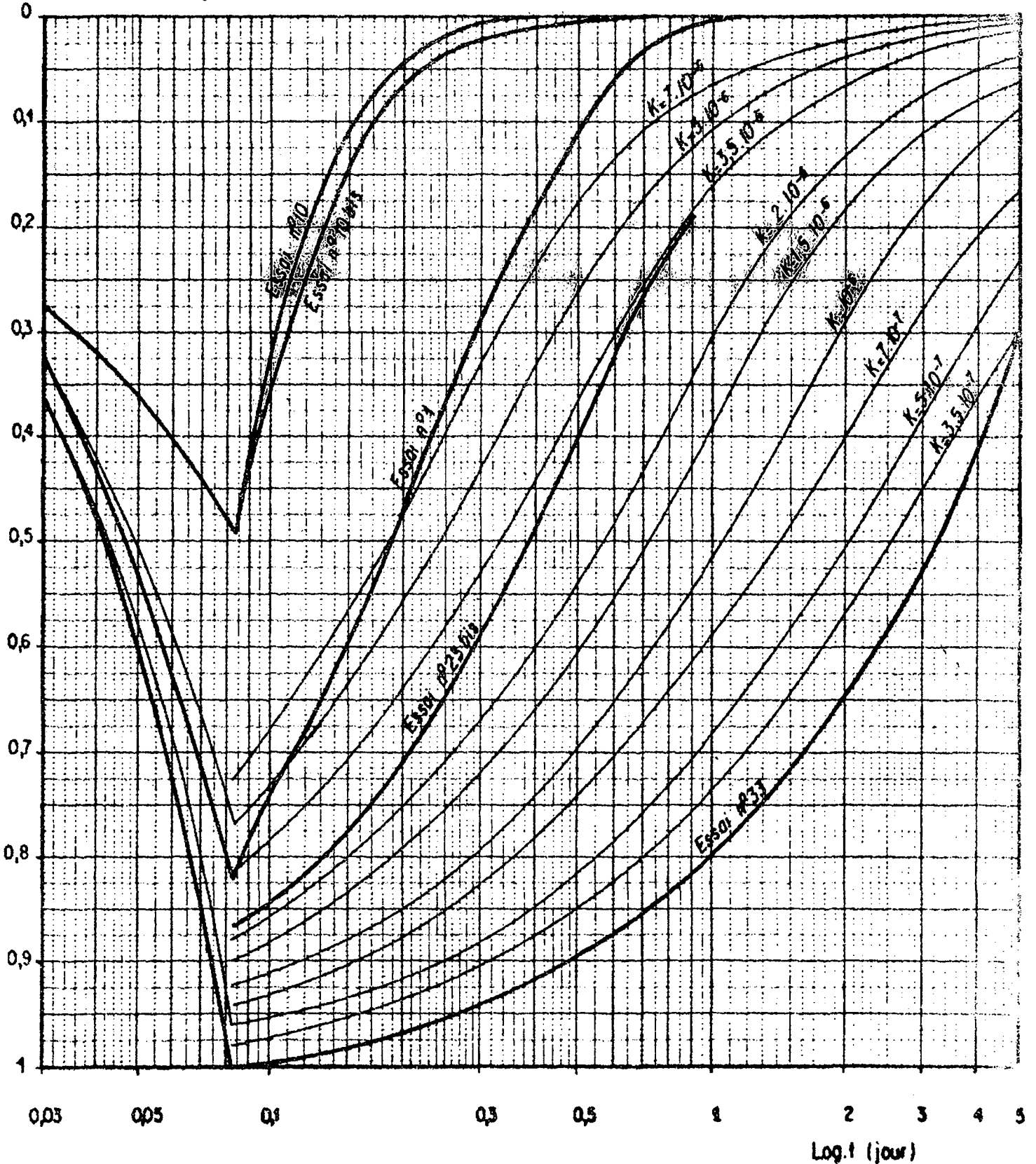
Essai n°10

Abaque $r = 0,5$ m et $H_m = 2$ m

Courbe d'essai et n° de référence du puits

$H_m = 1,30$ et $3,00$ m

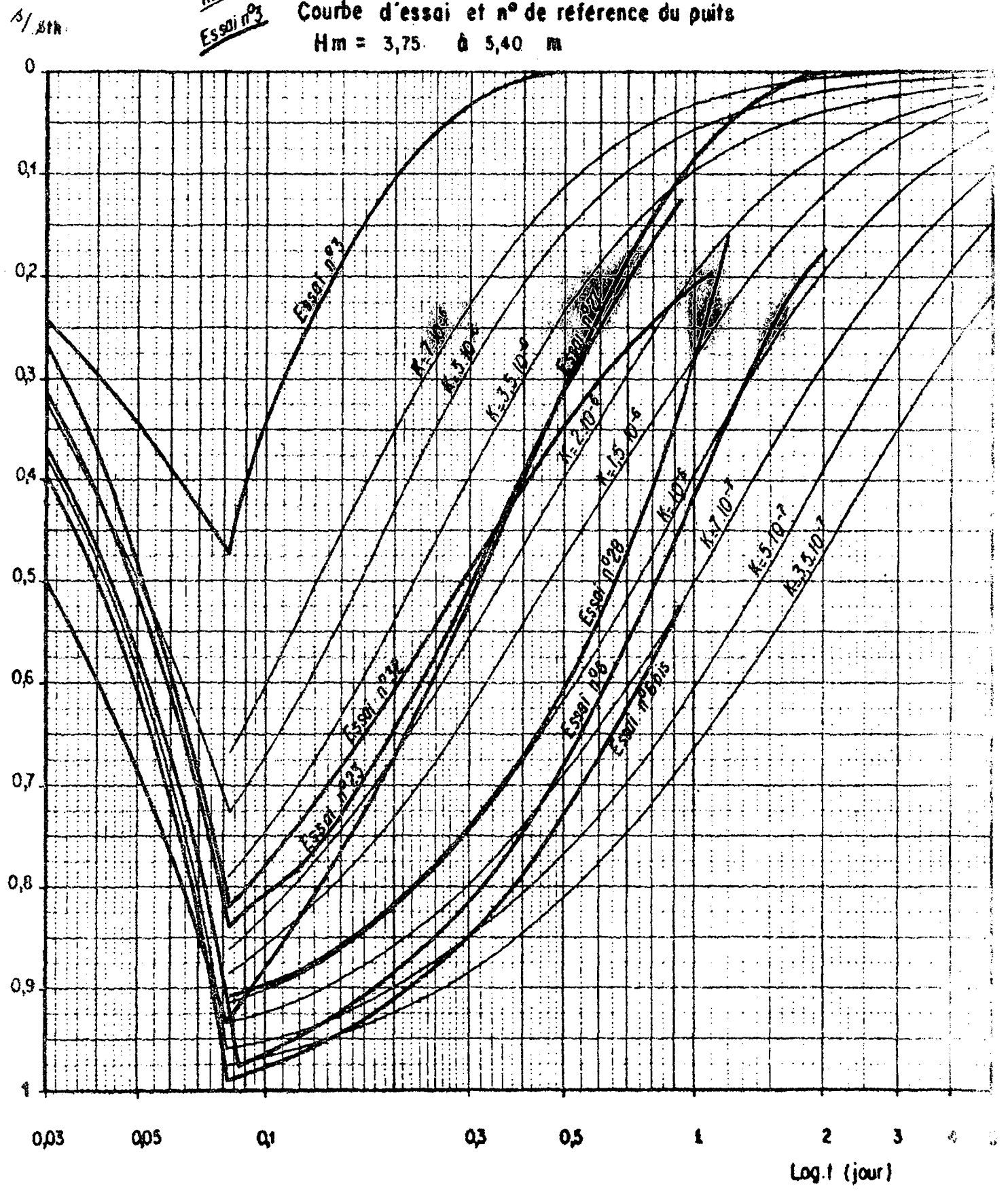
s/h



RÉSULTATS DE LA CAMPAGNE D'ESSAIS DE DÉBIT

$K=7.10^{-6}$
Essai n°3

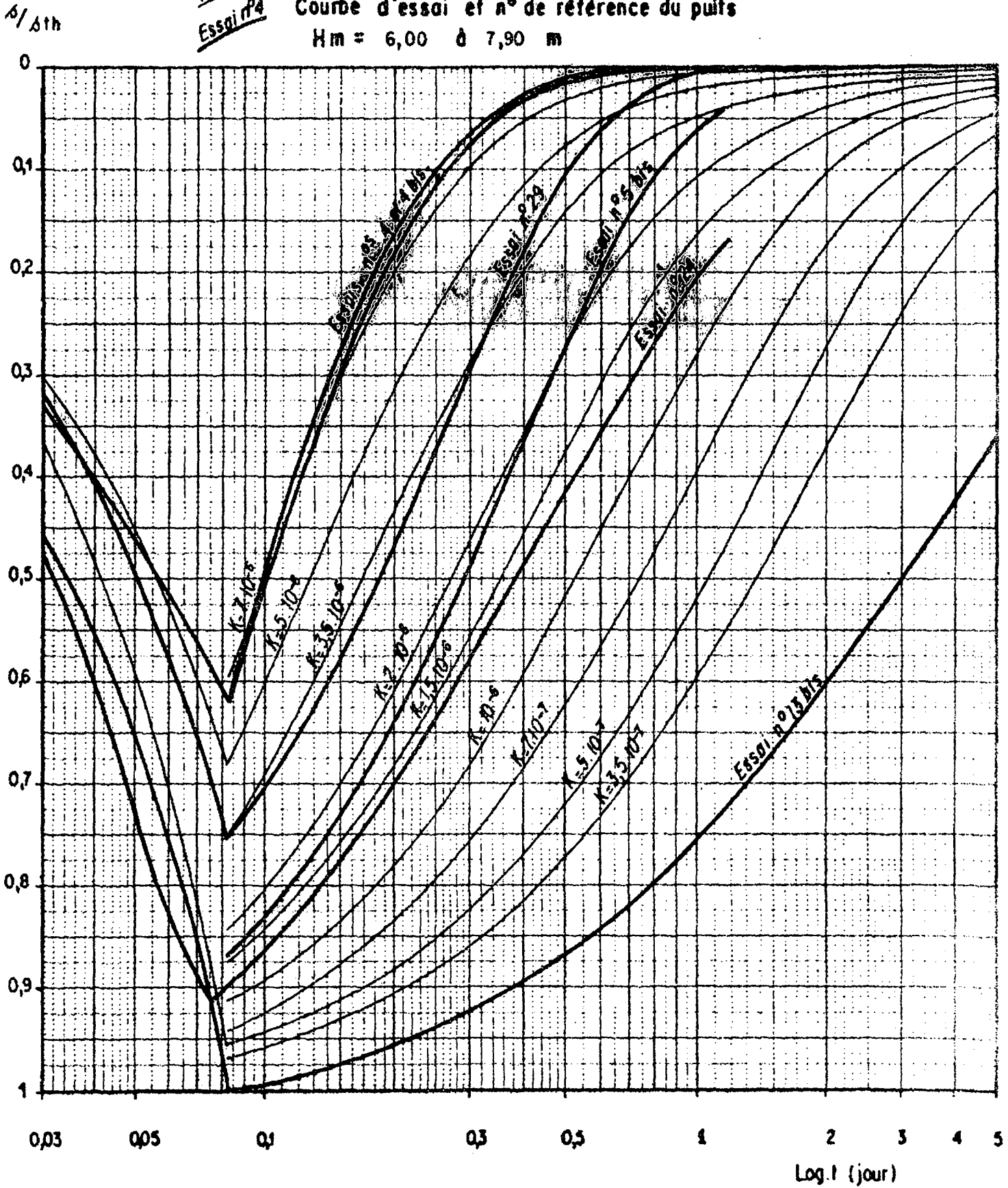
Abaque $r = 0,5$ m et $H_m = 4$ m
Courbe d'essai et n° de référence du puits
 $H_m = 3,75$ à $5,40$ m



RÉSULTATS DE LA CAMPAGNE D'ESSAIS DE DÉBIT

$K=7.10^{-6}$
Essai n°4

Abaque $r = 0,5 \text{ m}$ et $H_m = 7 \text{ m}$
Courbe d'essai et n° de référence du puits
 $H_m = 6,00 \text{ à } 7,90 \text{ m}$

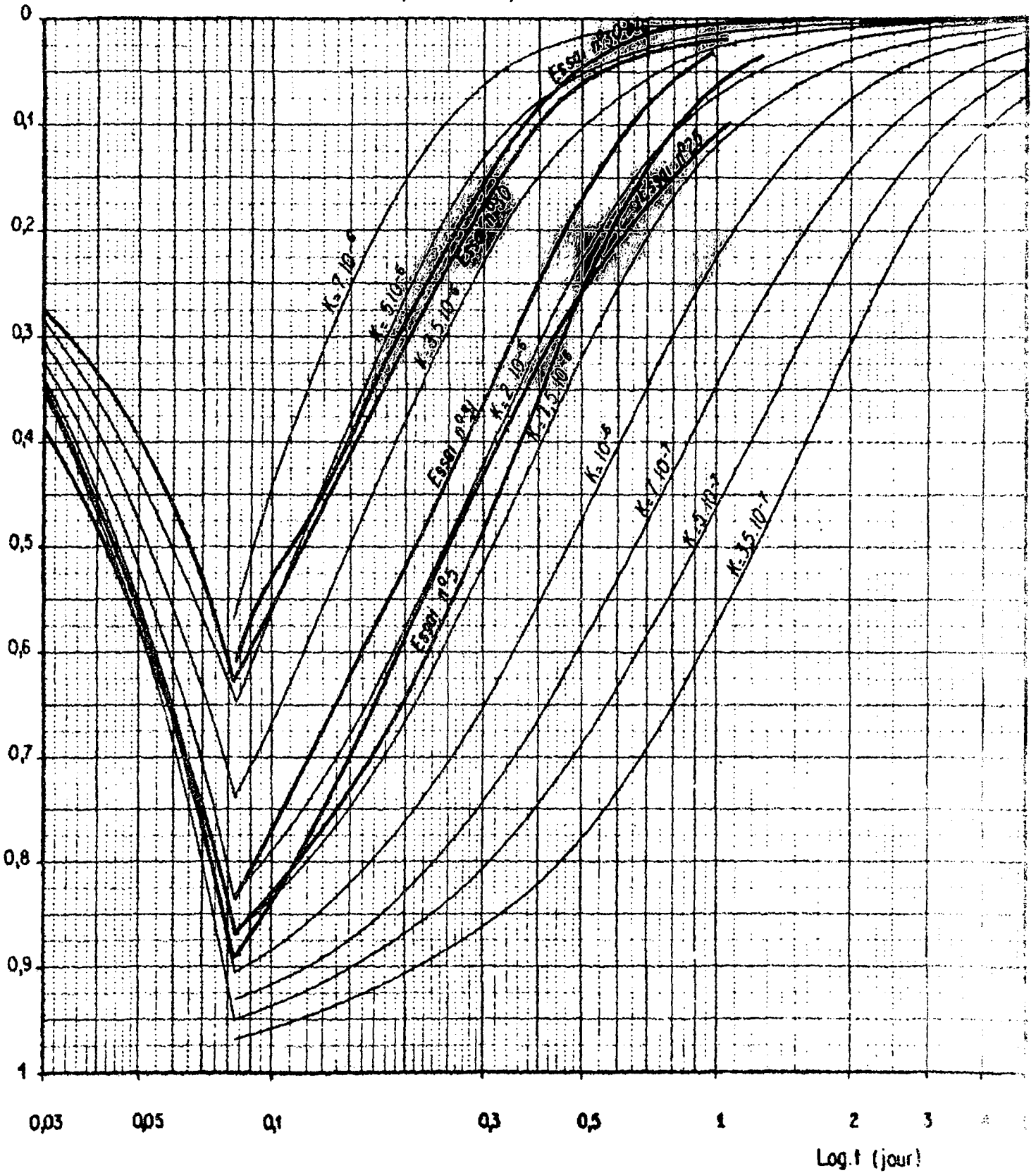


RÉSULTATS DE LA CAMPAGNE D'ESSAIS DE DÉBIT

$K = 7 \cdot 10^{-6}$
Essai n°5

Abaque $r = 0,5$ m et $H_m = 9$ m
Courbe d'essai et n° de référence du puits
 $H_m = 8,40$ à $10,87$ m

$s / \Delta h$

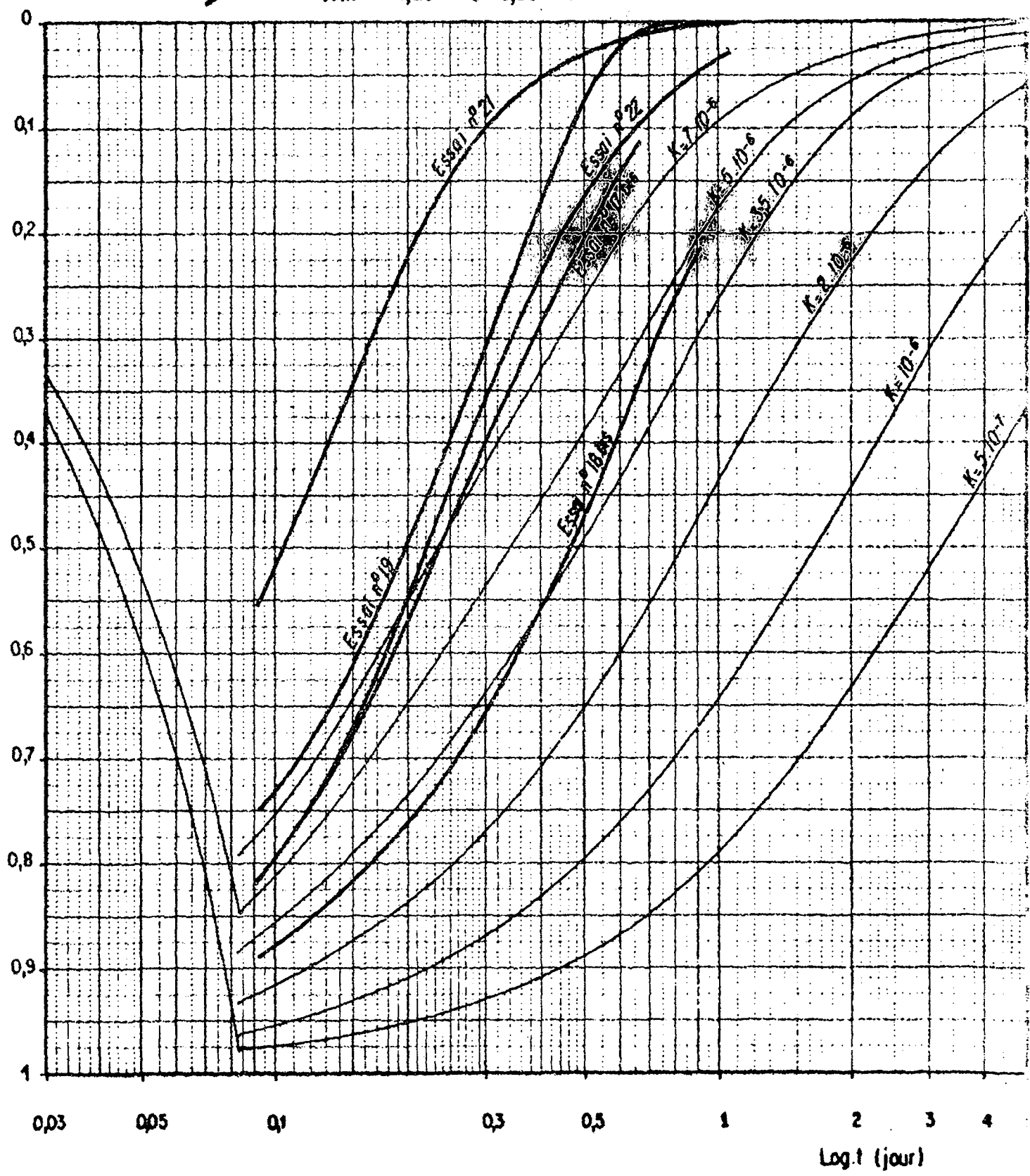


RÉSULTATS DE LA CAMPAGNE D'ESSAIS DE DÉBIT

$K = 7 \cdot 10^{-6}$
Essai n° 21

Abaque $r = 0,9$ m et $H_m = 5$ m
Courbe d'essai et n° de référence du puits
 $H_m = 4,20$ & $5,86$ m

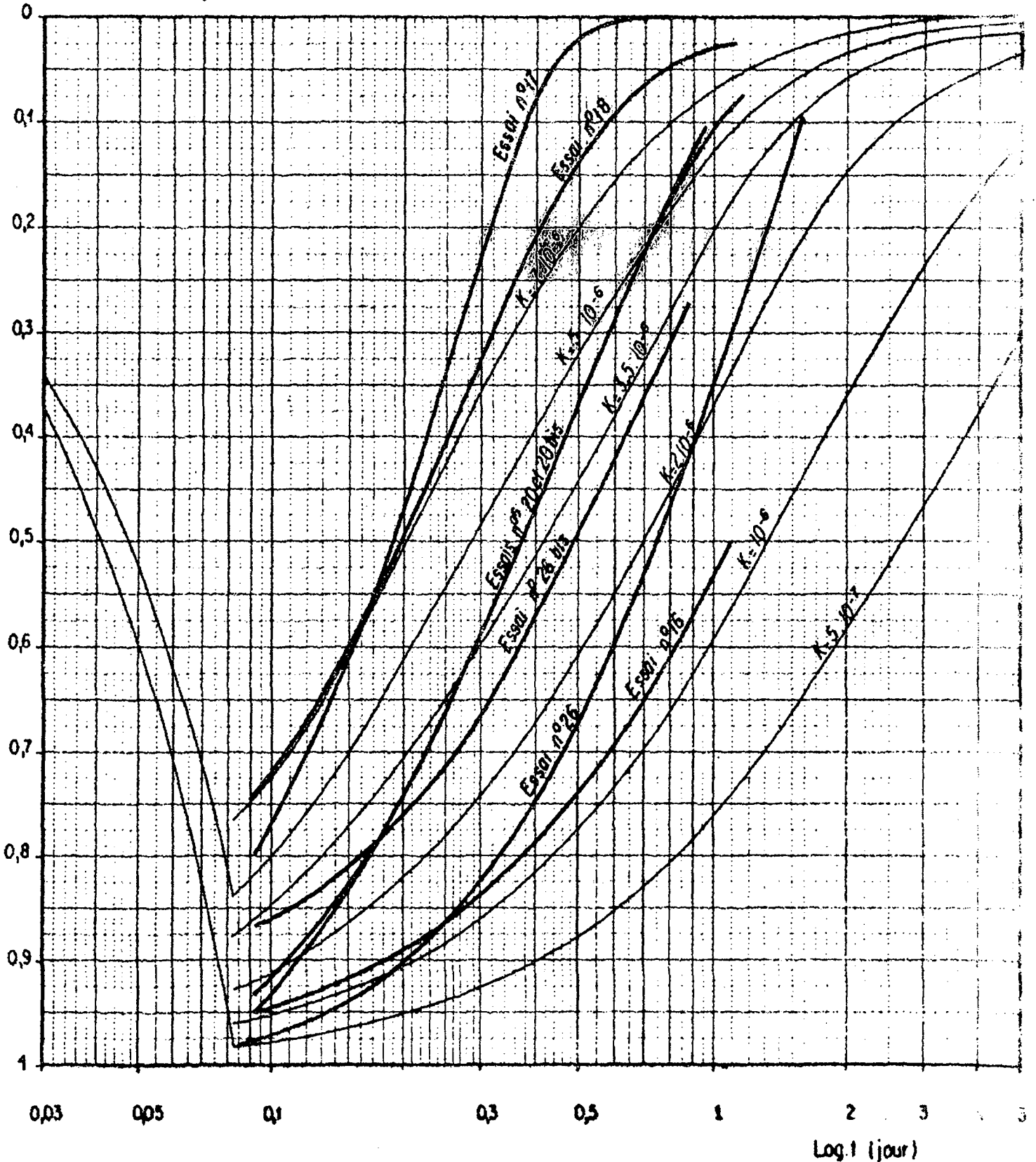
s/At_h



RÉSULTATS DE LA CAMPAGNE D'ESSAIS DE DÉBIT

$K = 7 \cdot 10^{-6}$
Essai n°17

Abaque $r = 0,9$ m et $H_m = 7$ m
Courbe d'essai et n° de référence du puits
 $H_m = 6,40$ à $8,20$ m



ANNEXE IV

LA MÉTHODE DE PORCHET

d'après R. BREMOND (GAUTHIER-VILLARS-1965)
(document n° 6)

Cette méthode repose sur l'interprétation des courbes de rabattement et de remontée de niveau d'une nappe, à la suite d'un essai de pompage, effectué sur un puits, à débit constant.

1° Théorie

Soit un ouvrage, un puits par exemple, ayant une section « S », dans lequel on effectue un pompage au débit « Q » constant, supérieur à celui de la nappe « q ». On obtient la courbe de rabattement « OR ». Après l'arrêt du pompage, on a la courbe de remontée « RT ».

Observons un temps « dt₁ »; on constate une baisse de niveau « ds » et on peut écrire :

$$S ds = (Q - q) dt_1, \quad (1)$$

équation différentielle de l'élément curviligne OR.

Après l'arrêt du pompage, le niveau mettra pour remonter de la même hauteur « ds » un temps « dt₂ ». Et on a :

$$S ds = q dt_2, \quad (2)$$

équation différentielle de l'élément curviligne RT.

En égalant les deux équations (1) et (2), on a la relation :

$$(Q - q) dt_1 = q dt_2$$

ou encore :

$$q = Q \frac{dt_1}{dt_1 + dt_2} \quad (3)$$

Divisons le tout par « ds » :

(3) devient :

$$q = Q \frac{dt_1/ds}{dt_1/ds + dt_2/ds}$$

or, $\frac{dt_1}{ds}$ et $\frac{dt_2}{ds}$ représentent la pente des tangentes en B et C, lesquelles se coupent en A. Et nous avons :

$$\frac{dt_1}{ds} = \frac{HB}{HA} \quad \text{et} \quad \frac{dt_2}{ds} = \frac{HC}{HA}$$

d'où (3) devient :

$$q = Q \times \frac{BH}{BC}$$

Ainsi, connaissant le débit de la pompe, on peut pour chaque niveau calculer le débit utilisable et déterminer le régime de pompage optimum.

En particulier, en R, point d'arrêt du pompage, on a :

$$q = Q \frac{B'H'}{B'C'}$$

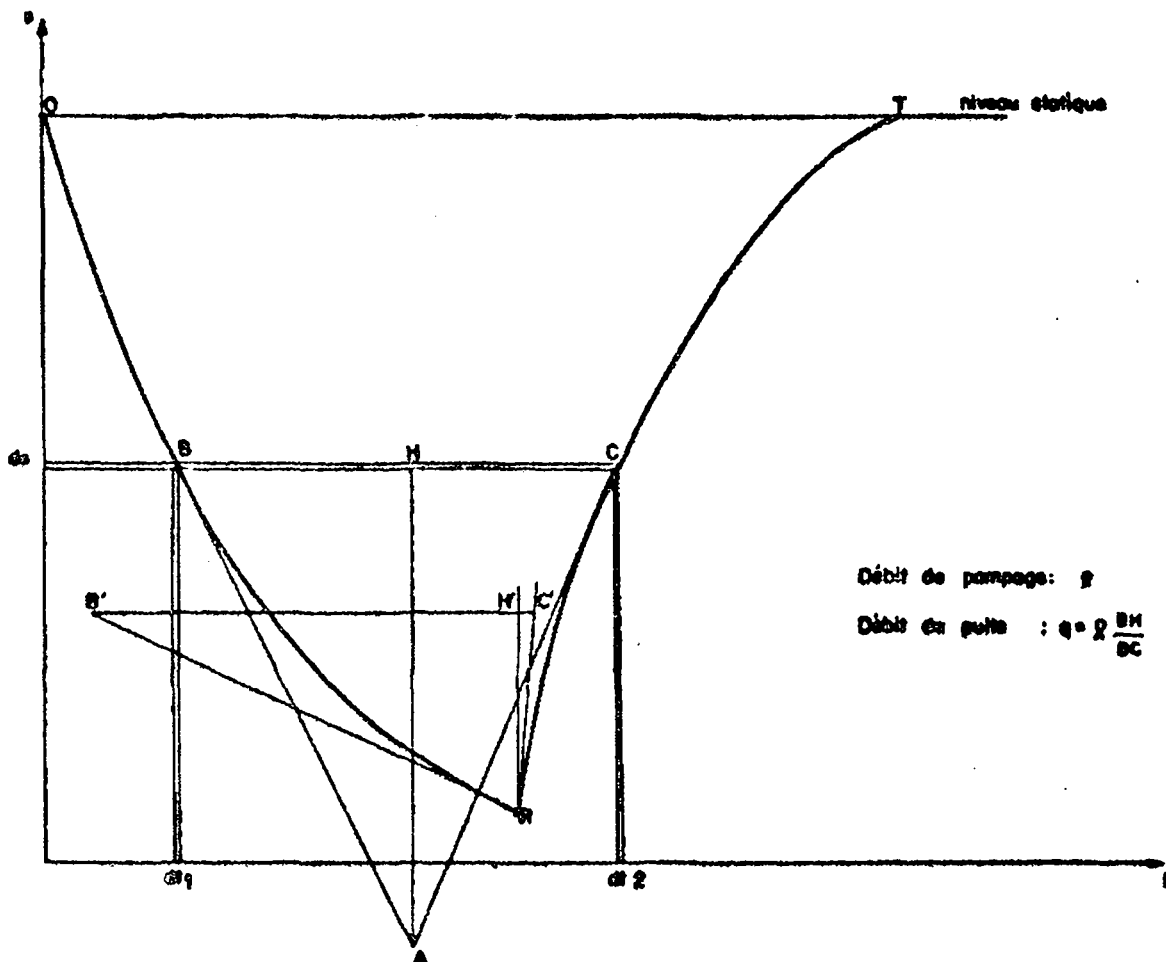
2° Application pratique.

On pompera à un débit constant « Q » et on construira avec autant de précision que possible les courbes de rabattement et de remontée de la nappe. A un rabattement « s » choisi, on mènera une horizontale à l'axe des temps qui coupera les deux courbes B et C. On mènera en ces points les tangentes aux courbes qui se couperont en un point A qu'on projettera sur BC en H.

On pourra écrire :

$$q = Q \frac{BH}{BC}$$

et « q » sera le débit auquel on devra se limiter, si l'on désire que la dénivellation dans le puits reste fixée à « s ».



BIBLIOGRAPHIE

- (1) **ARCHAMBAULT J.**
Les eaux souterraines de l'Afrique Occidentale (CIEH) 1960

- (2) **BELIARD C.**
Premiers résultats de l'étude des nappes phréatiques contenues dans les formations d'altération sur le pourtour du lac de Kossou. (Fac. des Sciences d'Abidjan, Départ. Géologie, série documentation n° 8, 1973).

- (3) **BERKALOFF E. (BRGM)**
Essais de pompage à débit constant. L'effet perturbateur de la capacité des puits sur le résultat de l'évaluation des caractéristiques d'une couche aquifère (1968).

- (4) **BISCALDI R. (BRGM)**
Etude statistique des forages et carte hydrogéologique des régions à substratum éruptif et métamorphique en Afrique Occidentale (C.I.E.H.) (1967)

- (5) **BIZE J. (BURGEAP)**
Application d'observations géomorphologiques et hydrodynamiques à la prospection des nappes des terrains d'altération en Cote d'Ivoire et en Haute Volta (C.I.E.H.) (1966).

- (6) **BREMOND R.**
Contribution à l'interprétation des mesures de débit et de rabattement dans les nappes souterraines - Gauthier - Villars 1965.

- (7) **BRGM**
Etude du ruissellement et de l'infiltration sur un petit bassin versant de zone de savane (Korhogo Cote d'Ivoire)(C.I.E.H.) (1972).

- (8) **BURGEAP**
Etude comparative des avantages respectifs des puits et des forages dans les régions à substratum cristallin d'Afrique de l'Ouest. (C.I.E.H.) (1972)

- (9) LE GOURIERES
Détermination du débit des puits incomplets de nappes libres forcés en terrain isotrope et anisotrope.
Bull. des Sciences hydrologiques, vol. 17, n°3, (1972)
- (10) LELONG F.
Nouvelles données sur les nappes d'arènes (B.C.E.O.M. - C.I.E.H.) (1964).
- (11) LELONG F.
Régime des nappes phréatiques contenues dans les formations d'altération tropicale. Conséquences pour la pédogénèse.
Sciences de la Terre, Tome XI, (1966), n°2 - p. 201-244, Nancy 1966
- (12) MARY C.
Méthode simplifiée de mesure de débit - Puits du C.H.E.R. de KAMBOINGE (note interne). - H.E.R. Section puits Ouagadougou.
- (13) NARASHIMAN T.N.
Pumping tests on open wells in Palar alluvium.
Bull. of Int. Assoc. of. Scientific Hydrology -
Vol XIII, n° 4, décembre 1968.
- (14) PAPADOPOULOS I.S. and H.H. COOPER Jr.
Drawdown in a well of large diameter (Water Resources Research, vol 3, n° 1, 1967).
- (15) SAMMEL E.A.
Aquifer Testing in large diameter wells in India
Groundwater, vol 12, n° 5, sept-octob. 1974