

DETERMINATION DES PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES A L' AIDE DES POMPAGES DANS LES PUITES

GENERALITES :

Avant d'exploiter l'eau d'une nappe, il s'agit de bien étudier l'aquifère afin de dimensionner les ouvrages d'exploitation. Cette étude se fait sous forme d'essais de pompage: étude de l'évolution de la charge hydraulique de la nappe dans le puits et/ou dans des piézomètres proches en fonction du débit prélevé et du temps écoulé. De manière très schématique, on dira que le premier but de l'essai par pompage sera de déterminer approximativement l'importance du rabattement de l'eau dans le puits d'exploitation en fonction du débit, afin de déterminer la profondeur de la pompe d'exploitation. Un second but important est de vérifier si le forage a été bien fait (pertes de charge raisonnables) et le troisième but est la mesure des caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère (**T** et **S**) afin de pouvoir proposer une exploitation optimale de l'aquifère (nature et distribution des forages exploitants).

Lors de la réception d'un ouvrage, on vérifie si le développement a été bien fait (l'eau doit être claire) puis on teste l'ouvrage afin de connaître sa courbe caractéristique (voir plus loin): l'évolution du niveau en fonction des débits, en régime pseudo-stabilisé, pour des paliers de 4-6 h. Si la nappe est libre, la courbe caractéristique présente un point critique qui permet d'évaluer approximativement le débit maximum de l'ouvrage. Si la nappe est captive, les courbes deviennent des droites (**Q** est directement proportionnel au rabattement). L'étude fine de ces courbes, en particulier du rabattement s en fonction du débit spécifique (débit par m de rabattement), permet de vérifier la qualité du puits en comparant les pertes de charge dues au puits à celles dues à l'aquifère. Si les premières, quadratiques, ne sont pas "très faibles" par rapport aux secondes, linéaires, on considérera le forage comme mal équipé.

Lorsque ces premières études ont été effectuées et pour une exploitation à long terme, on réalise des tests beaucoup plus complets que l'on fait par des essais "longue-durée" en régime transitoire sur une station avec au minimum un piézomètre. Les durées peuvent varier entre 72 h et six mois et se font généralement à débit constant. Le cône de rabattement autour d'un puits exploitant une nappe évolue au cours du temps.

On distingue deux méthodes de pompage dans les puits.

Dans la première, on pompe dans un puit à débit constant jusqu'à obtention de l'équilibre de la surface de la dépression piézométrique (c'est le régime d'équilibre ou permanent).

Dans la seconde, on pompe toujours à débit constant, et l'on observe l'évolution de la dépression en fonction du temps (régime non permanent ou transitoire).

En général, on mesure les variations de niveau dans le puit et on fait des courbes qui seront interprétées par comparaison avec des modèles.

On compare les résultats de la nappe réelle avec ceux de la nappe simple théorique. Ces interprétations portent sur les différences. Quant on ne voit pas de concordance entre les deux courbes théoriques et expérimentales, il faut chercher un autre modèle en tenant compte du schéma général de la nappe et de sa structure (captive ou libre).

MATERIELS UTILISES DANS UNE STATION D'ESSAI :

Dispositif de pompage :

* Les piézomètres et le puits :

- Un piézomètre est un forage à petit diamètre, généralement non équipé de pompe, sert à suivre l'évolution du rabattement de la nappe.

Dans le cas de l'étude d'un aquifère, il est très important d'implanter au moins un piézomètre pour le calcul du coefficient d'emménagement. Son implantation dépend de la perméabilité du terrain ; il ne doit en aucun cas dépasser le rayon d'influence (généralement inférieur à 200 m), ni être trop près du puits de pompage pour éviter l'effet des colmatages... Le nombre de piézomètre est imposé par le problème à résoudre et par les crédits disponibles.

En tout état de cause, les piézomètres doivent avoir un temps de réponse très faible.

- Un puits doit avoir un diamètre suffisant pour y introduire la pompe et le matériel de mesure de niveau (soude électrique ou autres). Il doit en principe traverser complètement l'aquifère pour éviter l'écoulement tridimensionnel, car généralement les formules s'appliquent à des puits parfaits.

* Les pompes et les conduites :

Il existe deux catégories de pompe d'essai. Ses pompes à axe vertical ont le moteur en surface et le mouvement est transmis à la turbine par un axe qui est une source de fragilité. Le pompage est assez long, mais ces pompes ont l'avantage d'utiliser un moteur diesel et d'avoir une transmission mécanique de l'énergie.

Les pompes immergées regroupent turbine et moteur électrique au fond du puits.

Le montage est simple et rapide, l'ensemble étant suspendu à la colonne de refoulement et leur débit est pratiquement illimité. Pendant le pompage, le refoulement de l'eau doit s'effectuer suffisamment loin pour éviter les réalimentations accidentelles. Pour surveiller la bonne marche de la pompe, il est nécessaire de placer un manomètre avant la vanne de régulation de débit. Si la pente de la conduite de refoulement n'est pas constante, il faut prévoir des purges d'évacuation d'air aux points hauts de changement de pente.

Matériels de mesure :

Mesures de niveaux :

- Sonde électrique :

On peut citer différents types de sondes destinées à mesurer la profondeur du niveau d'eau. Les plus utilisées sont les sondes électriques. C'est un circuit qui se ferme en touchant l'eau soit par contact à flotteur, soit par passage du courant dans l'eau. Le circuit se ferme en allumant une ampoule ou en actionnant un signal sonore. Le fil électrique est gradué directement (résistant au phénomène d'allongement par son propre poids) donne la profondeur du niveau de l'eau.

- La sonde mécanique :

C'est un flotteur qui est entraîné par son propre poids et relié à un câble en acier.

La descente du câble est enregistrée sur un cadran. Le flotteur et le câble sont suspendus à une potence équilibrée par un ressort et solidaire par un cliquet d'arrêt.

Le moindre choc ou variation de tension provoque le redressement de la potence qui bloque le déroulement du fil. Il suffit de lire le nombre inscrit sur le cadran enregistreur.

- Les limnigraphes : Ils enregistrent le niveau de l'eau en fonction du temps.

C'est un cylindre entraîné par un mouvement d'horlogerie. Le stylet suit les variations d'un flotteur équilibré par un contrepoids.

Mesure de débits.

C'est une mesure aussi importante que celle des rabattements et elle doit être faite avec autant de soin.

La méthode la plus exacte, c'est la mesure à l'aide d'un chronomètre et d'un bac (le temps de remplissage d'un bac de volume connu donne le débit).

On peut également utiliser les appareils de Pitot et de Venturi, les compteurs de volume ou de débit, les déversoirs et les canaux.

Mesure des vitesses.

Lorsque l'aquifère est capté à plusieurs niveaux, on peut mesurer la vitesse de l'eau dans le forage à différents niveaux en cours de pompage afin de reconnaître les perméabilités relatives de chaque niveau. Cette mesure de vitesse peut se faire par micro-moulinet.

Hydraulique souterraine

Loi de DARCY et principes fondamentaux

I. INTRODUCTION

Certains matériaux peuvent être traversés par des fluides (eau, pétrole etc...). D'autres part, d'autres ne le peuvent pas : les uns sont dits perméables, les autres imperméables. Mais parmi les matériaux perméables eux-mêmes, certains opposent plus de résistance que d'autres au passage des fluides (ils sont moins perméables).

Il existe toute une gamme de perméabilité depuis les milieux pratiquement imperméables). Jusqu'à ceux dans lesquels la circulation des fluides se fait presque sans partie d'énergie (tableau n°1).

Coefficient K (m/s)	10	10 ⁰	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹¹
Type de K des formations	PERMEABLE						SEMI-PERMEABLE			IMPERMEABLE			
Degré de K	Très bonne				bonne		mauvaise			nulle			
Granulométrie -homogène	Gravier				sable		Sable très fin			silt		argile	
-hétérogène	Gravier gros et moyen		Gravier et sable		Sable et argile + limon						argile		

Tableau – 1 Importance des valeurs du coefficient de perméabilité(K) en fonction des types de formation . CASTANY 1982

Ainsi, on définit un coefficient de perméabilité caractéristique du matériau pour son comportement vis à vis du fluide qui le traverse.

Définition du coefficient de perméabilité de Darcy (k).

H. DARCY fut le premier à reconnaître que la chute de pression (perte d'énergie potentielle) subie par l'eau au passage d'un milieu perméable défini, est proportionnelle à la vitesse de filtration d'où les équations :

$$Q = KSi \text{ ou } dQ = KdSdh \quad ?$$

$$Q = Ks i \text{ ou } dQ = K d s dh \Rightarrow K ds dh \Rightarrow K = \frac{Q}{ds dh}$$

avec : Q : débit filtrant en m³/s.

i : pente de la ligne piéométrique.

s : section du passage (pleine et vide) qu'empreinte le débit en m².

k : coefficient de perméabilité en m/s.

dq : débit élémentaire passant à travers la surface ds perpendiculaire à la surface de l'écoulement

$\frac{dh}{dl}$ = i gradient de pression le long de la ligne de courant considérée.

Le coefficient de perméabilité est aussi le volume libre qui percole pendant l'unité de temps à travers l'unité de surface d'une section totale de la couche aquifère sous un gradient hydraulique (perte de charge dh le long d'une distance l) égal à l'unité, à la température 20° c. Ayant les dimensions d'une vitesse, il est exprimé en mètre par seconde (m/s) ou en centimètre par seconde (cm/s). Fréquemment, on parle simplement de perméabilité. Dans les conditions hydrogéologiques naturelles, nous devons considérer deux perméabilités :

- La perméabilité verticale (Kz) qui considérée pour l'infiltration, caractérise l'écoulement des eaux souterraines de haut en bas ou de bas en haut.
- La perméabilité horizontale (Kx et Ky) qui régit l'écoulement des eaux souterraines.

Les terrains n'étant pas isotropes, ces deux perméabilités ne sont pas égales.

- Calcul de la perméabilité par H. DARCY (fig.)

L'expérience de DARCY permet d'établir une relation simple entre le débit de l'eau passant au travers d'une colonne de sable l, et divers paramètres mesurables (section s, différence de charge sH entre l'entrée et la sortie du filtre « sable »).

Fig.

$$Q = Ksi$$

$$I = \frac{sH}{l} \text{ gradient hydraulique}$$

$$---$$
$$l$$

$$K = \frac{Q}{s} = \frac{m^3/s}{m^2} = m/s$$

$$---$$
$$\frac{m^3/s}{m^2}$$

K donné en m/s ou également en DARCY

1 DARCY = 10⁻⁵ m/s

Le coefficient K ainsi défini caractérise l'ensemble matériau-fluide. Il est appelé perméabilité relative et présente l'avantage de pouvoir être atteint directement par l'expérience.

Si l'on cherche à obtenir un coefficient K_i caractérisant le matériau, on doit faire intervenir les propriétés du fluide.

$$K = K_i \frac{\gamma}{\mu}$$

avec γ : poids spécifique du fluide

μ : viscosité du fluide.

K dépend de la température. Pour l'eau à 20°C., $K_{20} = K_i$ et γ et μ étant proche de 1.

Ainsi en opérant avec de l'eau à 20°C., la perméabilité intrinsèque est égale à la perméabilité relative en première approximation $\gamma \approx 1$ dans tous les cas.

Donc $K_t = K_{20}/\mu$.

- Transmissivité.

C'est le produit du coefficient de perméabilité horizontale pour l'épaisseur de la couche aquifère $T = K.e$. Ce paramètre caractérise l'aptitude de la nappe à transmettre l'eau, il a la dimension $L^2 \cdot t^{-1}$ c'est aussi le débit à travers une section verticale de l'aquifère de largeur unité et de hauteur égale à la puissance e de l'aquifère saturé sous un gradient hydraulique égale à 100 %.

Suivant la loi de DARCY on a :

$$Q = KS \frac{dh}{dl}$$

$T = K (e \times 1) \times 1 = K.e$ T s'exprime en m^2/s

Transmativité m^2/s	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}
Débit m^3/h	1000	100	10	1	0,1

Quelques ordres de grandeur

Coefficient d'emmagasinement :

Le coefficient d'emmagasinement d'une formation aquifère est égal au volume d'eau effectivement libéré par un prisme vertical de la nappe de section unité, pour une baisse unité du niveau piézométrique (ou volume emmagasiné par le même prisme pour une

élévation unité du niveau). C'est un nombre sans dimension, désigné souvent par la lettre S.

Pour les nappes à surface libre S est équivalent à la porosité efficace (me). Le volume d'eau libéré est dû au drainage par gravité de la porosité $dh = 1$ du prisme d'aquifère de section unité. Pour une nappe libre, S varie entre 5 et 30 % (10-2 à 10-1).

Pour les nappes captives, il ne s'agit plus de vidange partielle des vides, mais d'un double mécanisme lié à la compressibilité de l'eau et du matériau aquifère :

- La pression baissant, l'eau contenue dans les pores du milieu aquifère doit se dilater par détente élastique.

- L'eau ayant une pression plus faible, le squelette solide de la formation se tasse sous l'effet du poids des couches géologiques supérieures. Ce tassement élastique entraîne une diminution du module des vides et l'expulsion d'un surcroît d'eau. L'aquifère proprement dit reste toujours saturé tant que la nappe reste captive.

Pour une nappe captive, le coefficient d'emménagement est généralement compris entre 10-6 et 10-3. Ces valeurs beaucoup plus faibles sont dues d'une part au fait que l'eau a un coefficient d'élasticité si petit qu'elle est souvent considérée comme incompressible, d'autre part au fait que le squelette solide d'une formation aquifère est généralement très rigide, donc les variations de porosité sont extrêmement faibles.

$$S = m.e.\gamma\left(\beta + \frac{\alpha}{m}\right)$$

m = porosité totale

e = puissance de l'aquifère

γ = poids spécifique du liquide ($\gamma = \text{densité} = \rho \times g$)

β = coefficient de compressibilité du liquide

α = coefficient de compressibilité élastique du terrain.

En résumé, S correspond numériquement au volume d'eau mis en jeu par m² de nappe

pour une variation unité de la charge hydraulique $S = \frac{L^3}{L^2.L}$

Relations fondamentales de l'hydrodynamique des milieux poreux :

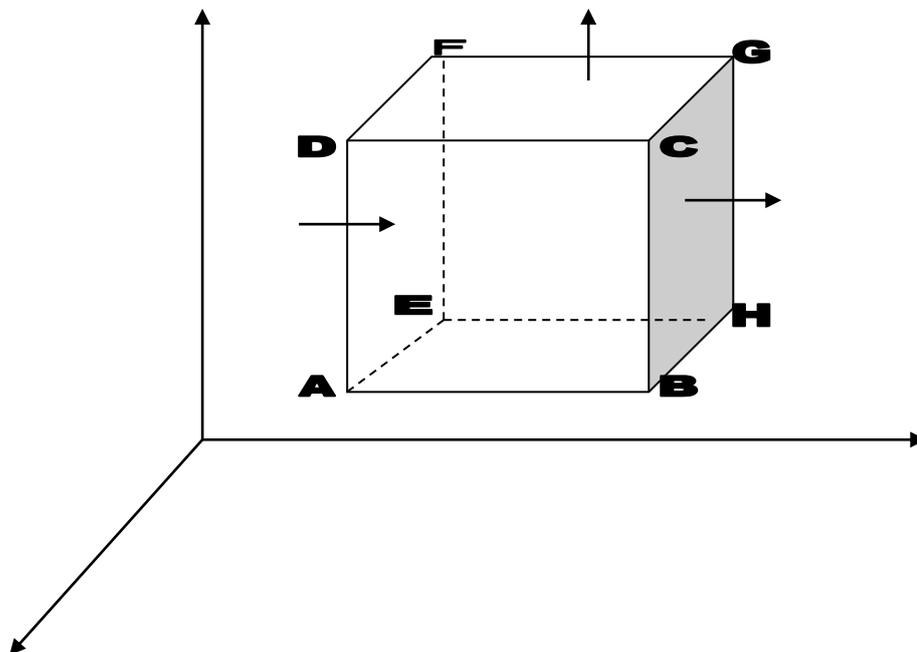
Equation de continuité

I-Introduction :

L'équation de continuité est appelée également l'équation de conservation de masse. L'hydrodynamique en milieu poreux se base sur cette équation. Elle s'énonce comme suit : la masse d'une partie d'un système, en mouvement reste constante dans le temps .

II -Etablissement de l'équation de continuité exprimant la conservation de la masse de fluide :

Considérant un milieu fluide contenu ,soient dx,dy et dz ,les cotés d'un parallélépipède fluide élémentaire.



Soit $U (U_x ,U_y ,U_z)$ la vitesse de la particule fluide du volume infiniment petit du fluide .Le volume du fluide qui entre par la face ADFE est $U_x dy dz dt$.La masse qui correspond à ce volume est $\rho U_x dy dz dt$.

$$\begin{array}{ccccccc} \Downarrow & \Downarrow & \Downarrow & \Downarrow & \Downarrow \\ \text{Kg/m}^3 \cdot \text{m/s} \cdot \text{m} \cdot \text{m} \cdot \text{s} & = & \text{Kg} \end{array}$$

En se basant sur le même raisonnement la masse liquide qui sort par la face opposée BCGH sera :

$$\left(\rho U_x + \frac{\partial(\rho U_x)}{\partial x} dx \right) dy dz dt \quad (2)$$

où $(\frac{\partial(\rho U_x)}{\partial x} \partial x)$ est l'augmentation de la fonction ρU_x ou la variation de la fonction ρU_x .

La différence entre la masse sortante et la masse entrante sera :

$$(\rho U_x + \frac{\partial(\rho U_x)}{\partial x} \partial x) dydzdt - \rho U_x dydzdt = \frac{\partial(\rho U_x)}{\partial x} dx dy dz dt \quad (3)$$

En considérant le même raisonnement pour les autres directions, on obtient pour l'ensemble des 6 faces :

$$(\rho U_y + \frac{\partial(\rho U_y)}{\partial y} \partial y) dx dz dt - \rho U_y dx dz dt = \frac{\partial(\rho U_y)}{\partial y} dx dy dz dt \quad (4)$$

$$(\rho U_z + \frac{\partial(\rho U_z)}{\partial z} \partial z) dx dy dt - \rho U_z dx dy dt = \frac{\partial(\rho U_z)}{\partial z} dx dy dz dt \quad (5)$$

$$(\frac{\partial(\rho U_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho U_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho U_z)}{\partial z}) dx dy dz dt \quad (6)$$

Si la masse du volume du fluide considéré à l'instant t est égale à $\rho dx dy dz$, donc sa variation (sa diminution) sera : $-\frac{\partial \rho}{\partial t} dt dx dy dz \quad (7)$

De l'égalité (6) et (7) on obtient :

$$(\frac{\partial(\rho U_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho U_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho U_z)}{\partial z}) dx dy dz dt = -\frac{\partial \rho}{\partial t} dt dx dy dz \quad (8)$$

ou d'une autre manière :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\frac{\partial(\rho U_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho U_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho U_z)}{\partial z}) = 0 \quad (9)$$

L'équation (9) précédente est l'équation de continuité sous forme d'Euler.

$$\text{Comme } \frac{\partial(\rho U_x)}{\partial x} = \rho \frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial \rho}{\partial x} U_x \quad (10)$$

$$\frac{\partial(\rho U_y)}{\partial y} = \rho \frac{\partial U_y}{\partial y} + \frac{\partial \rho}{\partial y} U_y \quad (11)$$

$$\frac{\partial(\rho U_z)}{\partial z} = \rho \frac{\partial U_z}{\partial z} + \frac{\partial \rho}{\partial z} U_z \quad (12)$$

$\rho = f(x, y, z, t)$ donne :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho dx}{\partial x dt} + \frac{\partial \rho dy}{\partial y dt} + \frac{\partial \rho dz}{\partial z dt} = \frac{d\rho}{dt} \quad (13)$$

ou bien

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho}{\partial x} U_x + \frac{\partial \rho}{\partial y} U_y + \frac{\partial \rho}{\partial z} U_z \quad (14)$$

En additionnant (10), (11) et (12) on aura :

$$\frac{\partial(\rho U_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho U_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho U_z)}{\partial z} = \rho (\frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_y}{\partial y} + \frac{\partial U_z}{\partial z}) + \frac{\partial \rho}{\partial x} U_x + \frac{\partial \rho}{\partial y} U_y + \frac{\partial \rho}{\partial z} U_z \quad (15)$$

De l'équation de continuité (9) nous aurons :

$$-\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial(\rho U_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho U_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho U_z)}{\partial z} \quad (16)$$

Des équations (10),(11),(12)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho U_x}{\partial x} + \frac{\partial \rho U_y}{\partial y} + \frac{\partial \rho U_z}{\partial z} = \frac{d\rho}{dt} \quad (17)$$

C'est à dire on obtient :

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \left(\frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_y}{\partial y} + \frac{\partial U_z}{\partial z} \right) = 0 \quad (18)$$

Les équations (9) et (18) sont appelées les équations de continuité qui expriment ainsi la conservation de masse .

Dans le cas d'un fluide incompressible (eau) , la masse volumique est constante $\rho = \text{constante}$ et $\frac{d\rho}{dt} = 0$ et l'équation de continuité s'écrit :

$$\left(\frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_y}{\partial y} + \frac{\partial U_z}{\partial z} \right) = 0 \quad (19)$$

Chaque terme de cette somme caractérise la vitesse du changement de segment élémentaire , à la direction correspondante . La somme des termes représentant la vitesse du changement relatif du volume élémentaire d'un fluide est appelée la divergence ou séparation du vecteur de la vitesse . La divergence est donc la valeur scalaire de :

$$\text{div} \mathbf{U} = \left(\frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_y}{\partial y} + \frac{\partial U_z}{\partial z} \right) \quad (20)$$

En notation vectorielle , l'équation de continuité s'écrit : $\text{div}(\rho \vec{v}) = \frac{d\rho}{dt}$

(21)

En résumé l'équation de continuité exprime l'égalité de la variation de la masse du fluide dans un volume élémentaire et la différence des quantités de fluide entrant et sortant pendant le même temps .

Dans le cas d'un écoulement permanent la masse volumique (ρ) en un point ne dépend pas du temps et l'équation (21) devient alors en notation vectorielle :

$$\text{div}(\rho \vec{v}) = 0 \quad (22)$$

Et comme dans les liquides incompressibles la masse volumique (ρ) est constante en tous les points du système , donc l'équation (22) devient :

$$\text{div}(\vec{v}) = 0 \quad (23)$$

Pour arriver à l'équation de Laplace on va simplifier notre raisonnement en disant simplement qu'il y a la fonction ϕ : potentiel de la vitesse , avec :

$$U_x = -\frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (24)$$

$$U_y = -\frac{\partial \phi}{\partial y} \quad (25)$$

$$U_z = -\frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (26)$$

Comme $\frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_y}{\partial y} + \frac{\partial U_z}{\partial z} = 0$

En remplaçant U la vitesse dans les équations (24) (25) et (26) nous aurons :

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (27)$$

L'équation (27) s'appelle l'équation de Laplace .

Comme la vitesse $V=U_x = -K \frac{dh}{dx} = -\frac{\partial(Kh)}{\partial x}$ (28)

$$U_y = -K \frac{dh}{dy} = -\frac{\partial(Kh)}{\partial y} \quad (29)$$

$$U_z = -K \frac{dh}{dz} = -\frac{\partial(Kh)}{\partial z} \quad (30)$$

$$\phi = Kh \quad (31)$$

h est l'énergie potentielle unitaire

$$h = z + \frac{p}{\rho g} \quad \text{charge piézométrique}$$

Comme K (perméabilité) dans un milieu restreint est constante donc l'équation de Laplace ou Laplacien devient :

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (32)$$

Régime de non équilibre ou régime transitoire :

Méthode de THEIS :

L'équation de continuité de l'écoulement, compte tenu de la compressibilité de l'eau et des terrains est de la forme :

$$\left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) T = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1) \quad \text{par analogie à l'équation de la chaleur :}$$

propagation de la chaleur (température) en régime transitoire.

Où S est le coefficient d'emmagasinement = $S = m.e.\gamma \left(\beta + \frac{\alpha}{m} \right)$

$S \frac{\partial h}{\partial t}$ = variation de la réserve de la quantité d'eau existante dans le volume considéré.

T est la transmissivité = K.e

On peut transmettre l'équation(1) à l'eau en régime permanent :

Condition aux limites d'application de l'équation :

- 1- couche aquifère est homogène, isotrope et de même épaisseur dans toute la zone influencée par le pompage
- 2- nappe d'extension latérale infinie
- 3- le puits est parfait (complet) donc écoulement bidimensionnel

$$\left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) T = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2)$$

- 4- rayon du puits (r_p) négligeable
- 5- les épontes de la nappe sont imperméables
- 6- la libération de l'eau par le milieu poreux consécutivement à une baisse de pression est instantanée

- 7- le débit pompé est constant
- 8- la nappe est initialement au repos.

En coordonnées polaires et en symétrie axiale, l'axe oy coïncide avec l'axe du puits et en remplaçant x par r on a :

$$\Delta h = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial(r \frac{\partial h}{\partial r})}{\partial r} \Rightarrow \frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial r} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} = \Delta h \quad (3)$$

$$\text{Comme } \partial h = \partial s \Rightarrow \frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + \frac{\partial s}{\partial r} \cdot \frac{1}{r} = \frac{S}{T} \frac{\partial s}{\partial t} \quad (4)$$

par intégration la solution de l'équation :

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \int_0^t \frac{e^{-\frac{r^2 S}{4Tt}}}{t} dt \quad \text{Cette fonction peut être calculée à l'aide de la fonction exponentielle intégrale } E_i.$$

$$\text{En posant } u = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

$$\Rightarrow s = \frac{Q}{4\pi T} \int_0^t \frac{e^{-u}}{t} dt \quad (5) \quad ; \quad t = \frac{r^2 S}{4Tu} \quad \text{et} \quad \frac{dt}{t} = -\frac{du}{u}$$

$$W(u) = -E_i(-u) = \int \frac{e^{-u}}{u} du$$

$$\int \frac{e^{-u}}{u} du = \int \frac{du}{u} + \int \frac{(e^{-u} - 1)}{u} du$$

$$\int \frac{du}{u} = Lnu$$

$$\int \frac{(e^{-u} - 1)}{u} du = -u + \frac{u^2}{2.2!} - \frac{u^3}{3.3!} + \dots + \frac{(-u)^n}{n.n!}$$

$W(u) = -0.5772 - Lnu + u - \frac{u^2}{2.2!} + \dots - \frac{(-u)^n}{n.n!}$ Donc en remplaçant $W(u)$ par cette valeur dans l'équation (5) on a :

$$s = \frac{Q}{4\pi T} (-0.5772 - Ln(\frac{r^2 S}{4Tt}) + \frac{r^2 S}{4Tt} - \frac{1}{2.2!} (\frac{r^2 S}{4Tt})^2 + \frac{1}{3.3!} (\frac{r^2 S}{4Tt})^3 \dots)$$

Les valeurs de $W(u)$ en fonction de u sont données par une table ou par un graphique à l'échelle log-log.

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (6)$$

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (7)$$

$$\text{D'où } \log s = \log(W(u)) + \log \frac{Q}{4\pi T} \quad (8)$$

$$\log \frac{r^2}{t} = \log u + \log \frac{4T}{S} \quad (9)$$

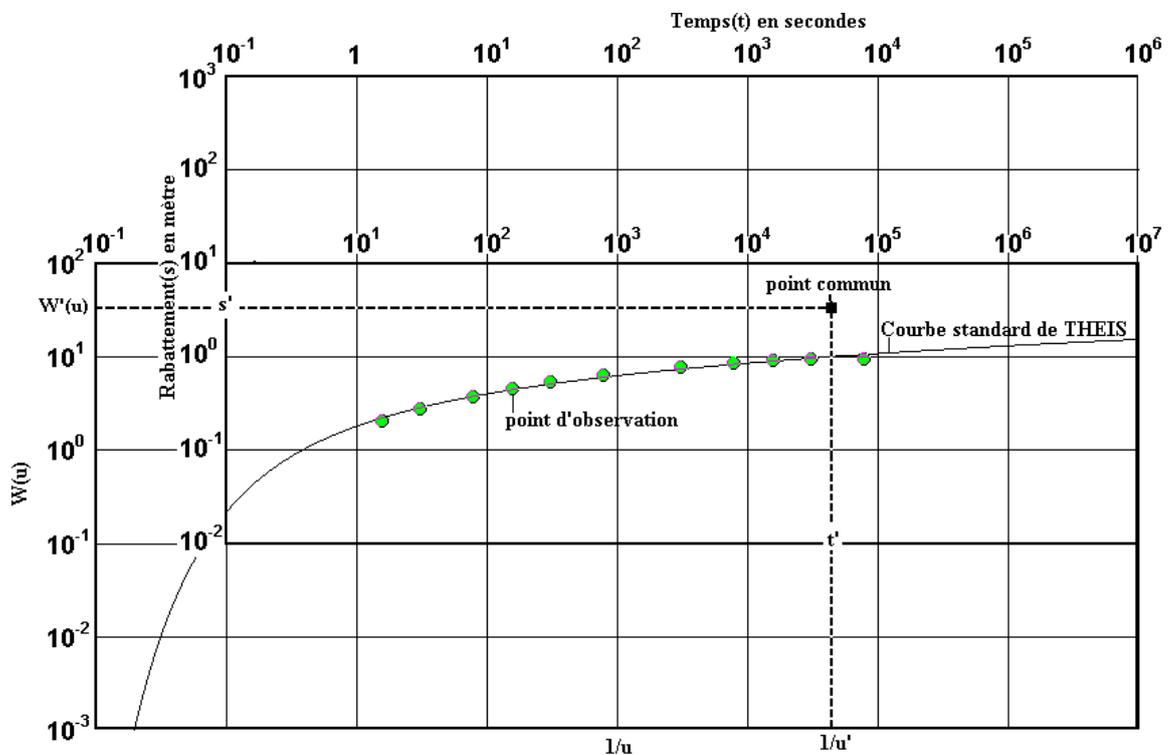
$$\text{Ou } \log \frac{1}{t} = \log u + \log \frac{4T}{r^2 S} \quad (10)$$

$\log \frac{Q}{4\pi T}$, $\log \frac{4T}{S}$ et $\log \frac{4T}{r^2 S}$ étant des constantes.

Mode opératoire :

Pour déterminer T et S THEIS utilise la méthode graphique de superposition suivante :

- on construit la courbe $W(u)$ en fonction de u en coordonnées bi-logarithmiques on obtient ce qu'on appelle la courbe standard
- on construit par ailleurs la courbe du rabattement s en fonction de r^2/t (ou de $1/t$ dans le cas où il n'y a qu'un seul puits d'observation) sur papier bi-logarithmique de même dimension que celui utilisé pour la courbe standard
- si le débit est constant, les équations ci-dessus montrent que $W(u)$ est une fonction de u de la même façon que s est une fonction de r^2/t ou de $1/t$. Il sera donc possible de superposer la courbe des données $\log s = f(\log r^2/t)$ ou $\log s = f(\log 1/t)$ avec la courbe standard en maintenant les axes de coordonnées des deux courbes parallèles, de telle façon que les données coïncident au mieux avec la courbe standard.
- un point commun appelé « Match Point », choisi arbitrairement sur la partie commune des deux courbes, détermine les valeurs corrélatives de s , $W(u)$, u , et r^2/t (ou $1/t$).
- en reportant ces valeurs dans (6) et (7), on déduit les valeurs de T et S connaissant le débit Q (et la distance).



Détermination des paramètres hydrodynamiques par la méthode de THEIS

Remarque :

De l'équation $u = \frac{r^2 S}{4Tt}$ on peut tirer: $\frac{1}{u} = \frac{4Tt}{r^2 S}$ donc $\log \frac{1}{u} = \log t + \log \frac{4T}{r^2 S}$

En faisant le même raisonnement que précédemment, on voit que l'on peut superposer les deux diagrammes:

$\log W(u)$ En fonction de $\log \frac{1}{u}$ et $\log s$ en fonction de $\log t$.

Cette manière de d'opérer nécessite la construction de la courbe $\log s = f(\log t)$ plus facile et plus représentative que les courbes $\log s = f(\log 1/t)$ ou $\log s = f(\log r^2/t)$.

Comme $\log 1/u = -\log u$, la courbe $W(u) = f(u)$ par rapport à la droite $u = 1$ parallèle à l'axe de $W(u)$.

Méthode d'approximation logarithmique ou méthode semi-logarithmique de JACOB:

L'équation de THEIS s'écrit :

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left(-0.5772 - \text{Ln}\left(\frac{r^2 S}{4Tt}\right) + \frac{r^2 S}{4Tt} - \frac{1}{2.2!} \left(\frac{r^2 S}{4Tt}\right)^2 + \frac{1}{3.3!} \left(\frac{r^2 S}{4Tt}\right)^3 \dots \right)$$

Avec $u = \frac{r^2 S}{4Tt}$

Pour les petites valeurs de u , c'est à dire r petit (piézomètre très proche du puits de pompage) ou t **grand** (pompage de longue durée). La série

$\left(\frac{r^2 S}{4Tt} - \frac{1}{2.2!} \left(\frac{r^2 S}{4Tt}\right)^2 + \frac{1}{3.3!} \left(\frac{r^2 S}{4Tt}\right)^3 \dots\right)$ Devient négligeable par rapport au terme $\text{Ln}u$, et

l'on peut écrire :

$$s = \frac{Q}{4\pi T} (-0.5772 - \text{Ln}u)$$

Sachant que $0.5772 = \text{Ln} 1.78$

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left(\text{Ln} \frac{1}{u} - \text{Ln} 1.78 \right)$$

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left(\text{Ln} \frac{4Tt}{r^2 S} \times \frac{1}{1.78} \right)$$

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left(\text{Ln} \frac{2.25Tt}{r^2 S} \right)$$

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \text{Ln} \frac{2.25Tt}{r^2 S} \Rightarrow s = \frac{2.3Q}{4\pi T} \log_{10} \frac{2.25Tt}{r^2 S}$$

$$s = \frac{0.183Q}{T} \log_{10} \frac{2.25Tt}{r^2 S} \text{ (JACOB)}$$

Conditions aux limites d'application :

L'équation de Jacob est valable pour toutes les conditions de THEIS + $u \leq 10^{-2}$.

Mode opératoire:

- on construit sur un diagramme semi-logarithmique la courbe $s = f(\log t)$ (ou si l'on a plusieurs points d'observation on peut utiliser $s = f(\log t/r^2)$).
- A débit constant, cette courbe est une droite d'équation:

$$s = \frac{0.183Q}{T} \log t + \frac{0.183Q}{T} \log \frac{2.25T}{r^2 S} \Rightarrow s = ax + \text{const} \tan te\left(\frac{0.183Q}{T} \log \frac{2.25T}{r^2 S}\right)$$

Ou $s = \frac{0.183Q}{T} \log \frac{t}{r^2} + \frac{0.183Q}{T} \log \frac{2.25T}{S} \Rightarrow s = ax + \text{const} \tan te\left(\frac{0.183Q}{T} \log \frac{2.25T}{S}\right)$

- la pente a de cette droite = $\frac{0.183Q}{T}$ permet de calculer la transmissivité

$$T = \frac{0.183Q}{a}$$

$$a = \frac{\Delta s}{\Delta \log t} = \frac{s_2 - s_1}{\log t_2 - \log t_1} \Rightarrow \log \frac{t_2}{t_1} = 1 \text{ pour un cycle logarithmique} \Rightarrow T = \frac{0.183Q}{a}$$

Si la droite représentative $s = f(\log t)$ coupe l'axe des temps au temps t_0 , on sait que pour $t = t_0$ $s = 0$. Or quand $s = 0$, $\frac{0.183Q}{a} \neq 0 \quad \forall t$; donc

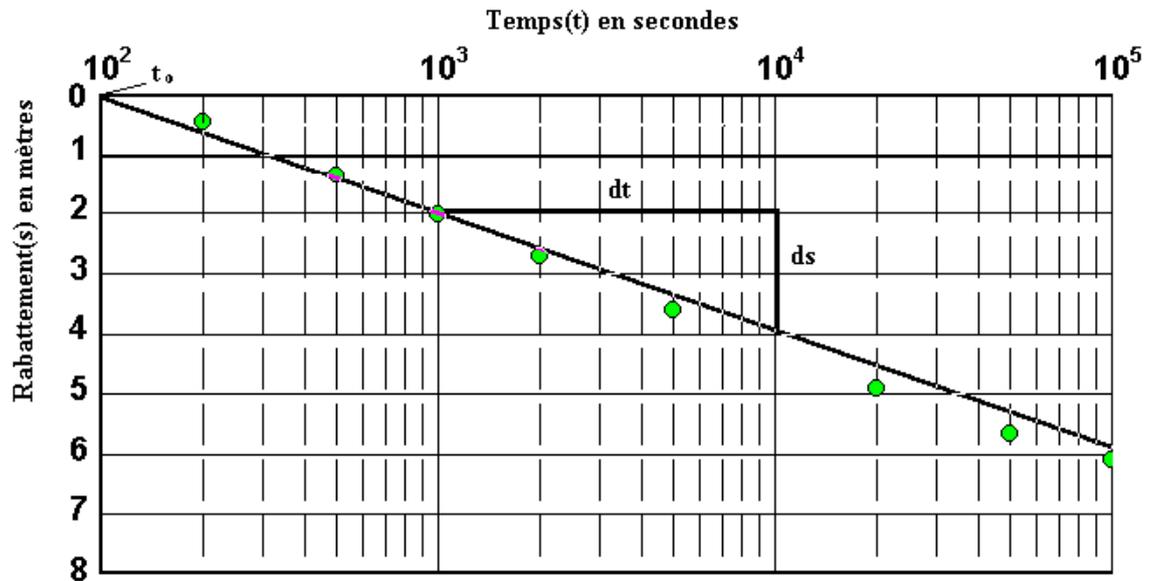
$$\log \frac{2.25Tt_0}{r^2 S} = 0 \Rightarrow \log \frac{2.25Tt_0}{r^2 S} \log 1 \Rightarrow \frac{2.25Tt_0}{r^2 S} = 1 \Rightarrow S = \frac{2.25Tt_0}{r^2}$$

La détermination graphique de t_0 permet, connaissant T de faire un calcul rapide du coefficient d'emmagasinement S.

Remarque :

Au lieu de construire la courbe $s = f(\log t)$ on peut construire l'une des 03 autres courbes suivantes :

1. $\frac{s}{Q} = f(\log t) \Rightarrow T = \frac{0.183}{a}$ et $S = \frac{2.25Tt_0}{r^2}$
2. $s = f\left(\log \frac{t}{r^2}\right) \Rightarrow T = \frac{0.183Q}{a}$ et $S = 2.25Tt_0$
3. $\frac{s}{Q} = f\left(\log \frac{t}{r^2}\right) \Rightarrow T = \frac{0.183}{a}$ et $S = 2.35Tt_0$



● point d'observation

Transmissivité(m²/s) = $2,34 \times 10^{-3}$ Coefficient d'emménagement = $4,70 \times 10^{-5}$

Détermination des paramètres hydrodynamiques par la méthode de JACOB-COOPER

Etude théorique de la remontée :

L'analyse mathématique du phénomène physique de l'effacement du cône de dépression à l'arrêt du pompage peut être réalisée en appliquant le principe de superposition des écoulements, principe qui découle de la forme linéaire de la loi de Darcy.

Supposons qu'un débit +Q est pompé jusqu'à un instant t où le pompage est arrêté. On peut imaginer que l'ouvrage (forage) continue à débit +Q mais que cette quantité d'eau est reversée instantanément dans le forage, comme si, un sondage absorbant le débit -Q se superposait simultanément à l'écoulement précédent. Si t est le temps écoulé depuis le début de pompage et t' le temps écoulé depuis l'arrêt, on peut écrire en appliquant la formule d'approximation logarithmique:

$$\text{Forage avec } +Q \quad (1) \quad s = \frac{0.183Q}{T} \log \frac{2.25Tt}{r^2 S}$$

$$\text{Forage correspondant à } -Q \quad (2) \quad s = \frac{0.183Q}{T} \log \frac{2.25Tt'}{r^2 S}$$

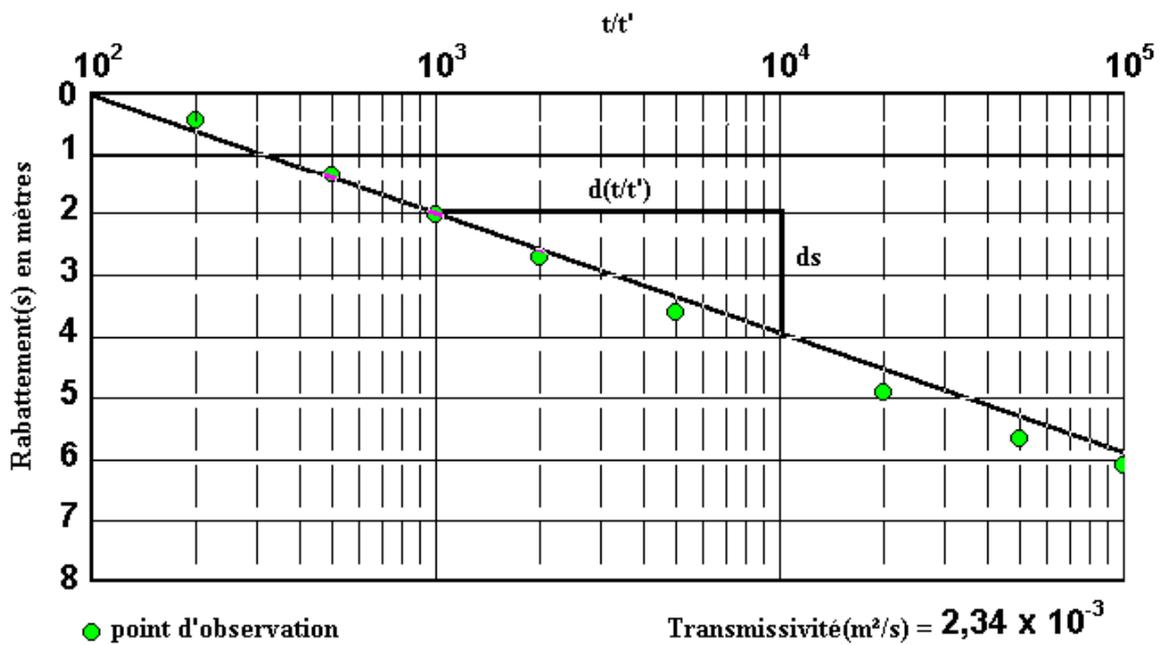
Le rabattement résultant s'obtient par addition des équations (1) et (2)

$$s = \frac{0.183Q}{T} \left(\log \frac{2.25Tt}{r^2 S} - \log \frac{2.25Tt'}{r^2 S} \right)$$

$$(3) \quad s = \frac{0.183Q}{T} \log \frac{t}{t'}$$

Cette formule n'est valable que pour les valeurs de t et t' assez grandes et des valeurs de r faibles. On a donc intérêt à observer la remontée sur des piézomètres proches du captage ou sur le puits lui même.

La pente de la droite : $a = \frac{ds}{d(\log \frac{t}{t'})} = \frac{0.183Q}{T} \Rightarrow T = \frac{0.183Q}{a}$

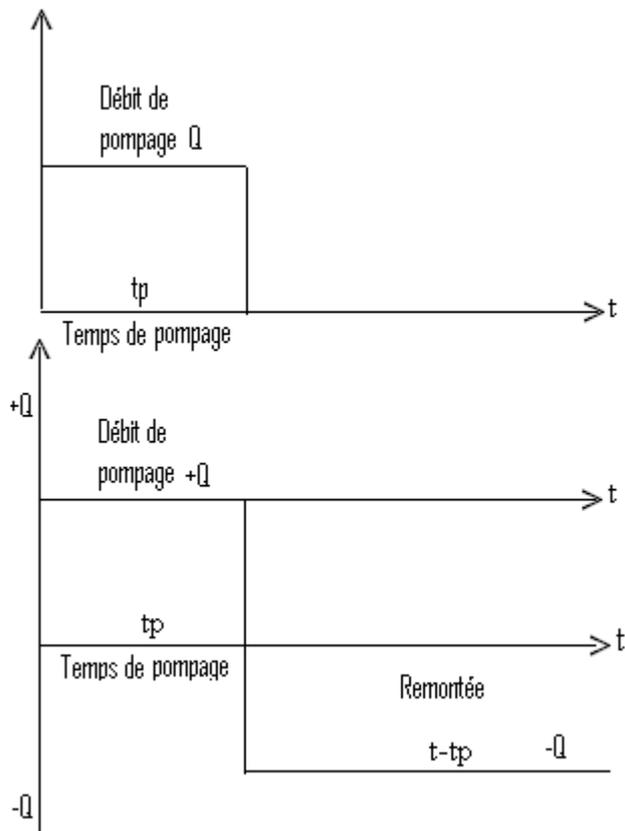


Détermination de la transmissivité pendant la remontée

S n'apparaît plus dans la formule(3), la courbe de remontée est donc indépendante de S.

Rabattement résiduel :

Schéma ci-dessous



$$\text{De } t=0 \text{ à } t_p \quad s = \frac{0.183Q}{T} \log \frac{2.25Tt}{r^2S}$$

$$\text{De } t_p \text{ à } \infty \quad s = \frac{0.183Q}{T} \log \frac{2.25Tt}{r^2S} + s = \frac{0.183(-Q)}{T} \log \frac{2.25T(t-t_p)}{r^2S}$$

$$s = \frac{0.183Q}{T} \log \frac{t}{t-t_p} \quad \text{ou} \quad s = \frac{0.183Q}{T} \log \frac{t}{t'}$$

$$\frac{t}{t-t_p} \Rightarrow \text{On peut également l'écrire } \frac{t-t_p+t_p}{t-t_p} \Rightarrow \frac{t-t_p}{t-t_p} + \frac{t_p}{t-t_p}$$

$$\text{Donc } s = \frac{0.183Q}{T} \log\left(1 + \frac{t_p}{t-t_p}\right) = \frac{0.183Q}{T} \log\left(1 + \frac{t_p}{t'}\right)$$

Étude du puits

I-Introduction :

Il s'agit en général de déterminer le débit optimum du puits avant son exploitation. Cet optimum dépend de critères propres à chaque utilisateur et de l'efficacité du développement du forage.

II-Effet de capacité (effet du puits) :

Les puits de pompage ont un certain rayon et une certaine hauteur et au cours du pompage une partie du débit prélevé provient donc directement du puits sans avoir transité dans la couche comme le supposent les formules et les modèles d'interprétation. L'inverse de ce phénomène se produit après l'arrêt de pompage lors de la remontée (et effet de post production). Il s'ensuit donc une erreur systématique qui limite la validité des formules d'interprétation. Il a été démontré que cette limite de validité s'exprime :

1. $\frac{\Delta s}{s} \leq 0.02$ C'est à dire que le rabattement (s) est donné à 2% près dès que le temps de

pompage est supérieur à la valeur suivante :

$$t_c = \frac{25r_p^2}{T} \text{ Pour le puits de pompage}$$

$$t_c = \frac{1}{2} \frac{25r_p^2}{T} \left(\frac{s+s'}{s} \right) \text{ Pour les piézomètres}$$

Où T : transmissivité en m²/s

r_p : rayon du puits en m

s : rabattement observé au puits

s' : rabattement observé au piézomètre au même instant.

Le t_c ne peut être calculé qu'après avoir estimé la transmissivité par un choix judicieux sur la courbe s = f (log t). Pour les piézomètres le rapport $\frac{s+s'}{s}$ doit être constant en

procédant par tâtonnement. On procède comme suit :

- on calcule d'abord t_c pour le puits de pompage
- ensuite on calcule $\frac{s+s'}{s}$ pour chaque piézomètre en prenant plusieurs valeurs de s et de s' groupées autour de t_c calculé précédemment jusqu'à ce que l'on trouve plusieurs rapports $\frac{s+s'}{s}$ quasi-constants.

2. L'expérience a montré que l'effet de capacité devient négligeable lorsque le débit fourni par le puits est inférieur à 2% du débit d'exploitation. On procède de la manière suivante :

$$Q_p = \pi \cdot r_p^2 \frac{ds}{dt} \quad \text{Où } Q_p : \text{débit du puits en m}^3/\text{s}$$

r_p : rayon du puits en m

$\frac{ds}{dt}$: vitesse de rabattement en m/s

ds et dt sont prises sur la courbe du rabattement en fonction du temps jusqu'à ce que Q_p soit inférieur à 2% du débit d'exploitation(Q_{ex}). Quand Q_p < 2% Q_{ex} l'effet de capacité est négligeable.

Les deux méthodes citées présentent l'inconvénient d'être réalisées par tâtonnement donc un temps de réalisation assez long. Une troisième méthode plus facile à utiliser permet une estimation rapide du temps à partir duquel l'effet du puits est négligeable. Elle consiste à :

3. calculer V où $V = \pi \cdot r_p^2 \cdot h$ (V : volume d'eau dans le puits en m^3 et h : représente la hauteur mouillée dans le puits en m)

- déduire t_c connaissant le débit d'exploitation (Q_{ex})

$$t_c = V/Q_{ex} = \frac{m^3}{\frac{m^3}{s}} = s \text{ (seconde)}$$

III- Pertes de charge

La réalisation technique du forage et du dispositif de captage perturbe l'écoulement au voisinage de l'ouvrage. Ces différentes perturbations entraînent l'apparition pendant le pompage, d'une perte de charge supplémentaire qui s'ajoute à la perte de charge théorique qui sera imposée par le milieu poreux supposé capter dans des conditions idéales.

Le rabattement réel s_r observé lors du pompage dans un puits en nappe captive sera égal à :

$$s_r = s_{th} + pdc$$

s_{th} : Rabattement théorique pour le puits parfait

pdc : Pertes de charge due au captage.

Le terme de pdc se compose le plus souvent comme suit :

$$pdc = AQ + CQ^2$$

AQ = pertes de charge linéaire (exemple : colmatage...)

CQ^2 = pertes de charge quadratique (exemple : mise en vitesse anormales...)

Donc en remplaçant pdc on a :

$$s_r = s_{th} + AQ + CQ^2$$

Si l'on pompe à débit constant la courbe des rabattements observée dans le puits sera translatée d'une quantité égale à pdc par rapport à la courbe de rabattement théorique sans que la pente change.

Contrairement à l'effet de capacité du puits qui est un phénomène variable dans le temps et qui provoque la déformation des courbes aussi bien dans le puits de pompage que dans les piézomètres, les pertes de charge au puits ne concernent que le puits de pompage lui-même et sont constantes dans le temps sauf dans le cas d'un développement progressif du forage au cours de l'exploitation. On signale que les rabattements des piézomètres proches du puits de pompage peuvent également être perturbés par colmatage.

Détermination des pertes de charges quadratiques

La détermination sur la relation $s = f(Q)$ pour divers régimes de pompage. L'idée de base est que tous les rabattements réels stabilisés mesurés dans un forage peuvent se décomposer en deux termes :

$s_r = BQ + cQ^2$, dans cette forme B intègre aussi bien les effets de l'écoulement selon DARCY dans la couche non perturbée que les effets de pertes de charge anormales dues également au colmatage comme AQ mais toujours linéaire. Pratiquement il

suffit d'avoir plusieurs couples (au moins trois) « rabattement-débit » en régime stabilisé (ou pris après des temps de pompages suffisamment longs et égaux, si le régime stabilisé n'est pas atteint). On construit la droite $\frac{s}{Q} = f(Q)$ pour déterminer

B ordonnée à l'origine et c de la droite.

$\frac{s}{Q}$ Étant le rabattement spécifique, c'est la hauteur du rabattement mesuré dans le puits rapportée au débit pompé. Il est exprimé en, $\frac{m}{m^3/h}$ et correspond à l'équation de

C.E JACOB qui s'écrit : $\frac{s}{Q} = B + cQ$ c'est l'équation d'une droite qui met en

évidence certaines formulations simples de la relation débit par rapport au rabattement. WALTON a proposé une méthode qui permet de caractériser l'état du puits par la valeur de c .

$c < 675 \text{ m}/(\text{m}^3/\text{s})^2 \Rightarrow$ bon puits, le développement est correcte.

$675 < c < 1350 \text{ m}/(\text{m}^3/\text{s})^2 \Rightarrow$ puits médiocre

$c > 1350 \text{ m}/(\text{m}^3/\text{s})^2 \Rightarrow$ puits colmaté ou détérioré

$c > 5400 \text{ m}/(\text{m}^3/\text{s})^2 \Rightarrow$ puits irrécupérable

Exemple d'application :

Un pompage par paliers a donné les valeurs suivantes :

Débit (m^3/H)	Rabattement stabilisé(m)	Rabattement spécifique ($\text{m}/\text{m}^3/\text{H}$) (s/Q)
30	1.77	59×10^{-3}
60	3.60	60×10^{-3}
90	5.49	61×10^{-3}
130	8.06	62×10^{-3}
150	10	66×10^{-3}
160	12	75×10^{-3}

SCHEMA

$$B = 58 \times 10^{-3}$$

$$c = 2.85 \times 10^{-5} \text{ m}/(\text{m}^3/\text{H})^2 = 369.36 \text{ m}/(\text{m}^3/\text{s})^2$$

$c = 369.36 \text{ m}/(\text{m}^3/\text{s})^2$: le puits est bon où le développement est correct.

B et c étant connus, on évalue ensuite le terme de pertes de charge quadratiques pour divers régimes de pompage. Cette procédure ne nous renseigne aucunement sur les pertes de charge linéaires comme le terme AQ .

$$S/Q = CQ^2 + BQ ; s = CQ + B$$

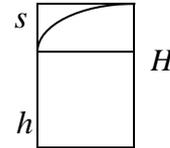
Calcul des pertes de charge linéaires :

Si on possède au moins deux piézomètres, on construit la droite $s = f(\log r)$ (où s représentent les rabattements stabilisés et r les distances aux piézomètres) et on déduit s_p comme indiqué sur graphique :

SCHEMA pour déterminer le débit critique $s=f(Q)$

I. Courbe caractéristique et débit critique :

Pour l'opérateur, il est nécessaire de connaître le débit possible pour un rabattement donné. Cette courbe du débit en fonction du rabattement est appelée courbe caractéristique du puits. Une telle courbe ne se conçoit que dans le cas des rabattements constants à un débit constant. Elle doit donc représenter les conditions de pompage en régime permanent ce qui nous amène à utiliser les formules de DUPUIT.



* Pour 1 nappe libre :

$$Q = 1,366k \frac{H^2 - h^2}{\log \frac{R}{r}} = 1,366k \frac{(H + h)s}{\log \frac{R}{r}}$$

$$H + h = 2H - s$$

$$H^2 - h^2 = (H + h)(H - h)$$

$$\frac{1,366k}{\log \frac{R}{r}} = C$$

$$\Rightarrow Q = C(2H - s)s$$

Cette équation est du second degré à coefficient constant est représentée par une parabole. Le débit est proportionnel au carré du rabattement.

Cependant, à ces considérations théoriques, il convient d'ajouter le rabattement occasionné par la résistance spécifique aux crépines et par l'écoulement turbulent qui se produit au voisinage immédiat du puits, (sursaut pour des débits importants).

On admet que ce rabattement supplémentaire suit une loi de la forme $s = bQ^n$

Cette courbe permet à l'utilisateur de connaître, d'une part les possibilités maxima du puits, d'autre part le type de pompe qu'il aura intérêt à utiliser (suivant le Q donc prix de revient de l'exploitation...).

On définit également le débit critique à partir duquel l'accroissement du rabattement devient inacceptable en fonction du pompage.

Détermination de la courbe caractéristique

On construit la courbe par des points. Il convient de pomper à débit constant jusqu'à l'obtention de la stabilisation. Au cours d'un même pompage, on effectue divers « paliers » suivant deux possibilités :

1) Procéder par débits croissants en attendant à chaque fois la stabilisation.

Ceci permet de suivre l'évolution sans risquer de dénoyer la pompe par un débit trop important imposé arbitrairement. En terrain meuble (alluvionnaire par exemple), un accroissement progressif de la vitesse de l'eau provoque un arrangement des particules suivant un filtre naturel qui participe au bon fonctionnement du puits.

2) Il est possible de procéder par débits décroissants. Cette méthode présente l'intérêt en milieu fissuré (craie, calcaire...).

Exemple :

s(m) Rabattements stabilisés	Q (m ³ /h)
1.75	30
3.20	55
5.30	90
7.40	120
8.20	130
9.20	140
10	150

Déterminer le débit critique.

Droite rabattement – débit spécifique pour déterminer la nature des nappes (pas indispensable de faire les paragraphes soulignés)

SCHEMA

(I)- droite parallèle à l'axe des rabattements c'est à dire que le débit spécifique est constant, c'est le cas des nappes captives (artésiennes ou à fortes pressions) où le rabattement est faible.

(II)- Le débit spécifique diminue en fonction du rabattement, c'est le cas de nappe libre ou nappe captive à faible pression à et fort rabattement.

(III)- C'est le cas d'une nappe captive ou artésienne à différents gradients hydrauliques.

(IV)-Cas d'un essai de débit défectueux.

VI- Détermination de la résistance aux crépines :

De la forme de la courbe caractéristique du puits, on peut déduire l'influence de l'importance de l'obstacle à l'écoulement que constitue la crépine, voire même le massif filtrant qui l'entoure. Ce phénomène se déclare dès que le régime d'écoulement devient turbulent et correspond à une perte de charge d'origine cinétique. Sa connaissance peut nous renseigner sur l'état du tubage dans le cas d'un ouvrage ancien ou sur l'efficacité du développement du puits pour un ouvrage neuf.

On estime que le rabattement supplémentaire ainsi provoqué est représentable par la formule :

$$\underline{\underline{s' = bQ^n}}$$

dans le cas d'une nappe libre, on a vu que la courbe du rabattement en fonction du débit est de la forme parabolique. Pour les nappes captives, nous pouvons écrire que le rabattement en fonction du débit est de la forme :

$$\underline{\underline{s = aQ + bQ^n}} \quad (1)$$

Théoriquement, il suffit de trois couples de valeurs Q et s pour déterminer les trois inconnues, mais cela nous entraîne très loin. S. RAMON ingénieur à l'ENSG(1967) à imaginé une méthode graphique approchée qui permet de déterminer les inconnues avec une précision suffisante. Elle consiste à éliminer successivement a et b pour des constructions graphiques simples :

Méthodologie On peut écrire:

$$\underline{\underline{\frac{s}{Q} = a + bQ^{n-1}}} \quad (2)$$

Puis dérivez cette expression par rapport à Q

$$\underline{\underline{\frac{ds}{dQ} = (n-1)bQ^{n-2}}} \quad (3)$$

Cette expression est représentable par une droite de pente (n-2) en graphique Log-log car :

$$\underline{\underline{\log \frac{ds}{dQ} = \log(n-1)b + (n-2) \log Q}} \quad (4)$$

La fonction obtenue est de la forme :

$$\underline{\underline{\log y = c + (n-2) \log Q}}$$

$y = \frac{ds/Q}{dQ}$ Est la pente de la tangente à la courbe caractéristique du puits $s/Q = f(Q)$

que l'on réalise graphiquement.

La précision sera donc d'autant meilleure que l'on possèdera plus de points (donc de paliers de débit), un minimum de trois points rapprochés est nécessaire pour tracer cette courbe expérimentale.

En résumé :

Le calcul de n se fait donc en cinq temps :

1- Le tracé de la courbe $s/Q = f(Q)$.

2- La mesure de la pente y des tangentes en chaque point.

3- Le report sur graphique log-log de $y = f'(Q)$

4- La lecture de la pente $n-2$ de la droite.

5- La détermination de n , $n-2 = x \Rightarrow n = 2 + x$

Lorsque la résistance aux crépines ou au voisinage immédiat de l'ouvrage est décelée et jugée trop importante, on dispose soit au développement par pistonnage dans les alluvions ou au pistonnage et curage puis acidification en terrain calcaire.

Remarque

Nappe captive $n = \frac{d \log Q}{d \log s} \geq 1$

Nappe libre $n = \frac{d \log Q}{d \log s} \geq 2$

Quand certains points ne s'alignent pas avec les autres et correspondent à des rabattements inférieurs, on peut affirmer que la stabilisation véritable n'a pas été atteinte pour ces paliers.

Pertes de charge par pénétration partielle :

Souvent le puits de pompage ne traverse pas la totalité de l'aquifère ou il n'est crépiné que sur une partie et la crépine débute soit du toit, soit au mur de l'aquifère. Il va donc se créer de pertes de charge par pénétration partielle. On peut faire la correction du rabattement comme suit :

$$s_{\text{complet}} - s_{\text{partiel}} = F \frac{Q}{4\pi T}$$

F est une fonction tabulée en fonction de $\frac{\pi.r}{e}$ et P ($P = \frac{e_{cr}}{e}$: épaisseur crépinée, e : épaisseur totale).

Méthode de détermination des pertes de charge par pénétration partielle :

1- on calcule $P = \frac{e_{cr}}{e}$

2- on détermine $\frac{\pi.r}{e}$

3- on déduit F à partir de l'abaque

4- on calcule les pertes de charge $s_{\text{complet}} - s_{\text{partiel}} = F \frac{Q}{4\pi T}$

$s_{complet} - s_{partiel}$ est la correction de rabattement c'est à dire la différence entre le rabattement observé ($s_{partiel}$) et le rabattement $s_{complet}$ que l'on aurait mesuré si le puits de pompage avait traversé la totalité de la nappe.

Au cours d'un pompage d'essai en régime transitoire

$$s(\text{rabattement}) = \frac{0.183Q}{T} \log \frac{2.25Tt}{r^2S} + pdc_{totale}$$

$pdc_{totale} = pdc$ due à la pénétration partielle + pdc due au colmatage + BQ^2 (pdc due à la vitesse donc aux crépines)

pdc : perte de charge.

Puits traversant entièrement une nappe libre

Conditions aux limites :

- 9- couche aquifère est homogène, isotrope et de même épaisseur dans toute la zone influencée par le pompage
- 10- nappe d'extension latérale infinie
- 11- le puits est parfait (complet) donc écoulement bidimensionnel
- 12- rayon du puits (r_p) négligeable
- 13- les épontes de la nappe sont imperméables dans le cas d'une nappe captive ou nappe à surface libre pour la nappe libre
- 14- l'écoulement vers le puits est en régime permanent
- 15- le débit pompé est constant
- 16- absence d'effets capillaires sensibles
- 17- régime laminaire
- 18- la nappe est initialement au repos.

Schéma

$$Q = SV$$

$$S = 2\pi \cdot xy$$

$$V = Ki = K \frac{dy}{dx}$$

$$Q = 2\pi \cdot Kxy \frac{dy}{dx} \quad (1)$$

$$\int Q \frac{dx}{x} = \int 2\pi \cdot Ky dy \quad (2)$$

$$Q \ln x = \frac{2\pi \cdot K}{2} y^2 + C \quad (3)$$

$$C = QLnx - \pi \cdot Ky^2 \quad (4)$$

Pour un cylindre infiniment rapproché de la paroi du puits $x = r_p$ et $y = h$ et l'équation devient :

$$C = QLnr_p - \pi \cdot Kh^2 \quad (5)$$

$$\begin{aligned}
QLnx &= \pi.Ky^2 + QLn r - \pi.Kh^2 \\
QLnx - Lnr &= \pi.K(y^2 - h^2) \\
Q &= \pi.K \frac{y^2 - h^2}{Ln x / r_p} \quad (6)
\end{aligned}$$

De la même façon, quand le cylindre est infiniment rapproché de la paroi de la tranchée d'alimentation $x = R$ et $y = H$

$$\Rightarrow Q = \pi.K \frac{H^2 - h^2}{Ln R / r_p} = \frac{\pi.K}{2.3} \frac{H^2 - h^2}{\log R / r_p} \quad (7)$$

$$Q = 1.366K \frac{H^2 - h^2}{\log R / r_p} \quad (8) \quad \text{schéma } h=H-s$$

$$H^2 - h^2 = (H + h)(H - h) = (H + h)s = (H + (H - s))s = (2H - s)s$$

$$c = \frac{1.366}{\log R / r_p} \quad Q = 1.366K \frac{(2H - s)s}{\log R / r_p}$$

La courbe est donc $Q = c(2H - s)s$

II-nappe captive

Régime permanent (fig...)

Formule de DUPUIT (cf conditions aux limites d'application)

$$Q = SV$$

$$V = Ki = K \frac{dy}{dx}$$

S : section d'écoulement

V : vitesse des filets liquides vers le puits

$S = 2\pi.xe$ les filets sont convergents dans un cylindre

$$Q = 2\pi.Ke x \frac{dy}{dx} \quad (1)$$

$$\int Q \frac{dx}{x} = \int 2\pi.Ke dy \quad (2)$$

$$Q \log_e x = 2\pi.Ke y + \text{constante} \quad (3)$$

$$c = \text{constante} = Q \log_e x - 2\pi.Ke y$$

Mais pour un cylindre infiniment rapproché de la paroi du puits

$x = r_p$ et $y = h$ r_p : rayon du puits

$$c = Q \log_e r_p - 2\pi.keh \quad (4)$$

$$Q \log_e x = 2\pi.Ke y - 2\pi.keh + Q \log_e r_p$$

$$Q \log_e x - Q \log_e r_p = 2\pi.Ke(y - h)$$

$$Q = 2\pi.Ke \frac{y - h}{\log_e x / r_p} \quad (5)$$

De la même manière pour un cylindre infiniment rapproché de la paroi d'alimentation $x = R$ et $y = H$

$$Q = 2\pi.ke \frac{H-h}{\log_e R/r_p} \quad (6)$$

$$\log_e = 2.3 \log_{10} \Rightarrow Q = 2\pi.Ke \frac{H-h}{2.3 \log R/r_p}$$

$$Q = 2.73Ke \frac{H-h}{\log R/r_p} \quad (7)$$

Q : débit constant pompé (m³/s)

e : puissance de l'aquifère(m)

H-h: rabattement s (m)

R: rayon d'action qui représente la distance du puits à partir de laquelle le fonctionnement de ce dernier n'altère plus l'état initial de la nappe(distance où le rabattement est égal à zéro) ;

K : perméabilité horizontale dans le plan de l'écoulement

Mode opératoire

Quand le gradient hydraulique du cône de dépression est constant et que l'écoulement de la nappe captive est en régime permanent, on peut identifier le rabattement stabilisé s, connaissant le débit Q, la puissance e, le rayon du puits r_p et le rayon d'action R, on peut en déduire la transmissivité T :

$T = K.e$ à partir de l'équation suivante :

$$T = \frac{Q \log R/r_p}{2.73s}$$

Cette méthode apparemment très simple, pose un problème dans la détermination du rayon d'action, généralement il est fixé d'avance, pour cette raison THIEM a eu l'idée de prendre 02 piézomètres pour calculer la transmissivité.

Méthode de THIEM

Les conditions au limites d'application de cette méthode sont les mêmes que celles de DUPUIT.

THIEM a pu démontrer que le débit peut s'exprimer par la formule suivante calquée sur celle de DUPUIT :

Schéma

$$Q = 2.73Ke \frac{(h_2 - h_1)}{\log(r_2/r_1)} \quad (1)$$

$$Q = 2.73Ke \frac{(s_1 - s_2)}{\log(r_2/r_1)} \quad \text{où} \quad Q = 2.73T \frac{(s_1 - s_2)}{\log(r_2/r_1)} \quad (2)$$

Q : débit de pompage en m³/s

$K.e = T$ (Transmissivité de l'aquifère en m³/s)

h_1 et h_2 : hauteurs de l'eau dans les piézomètres en m

r_1 et r_2 : distances aux piézomètres en m

s_1 et s_2 : rabattements stabilisés dans les piézomètres en m.

Modes opératoires :

Pour déterminer la transmissivité THIEM utilise deux modes opératoires :

1^{er} mode opératoire :

Quand le gradient hydraulique du cône de dépression est constant et que l'écoulement de la nappe est en régime permanent, on peut noter les rabattements stabilisés s_1 et s_2 , connaissant les valeurs de débit Q , les distances aux piézomètres r_1 et r_2 on peut aisément déterminer la transmissivité de la nappe à l'aide de l'équation suivante :

$$Q = 2.73T \frac{(s_1 - s_2)}{\log(r_2 / r_1)} \Rightarrow T = \frac{Q \cdot \log(r_2 / r_1)}{2.73(s_1 - s_2)}$$

Exemple d'application:

Le tableau suivant donne les rabattements observés dans divers piézomètres au cours d'un essai par pompage dans une nappe captive puissante de 10m. Le débit d'exploitation est égal à 25 l/s.

Distances aux piézomètres en m	10.00	31.60	100.00
Rabattements stabilisés en m	6.23	3.96	1.85

Si on considère les piézomètres situés à 10m et 31.6m :

$$T_1 = \frac{25 \cdot 10^{-3} \log 31.6/10}{2.73(6.23 - 3.96)} = 2.0 \times 10^{-3} m^2 / s$$

Pour les piézomètres situés à 10m et 100m :

$$T_2 = \frac{25 \cdot 10^{-3} \log 100/10}{2.73(6.23 - 1.85)} = 2.0 \times 10^{-3} m^2 / s$$

Pour les piézomètres situés à 31.6m et 100m :

$$T_3 = \frac{25 \cdot 10^{-3} \log 100/31.6}{2.73(3.96 - 1.85)} = 2.0 \times 10^{-3} m^2 / s$$

Transmissivité moyenne est de l'ordre de $2.0 \times 10^{-3} m^2/s$. $K = T/e = 0.002/10 = 0.0002 m/s$

2^{ème} mode opératoire :

- on construit sur un diagramme semi-logarithmique, la courbe $s=f(\log r)$ (où s est le rabattement stabilisé)
- on trace la droite rabattement-distance qui s'ajuste le mieux à l'ensemble des points
- on mesure la pente de cette droite (Δs) pour un cycle logarithmique et de l'équation(2) on peut en déduire la transmissivité étant donné que le débit est

$$\text{connu, comme } \log r_2/r_1 = 1 \text{ pour un cycle logarithmique } \Rightarrow T = \frac{Q}{2.73\Delta s},$$

$$\Delta s = 4.38m \quad T = \frac{25 \cdot 10^{-3}}{2.73 \times 4.38} = 2.0 \times 10^{-3} m^2 / s . \text{ Ce dernier résultat est très proche si}$$

non égal à celui de la méthode1 de THIEM.

Méthode du profil de dépression d'après JACOB :

Rayon d'action :

Etant donné que l'écoulement dans une nappe supposée parfaitement captive et infinie, est toujours transitoire, la zone d'influence est continuellement en expansion, bien que la progression puisse être très lente après une période de pompage relativement longue. Pour caractériser cette influence on considère parfois la distance théorique R à laquelle le rabattement calculé par l'équation de JACOB est nul d'où :

$$s = \frac{0.183Q}{T} \log \frac{2.25Tt}{R^2 S} = 0 \quad \text{Comme } \frac{0.183Q}{T} \neq 0 \text{ quelque soit } t \Rightarrow \frac{2.25Tt}{R^2 S} = 1$$

$$d'o\grave{u} R = 1.5\sqrt{\frac{Tt}{S}}$$

R est parfois appelé rayon d'action fictif, car pour les valeurs de $u > 10^{-2}$ où pour les faibles rabattements, l'équation de JACOB est grossièrement fautive. Il est souhaitable de calculer R par THEIS.

Equation du profil du cône de rabattement d'après JACOB :

A un instant t la différence entre les rabattements aux distances r_1 et r_2 s'écrit :

$$s_1 - s_2 = \frac{0.183Q}{T} \left(\log \frac{2.25Tt}{r_1^2 S} - \log \frac{2.25Tt}{r_2^2 S} \right)$$

$$s_1 - s_2 = \frac{0.183Q}{T} \log \frac{r_2^2}{r_1^2} = \frac{0.183Q}{T} \log \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2$$

$$s_1 - s_2 = \frac{2 \times 0.183Q}{T} \log \frac{r_2}{r_1}$$

$$\Delta s = \frac{0.366Q}{T} \log \frac{r_2}{r_1} \quad \text{Cette équation est indépendante du temps, elle permet donc de}$$

calculer T à condition d'avoir au moins deux piézomètres alignés avec le puits de pompage. L'exploration de la droite jusqu'à la valeur $s = 0$ donne la valeur du rayon d'action fictif pour le temps de pompage considéré.

Mode opératoire :

On construit sur un diagramme semi-logarithmique la courbe $s = f(\log r)$. Les distances r sont les distances de l'axe du puits de pompage jusqu'aux piézomètres. Il suffit d'avoir au moins 02 piézomètres alignés avec le forage de pompage et leurs rabattements stabilisés respectifs pour tracer cette courbe.

- pour calculer la pente de la droite Δs , on trace la droite rabattement-distance qui s'ajuste le mieux à l'ensemble des points.
- On peut alors calculer la transmissivité étant donné que le débit Q est connu et la pente est calculée par cycle logarithmique. La pente (Δs) est égale à

$$\frac{s_2 - s_1}{\log r_2 - \log r_1} = \frac{\Delta s}{\log r_2 / r_1}, \text{ Comme } \log \frac{r_1}{r_2} = 1 \text{ pour un cycle logarithmique, la}$$

pente est alors égale à Δs .

$$\Rightarrow T = \frac{0.366Q}{\Delta s}$$

Application :

Si on considère les données de l'exemple 1, ci-dessous : $Q=25l/s$

Distances aux piézomètres (m)	10	31.6	100
Rabattements stabilisés	6.23	3.96	1.85

$$\Delta s = 4.38$$

$$T = \frac{0.366 \times 25 \times 10^{-3}}{4.38} = 2.08 \times 10^{-3} m^2/s$$

schéma

Interprétation des pompages d'essai en nappe semi-captive

I-Généralités :

En pratique, il est rare que les conditions hydrogéologiques réelles soient assimilables aux conditions aux limites idéales définies par THEIS, ce qui limite beaucoup les possibilités d'application des méthodes de THEIS et de JACOB. De ce fait des schémas plus complexes ont été conçus, ainsi que des méthodes correspondantes. Trois auteurs principaux ont élaboré des méthodes d'interprétation :

- HANTUSH a tabulé les réalimentations qui stabilisent les rabattements des piézomètres.
- BOULTON a tabulé les réalimentations limitées, produites par exemples par un aquifère secondaire.
- BERKALOFF a synthétisé les deux approches pour donner des règles pratiques d'interprétation.
- Les premières simplifications ont trait aux conditions aux limites d'étanchéité des épontes de la couche aquifère, ce qui conduit à tenir compte du rôle des couches encaissantes : c'est ce qu'on appelle le phénomène de **drainance**. Ce phénomène est très fréquent dans les systèmes multicouches, ou un aquifère principal parce que plus transmissif, est captif entre des couches semi-perméables.

Les schémas d'interprétation proposés pour représenter l'influence d'un pompage dans de tels systèmes supposent maintenues, pour la couche principale, toutes les conditions de THEIS mais les conditions portant sur les épontes semi-perméables sont à ajouter.

L'introduction de ces conditions se traduit numériquement par la définition de nouveaux paramètres caractérisant le phénomène de drainance. Il s'ensuit que la forme des solutions est évidemment plus complexe. En particulier les représentations graphiques ne peuvent se faire par une courbe unique, mais par des abaques, ou même un catalogue d'abaques.

II-Nappe semi-captive : conditions aux limites

Cas d'une nappe semi-captive en communication à travers son éponte semi-perméable dont l'emmagasinement est négligeable avec une nappe à niveau d'eau constant. Dans ce schéma l'hypothèse 5 de THEIS est mise en défaut mais toutes les autres sont observées.

La réserve propre de la couche semi-perméable est négligeable devant les volumes d'eau qui la traversent. Pendant le pompage, l'écoulement dans la couche aquifère est augmenté par le débit retardé transmis verticalement par la couche semi-perméable. Ce débit est proportionnel au rabattement et il est permanent.

SCHEMA

Les paramètres définissant ce transfert d'eau sont :

$$\frac{K'}{b'} : \text{Paramètre de drainance}$$

$$B = \sqrt{\frac{T' b'}{K'}} : \text{Facteur de drainance.}$$

- a) paramètre de drainance : c'est un paramètre de la couche aquifère semi-perméable caractérisant la capacité de cette couche à transmettre de l'eau verticalement. Il se définit comme le débit qui s'écoule à travers une unité de surface limite entre la couche aquifère captée et son éponte semi-perméable(toit ou mur), pour une différence de pression unitaire entre la nappe captée (dite aussi principale) et la

nappe alimentant la drainance. Il a la dimension T^{-1} . Les valeurs de ce paramètre signalées par quelques auteurs s'échelonnent entre 10^{-7}sec^{-1} et 10^{-9}sec^{-1} .

- b) Facteur de drainance : c'est un paramètre qui caractérise les effets de drainance dans les nappes semi captives. Un facteur de drainance élevé correspond à une distance faible et inversement. En effet, il a été introduit surtout pour la commodité des calculs et ses valeurs sont rarement citées pour les autres. Il a la dimension d'une longueur L

III-Méthode bi logarithmique de HANTUSH-WALTON :

Introduction : supposons une nappe pouvant être considérée comme ayant une extension infinie, une épaisseur constante et située dans un aquifère parfaitement élastique. Provenant du toit **A REPRENDRE**

La méthode de WALTON est à utiliser en régime transitoire.

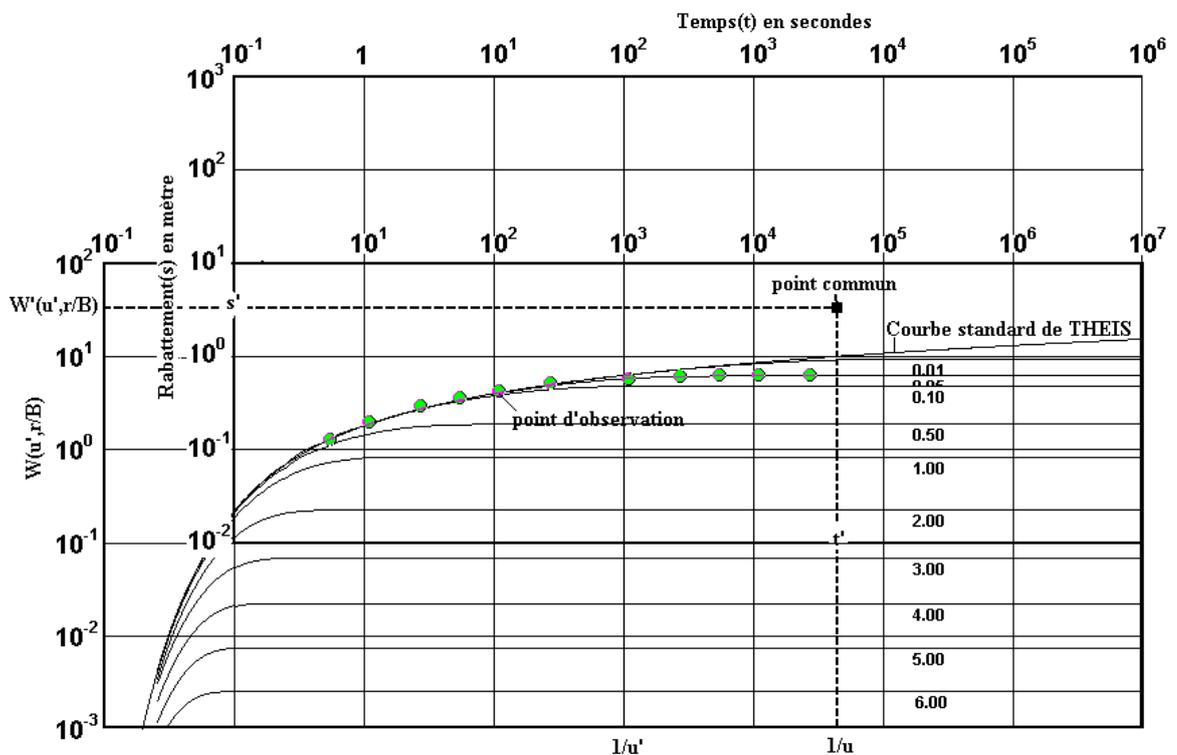
$$s = \frac{Q}{4\pi T} F(u', r/B) = \frac{0.08Q}{T} F(u', r/B)$$

Où $F(u', r/B)$ est une fonction tabulée en fonction de u' et r/B toutes les courbes se terminent par un palier horizontal, leur début étant identique à la courbe de THEIS.

La détermination des caractéristiques se fait de la manière de THEIS. $F(u', r/B)$, u' , s et t ainsi que r/B qui a permis l'ajustement des courbes, permettent de

calculer : $T = \frac{0.08Q}{s} F(u', r/B)$ $T=K.e$

$$s = \frac{4Tt}{r^2 u'} \quad B = \frac{r}{(r/B)} \quad \frac{K'}{b'} = \frac{T}{B^2}$$



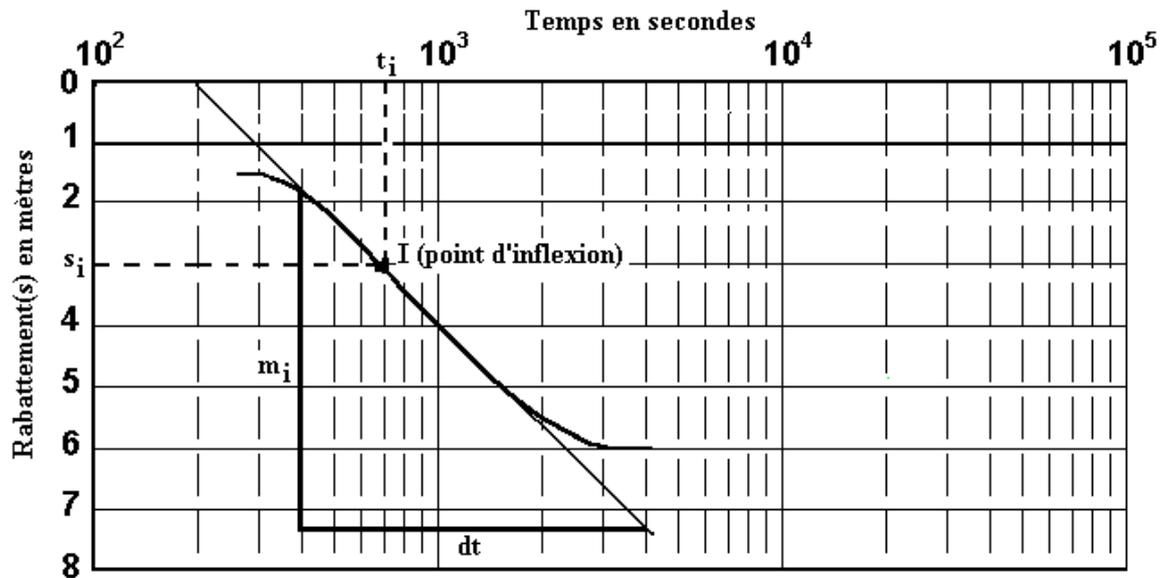
Détermination des caractéristiques hydrodynamiques d'après la méthode de HANTUSH-WALTON

IV- Méthode semi-logarithmique de HANTUSH-BERKALOFF

La méthode de HANTUSH, à utiliser également en régime transitoire, consiste à construire la courbe de $s = f(\log t)$ pour un piézomètre et à rechercher quelques points caractéristiques de cette courbe.

Elle ne peut être appliquée que lorsqu'il est possible d'extrapoler les valeurs de s de manière à trouver la valeur de s_{\max} .

Cette méthode utilise les fonctions $K_0(x)$ et $e^x K_0(x)$ qui sont données par la table.



Méthode semi-logarithmique de HANTUSH-BERKALOFF :

On procède comme suit :

- 1- représenter sur du papier semi-logarithmique $s = f(\log t)$, en extrapolant s , on détermine s_{\max} .
- 2- déterminer le point d'inflexion de la courbe $s = f(\log t)$, où s_i représente le rabattement au point d'inflexion qui est égal à :

$$s_i = \frac{1}{2} s_{\max} = \frac{Q}{4\pi T} K_0(r/B)$$

- 3- déterminer, sur le graphique, la pente m_i de la courbe $s = f(\log t)$ au point d'inflexion et le temps t_i correspondant à ce point :

$$m_i = \frac{2.3Q}{4\pi T} e^{r/B} = \frac{0.183Q}{T} e^{-r/B}$$

En ce même point :

$$u' = \frac{r^2 S}{4T t_i} = \frac{r}{2B}$$

s_i et m_i étant liés par la relation :

$$\frac{2.3s_i}{m_i} = e^{r/B} K_0(r/B) \text{ et on tire des tables :}$$

$e^{r/B}$ et r/B d'où $B = \frac{r}{(r/B)}$ on calcule les paramètres d'après les relations :

$$T = \frac{0.183Q}{m_i} e^{-r/B} \quad S = \frac{2Tt_i}{Br} \quad \frac{K'}{b'} = \frac{T}{B^2}$$

Les valeurs de la fonction $e^{-x} K_0(x)$ ont été tabulées par M.S.HANTUSH.

V- Méthode bi-logarithmique de JACOB des cônes de rabattement :

La méthode de JACOB s'utilise quand le temps de pompage est suffisamment grand pour qu'un équilibre s'établisse entre le volume d'eau pompé et l'apport par la drainance, le régime peut se stabiliser alors :

$$s = \frac{Q}{2\pi T} K_0(r/B) = \frac{0.159}{T} K_0(r/B)$$

La courbe-type est un report logarithmique de $K_0(r/B)$ en fonction de r/B et le report de données est celui de s en fonction de r. Sur papier logarithmique la superposition donnera les coordonnées $K_0(r/B)$, r/B , s et r qui serviront à calculer

T et K'/b' d'après les relations :

$$T = \frac{0.159Q}{s} K_0(r/B) \quad \frac{K'}{b'} = \frac{T}{(r/r/B)^2} = \frac{T}{B^2}$$

SCHEMA

Remarque : pour appliquer cette méthode, les données de plusieurs piézomètres (au moins 3) sont nécessaires.

Méthode semi-logarithmique de BERKALOFF dite de la strate conductrice

Cette méthode est utilisée en nappe captive avec une strate conductrice d'eau privilégiée. Ce schéma est intermédiaire entre les nappes captives et semi-captives.

SCHEMA

Conditions aux limites :

- puits parfait
- nappe captive avec strate conductrice
- nappe d'extension latérale infinie
- épaisseur constante dans la zone d'influencée par le pompage
- la couche magasin se définit par : S' coefficient d'emmagasinement total

On peut remarquer dans ce modèle :

L'ensemble aquifère est supposé captif, où les épontes sont imperméable et la couche magasin est définissable par :

S' : coefficient d'emmagasinement total.

$$\Gamma = \frac{K'}{b'}$$

La strate conductrice d'eau se définit par :

T : transmissivité hydraulique et S : coefficient d'emmagasinement de la réserve immédiatement mobilisable supposé nul ou négligeable.

La courbe $s = f(\log t)$ caractéristique porte deux tronçons comme le montre la figure suivante

SCHEMA

Mode opératoire :

- construire sur un diagramme semi-logarithmique la courbe $s = f(\log t)$
- noter les points caractéristiques i_1 et i_2 ainsi $\alpha.t_0, t_0, \Gamma_0 \dots$ sur le graphique
- calculer la transmissivité T , S , S' , K' et Γ de la strate conductrice d'eau privilégiée d'après la relation :

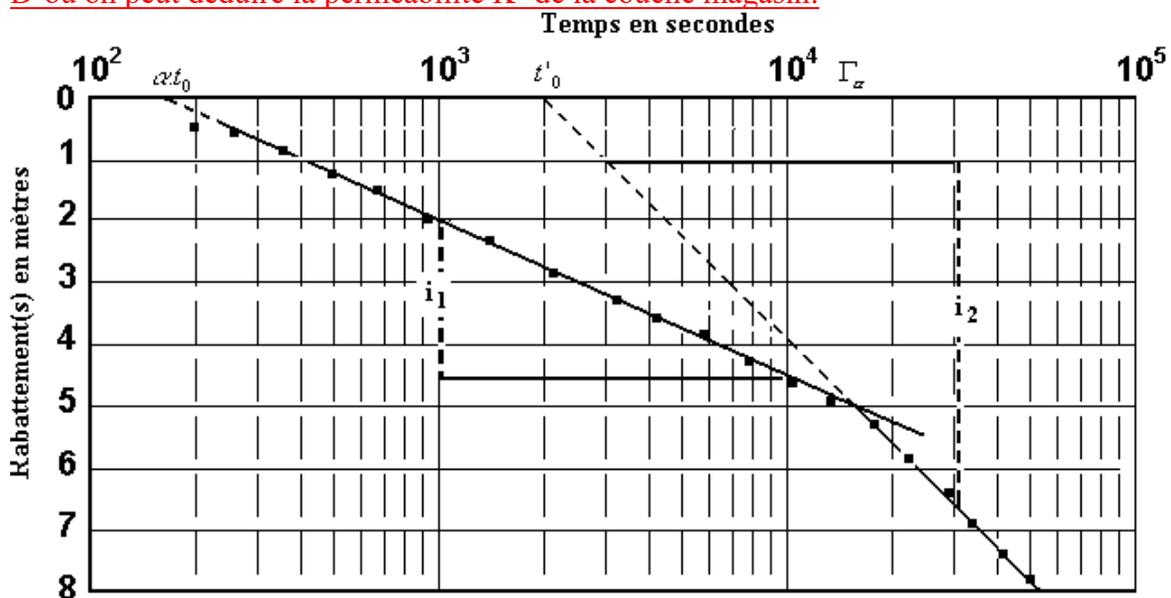
$$T = \frac{0.183Q}{i_2} \quad (1)$$

$$S = \frac{2.25T(\alpha.t_0)}{r^2} \quad (2)$$

$$S' = \frac{2.25Tt'_0}{r^2} \quad (3)$$

$$\Gamma = \frac{K'}{b'} = 0.56 \frac{S'}{\Gamma_\alpha} \quad (4)$$

D'où on peut déduire la perméabilité K' de la couche magasin.



● point d'observation

Méthode semi-logarithmique de BERKALOFF dite de la droite conductrice

Remarque

La détermination de T, S', Γ n'est possible que si la courbe $s = f(\log t)$ comporte deux tronçons de droite assez rectilignes correspondant au stade initial et au stade final de pompage, d'où l'intérêt de pompage prolongé dans des piézomètres proches du puits de pompage.

Pour les piézomètres éloignés souvent on remarque que le deuxième tronçon
Quand la courbe $s = f(\log t)$ comporte un seul tronçon de droite identifiable comme
étant celui du stade initial de pompage, seule l'évaluation de T peut être faite.

Interprétation des pompages d'essai en nappes libres

I- Introduction :

Sur le plan théorique le problème de l'hydrodynamique des nappes à surface libre n'a pas
encore reçu de solutions rigoureuses indiscutables. Plusieurs méthodes ont été élaborées à
des dates récentes ; elles tiennent compte des différentes conditions caractérisant les
nappes libres par rapport aux nappes captives à savoir :

- écoulement tridimensionnel au voisinage d'un puits,
- variation de la transmissivité avec le rabattement (épaisseur varie, comme $T=K.e$)
- retard de désaturation de la couche aquifère, cependant aucune d'elles ne tient
compte de ces trois conditions à la fois.

II- Règles générales

- $s < 0.1b$ _____ on applique les mêmes méthodes que les nappes captives

- $0.1b < s < 0.3b$ _____ on applique les mêmes méthodes que les nappes captives avec
corrections de rabattements (s_c) :

$$s_c = s_m - \left(\frac{s_m^2}{2b} \right) \text{ Avec}$$

_____ s_c : rabattement corrigé

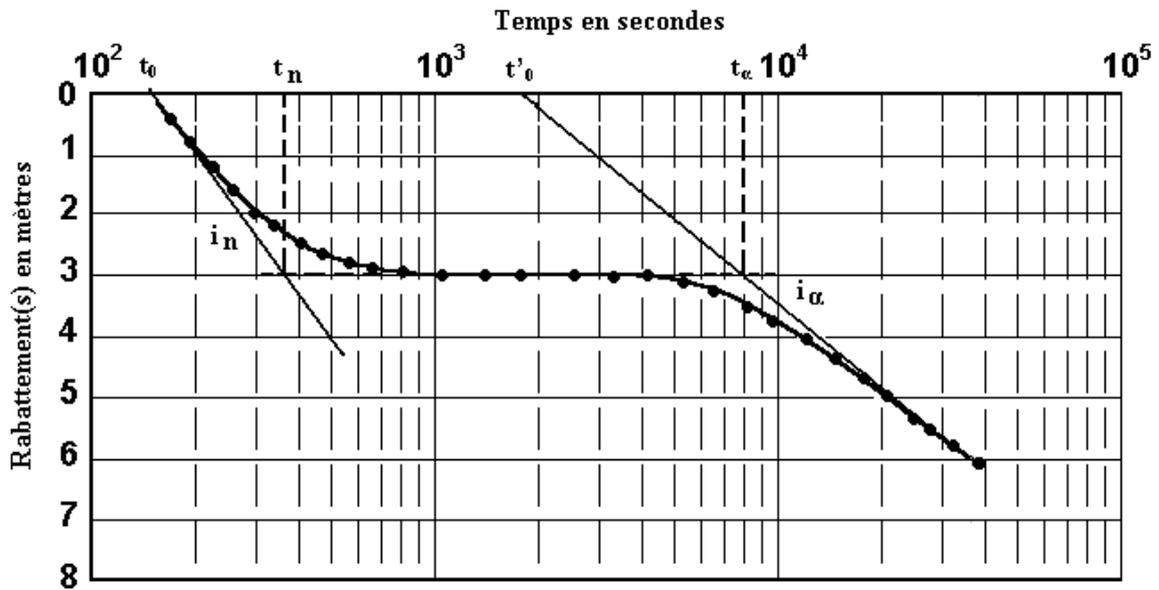
_____ s_m : rabattement mesuré

_____ b : épaisseur initiale saturée

- $s > 0.3b$ _____ on applique les méthodes spécifiques des nappes libres, qui tiennent
compte de la composante verticale de la composante de la vitesse et de la diminution de
la transmissivité.

III-Nappe libre à fort rabattement :

Pour le cas $s > 0.3b$, on ne dispose d'aucune théorie complètement satisfaisante. Une
approche du phénomène consiste à admettre que la libération de l'eau n'est pas
instantanée, il y a effectivement libération instantanée au début du pompage, par
décompression du milieu, mais ensuite la libération de l'eau se fait progressivement par
suite du drainage de la partie dénoyée. On dit qu'il y a égouttement.



● point d'observation

Méthode semi-logarithmique de BERKALOFF-BOULTON pour les nappes libres

En général l'allure générale des courbes en nappes libres se présente comme indiquées ci-dessus, sur laquelle on distingue :

- une phase linéaire en début de pompage, d'équation :

$$s_1 = \frac{0.183}{T} \log \frac{t}{t_0}$$

- une phase linéaire en fin de pompage, d'équation :

$$s_3 = \frac{0.183}{T} \log \frac{t}{t'_0}$$

Entre ces deux phases, un palier horizontal tel que

$$s_2 = \frac{0.183Q}{T} \log \frac{t_n}{t_0}$$

Si on appelle S le coefficient d'emmagasinement de la phase initiale, dont la valeur est faible et du même ordre de grandeur que celui des nappes captives, et S' le coefficient d'emmagasinement de la dernière phase, et qui lui est voisin de la porosité effective du milieu, on a d'après BERKALOFF :

$$T = \frac{0.183Q}{i} \quad \text{Avec } t_0 = \frac{r^2 S}{2.25T}, \quad t'_0 = \frac{r^2 S'}{2.25T}, \quad t_n = \frac{0.561}{n\alpha}, \quad t_\alpha = \frac{0.561}{\alpha}$$

$$S = \frac{2.25}{r^2} \quad S + S' = \frac{2.25T t'_0}{r^2}$$

On déduit par calcul :

T : transmissivité hydraulique du système

S : coefficient d'emmagasinement de la réserve immédiatement mobilisable suivant le concept de THEIS

S' : coefficient d'emmagasinement retardé

$S+S'$: coefficient d'emmagasinement total

α : Paramètre exprimant la vitesse d'épuisement

IV-Méthode de BOULTON-BERKALOFF

Nappe captive semi-infinie

L'influence de la limite d'alimentation peut être déterminée par l'application de « la théorie des images » décrite par FERRIS. Cette théorie peut se résumer ainsi : l'influence d'une barrière étanche limitant latéralement l'aquifère sur les rabattements dus au pompage est identique à la superposition des effets conjugués du forage réel produisant un débit Q du « forage image » symétrique du forage réel par rapport à la limite et débitant avec le même débit.

SCHEMA

Dans le cas d'une limite d'alimentation à niveau d'eau constant le principe est le même, sauf que « le forage image » est supposé débiter avec un débit $-Q$ (forage d'injection).

Les méthodes d'interprétation supposent maintenir toutes les hypothèses de THEIS énumérées, exceptée l'hypothèse N°2 qui est remplacée par la condition suivante : l'aquifère est limité, dans la zone influencée par le pompage, par une limite de longueur infinie, rectiligne et qui traverse entièrement la couche aquifère, dans le cas d'une limite d'alimentation à niveau constant, la perméabilité ne change pas au contact avec la limite.

Nappe captive limitée par une barrière étanche :

- Méthode bi-logarithmique :

$$s = s_1 + s_2 = \frac{Q}{4\pi T} (W(u_1) + W(u_2))$$

$$\text{Avec } u_1 = \frac{4Tt}{r^2 S} \quad \text{et} \quad u_2 = \frac{4\pi Tt}{r_i^2 S}$$

Où r : distance du point considéré au puits réel
 r_i : distance du point considéré au puits image

Dans le cas particulier d'un piézomètre situé sur un axe perpendiculaire à la limite, on a :

$$u_2 = \frac{4Tt}{(2d \pm r)^2} \quad \text{Avec } d : \text{ distance à la limite}$$

$$\frac{u_1}{u_2} = \left(\frac{2d}{r} \pm 1 \right)^2 ; \quad u_1 = u_2 \left(\frac{2d}{r} \pm 1 \right)^2$$

$$s = \frac{Q}{4Tt} \Phi\left(u_1, \frac{r}{d}\right) = \frac{0.08Q}{T} \Phi\left(u_1, \frac{r}{d}\right)$$

$\Phi\left(u_1, \frac{r}{d}\right)$ a été calculé à partir de l'abaque

$$\Rightarrow T = \frac{0.08Q}{s} \Phi\left(u_1, \frac{r}{d}\right) \quad S = \frac{4Tt}{r^2 u_1}$$

Dès que l'influence de la limite se fera sentir, la courbe observée s'écarte de la courbe de THEIS pour se superposer à une des courbes dessinées au dessus de la courbe de THEIS.

Méthode semi-logarithmique :

Dès que l'approximation logarithmique est valable pour les deux fonctions $W(u_1)$ et $W(u_2)$:

$$s = s_1 + s_2 = \frac{0.183Q}{T} \left(\log \frac{2.25Tt}{r^2S} + \log \frac{2.25Tt}{r_i^2S} \right)$$

$$s = \frac{0.366Q}{T} \log \frac{2.25Tt}{r^2S} \quad \text{Avec } r \approx r_i$$

Le début de la courbe $s = f(\log t)$ correspondra à une nappe infinie, puis dès que l'influence de la limite se fait sentir, la courbe aura tendance à doubler sa pente primitive.

$$i_2 \approx 2i_1 = \frac{0.366Q}{T}$$

$$s_2 = \frac{0.183Q}{T} \log \frac{2.25Tt_i}{r_i^2S} = 0$$

$$\Rightarrow \frac{2.25Tt_i}{r_i^2S} = 1 \Rightarrow r_i = 1.5 \sqrt{\frac{Tt_i}{S}}$$

Cas particuliers

1-Pour un puits de pompage ou un piézomètre dont la distance r est négligeable par rapport à d : $r_i \approx 2d$ d'où $d = 0.75 \sqrt{\frac{Tt_i}{S}}$

$$t_i = 1.78 \frac{d^2 S}{T}$$

2- Pour un piézomètre situé sur l'axe passant par le forage et perpendiculaire à la limite, entre le forage et la limite SCHEMA

$$r_i = 2d - r \quad \text{et} \quad d = 0.75 \sqrt{\frac{Tt_i}{S}} + \frac{r}{2}$$

$$S = \frac{2.25Tt_0}{r^2} \quad d = 0.75 \sqrt{\frac{Tt_i}{2.25Tt_0}} + \frac{r}{2} \quad d = \frac{0.75}{1.5} r \sqrt{\frac{t_i}{t_0}} + \frac{r}{2}$$

$$d = \frac{r}{2} \sqrt{\frac{t_i}{t_0}} + \frac{r}{2}$$

Si le piézomètre est situé du côté opposé à la limite : $r_i = (2d + r)$ SCHEMA

$$d = \frac{r}{2} \sqrt{\frac{t_i}{t_0}} - \frac{r}{2}$$

Evaluation du degré d'étanchéité d'un écran :

M.LAGARDE et KARGANOFF ont montré que le rayon d'action d'un essai par pompage pouvait se mettre sous la forme :

$$\frac{R}{2} = d = \frac{1.5}{2} \sqrt{\frac{Tt_i}{S}} \quad R = \alpha \sqrt{\frac{Tt_i}{S}} \quad \text{Formule dans laquelle } \alpha = 2 \sqrt{-\log \frac{Q}{Q_0}}$$

Q : débit provenant de la zone extérieure au rayon d'influence R
 Q₀ : débit provenant de zone avant l'arrivée au rayon d'influence R
 Connaissant la distance R d'un écran, atteint au temps t_i et connaissant les caractéristiques de l'aquifère T et S, on peut en déduire la valeur de α, donc du rapport $\frac{Q}{Q_0}$ qui donne le degré d'étanchéité de cet écran (à un instant donné).

Principe :

On construit la courbe standard $\alpha = f(\log Q/Q_0)$ d'après le tableau suivant et connaissant α, on en déduit le degré d'étanchéité $\frac{Q}{Q_0}$

$\alpha = 2\sqrt{-\log \frac{Q}{Q_0}}$	5	4.75	4.32	3.85	3.70	3.62	3.5	3.1	2.75
$\frac{Q}{Q_0}$	0.002	0.00035	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.1	0.15
α	2.51	2.1	2.125	1.875	1.625	1.4			
$\frac{Q}{Q_0}$	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5	0.6			

SCHEMA

000000000000000000000000

Important :

000000000000000000000000

Interprétation générale des graphiques de la formule de non équilibre

Pour simplifier l'exposé, l'interprétation est faite sur les diagrammes semi-logarithmiques $s = f(\log t)$ ou $s = f\left(\log \frac{t}{t'}\right)$, elle peut être aisément extrapolée aux diagrammes bilogarithmiques et à tous les divers diagrammes semi-log $\frac{s}{Q} = \left(\log \frac{t}{r^2}\right)$ etc.

La fonction $s = f(\log t)$ est en général linéaire.

Quatre cas principaux peuvent se présenter au cours d'un pompage :

- pente constante de la droite représentative
- diminution de la pente pouvant atteindre un palier
- accroissement de la pente. Discontinuité
- anomalies diverses affectant la droite

1- pente constante de la droite représentative :

le régime reste non permanent et l'équilibre du cône de dépression n'est pas atteint. L'alimentation reste insuffisante et le débit de pompage trop élevé pour les caractéristiques **hydrologiques** de la nappe. A la limite, on dénoiera la pompe placée dans le puits.

2- Diminution de la pente et apparition d'un palier en fin de pompage

C'est le cas le plus fréquent : à partir d'un certain temps de pompage, le rabattement se stabilise et le régime d'écoulement devient permanent

L'établissement de cet état d'équilibre est déterminé par le régime d'alimentation de la nappe

- alimentation par les propres réserves de la nappe
- variations importantes des caractéristiques hydrodynamiques du terrain aquifère (en particulier le passage de la nappe captive en nappe libre
- alimentation par drainance des nappes supérieures ou inférieures à travers le toit ou le substratum de la nappe testée
- présence d'un front de suralimentation à proximité du puits testé (interprétation par la théorie des images)

3- accroissement de la pente-discontinuité

L'accroissement anormal de la pente de la droite représentative traduit une augmentation anormale du rabattement, donc un obstacle au développement du cône de dépression qui peut être dû :

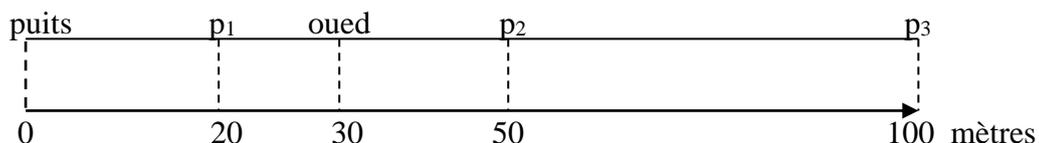
- à des variations importantes des caractéristiques hydrodynamiques du terrain aquifère
- à la présence d'une barrière étanche à proximité du puits pompé

Dans le premier cas, l'augmentation de pente est progressive alors que dans le second cas elle est brutale et se manifeste à un instant précis t_1 (interprétation par puits images)

00000000000000000000000000000000

Exercice pour avoir une idée sur les interprétations des pompages d'essais.

Pour l'exécution d'un pompage d'essai dans un aquifère à deux nappes superposées N1 et N2 dont le substratum est marneux, on dispose d'un puits et de trois piézomètres (voir schéma). Le forage à un diamètre Φ de 0.40 m, crépiné à sa partie inférieure et gravillonné sur toute sa longueur. Le dispositif d'observation comprend : 03 piézomètres alignés p_1 à 20 m, p_2 à 50m et p_3 à 100m du forage. Le débit d'exploitation est de 91l/s soit 328m³/h et a duré 50 heures. L'épaisseur de l'aquifère est de 12m dont 4 m seulement sont dans la couche saturée. La longueur du tubage est de 16m.



SCHEMA

Le puits de pompage est localisé dans la première nappe N_1 , p_1 , p_2 , p_3 : piézomètres localisées dans la première nappe.

Les résultats des mesures sont donnés au tableau suivant :

Temps (mn)	Débit (l/s)	Rabattement (cm),			
		P	p_1	p_2	p_3
2.2	91	180			
2.5	-	190			
3.0	-	200			
3.5	-	209			
4.0	-	219			
4.5	-	225			
5.0	-	232			
7.0	-	241.5	16.0	2.8	1.0
10	-	248.5	18.0	3.5	1.2
20	-	265	22.5	6.2	1.5
30	-	273	25.4	8.5	1.8
40	-	279	28.0	10	2.3
60	-	289.5	31.2	12.5	2.8
100	-	300	35.7	15.8	5.3
150	-	310	39.5	18.8	7.9
210	-	317.5	43.0	20.7	11.8
270	-	323	45.5	23.7	13.2
540	-	337	52.5	29.0	21.0
1200	87	353	60.0	34.5	27.5
2880	91	364	65.7	42.0	33.0
3000	91	364	65.7	42.0	33.0

Interprétez cet essai en s'intéressant entre autre aux caractéristiques hydrauliques et géométriques de la nappe, ainsi qu'aux pertes de charge...

Correction :

D'après les mesures de rabattements observés dans le puits et les trois piézomètres, on établit les diagrammes $s = f(\log t)$ sur papier semi-logarithmique.

Tous les diagrammes montrent en général au moins deux allures traduisant en premier temps le régime transitoire et en second temps le régime permanent.

Pour le puits p :

Le diagramme $s = f(\log t)$ présente une pente forte puis moyenne et se stabilise vers la fin de l'essai. L'effet de capacité du puits doit être très vite (**résorbé**) négligeable étant donné le faible diamètre du forage et le fort débit d'exploitation $Q \approx 328 m^3 / h$.

De $t = 0$ à $t = 5mn$ la pente est forte, comme il n'y a pas de changement de débit ni de limite étanche visible, ceci serait certainement dû à l'effet d'un colmatage autour du puits.

De $t = 5mn$ à $t = 1200mn$, on note une diminution légère de la pente mais elle reste toujours plus importante que celle des piézomètres ce qui confirme l'hypothèse du colmatage ; à savoir que la très forte proportion du rabattement étant due aux pertes de charge du forage lui-même. Il est sans doute vraisemblable que le développement était encore insuffisant par mauvais choix de l'ouverture de crépines, par conséquent on ne tient pas compte de la transmissivité T calculée par la courbe ou la droite du puits p.

La pente $i_p = 0.32m. \Rightarrow T = \frac{0.183Q}{i_p} = \frac{0.183 \times 0.91 \times 10^{-3}}{0.32} = 3 \times 10^{-2} m^2/s$

De $t = 1200mn$ à l'infini, on note une stabilisation

Pour les trois piézomètres p_1, p_2 et p_3

La même pente i est observée sur les diagrammes $s = f(\log t)$ des trois piézomètres :
 $i = 0.22m$

Pour $p_1, i_1 = 0.22m. \Rightarrow T = 7.5 \times 10^{-2} m^2/s$

Pour $p_2, i_2 = 0.17m. \Rightarrow T = 8.3 \times 10^{-2} m^2/s$

Pour $p_3, i_3 = 0.22m. \Rightarrow T = 7.5 \times 10^{-2} m^2/s$

La transmissivité moyenne T_{moy} est égale à : $T_{moy} = 8.10^{-2} m^2/s$

Calcul du coefficient d'emmagasinement S

$p_1 : t_0 = 2.23mn. \Rightarrow S = 6 \times 10^{-2}$

$p_2 : t_0 = 13mn. \Rightarrow S = 6 \times 10^{-2}$

$p_3 : t_0 = 65mn. \Rightarrow S = 6 \times 10^{-2}$

le coefficient d'emmagasinement moyen S_{moy} est égal à : $S_{moy} = 6 \times 10^{-2}$, cette valeur définit une nappe libre.

Tous les piézomètres se stabilisent vers la fin de l'essai. Deux hypothèses se dégagent :

- 1- Alimentation par l'oued
- 2- Drainance à partir de la deuxième nappe

Dans le cas d'une alimentation par l'oued, le rayon d'influence serait : $R = 1.5 \sqrt{\frac{Tt_i}{S}} = 1.5 \sqrt{\frac{8 \times 10^{-2} \times 1.6 \times 10^5}{6 \times 10^{-2}}} = 693m \Rightarrow d \approx 346m$

La distance d est la distance entre l'oued et le puits p de pompage ; les calculs montrent que $d \approx 346m$, or la distance réelle qui séparent l'oued du puits de pompage n'est que de 30 m, par conséquent l'hypothèse d'une alimentation de la nappe par l'oued est à écarter ou à exclure.

Nous considérons alors que c'est une drainance

Pour $p_1 s_i = 0.3225 \Rightarrow K_0(r/B = 3.28) \Rightarrow T = 7.2 \times 10^{-2} m^2/s$

Pour $p_2 s_i = 0.21. \Rightarrow K_0(r/B) = 2.62. \Rightarrow T = 9 \times 10^{-2} m^2/s$

Pour $p_3 s_i = 0.165. \Rightarrow K_0(r/B) = 1.19. \Rightarrow T = 5.2 \times 10^{-2} m^2/s$

Le temps d'influence est : $t_i = 70mn$

$p_1 : B = \frac{r}{r/B} = 465.116 \Rightarrow S = 6.5 \times 10^{-2}$

$p_2 : B = 609.756. \Rightarrow S = 6.5 \times 10^{-2}$

$p_3 : B = 270.27. \Rightarrow S = 6.5 \times 10^{-2}$

$$\frac{K'}{b'} = \frac{T}{B^2}$$

Pour $b' = 10m. \Rightarrow .K' = 3.3 \times 10^{-6} m/s$

$b' = 1. \Rightarrow .K' = 3 \times 10^{-7} m/s$

$b' = 100. \Rightarrow K' = 3 \times 10^{-5} m/s$

K' varie de 10^{-5} à 10^{-7} donc il y a certaine relation des deux nappes car K' est assez fort, par conséquent il y a drainage dans le sens N2 vers N1

Si nous considérons le régime permanent : $s = f(\log r)$

Le nombre de piézomètres étant égal à trois. On peut construire ? graphiquement en fonction du log de la distance au forage.

$$T = \frac{0.366xQ}{i} \quad \text{avec } i = 0.46m \Rightarrow T = 7x10^{-2} m^2 / s$$

c'est une transmissivité moyenne entre les piézomètres et on remarque qu'elle est très proche de celles calculées par le régime transitoire.

Calcul des pertes de charge

Les pertes de charge provenant de changement de débit de pompage (quadratique) est négligeable vue la faible variation de débit

Il se trouve que $s = f(\log r)$ s'aligne qu'avec les piézomètres

$$\Delta H = pdc = 3.646 - 1.05 = 2.59m$$

Méthode bi-log de JACOB

$$s = \frac{Q}{2\pi T} K_0(r/B) = \frac{0.159Q}{T} K_0(r/B) \quad \text{SCHEMA } \log K_0(r/B)$$

$$T = \frac{0.159Q}{s} K_0(r/B)$$