Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande

Band: 94 (1968)

Heft: 5

Artikel: Méthodes modernes de calcul des débits et des réserves des nappes d'eau souterraines

Autor: Recordon, M.E.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-69627

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 13.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

94e année Lausanne, 9 mars 1968 N° 5

BULLETIN TECHNIQUE DE LA SUISSE ROMANDE

Paraissant tous les 15 jours

ORGANE OFFICIEL
de la Société suisse des ingénieurs et des architectes
de la Société vaudoise des ingénieurs et des architectes (SVIA)
de la Section genevoise de la SIA
de l'Association des anciens élèves de l'EPUL (Ecole polytechnique de l'Université de Lausanne)
et des Groupes romands des anciens élèves de l'EPF (Ecole polytechnique fédérale de Zurich)

COMITÉ DE PATRONAGE
Président: E. Martin, arch. à Genève
Vice-président: E. d'Okolski, arch. à Lausanne
Secrétaire: S. Rieben, ing. à Genève
Membres:
Fribourg: H. Gicot, ing.; M. Waeber, arch.
Genève: G. Bovet, ing.; Cl. Grosgurin, arch.; J.-C. Ott, ing.
Neuchâtel: J. Béguin, arch.; M. Chevalier, ing.
Valais: G. de Kalbermatten, ing.; D. Burgener, arch.
Vaud: A. Chevalley, ing.; A. Gardel, ing.; M. Renaud, ing.; J.-P. Vouga, arch.

CONSEIL D'ADMINISTRATION
de la Société anonyme du « Bulletin technique »
Président: D. Bonnard, ing.
Membres: Ed. Bourquin, ing.; G. Bovet, ing.; M. Bridel; M. Cosandey, ing.; J. Favre, arch.; A. Rivoire, arch.; J.-P. Stucky, ing.
Adresse: Avenue de la Gare 10, 1000 Lausanne

RÉDACTION
D. Bonnard, E. Schnitzler, S. Rieben, ingénieurs; M. Bevilacqua, architecte
Rédaction et Editions de la S.A. du « Bulletin technique »
Tirés à part, renseignements
Avenue de Cour 27, 1000 Lausanne

ABONNEMENTS

1 an	Suisse	Fr. 46.—	Etranger	Fr. 50.—
Sociétaires	»	» 38.—	»	» 46.—
Prix du numéro	»	» 2.30	»	» 2.50

Chèques postaux : « Bulletin technique de la Suisse romande » N° 10 - 5775, Lausanne

Adresser toutes communications concernant abonnement, vente au numéro, changement d'adresse, expédition, etc., à : Imprimerie La Concorde, Terreaux 29, 1003 Lausanne

ANNONCES
Tarif des annonces:

1/1 page	Fr. 450.—
1/2 »	» 235.—
1/4 »	» 120.—
1/8 »	» 62.—

Adresse: Annonces Suisses S.A.
Place Bel-Air 2. Tél. (021) 22 33 26, 1000 Lausanne et succursales

SOMMAIRE

Méthodes modernes de calcul des débits et des réserves des nappes d'eau souterraines, par M. E. Recordon, ingénieur.
Rationalisation et organisation de l'activité professionnelle, par M. A. Décoppet, architecte.
Divers. — Documentation générale — Documentation du bâtiment — Informations diverses.

MÉTHODES MODERNES DE CALCUL DES DÉBITS ET DES RÉSERVES DES NAPPES D'EAU SOUTERRAINES [1]

par M. E. RECORDON, ingénieur, privat-docent à la Faculté des sciences de l'Université de Neuchâtel, chargé de cours à l'EPUL

I. Introduction

L'exploitation de plus en plus intense des nappes d'eau souterraines par puits de pompage a conduit divers chercheurs à faire progresser la théorie des écoulements souterrains vers les ouvrages de captage. On assiste donc actuellement dans le domaine de l'hydrogéologie à un courant de recherches orienté vers les mathématiques, les nouvelles théories étant basées sur les lois de l'hydrodynamique et de l'hydraulique. Il est de plus en plus nécessaire que l'hydrogéologue soit à même de chiffrer les phénomènes, ceci en plus des très nombreuses connaissances qu'il doit posséder sur la géologie des eaux souterraines et qui relèvent des sciences naturelles.

C'est la raison pour laquelle un cours sur la « dynamique des eaux souterraines » a été ouvert à Neuchâtel, dans le cadre des cours d'hydrogéologie, aux géologues qui désirent se spécialiser, en troisième cycle.

Si l'on veut exploiter une nappe, il faut déterminer les caractéristiques de la couche aquifère au point de vue de la dynamique des écoulements souterrains. Dans ce but on exécute, en plus des prospections géologiques, ce qu'il est convenu d'appeler des essais de pompage dans des puits construits spécialement à cet effet.

Il est évident que les essais de pompage ne donneront pas tous les éléments nécessaires pour fixer de manière raisonnable le débit exploitable et les réserves disponibles dans la nappe aquifère. En effet, si l'on veut éviter d'épuiser à longue échéance une nappe, il faudra qu'à certaines époques ses réserves puissent se reconstituer par son alimentation naturelle. La nappe aquifère devra donc être exploitée comme un réservoir qui se

[1] Leçon inaugurale du cours de « Dynamique des eaux souterraines », donnée à l'Institut de Géologie de Neuchâtel, le mercredi 13 décembre 1967.

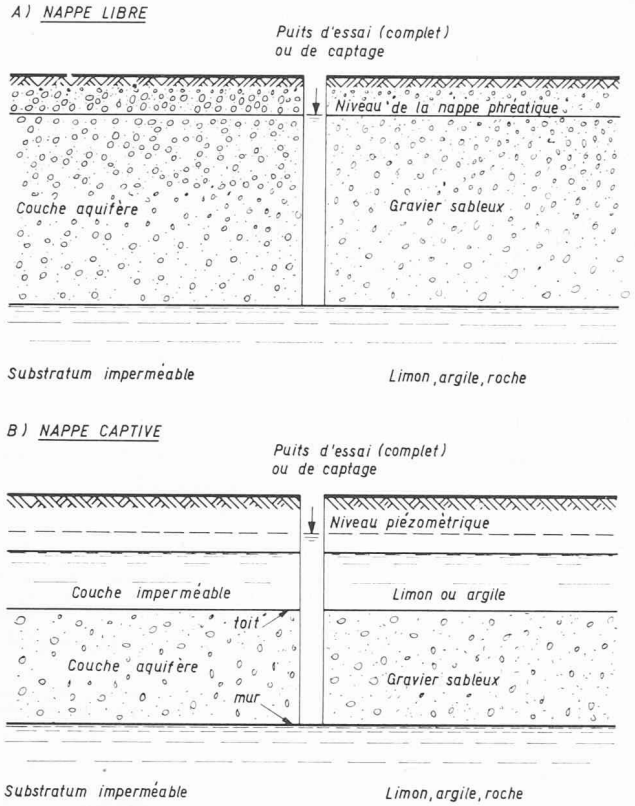

Fig. 1. — Puits complet dans une nappe libre (cas A) et dans une nappe captive (cas B).

vide lorsque les besoins en eau l'exigent et qui se remplit lorsque ces besoins diminuent ou que les précipitations sont abondantes. Les conditions d'alimentation de la nappe devront être connues, de même que son exutoire éventuel. Seule l'étude géologique complète de l'aquifère donnera ces indications.

La présente étude sera orientée uniquement vers l'interprétation des essais de pompage et nous laisserons délibérément de côté le problème spécifiquement géologique de l'alimentation et de l'exutoire de la nappe.

Nous examinerons tout d'abord quelles sont les théories qui permettent d'interpréter les résultats d'un essai de pompage, puis, dans une deuxième partie, nous montrerons comment se fait cette interprétation dans le cas particulier d'un essai de pompage, exécuté à Cressier.

Nous tenterons de montrer surtout quels sont les avantages des méthodes de calcul développées ces trente dernières années sous le nom de théorie des écoulements non permanents, ou régime de non-équilibre, par rapport à la théorie classique de Dupuit basée sur l'hypothèse d'un écoulement permanent et d'un régime d'équilibre.

II. Théories des écoulements vers les puits de captage

A. *Ecoulements permanents — Théorie de Dupuit*

Rappelons tout d'abord quelques définitions :

On appelle *couche aquifère*, ou *aquifère*, une couche de sédiments dont les interstices sont suffisamment grands pour qu'elle soit perméable et que l'on puisse, par captage, en retirer un débit appréciable.

La couche aquifère est limitée vers le bas par une couche dont la perméabilité est beaucoup plus faible et qui est appelée *substratum imperméable*. Elle est parfois limitée également vers le haut (cas B de la figure 1) par une couche peu perméable ; la nappe aquifère est alors en pression, elle est artésienne ; on dit qu'elle est *captive*. Dans le cas contraire, elle est *libre* (cas A de la figure 1).

Le forage ou puits de pompage est dit *complet* ou *parfait* s'il traverse entièrement la couche aquifère et atteint le substratum imperméable. Nous ne considérerons dans la suite que ce type de puits.

La théorie la plus ancienne permettant de calculer la forme de la surface de dépression de la nappe, en fonction du débit pompé et de la perméabilité de l'aquifère, est celle qui fut établie par J. Dupuit vers 1860 environ [1] [2]. Cette théorie suppose que le régime d'écoulement est permanent, c'est-à-dire qu'après une durée de pompage à débit constant relativement courte, la surface de la nappe déprimée ne varie plus et le débit pompé est exactement compensé par l'alimentation de la nappe, selon une surface cylindrique de rayon R (fig. 2). Le débit d'alimentation est réparti également sur tout le pourtour du cylindre de rayon R, qui est appelé rayon d'action du puits et qui ne varie pas non plus au cours du temps.

Dupuit a fait quelques hypothèses simplificatrices pour établir les formules donnant le débit et la courbe de dépression :

— Il admet entre autres que l'on peut négliger la composante verticale des vitesses en regard de leur composante horizontale, ce qui suppose que le rabattement Δ de la nappe reste faible par rapport à l'épaisseur de l'aquifère.

— Il admet aussi que la loi de Darcy est applicable à l'aquifère et que le coefficient de perméabilité est le même dans toutes les directions et en tous points.

Cette théorie ne traduit évidemment pas ce qui se passe pendant les premières heures de pompage, durant lesquelles le niveau d'eau dans le puits s'abaisse très rapidement ; mais après cette période initiale, le niveau ne varie plus que très lentement ; c'est ce qui a conduit Dupuit à admettre qu'alors l'écoulement était quasi permanent. Ce changement de régime s'explique par le fait qu'au début, la dépression de la nappe ne se produit qu'au voisinage du puits et n'intéresse qu'une surface horizontale très faible ; dans cette première phase, le rayon de la zone déprimée, faible au début, augmente très rapidement. Il est certain alors que le débit pompé n'est pas compensé par l'alimentation. En revanche, après quelques heures, cette zone déprimée a un rayon de plusieurs dizaines de mètres, sa surface est grande, donc il suffit d'un abaissement très lent des niveaux pour compenser le débit pompé. Le rayon de la zone déprimée ne s'accroît plus que lentement. Dupuit admet que, dès cet instant, le rayon d'action ne varie plus, que la nappe ne s'abaisse plus et que le débit pompé, au lieu d'être prélevé sur l'eau de la nappe, est fourni entièrement par l'alimentation. La théorie de Dupuit ne traduit donc pas du tout ce qui se passe en régime transitoire, pendant les premières heures de pompage. Le fait d'admettre qu'à un moment donné l'écoulement transitoire devient permanent, mais sans que l'on puisse préciser à quel moment, fait apparaître le défaut de la théorie de Dupuit qui sera éliminé dans les théories nouvelles.

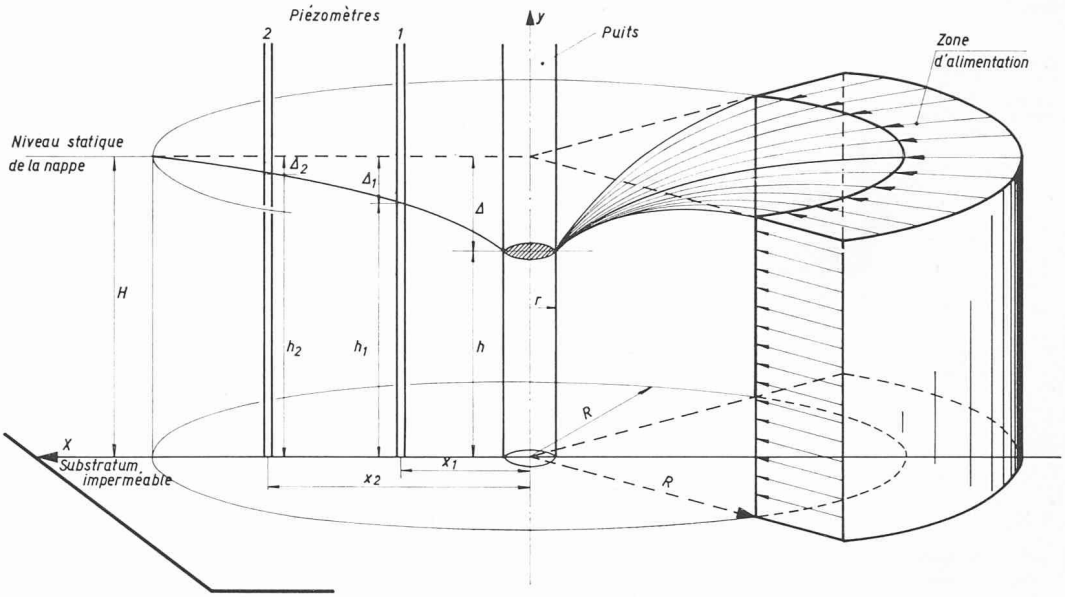

Fig. 2. — Ecoulement permanent vers un puits de captage ; pompage à débit constant. Hypothèses de la théorie de Dupuit.

Pour pouvoir utiliser la théorie de Dupuit, il faut connaître le rayon d'action R qui n'est pas mesurable. On lui attribue donc une valeur arbitraire qui varie de 60 m environ pour les sables fins à 150 m pour les graviers.

En 1906, Thiem a complété la théorie de Dupuit en montrant que, si l'on mesurait le rabattement de la nappe dans deux piézomètres situés à proximité du puits, il n'était plus nécessaire de faire intervenir dans le calcul le rayon d'action. La formule de Thiem est toujours basée sur l'hypothèse d'un écoulement permanent, mais elle a l'avantage de permettre la détermination du coefficient de perméabilité dans diverses directions rayonnantes autour du puits, à condition de placer dans chacune de ces directions deux piézomètres au moins.

Pour illustrer la théorie de Dupuit, prenons un exemple numérique (fig. 3) : supposons un puits de rayon $r = 1$ m foré dans une nappe libre d'épaisseur $H = 8$ m. Admettons que le rayon d'action $R = 100$ m et supposons que l'on ait mesuré le rabattement du niveau d'eau dans le puits $\Delta = 2{,}10$ m après quelques heures de pompage à débit constant $Q = 600$ l/min. Si l'on résout la formule de Dupuit donnée sur la figure 3 par rapport à k, on obtient

$$k = \frac{Q \cdot \log R/r}{1{,}366(2H - \Delta)\,\Delta}$$

Dans l'exemple numérique, $\log R/r = 2$, $Q = 0{,}01$ m³/sec., et l'on trouve $k = 5.10^{-4}$ m/sec.

Le coefficient de perméabilité étant connu, l'équation de Dupuit donne une relation entre Q et Δ qui est la

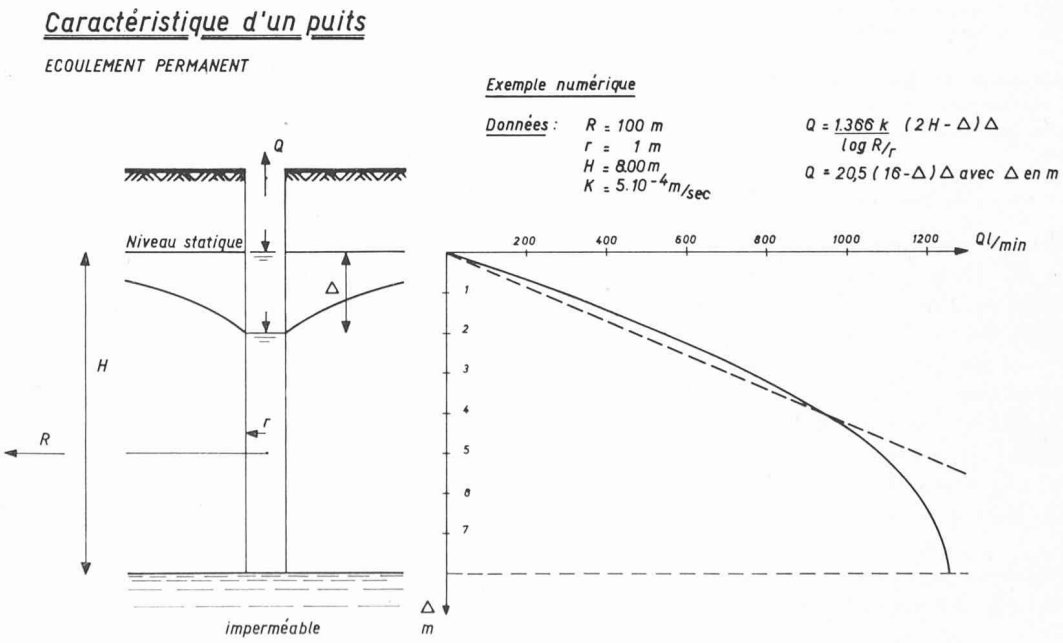

Fig. 3. — Exemple de calcul de la courbe caractéristique d'un puits : courbe débit — rabattement.

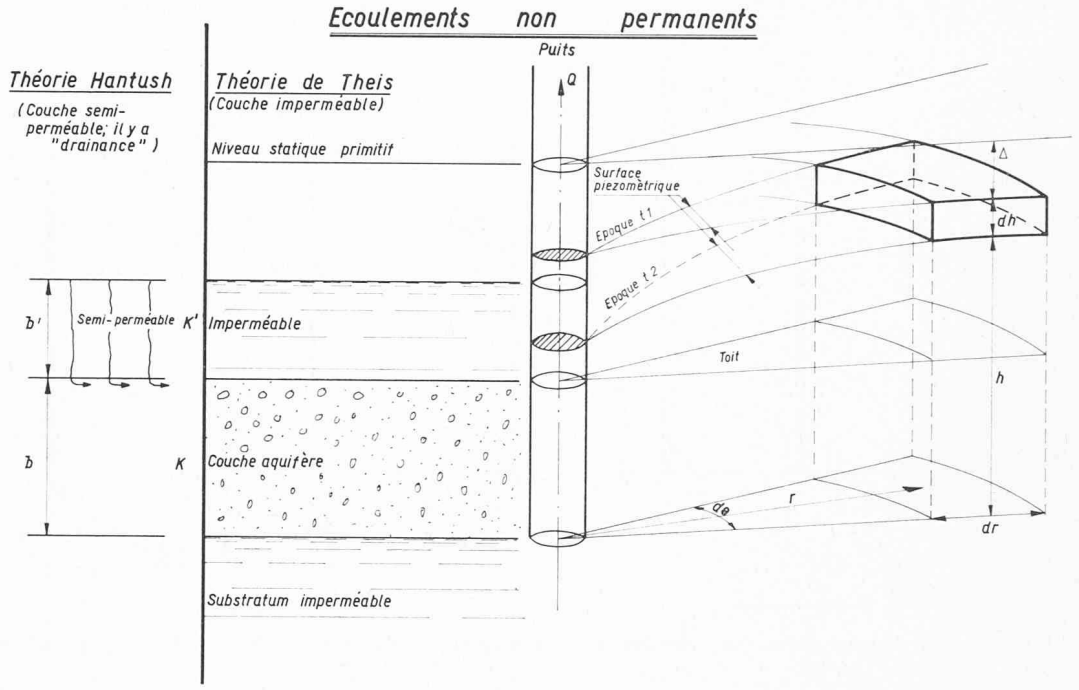

Fig. 4. — Ecoulement non permanent vers un puits de captage ; pompage à débit constant. Hypothèses des théories de Theis et de Hantush.

caractéristique du puits dans notre cas particulier $Q = 20{,}5\ (16 - \Delta)\Delta$. Cette équation est représentée graphiquement par la courbe de la figure 3, et l'on constate que, lorsque le rabattement est inférieur à la moitié de l'épaisseur H de l'aquifère, le débit augmente à peu près linéairement, tandis que si le rabattement est plus grand, le débit augmente relativement peu.

La théorie de Dupuit permet aussi d'établir l'équation de la courbe de dépression, profil de la nappe déprimée.

Cette théorie donne donc trois éléments caractéristiques d'un puits de pompage :

1. Le coefficient de perméabilité de l'aquifère.
2. La caractéristique du puits, variation du débit en fonction du rabattement.
3. La courbe de dépression donnant la valeur du rabattement en fonction de la distance au puits.

Elle ne donne en revanche aucune indication sur les réserves de la nappe, ni sur l'évolution de la courbe de dépression au cours du temps.

B. *Ecoulements non permanents — Théorie de Theis*

Pour éliminer les inconvénients de la théorie de Dupuit, Charles V. Theis, géologue à l'Inspectorat géologique de l'administration des Etats-Unis [1] [3], imagina en 1935 d'écrire les équations de l'écoulement non permanent vers un puits de captage. Un écoulement est dit non permanent lorsque ses caractéristiques, sa vitesse, sa pression, par exemple, varient en fonction du temps. Pour cela, Theis a considéré une nappe aquifère captive d'épaisseur constante et de très grande étendue dans laquelle a été établi un puits de captage complet.

Pour résoudre ce problème, il faut écrire, puis intégrer les équations différentielles traduisant le principe de continuité, la conservation de l'énergie et la loi de Darcy.

Theis a montré également que, dans le cas de la nappe libre, les équations sont les mêmes.

Nous ne donnerons pas ici le développement mathématique complet, ce qui serait trop long, mais voyons pourtant quelle est la forme de l'expression donnant le débit.

Supposons que le débit Q soit constant ; si l'alimentation de la nappe est nulle, le volume d'eau qui correspondra à ce débit sera celui qui est compris entre deux positions de la surface de l'aquifère déprimée. Considérons à une distance r du puits un élément de cette surface dont les dimensions sont $rd\theta$ et dr (fig. 4). Supposons que, pendant un espace de temps très court dt, compris entre les époques t_1 et t_2, la surface de la nappe s'abaisse de dh. Le volume d'eau élémentaire qui s'écoulera du volume $rd\theta\, dr\, dh$ sera égal à $rd\theta\, dr\, dhS$. Dans cette expression, S est le coefficient d'emmagasinement ; c'est une fraction qui représente le volume d'eau libre, par rapport au volume total de l'élément, que l'on peut extraire de l'aquifère par pompage. Le débit élémentaire sera donc égal à ce volume d'eau, divisé par le temps dt. On a donc :

$$dQ = Sr\, d\theta\, dr \frac{\partial h}{\partial t}$$

et le débit total sera donné par l'intégrale :

$$Q = S \int_{r_0}^{\infty} \int_{0}^{2\Pi} r \frac{\partial h\,(r, \theta, t)}{\partial t}\, d\,\theta\, dr.$$

r_0 : rayon du puits.

Remarquons que le problème de Theis, qui consiste à déterminer le rabattement de la nappe à une distance quelconque du puits et à une époque quelconque, est le même du point de vue mathématique que celui qui

[1] U. S. Geological Survey, Washington, D. C.

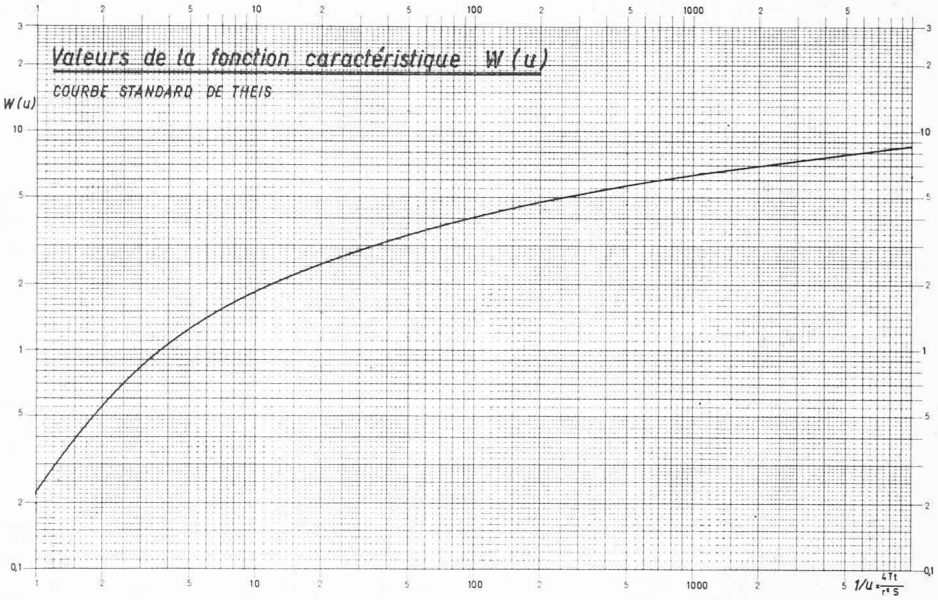

Fig. 5. — Courbe standard de Theis.

consiste à calculer la variation de la température en fonction du temps en un point quelconque d'une plaque mince au centre de laquelle on applique une source de chaleur constante et ponctuelle.

Cette analogie a facilité les travaux de Theis, qui a pu utiliser une méthode déjà établie.

Le calcul conduit à l'équation suivante :

$$\Delta = \frac{Q}{4 \Pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} \, du$$

$$\text{dans laquelle } u = \frac{r^2 S}{4 T t}$$

L'intégrale qui figure dans cette équation ne peut pas être calculée à l'aide des fonctions transcendantes élémentaires. Il faut avoir recours à un développement en série qui est le suivant :

$$W(u) = \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} \, du = -0{,}5772 - \log_e u +$$

$$+ u - \frac{u^2}{2 \,.\, 2!} + \frac{u^3}{3 \,.\, 3!} - \frac{u^4}{4 \,.\, 4!} + \ldots$$

La fonction $W(u)$ est appelée « fonction caractéristique » du puits ; on peut calculer une fois pour toutes sa valeur pour toute valeur de u au moyen du développement en série. Il existe des tables donnant les valeurs de $W(u)$ [1] [2] [6]. Dès lors, le problème est résolu à l'aide des deux équations suivantes qui donnent la valeur de Δ en fonction de r et t pour un débit Q et pour un aquifère caractérisé par sa transmissivité $T = kH$ (k : coefficient de perméabilité de Darcy — H : épaisseur de l'aquifère) et son coefficient d'emmagasinement S.

$$\boxed{\Delta = \frac{Q}{4 \Pi T} \cdot W(u) \qquad u = \frac{r^2 S}{4 T t}}$$

Ce sont les équations de Theis qui permettent, comme nous le verrons plus loin, de déterminer les mêmes éléments que les équations de Dupuit, mais qui donnent en plus l'évolution du rabattement de la nappe en fonction du temps et le coefficient d'emmagasinement qui caractérise les réserves en eau disponibles dans l'aquifère.

Les valeurs numériques de la fonction caractéristique $W(u)$ peuvent être données sous forme d'une courbe standard (fig. 5) que l'on dessine sur papier logarithmique en reportant en ordonnées $W(u)$ et en abscisse $1/u$ ou $\frac{4 T t}{r^2 S}$.

Pour préciser la signification des équations de Theis, reprenons l'exemple numérique que nous avons analysé plus haut par la méthode de Dupuit (chapitre II A et figure 3). Nous avions considéré un puits de 1 m de rayon, un aquifère de 8 m d'épaisseur, et le coefficient de perméabilité était égal à $k = 5 \cdot 10^{-4}$ m/sec. Dans ce cas, la transmissivité, qui est égale à $k.H$, vaut $T = 4.10^{-3}$ m²/sec. Supposons que l'on ait déterminé le coefficient d'emmagasinement $S = 0{,}1$ (10 %) et voyons comment varie le niveau d'eau dans le puits au cours du temps ($r = r_o = 1$m).

Les équations de Theis dans ce cas deviennent :

$$\Delta = 20 \, Q \, W(u) \quad \text{avec } u = \frac{6{,}25}{t} \text{ ou } \frac{1}{u} = \frac{t}{6{,}25}$$

A toute valeur de t correspond une valeur bien définie de u, donc de $\frac{1}{u}$, et la courbe standard donne la valeur correspondante de $W(u)$. Pour un débit donné, par exemple de 300 l/min., ou 0,005 m³/s., la valeur du rabattement Δ peut donc être trouvée pour toute valeur de t. C'est ce qui se traduit par les courbes de la figure 6 (graphique supérieur).

Supposons maintenant que l'on veuille trouver, par la théorie de Theis, la courbe analogue à la caractéristique du puits dans la théorie des écoulements permanents, c'est-à-dire la variation du débit en fonction du rabattement. Il faudra choisir une valeur constante du temps, par exemple 1 jour ou 86 400 sec., à laquelle correspond

$$\frac{1}{u} = \frac{86\,400}{6{,}25} = 13\,824$$

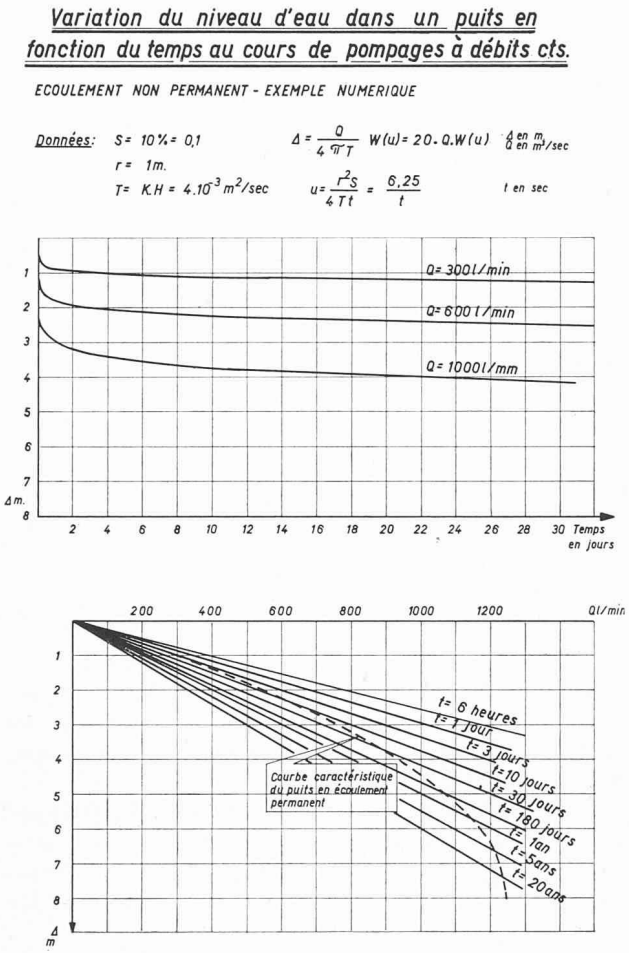

Fig. 6. — Exemple de calcul de la variation du niveau d'eau dans un puits au cours d'un pompage à débit constant (théorie de Theis).

et la courbe standard donne $W(u) = 9$. La première équation de Theis devient $\Delta = 180Q$. Elle se traduit par une droite sur le graphique inférieur de la figure 9. D'autres droites correspondront à une durée de pompage, $t = 3$ jours, 10 jours, etc.

A la courbe caractéristique calculée par l'équation de Dupuit et dessinée en traitillé sur le graphique de la figure 6 correspond donc dans la théorie de Theis une famille de droites de moins en moins écartées à mesure que la durée de pompage t augmente. On remarque que la droite de Theis pour une durée de pompage de 10 jours est peu différente de la courbe de Dupuit pour les rabattements plus petits que 3 m (rabattements inférieurs aux 40 % de la puissance de l'aquifère). Si l'on impose la condition que le rabattement dans le puits ne doit pas dépasser 3 m par exemple, pour une durée de pompage de 20 ans le débit ne devra pas dépasser 500 l/min., alors que, si cette durée n'est que de 10 jours, le débit sera limité à 800 l/min.

C. *Ecoulements non permanents — Théorie de Hantush*

Le succès remporté aux Etats-Unis par la théorie de Theis a conduit d'autres chercheurs à perfectionner cette méthode.

Vers 1955, M. S. Hantush [4] étendit la théorie de Theis au cas d'une nappe limitée vers le haut par une couche semi-perméable (fig. 4). Il y a donc un débit complémentaire qui alimente l'aquifère ; ce débit est d'autant plus grand que la pression artésienne diminue sous l'effet d'un pompage plus intense. Schoeller propose de désigner en français ce phénomène par le terme de « drainance ». Hantush introduit le facteur de drainance $B = \sqrt{\frac{k}{k'} bb'}$ (fig. 4) pour caractériser la perméabilité relative de la couche supérieure et de l'aquifère. Il a donné l'équation des nouvelles courbes standard. La fonction caractéristique dépend alors de u et de r/B.

Cette fonction peut être représentée graphiquement (fig. 7) par une famille de courbes. Remarquons que, si r/B devient très petit, c'est que B est très grand et que k' est très petit ; on tend vers le cas de la théorie de Theis et la valeur $r/B = 0$ correspond à la courbe de Theis.

Enfin, en 1960, Hantush [5] a encore généralisé sa théorie en faisant intervenir la perméabilité du substratum et les coefficients d'emmagasinement du toit et du substratum. Nous ne pouvons pas décrire ici ces nouveaux développements.

(A suivre)

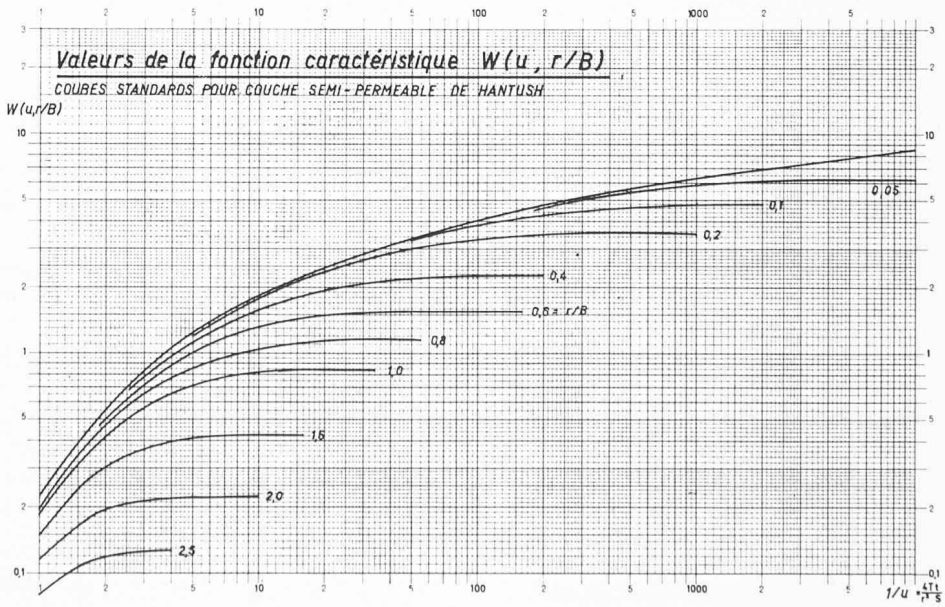

Fig. 7.
Courbes standard de Hantush.