

#### 4. Remontée de la nappe avec la méthode de Jacob :

Une fois le pompage achevé, le niveau d'eau cesse de descendre pour remonter vers sa position d'origine. On mesure la remontée par le rabattement résiduel  $s_r$ , c'est à dire la différence entre le niveau original de l'eau avant le pompage et le niveau mesuré à un certain moment  $t_r$  de la remontée ;  $t_r$  représente le temps écoulé depuis l'arrêt du pompage.

Les résultats de la remontée permettent eux aussi le calcul de la transmissivité et sont donc un moyen de contrôler des résultats de l'interprétation de l'essai durant la période de pompage. En outre, la remontée présente l'avantage que le débit  $Q$  est constant et égal à la moyenne des débits du pompage. Ceci fait que les variations de rabattements dues aux fluctuations du débit ne se retrouvent plus à la remontée.

Cette méthode est applicable à l'étude de la remontée d'une nappe immédiatement après l'arrêt d'un pompage de courte durée (nappe non stabilisée). Permet le calcul de  $T$  par interprétation de l'équation de *Theis-Jacob* avec les données suivantes :

$t_p$  : temps écoulé depuis l'origine du pompage jusqu'à son arrêt ;

$t_r$  : le temps compté après cet arrêt ;

$s_r$  : la continuation de l'enregistrement du rabattement dans le piézomètre de contrôle ;

$Q$  : valeur de débit du pompage ayant créé le rabattement initial.

Le raisonnement mathématique pour déterminer les effets de l'arrêt du pompage est basé sur le principe de superposition : on combine une « poursuite fictive » du pompage au débit initial  $Q$  avec une « injection fictive » d'eau au même débit soit un pompage au débit  $(-Q)$ . Le rabattement se mesure dans le piézomètre d'observation. L'équation de JACOB devient :

$$\begin{aligned} s_r &= \frac{2.3 Q}{4\pi T} \cdot \log\left(\frac{2.25T (t_p + t_r)}{r^2 S}\right) - \frac{2.3 Q}{4\pi T} \cdot \log\left(\frac{2.25T t_r}{r^2 S}\right) \\ \Rightarrow s_r &= \frac{0.183 Q}{T} \cdot \left(\log \frac{2.25T (t_p + t_r)}{r^2 S} - \log \frac{2.25T t_r}{r^2 S}\right) \\ \Rightarrow s_r &= \frac{0.183 Q}{T} \cdot \log\left(\frac{t_p + t_r}{t_r}\right) \Rightarrow s_r = \frac{0.183 Q}{T} \cdot \log\left(1 + \frac{t_p}{t_r}\right) \end{aligned}$$

Le calcul se fait, comme précédemment, sur un graphique semi-logarithmique. On trace la courbe expérimentale de l'essai avec cette fois  $\left(\frac{t_p + t_r}{t_r}\right)$  (en fait  $\log\left(\frac{t_p + t_r}{t_r}\right)$ ) en abscisses logarithmiques et  $s_r$  en ordonnées linéaires. Normalement, tous les points ont tendance à s'aligner sur une droite.

Pente de la droite =  $\frac{\Delta s}{\Delta \log \left( \frac{t_p + t_r}{t_r} \right)} = \Delta s = \frac{0.183 Q}{T}$ , Avec ;  $\Delta s$  différence de rabattement correspondant à 1 cycle logarithmique ( $\Delta \log \left( \frac{t_p + t_r}{t_r} \right) = 1$ ), d'où ;  $T = \frac{0.183 Q}{\Delta s}$

Cette méthode permet de vérifier le résultat obtenu pour T (la transmissivité) lors de la phase de descente de la nappe.

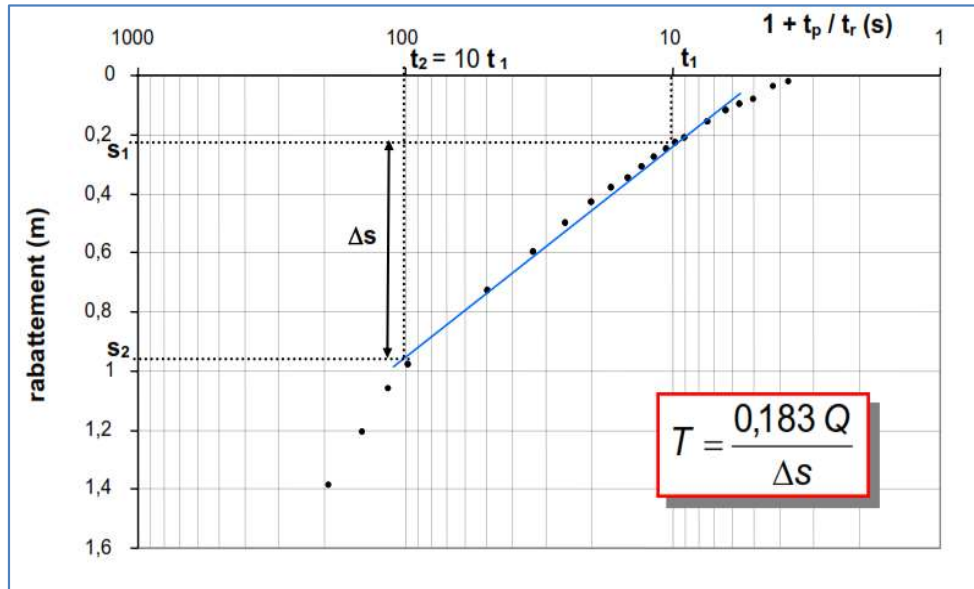


Figure. 28 : courbe de remontée d'après la Méthode de Jacob (nappe captive)

**5. Anomalies rencontrées dans la méthode graphique de Theis :** Toutes les méthodes de détermination de caractéristiques hydrodynamiques des nappes à partir des essais de pompage ou à partir de l'étude des variations naturelles de nappes conduisent à des résultats dont la validité est sujette à discussion en raison du fait que les hypothèses admises pour l'emploi de ces méthodes ne sont que rarement réalisées dans la nature.

En théorie, la méthode de Theis ne requiert qu'un seul piézomètre pour déterminer T et S. En pratique, c'est un leurre. On obtiendra autant de couples (T, S) que l'on aura installé de piézomètres parce que les conditions de terrain ne respectent jamais toutes les conditions d'établissement des équations théoriques. Pour bien connaître un aquifère, il est préférable d'avoir plusieurs points d'observation (piézomètres) pendant un essai de pompage, ce qui permet de faire une évaluation plus sérieuse qu'avec un seul piézomètre ou pas du tout.

La solution de Theis n'est valide que si les conditions suivantes sont respectées : le milieu poreux est homogène, isotrope et infini ; la transmissivité est constante, c'est-à-dire que soit la nappe est captive à épaisseur constante, soit la nappe libre est peu rabattue (rabattement/charge initiale < 25%) ; le puits capte toute la hauteur de l'aquifère et a un

diamètre négligeable ; le débit est constant ; il n'y a aucun écoulement transitoire initial. Ces conditions ne se rencontrent jamais ensemble dans la nature.

Si une ou plusieurs conditions d'application de la méthode de *Theis* ne sont pas remplies des corrections peuvent être apportées :

Le principe de superposition et la méthode des images permettent de prendre en compte les limites de l'aquifère (alimentée ou étanche), et les variations de débit. Lorsque le puits n'a pas un diamètre négligeable, on commence par vider le puits avant de mobiliser l'eau de la formation. On observe alors un effet de retard des rabattements en début de pompage. Cet effet s'appelle « effet de capacité ».

Neuman (1975) propose une solution prenant en compte le retard dans le drainage gravitaire de la zone non saturée dans le cas d'un aquifère libre. Cette solution permet aussi de corriger les effets liés à un puits incomplet (c'est-à-dire qui ne capte pas l'ensemble de la nappe), ou à un aquifère avec une anisotropie verticale-horizontale.

**6. L'effet de puits et la post-production :** L'interprétation des essais de pompage en régime transitoire permet de mettre en évidence l'effet de puits et la post-production. On convient de poser que la distance ( $r$ ) entre le point d'observation et le point de prélèvement est égale au rayon  $r_p$  du puits. Toutefois, ce faisant, on néglige implicitement tous les phénomènes perturbateurs dont le puits et son voisinage sont le siège. Ces phénomènes assez divers dans le détail peuvent, si l'on ne considère que leurs effets sur le comportement du niveau d'eau dans le puits, être groupés en deux catégories :

- l'effet pariétal (effet de puits), qui se manifeste lors de la phase d'abaissement du niveau ;
- la post-production qui apparaît à la remontée.

Quantitativement ces perturbations se traduisent par l'apparition d'une perte de charge singulière affectant les rabattements mesurés dans le puits.

**6.1. L'effet pariétal ou effet de puits :** Perte de *charge hydraulique* linéaire imposée au flux d'eau traversant la paroi d'un puits. Composante des *pertes de charge dues au puits*. C'est un effet de retard des *rabattements* dont la durée dépend des dimensions du puits et des paramètres de *l'aquifère*. Cette perturbation du rabattement est due principalement à :

- Modification de perméabilité du milieu naturel à proximité du puits (colmatage ou remaniements des terrains) ;
- Présence d'une crépine modifiant la forme d'écoulement et le régime des pertes de charges ;
- Présence des organes de pompage et existence dans le tube de production d'un écoulement turbulent qui n'obéit pas aux lois de l'hydrodynamique des milieux poreux ;

- D'autre part, il faut noter qu'à proximité du puits des vitesses élevées, consécutives aux forts débits, créent une situation dans laquelle l'hypothèse d'écoulement laminaire, qui est à la base de la loi de Darcy, n'est plus vérifiée.

- **Effet de puits sur les courbes d'abaissement :** D'une façon générale les diverses perturbations intervenant dans l'effet de puits entraînent l'apparition, en période de pompage, d'une perte de charge singulière  $\Delta H_p$  qui se superpose à la perte de charge théorique globale qui serait imposée par le milieu poreux supposé capté dans des conditions idéales. Il serait par ailleurs illusoire de vouloir individualiser chacune des composantes de la perte de charge totale  $\Delta H_p$ . Cette dernière comprend des pertes de charge linéaires et des pertes de charge quadratiques de la forme  $CQ^n$  ( $1 < n < 2$ ). Ainsi  $\Delta H_p$  ne dépend que du débit et, pour un débit donné, elle reste invariable dans le temps, sous réserve que des phénomènes de débouillage ne se produisent pas en cours d'essai.

- Il apparaît donc que le rabattement réel  $sr$  observé lors de l'abaissement du niveau, sera égal à la somme du rabattement dû à la nappe  $sn = f(Q, t)$  et à la perte de charge consécutive à l'effet de puits soit  $\Delta H_p = CQ^n = f(Q)$ . Donc si l'on opère à débit constant, la courbe d'abaissement mesurée sera simplement translatée d'une quantité égale à  $CQ^n$  par rapport à la courbe d'abaissement théorique  $s_n$ .

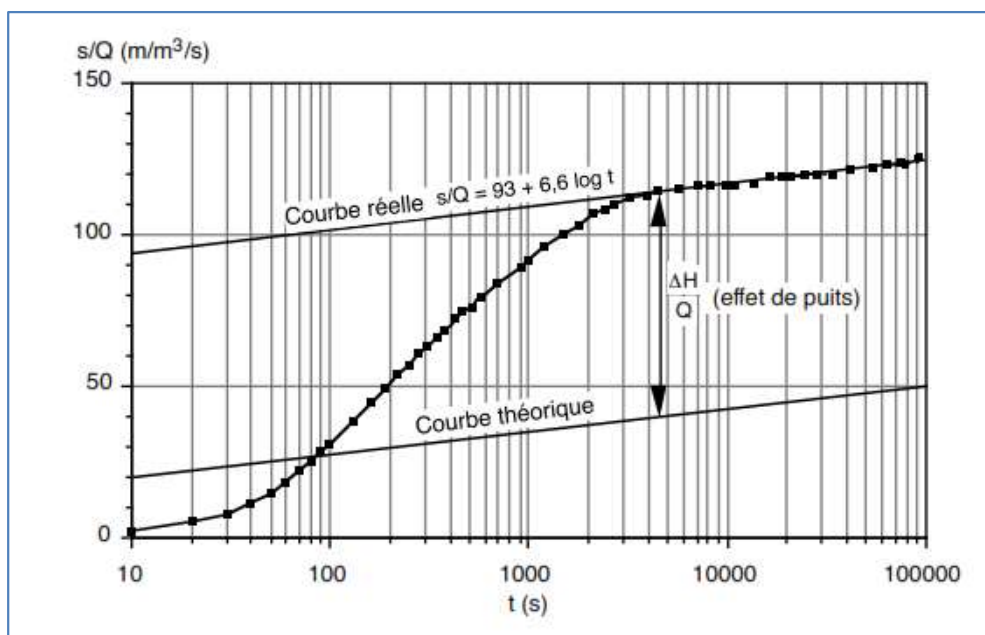


Figure. 29 : Abaissement du niveau piézométrique dans le forage.

- De la même façon, le report des courbes d'abaissement réelle et théorique sur un diagramme semi-logarithmique ( $s = f(\log t)$ ) donnera deux droites parallèles. Ainsi le calcul de  $T$  par la méthode approximative de Jacob, qui repose sur la détermination de la pente de la droite de descente, ne sera en rien altéré par la présence des pertes de charge. Par contre, le

calcul du coefficient d'emmagasinement  $S$  par la formule :  $S = \frac{2.25Tt_0}{r_p^2}$  n'est valable que si l'on prend pour  $t_0$  la valeur de l'abscisse à l'origine de la droite théorique  $s_n = f(\log t)$ . On obtiendra évidemment un résultat erroné si l'on veut procéder de même avec la droite réelle obtenue directement à partir des rabattements observés.

**6.2. La post-production :** Ce phénomène intéresse exclusivement la phase de remontée du niveau piézométrique consécutive à l'arrêt du pompage. En pratique, elle n'est réellement sensible que dans la mesure où les variations de volume dans le puits sont importantes.

Donc, compte tenu de la formulation logarithmique de la variation du niveau en fonction du temps, son influence se manifeste surtout dans les premiers instants suivant l'arrêt du pompage, alors que les variations du niveau d'eau dans le puits (et par conséquent les variations de volume) sont rapides. De même, il en résulte que l'importance de la post-production dépend du diamètre du puits et de la valeur du rabattement atteint à l'issue du pompage.

- **Effet de la post-production sur les courbes de remontée :** Contrairement à l'effet de puits dont l'importance est fonction du seul débit, la post-production est un phénomène variable dans le temps. Il s'ensuit une déformation et non seulement un déplacement des courbes de remontée du niveau piézométrique. Cette déformation est sensible surtout au début de cette phase alors que la post production est importante.

Par ailleurs, l'importance de la perte de charge causée par l'effet de puits conditionne l'amplitude et la durée de la post-production. Cette dernière prolonge l'effet de puits dû au pompage durant la phase de remontée. L'établissement du régime non perturbé n'intervient que pour les derniers instants de la remontée. En deçà, la courbe réelle ne tend que très lentement, par valeurs inférieures, vers la courbe théorique. On conçoit donc qu'à ce stade, l'interprétation quantitative de la courbe de remontée puisse être très délicate surtout lorsque le captage a été précédemment le siège d'un fort effet de puits.

## 7. Champs de captage et notions d'interférences

Lors d'un essai de pompage, le terme « interférence » correspond à l'ensemble des perturbations enregistrées sur le rabattement, dues à d'autres phénomènes que le pompage dans le puits testé. Ces perturbations liées essentiellement aux frontières d'un aquifère, c'est-à-dire une surface géométrique marquant la frontière entre l'aquifère teste et un aquitard (frontière imperméable) ou entre l'aquifère et une zone de recharge (frontière de recharge). Ces frontières peuvent être visibles ou invisibles. On parle généralement de frontière lorsque

le rapport de perméabilité entre la formation aquifère et la formation adjacente est supérieur à 100 (frontière imperméable) ou inférieur à 0.01 (frontière de recharge).

La détermination des paramètres hydrauliques d'un aquifère et la position de la frontière à partir des données d'un essai de pompage soumis à l'influence de cette frontière peuvent être trouvées en utilisant le concept mathématique des puits images.

**7.1. Méthode des puits images** : elle est couramment utilisée pour analyser des écoulements situés près d'une limite imperméable ou une limite à charge imposée. Cette méthode est basée sur le principe de superposition (*voir équation de continuité*). On introduit un puits image, symétrique du puits réel par rapport à la frontière de façon à simuler un aquifère infini dans lequel le puits réel a un débit de même intensité que le puits image, de même signe ( $Q$ ) pour une limite imperméable (pompage concurrent) et de signe opposé ( $-Q$ ) pour la limite d'alimentation (pompage compensatoire) dans l'autre demi-espace infini.

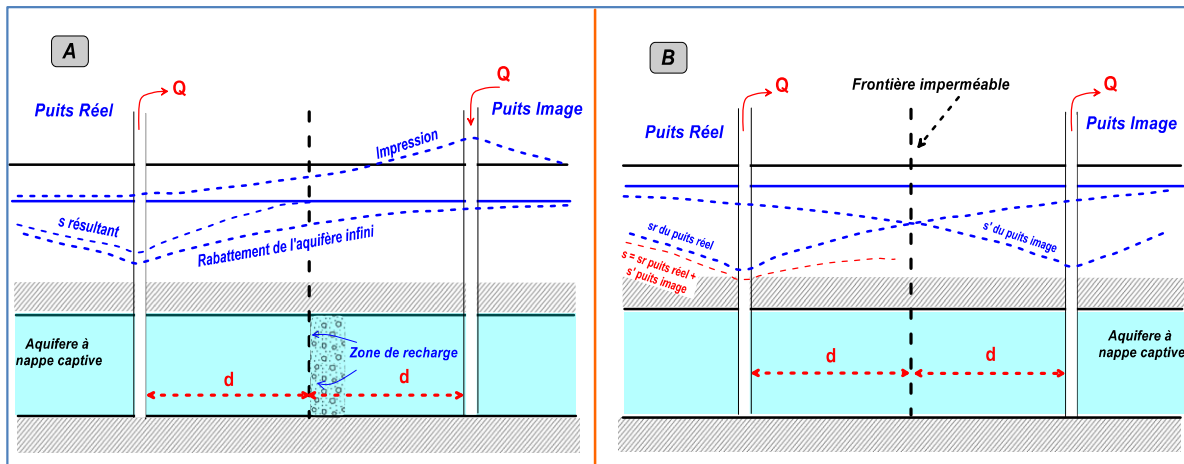


Figure.30 : Méthode du puits image pour une frontière de recharge (A) et une frontière imperméable (B)

Considérons une limite rectiligne voisine d'un puit de pompage  $P$ . Soit  $p$  un puits d'observation situé à une distance ( $r$ ) du puits réel et à une distance ( $r'$ ), du puits image ( $P'$ ) (symétrique de  $P$  par rapport à la limite) (fig.31). Si les conditions du milieu et du pompage permettent l'utilisation de l'équation de Theis, le rabattement ( $s$ ) dans le puits d'observation est :

$$s = \frac{Q}{4\pi T} [W(u) - W(u')] , \text{ Cas de la limite d'alimentation} \quad (11)$$

$$\text{Ou ; } s = \frac{Q}{4\pi T} [W(u) + W(u')] , \text{ Cas de la limite imperméable} \quad (12)$$

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

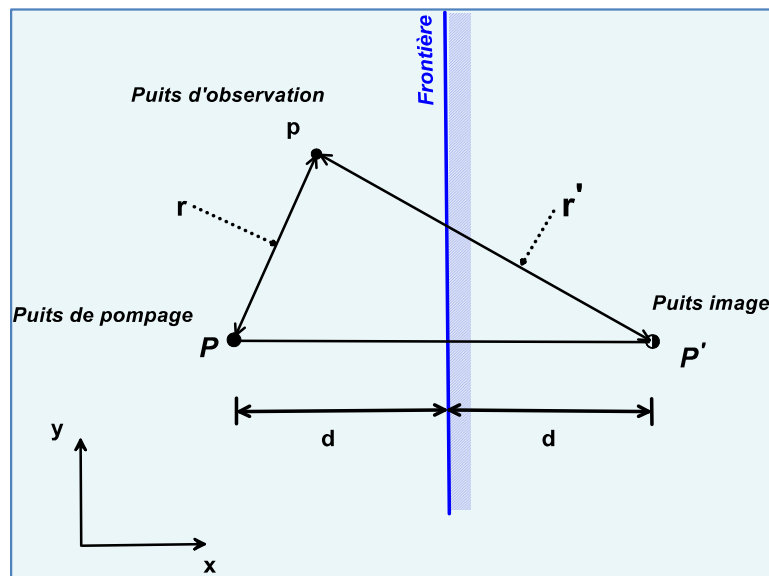


Figure. 31 : Application du principe du puits image symétrique par rapport à la limite

En utilisant l'approximation logarithmique de Cooper-jacob, on obtient :

$$s = \frac{0.183Q}{T} \log \frac{2.25Tt_i}{r^2 S} \pm \frac{0.183Q}{T} \log \frac{2.25T}{r'^2 S} = \begin{cases} s = \frac{2.3Q}{2\pi T} \log \frac{r'}{r}, \text{ Cas de la limite d'alimentation} \\ s = \frac{2.3Q}{2\pi T} \cdot \log\left(\frac{2.25Tt}{rr'S}\right), \text{ Cas de la limite imperméable} \end{cases}$$

Dans le cas de la limite d'alimentation, la recharge  $h$  est constante ( $s = 0$ ) le long de la bissectrice perpendiculaire à la droite reliant les puits. En effet, à chaque point de cette bissectrice ( $r = r'$ ). C'est pourquoi cette procédure (puits en décharge et puits en recharge) permet de résoudre le problème d'un puits situé à proximité d'une limite à charge imposé dans l'aquifère, telle qu'un cours d'eau ou un lac en équilibre avec la nappe.

Dans les équations (11) et (22), le début de la courbe  $s = f(t)$  représente l'effet d'un pompage dans une nappe infinie.

- Droite à pente constante (11) ; aquifère à nappe captive ou libre ( $s < 0.1b$ ), illimité à épontes imperméables, elle représente l'écoulement transitoire dans les conditions idéales. Cependant sous l'effet du pompage, le cône de dépression de la nappe s'évase de plus en plus ; il peut arriver qu'il sollicite un milieu de nature différente du milieu initial. Ce second milieu peut être une limite imperméable, ou une zone de moins bonne ou de meilleure perméabilité. Ces variations se constatent sur la courbe.

- Droite brisé avec une pente doublée (2), aquifère à nappe captive ou libre, limité latéralement par une limite étanche : passage latéral de faciès ou faille ;

- Droite brisé avec palier de stabilisation (3), indice de débit entrant aux limites. Deux cas :  
(a) aquifère à nappe captive ou libre, limités latéralement par une limite à potentiel imposé

(limite d'alimentation) ; cas du système global aquifère/rivière, (b) aquifère à nappe semi-captive, impliquant la drainance par une ou deux épontes.

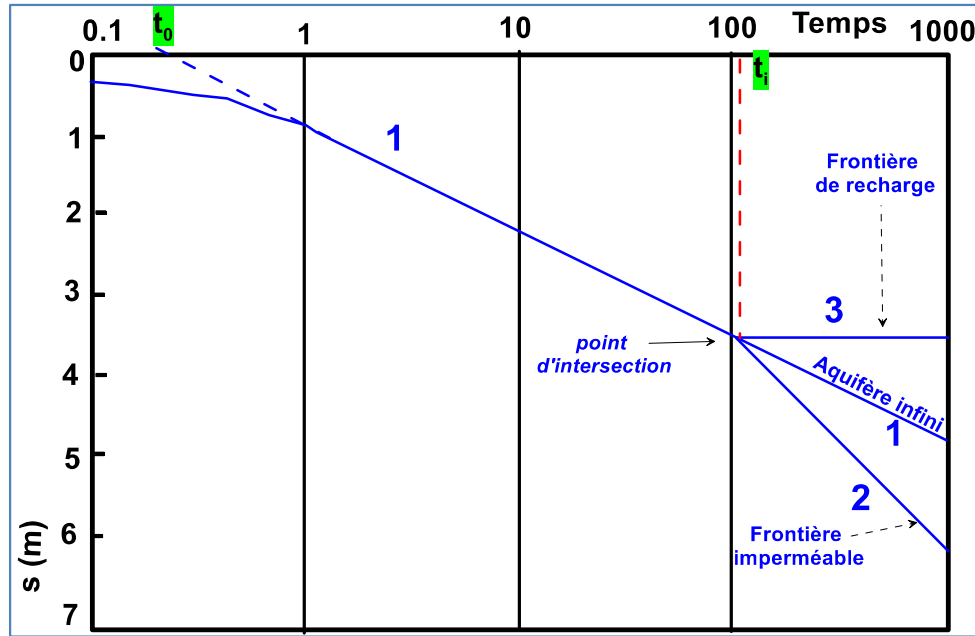


Figure. 32 : Influence des conditions aux limites sur le graphique du  $s = f(\log t)$

Le temp d'intersection ( $t_i$ ) des asymptotes initiale (temps petits) et finale (temps grands) de la courbe permet d'estimer approximativement la distance de la limite au puits pompé. En effet, en décomposant cette courbe en deux droites de Jacob (dues à chacun des deux puits), on remarque que ( $t_i$ ) correspond au temps où le rabattement théorique dû au puits image est nul.

En effet, le rabattement ( $s$ ) à la limite est :  $s = \frac{0.183Q}{T} \log \frac{2.25Tt_i}{r'^2S} \pm \frac{0.183Q}{T} \log \frac{2.25Tt_i}{r'^2S}$

A ( $t_i$ ), le rabattement dû au puits image (deuxième terme de la partie de droite de cette équation) est nul, d'où :  $s' = \frac{0.183Q}{T} \log \frac{2.25Tt_i}{r'^2S} = 0 \Rightarrow \frac{2.25Tt_i}{r'^2S} = 1 \Rightarrow r'^2 = \frac{2.25Tt_i}{S}$

Comme ;  $r'^2 = (2d - x)^2 + y^2$

Avec  $x$  et  $y$  les coordonnées du puits d'observation (en prenant le puits réel comme origine des coordonnées) et  $d$  la distance de la limite au puits réel (ou au puits image les deux étant symétrique par rapport à cette limite). La combinaison des équations ;

$$r'^2 = \frac{2.25Tt_i}{S} \text{ et } r'^2 = (2d - x)^2 + y^2, \text{ donne : } d_{\text{limite-pui}} = \frac{1.5}{2} \sqrt{\frac{Tt_i}{S} - y^2} + \frac{x}{2}$$

Dans le cas très particulier où le puits d'observation est sur l'axe passant par le puits de pompage et son puits image ( $y = 0$ ) et sur une limite imperméable ( $x = d$ ), on a ;

$$d_{\text{limite-puits}} = \frac{1.5}{2} \sqrt{\frac{Tt_i}{S}}$$



Certains cas particuliers peuvent se présenter :

- La distance (r) du puits d'observation au puits pompé est négligeable par rapport à la distance (d) du puits pompé à la limite ; dans ce cas, on considère la distance (r') du puits

image au puits pompé comme le double de (d) :  $r' \approx 2d \Rightarrow d = 0.75 \sqrt{\frac{Tt_i}{S}} \Rightarrow t_i = 1.78 \frac{d^2 S}{T}$

- Si le puits d'observation est situé sur l'axe passant par le puits pompé et son image (perpendiculaire à la limite), dans ce cas,  $r' = (2d - r)$ ,  $d = 0.75 \sqrt{\frac{Tt_i}{S}} + \frac{r}{2}$  et  $S = \frac{2.25 T t_0}{r^2}$ ,

$$\Rightarrow d = 0.75 \sqrt{\frac{Tt_i}{\frac{2.25 T t_0}{r^2}}} + \frac{r}{2} \Rightarrow d = \frac{0.75}{1.5} r \sqrt{\frac{t_i}{t_0}} + \frac{r}{2} \Rightarrow d = \frac{r}{2} \sqrt{\frac{t_i}{t_0}} + \frac{r}{2}$$

- Si le puits d'observation est situé du côté opposé à la limite :  $r' = (2d + r)$

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

- Si le puits d'observation est situé sur l'axe passant par le puits pompé et parallèle à la limite ; dans ce cas,  $r' = \sqrt{(4d^2 + r^2)}$

## 8. Interprétation des pompages d'essai pour les nappes libres et semi-captives

**8.1. Cas des nappes semi-captives :** La superposition ou la juxtaposition de terrains de perméabilités et de porosités différentes entraînent une hétérogénéité et une anisotropie de formations aquifères dans lesquelles on rencontre des nappes libres, captives, semi-libres ou semi captives. Lors des essais de pompage, dans ces conditions des phénomènes de drainance verticale ou horizontale se manifestent.

Les méthodes (Theis et Jacob...) utilisées pour les terrains homogènes et isotropes correspondent à des cas particuliers pour lesquels le phénomène de drainance est négligeable de même que le régime permanent n'est qu'un cas particulier du régime transitoire. En pratique, il est rare que les conditions hydrogéologiques réelles soient assimilables aux conditions aux limites idéales définies par ces méthodes. De ce fait des schémas plus complexes ont été conçus, ainsi que des méthodes de correspondances ; Trois auteurs ont élaboré des méthodes d'interprétation :

- *Hantush a tabulé les réalimentations puissantes qui stabilisent définitivement la piézométrie après une première descente.*
- *Boulton a tabulé les réalimentations limitées, produites par un aquifère secondaire.*
- *Berkaloff a synthétisé les deux approches pour donner des règles pratiques d'interprétation.*