ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Cours de physique du sol

ECOULEMENTS VERS LES OUVRAGES DE CAPTAGE

Copie des transparents

Version provisoire

Prof. A. Mermoud

Janvier 2006

Ecoulements vers les ouvrages de captage

OUVRAGES DE CAPTAGE

Ouvrages permettant de mobiliser l'eau gravitaire du sol.

Ouvrages de captage pour *l'approvision-nement en eau*:

- **puits : diamètre important et faible profondeur**
- **forages : faible diamètre et profondeur élevée**

Ouvrages de captage pour *l'élimination des eaux excédentaires*:

- **nuisibles aux cultures (fossés de drainage, drains, puits de drainage)**
- **nuisibles aux ouvrages de génie civil**

Approches de simulation

Approche à base physique

Equations mécanistes classiques:

- **éq. de Darcy :** $q = - K_s \text{ grad } H$
- **éq. de continuité :** $0 = - \text{div } q$ **(écoulement saturé)**

➔ **div [K_s grad H] = 0**

ou :

$$\boxed{K_S \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + K_S \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + K_S \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = \nabla^2 H = 0}$$

(éq. Laplace)

Equation aux dérivées partielles (deuxième ordre, elliptique):

- **conditions aux limites difficiles à spécifier**
- **domaine d'écoulement (surface de la nappe) non défini à priori**
- **nécessité de disposer de méthodes numériques appropriées.**

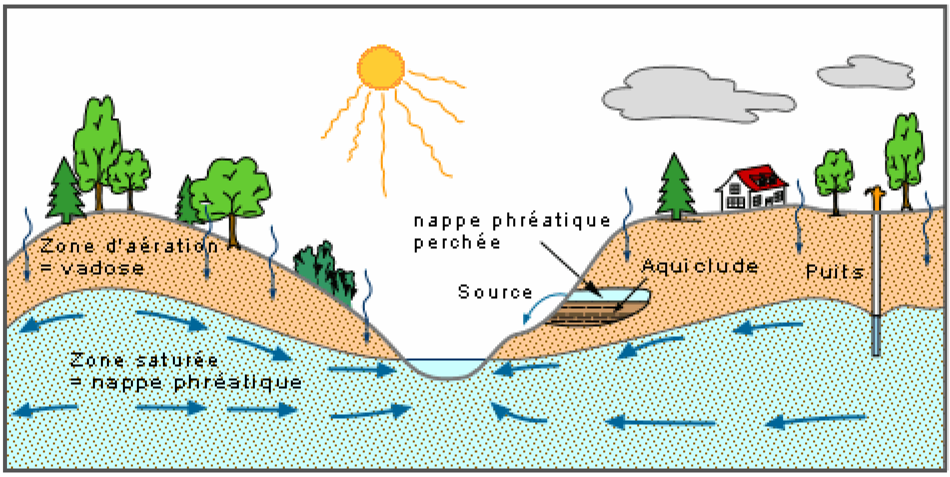
Approche simplifiée

➔ **hypothèses simplificatrices (Dupuit-Forchheimer)**

➔ **équations simples, fréquemment utilisées pour résoudre les problèmes d'écoulement vers les ouvrages peu profonds (fossés, drains, puits, etc.).**

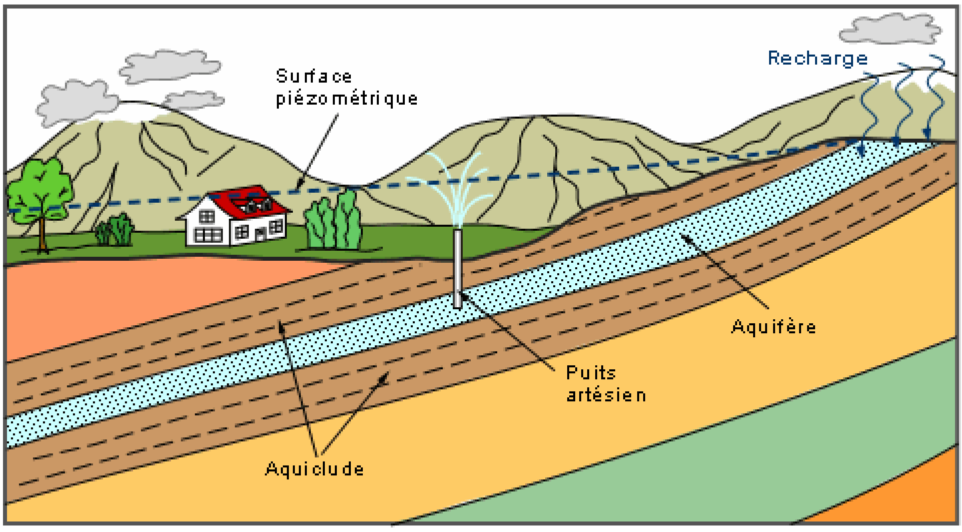
DEFINITIONS

***Aquifère*:**	**formation géologique susceptible de stocker et de transmettre des quantités d'eau telles que l'on peut en retirer un débit appréciable par captage.**
Aquifuge:	**formation qui ne peut ni contenir, ni transmettre de l'eau**
Aquiclude:	**formation qui contient de l'eau, mais qui, vu sa très faible conductivité hydraulique, ne peut transmettre des quantités d'eau appréciables**
Aquitard:	**couche de faible cond. hydraulique mais qui peut tout de même transmettre de faibles flux d'eau verticalement d'un aquifère à un autre**
Nappe libre:	**aquifère saturé en eau et non surmonté d'une couche imperméable**
Nappe captive:	**aquifère saturé prisonnier entre deux couches imperméables (aquifuge ou aquiclude); l'eau est habituellement sous pression. Lorsque l'aquifère est limité par un ou deux aquitards, il est dit *semi-captif***
Nappe perchée:	**nappe, généralement temporaire et localisée, résultant de l'interception de l'eau de percolation par un horizon peu perméable de faible étendue**
Surface de la nappe:	**niveau supérieur de la nappe**
Surface piézométrique:	**surface réelle ou fictive pour laquelle la pression de l'eau est égale à la pression atmosphérique**
Puissance de la nappe:	**hauteur d'eau mesurée depuis le substratum imperméable**

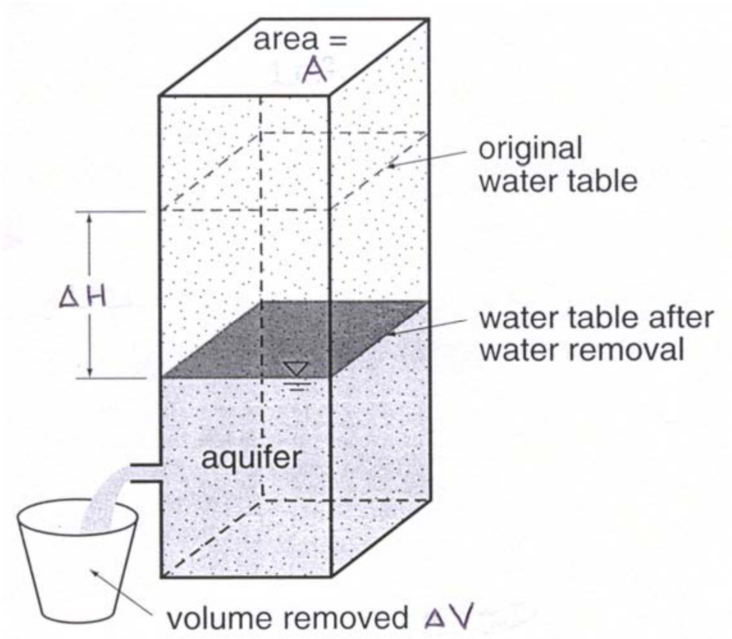


http://www.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s3/eaux.souterraines.html

Nappe libre



Nappe captive



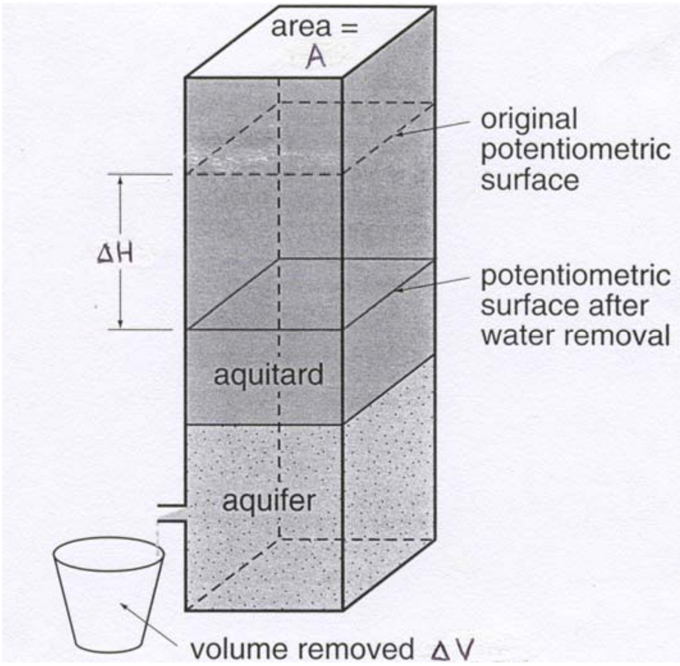
Coefficient d'emmagasinement ou porosité de drainage μ d'une nappe libre

$\Delta V = \mu \, A \, \Delta H$

$$\boxed{\mu = \frac{\Delta V}{\Delta H \, A} = \frac{\text{volume d'eau libérée}}{\text{volume de l'aquifère ayant cédé l'eau}}}$$

Valeurs indicatives de la porosité de drainage μ

-	gravier	20 - 30%
-	sable grossier	25 - 30%
-	sable moyen	20 - 25%
-	sable fin	15 - 20%
-	sable très fin	10 - 15%
-	sol argileux : moins de quelques %	



Coefficient d'emmagasinement S d'une nappe captive

(l'aquifère ne se draine pas et reste saturé)

$$\Delta V = S\ A\ \Delta H$$

ΔV : volume d'eau libéré suite à un abaissement ΔH de la surface piézométrique

$$\boxed{S = \frac{\Delta V}{\Delta H\ A}}$$

$$10^{-6} < S < 10^{-3}$$

C'est essentiellement la compressibilité de l'eau et de l'aquifère qui interviennent dans la libération de l'eau:

- **durant le pompage le niveau piézométrique baisse et donc la pression de l'eau dans l'aquifère, si bien que le liquide subit une décompression accompagnée d'une libération d'eau**
- **dans le même temps, l'eau étant à une pression plus faible, la compression de l'aquifère par les couches supérieures de sol augmente, ce qui expulse de l'eau vers le captage. Ce mécanisme est confirmé par le tassement du sol fréquemment observé après pompage prolongé dans les nappes captives.**

Transmissivité

La transmissivité T se définit par le produit:

$$\boxed{T = K_s\, e}$$

K_s : conductivité hydraulique à saturation de l'aquifère

e : puissance de la nappe

Elle correspond au débit par unité de largeur d'une nappe sous un gradient de charge unitaire[1].

Permet de calculer rapidement le débit Q traversant une section transversale d'une nappe de puissance e et de largeur L, sous un gradient H:

$$\boxed{Q = T\, L \text{ grad } H}$$

[1] $Q = K_s\, S \text{ grad } H$
Pour une largeur unitaire: $Q = K_s\, e\, (1m) \text{ grad } H$
Pour un gradient unitaire: $Q = K_s\, e = T$

Hypothèses de Dupuit-Forchheimer

- **milieu homogène, isotrope et indéformable**
- **composante verticale des vitesses négligeable**
- **vitesses identiques en tous points d'une même verticale**

➔ **équipotentielles théoriques verticales**

➔ **écoulement 1D – H[1] pour lequel le flux vaut (Darcy):**

$$q = -K_s \frac{dH}{dx} = -K_s \frac{dz}{dx}$$

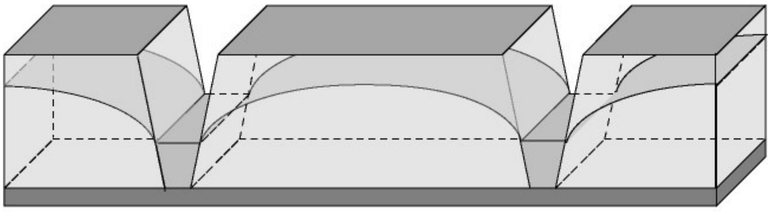
z(x) : courbe de rabattement (dépression) de la nappe

Sous les hypothèses retenues, le flux en chaque point est donc proportionnel à la pente de la nappe.

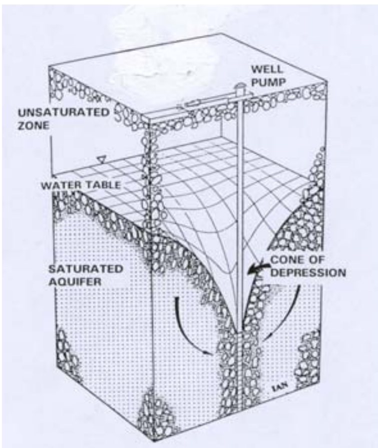
[1] unidimensionnel horizontal

Ecoulements permanents vers les ouvrages de captage
Approche simplifiée de Dupuit (1863)

- **Nappe cylindrique** : **écoulement vers une tranchée, un drain ou un canal**
  - **génératrices de la surface de la nappe parallèles à la tranchée ou aux drains**
  - **écoulement dans un plan vertical perpendiculaire à la tranchée ou aux drains**



- **Nappe à filets convergents** : **écoulement vers un puits ou un forage**
  - **la nappe prend l'aspect d'une surface conique de révolution**
  - **l'écoulement fait l'objet d'une symétrie axiale**



Avec les hypothèses de Dupuit, dans les deux cas, l'écoulement bi-dimensionnel devient mono-dimensionnel et peut être étudié dans un plan vertical quelconque.

Rabattement par un contre-canal

Objectif: calcul du débit unitaire Q_y d'un canal alimenté par une rivière (contre-canal) en régime permanent

Hypothèses: ouvrages reposant sur le substratum imperméable et à parois verticales

Distance rivière-canal: L
Hauteur de l'eau dans la rivière: h
Hauteur de l'eau dans le contre-canal: z_o

On a: $Q_y = q\,S = q\,z\,(1\text{ m})$

$$q = -K_s \frac{dH}{dx} = -K_s \frac{dz}{dx}$$

$$\rightarrow \quad Q_y = -K_s\, z \frac{dz}{dx}$$

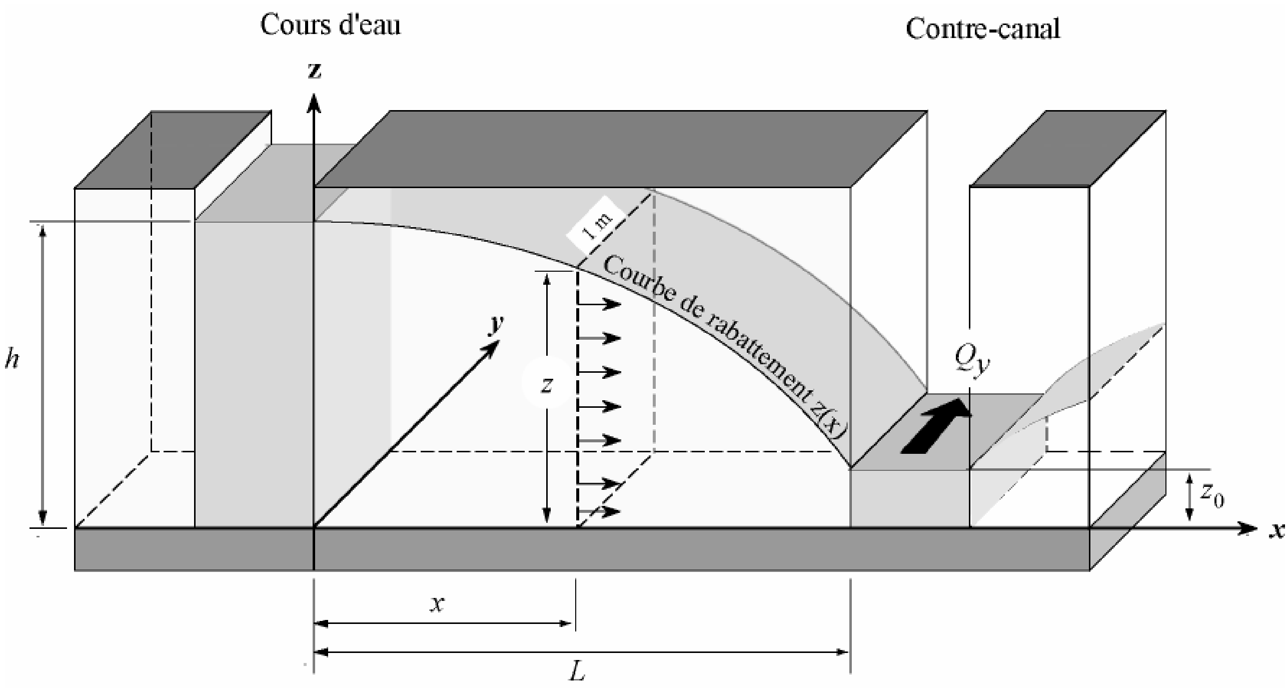
soit, en intégrant:

$$Q_y \int_0^L dx = -K_s \int_h^{z_0} z\,dz \quad \text{soit :} \quad Q_y\, L = \frac{K_s}{2}\left(h^2 - z_o^2\right)$$

$$\boxed{Q_y = \frac{K_s}{2L}\left(h^2 - z_o^2\right)}$$

Pour un canal de longueur D : $$\boxed{Q = \frac{K_s\, D}{2L}\left(h^2 - z_o^2\right)}$$

Q : débit du canal, compte-tenu des propriétés hydrauliques du sol et de la géométrie du système d'écoulement.



Rabattement par un contre-canal

Rabattement par un contre-canal

Equation z(x) de la courbe de rabattement de la nappe

Pour un point (x, z) quelconque, l'équation du débit devient:

$$Q_y = \frac{K_s}{2x}\left(z^2 - z_o^2\right)$$

En égalant les 2 expressions fournissant le débit, on obtient:

$$\frac{K_s}{2x}\left(z^2 - z_o^2\right) = \frac{K_s}{2L}\left(h^2 - z_o^2\right)$$

Il vient donc :

$$\boxed{\left(z^2 - z_o^2\right) = \frac{x}{L}\left(h^2 - z_o^2\right)}$$

ou:

$$\boxed{z^2 = \frac{\left(h^2 - z_o^2\right)}{L}x + z_o^2}$$

La surface de la nappe est donc cylindrique, d'axe parallèle au canal et de forme parabolique.

Rabattement par un canal unique

Les équations du rabattement par un contre-canal peuvent être étendues au cas du rabattement d'une nappe par un canal (fossé ou tranchée) unique, en dehors de l'existence d'un ouvrage d'alimentation.

Dans ce cas, la distance L caractérise la zone d'influence du canal sur le niveau de la nappe (distance d'action ou distance d'influence):

$$\boxed{L = \frac{K_s}{2Q_y}(h^2 - z_o^2)}$$

Hauteur de résurgence

Dans le cas où le sol aux abords de la tranchée est très peu perméable, il faut considérer l'existence d'une hauteur de résurgence z'.

La hauteur réelle z_r de la nappe au droit du canal vaut:

$$z_r = z_o + z'$$

En remplaçant z_o par z_r, on obtient l'équation généralisée de la surface de la nappe:

$$\left[z^2 - (z_o + z')^2\right] = \frac{x}{L}\left[h^2 - (z_o + z')^2\right]$$

Selon Vibert, z' s'obtient comme suit:

$$z' = \frac{1}{2}\left(\sqrt{L^2 + 4h^2} - L\right)$$

L	:	distance entre canaux ou distance d'action
h	:	hauteur de l'eau dans le canal d'alimentation ou hauteur de la nappe au-delà de la zone d'influence

Les formules ainsi modifiées ne donnent pas une expression rigoureusement exacte de la surface de la nappe. Toutefois, z' étant généralement petit en regard de L / h, l'erreur est faible.

Rabattement par puits en nappe libre

Objectif : calculer le débit Q que l'on peut extraire d'un puits de rayon r atteignant le substratum imperméable, de sorte à maintenir une hauteur d'eau z_o constante dans le puits, lorsque le régime permanent est atteint.

L'influence du pompage se fait sentir sur une certaine distance R (rayon d'action) de l'axe du puits.

Surface de la nappe = surface conique de révolution (cône de dépression). Isopièzes: cercles concentriques; les filets liquides convergent vers le puits.

➔ nappe à filets convergents

Débit Q à travers une surface cylindrique de rayon x et de hauteur z concentrique au puits:

$$Q = q\,S \quad \text{et :} \quad S = 2\,\pi\,x\,z$$

$$q = K_s \frac{dH}{dx} = K_s \frac{dz}{dx}^{*}$$

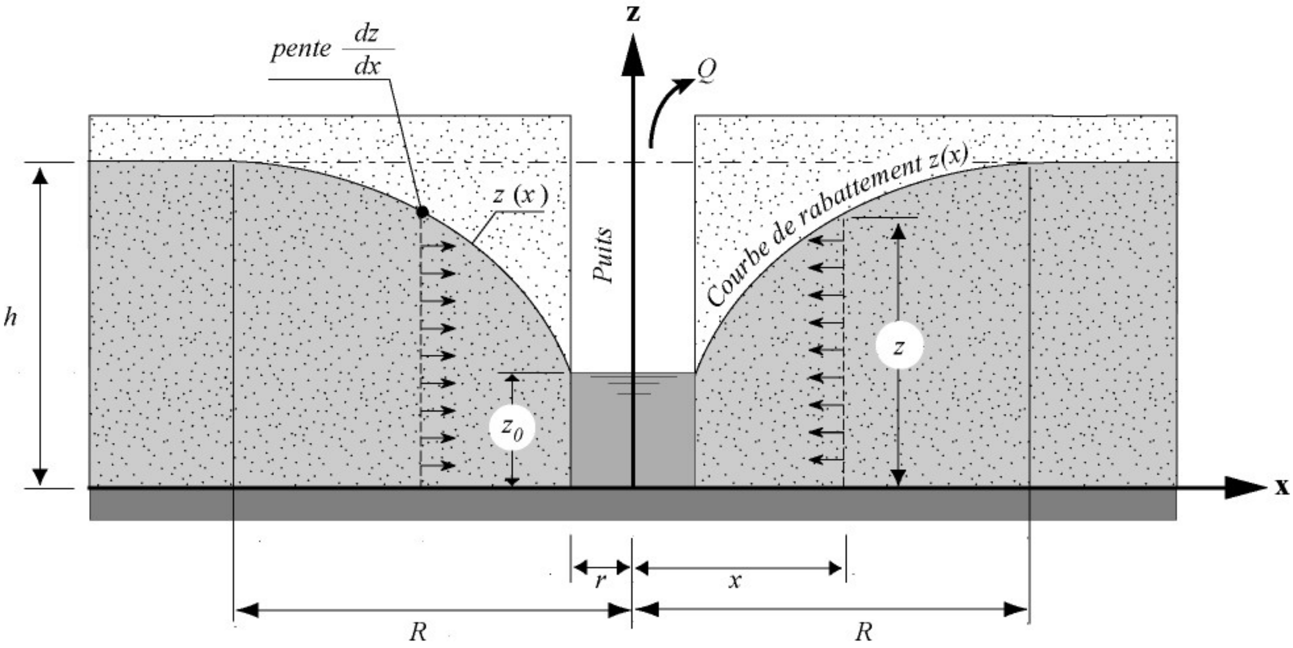
➔ $$Q = 2\,\pi\,x\,z\,K_s \frac{dz}{dx}$$

En intégrant: $$Q \int_r^R \frac{dx}{x} = 2\,\pi\,K_s \int_{z_o}^{h} z\,dz$$

soit : $$Q\left(\ln R - \ln r\right) = \frac{2\pi K_s}{2}\left(h^2 - z_o^2\right)$$

$$\boxed{Q = \pi\,K_s \frac{\left(h^2 - z_o^2\right)}{\ln\left(R/r\right)}}$$

* signe positif car le flux q est opposé à la direction de l'axe x



Rabattement par un puits en nappe libre

Rabattement par puits en nappe libre

Calcul de l'équation de la surface de la nappe z(x)

Pour un point (x, z) quelconque, l'éq. de débit devient:

$$Q = \pi K_s \frac{\left(z^2 - z_o^2\right)}{\ln(x/r)}$$

En égalant les 2 expressions fournissant le débit, on obtient:

$$\pi K_s \frac{\left(z^2 - z_o^2\right)}{\ln(x/r)} = \pi K_s \frac{\left(h^2 - z_o^2\right)}{\ln(R/r)}$$

$$\left(z^2 - z_o^2\right) = \left(h^2 - z_o^2\right)\frac{\ln(x/r)}{\ln(R/r)}$$

ou:

$$\boxed{z^2 = \left(h^2 - z_o^2\right)\frac{\ln(x/r)}{\ln(R/r)} + z_o^2}$$

La surface de la nappe est convergente ou conique.

z^2 varie linéairement avec le logarithme de la distance x au puits.

La surface de la nappe est donc représentée par une surface de révolution à écoulement convergent de type logarithmique.

Rabattement par puits en nappe captive

Si l'eau peut être supposée incompressible, le débit Q à travers une surface cylindrique concentrique au puits de rayon x et de hauteur e peut se calculer par:

$$Q = q\,S = q\,2\,\pi\,x\,e$$

$$q = K_S \frac{dH}{dx} = K_S \frac{dz}{dx} \quad \text{(z(x) : surface piézométrique)}$$

$$Q = 2\,\pi\,x\,e\,K_S \frac{dz}{dx}$$

soit :

$$Q \int_r^R \frac{dx}{x} = 2\,\pi\,e\,K_S \int_{z_o}^{h} dz$$

h : hauteur de la surface piézométrique dans la zone non influencée par le puits

et donc:

$$\boxed{Q = \frac{2\pi K_S\, e}{\ln(R/r)}\left(h - z_o\right)}$$

➔ équation de la surface piézométrique:

$$z - z_o = \frac{Q}{2\pi K_S\, e}\ln(x/r)$$

ou:

$$\boxed{z = \frac{Q}{2\pi K_S\, e}\ln(x/r) + z_o}$$

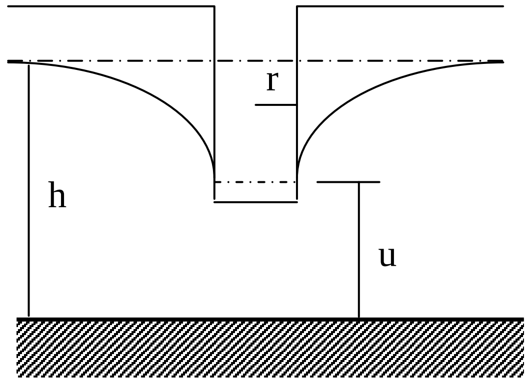
Nappe à surface piézomètrique de type logarithmique

Puits situés au-dessus du substratum imperméable (formules empiriques)

Puits à fond seul perméable

$$Q = 4K_S r\,(h - u)$$

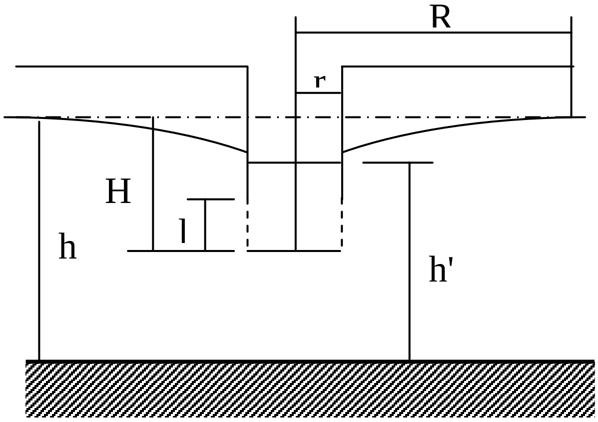
(Forchheimer)



Puits à fond étanche et à parois partiellement perméables

$$Q = 2\pi K_S l \left(\frac{h - h'}{\ln\left(0.66\,\frac{l}{r}\right)} \right)$$

(Babouchkine et Guirinsky)



Puits à fond perméable et à parois partiellement perméables

$$Q = \pi K_S \frac{\left(H' + 1/2\right)^2 - \left(h' + 1/2\right)^2}{\ln(R/r)}$$

(Porchet)

Puits à fond et parois latérales entièrement perméables

$$Q = \pi K_S \frac{hH'}{\ln(R/r)}$$

(Vibert)

Ecoulement transitoire vers un puits

Théorie de Theis

Hypothèses:
- **pompage à débit Q constant**
- **nappe captive d'épaisseur constante et de grande étendue**

$$\Delta = \frac{Q}{4\,\pi\,T}\,W(u) \qquad u = \frac{x^2\,S}{4\,T\,t}$$

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

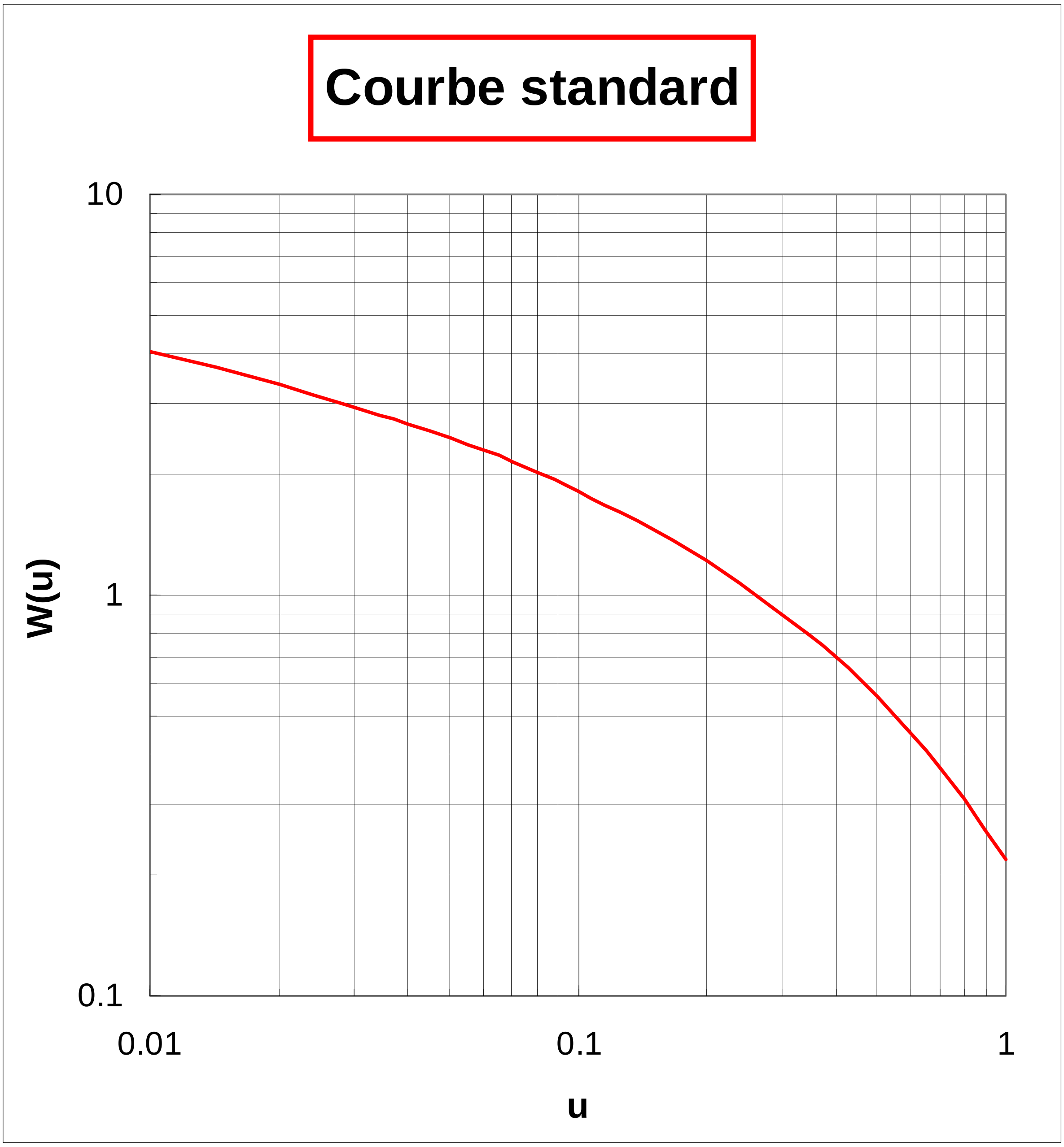
$\Delta(x,t)$	:	diminution de charge de pression au temps t et à la distance x de l'axe du puits
T	:	transmissivité de l'aquifère
S	:	coefficient d'emmagasinement de l'aquifère
W(u)	:	fonction caractéristique du puits ou courbe standard

Formule d'approximation logarithmique (Jacob)

($u < 0.01$)

$$\Delta = \frac{0.183\,Q}{T}\log\frac{2.25\,T\,t}{x^2\,S}$$

Ces éq. peuvent être généralisées aux nappes libres pour autant que Δ qui représente alors le rabattement soit faible par rapport à la puissance de la nappe.



Courbe standard
10
1
0.1
W(u)
0.01
0.1
1
u

Détermination de la conductivité hydraulique à saturation par essais de pompage

- **A partir des équations de Dupuit :**

$$K_s = \frac{Q}{\pi} \frac{\ln(R/r)}{(h^2 - z_0^2)}$$

Puits unique; nécessité de connaître R

$$K_s = \frac{Q}{\pi} \frac{\ln(x/r)}{(z^2 - z_0^2)}$$

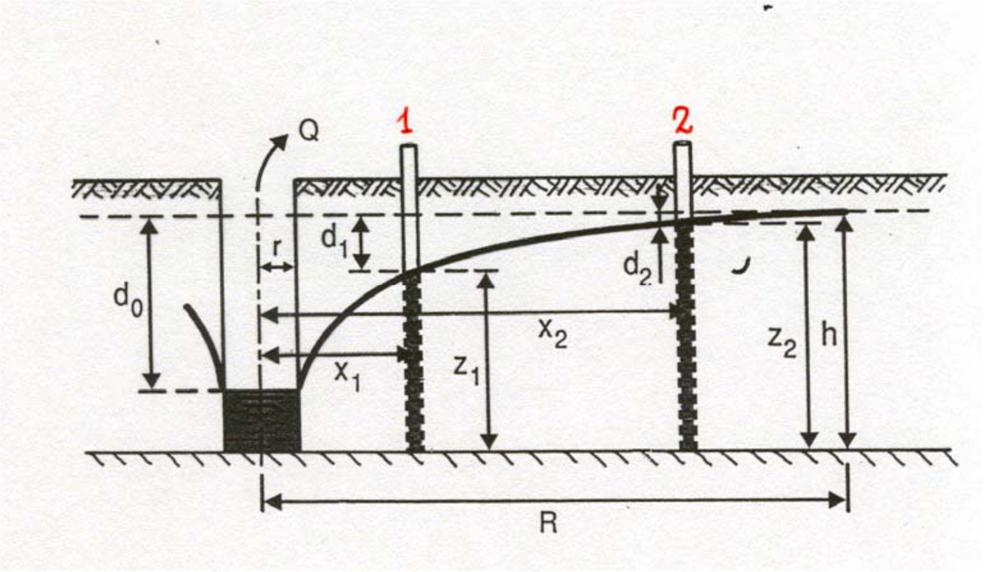
Puits et piézomètre

- **Formules dérivées de celles de Dupuit**

Formules de Thiem **(essais sur un puits équipé de piézomètres)**

Formule de Thiem

Rabattement par puits complet en régime permanent



Débit Q à travers une surface cylindrique concentrique au puits de rayon x et de hauteur z:

$$Q = q\,S = q\,2\,\pi\,x\,z \quad \text{et:} \quad q = K_S \frac{dz}{dx}$$

$$\Rightarrow \quad Q = 2\,\pi\,x\,z\,K_S \frac{dz}{dx}$$

en intégrant: $$Q \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{x} = 2\,\pi\,K_S \int_{z_1}^{z_2} z\,dz$$

$$\boxed{K_S = \frac{Q}{\pi} \frac{\ln(x_2 / x_1)}{(z_2^2 - z_1^2)}}$$

Q : débit de pompage
x_1 : distance entre l'axe du puits et le piézomètre 1
x_2 : distance entre l'axe du puits et le piézomètre 2
z_1 : hauteur de l'eau dans le piézomètre 1
z_2 : hauteur de l'eau dans le piézomètre 2

Deuxième formule de Thiem

Lorsque la cote du substratum imperméable n'est pas connue

Procédure expérimentale:

- **pompage à 2 débits différents Q_1 et Q_2**
- **mesure du rabattement dans 2 piézomètres**
- **calcul de la conductivité hydraulique K_s**

$$\boxed{K_s = \frac{\Delta x}{2\,\pi\,x_1\,\Delta z}\left(\frac{Q_2}{\Delta d_2} - \frac{Q_1}{\Delta d_1}\right)}$$

Δx : distance entre les 2 piézomètres 1 et 2

x_1 : distance entre l'axe du puits et le piézomètre 1

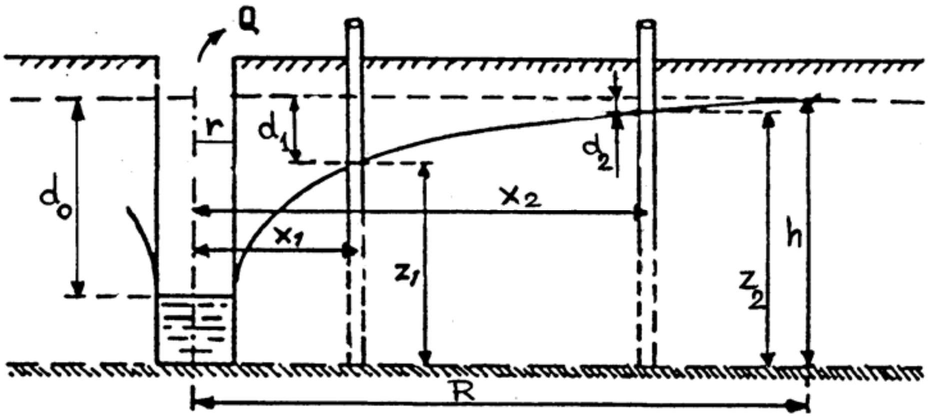
Δz : différence de cote dans le piézomètre 1 pour Q_1 et Q_2

Δd_1 : différence de niveau entre les piézomètres 1 et 2 pour Q_1

Δd_2 : différence de niveau entre les piézomètres 1 et 2 pour Q_2

Détermination de la porosité de drainage μ

Pompage bref dans un puits équipé de 2 piézomètres.



$$\boxed{\mu = \frac{V_e}{V_a}}$$

V_e : volume d'eau extraite du sol $V_e = V_p - \pi r^2 d_o$

V_p : volume d'eau pompée au temps t

$\pi r^2 d_o$: volume d'eau dans le puits avant pompage

V_a : volume de sol assaini = volume du cône de rabattement[1]

$$V_a = \pi M \left(\frac{R^2 - r^2}{2} - r^2 \ln \frac{R}{r} \right)$$

avec : $M = \dfrac{d_1 - d_2}{\ln(x_2 / x_1)}$ **et** $R = x_1 \exp(d_1/M)$

[1] **S'obtient par intégration volumique circulaire de 0 à 2π de la surface définie par l'équation de la courbe de rabattement entre $x = r$ et $x = R$, $z = z_o$ et $z = h$**

Détermination du rayon d'action R

- **par observation du rabattement** in-situ au moyen de piézomètres implantés à des distances croissantes de l'ouvrage

- **à partir des lois de Dupuit**
  - canal : $R = \frac{K_s \; L}{2 \; Q}\left(h^2 - z_o^2\right)$
  - puits : $\ln R = \frac{\pi \; K_s}{Q}\left(h^2 - z_o^2\right) + \ln r$

- **à partir de la formule d'approximation log.**

$$R = 1.5\sqrt{\frac{T \; t}{S}}$$

- **à partir de formules empiriques**
  - Sichardt : $R = 3000 \; \left(h^2 - z_o\right)\sqrt{K_s}$
  - Choultse : $R = \sqrt{\frac{6 \; h \; K_s \; t}{\mu}}$

h	:	hauteur de l'aquifère (m)
t	:	temps de pompage (s)
μ	:	porosité de drainage

- **valeurs empiriques :** de 60 m pour les sables fins à 200 m pour les graviers.

Détermination de T et S

Formule d'approximation logarithmique (Jacob) (u < 0.01)

$$\Delta = \frac{0.183\,Q}{T} \log \frac{2.25\,T\,t}{x^2\,S}$$

$$\Delta = \frac{0.183\,Q}{T} \left(\log t + \log \frac{2.25\,T}{x^2\,S} \right)$$

$$\Delta = a\,(\log t + \log b)$$

$$a = \frac{0.183\,Q}{T} \qquad \text{et:} \qquad b = \frac{2.25\,T}{x^2\,S}$$

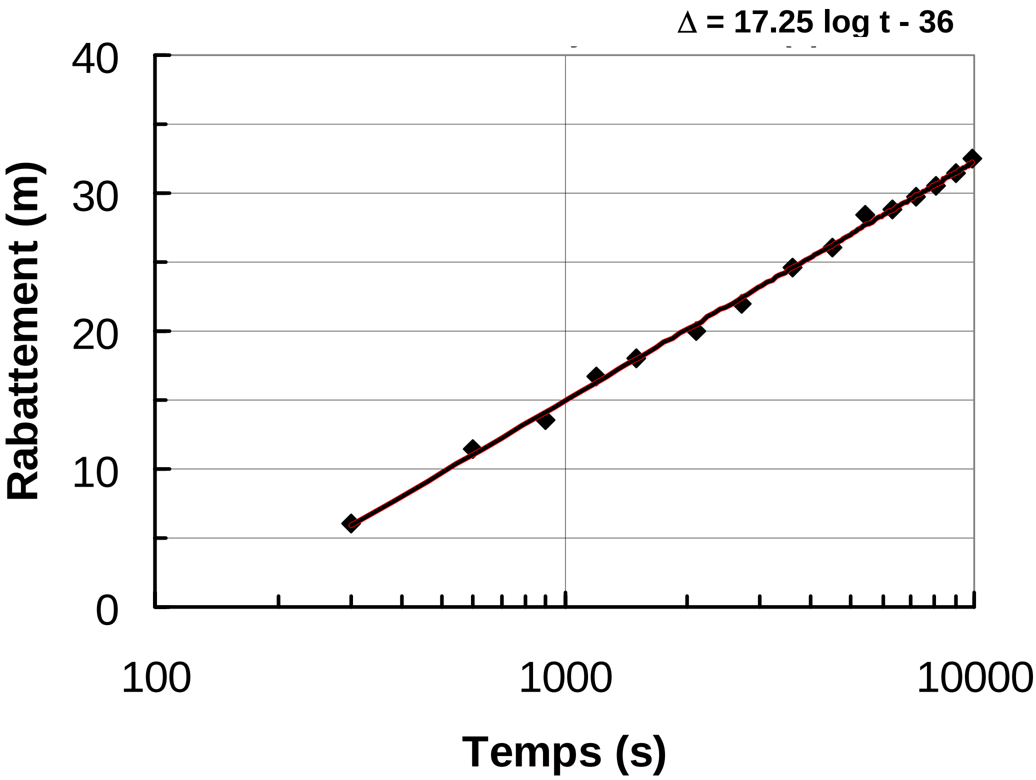
La pente de la droite $\Delta = f\,(\log t)$ permet de calculer T, après quoi la valeur de S est tirée de l'éq. générale.

Méthode de la courbe standard : ***méthode graphique***

Exemple de calcul de T et de S
(Formule de Jacob)

Débit de pompage: 0.5 m^3/s

Mesures de couples (rabattement Δ - temps t) sur un piézomètre situé à 5m du puits (figure).



Calcul de la transmissivité T

$$\mathbf{a} = \frac{\partial\ \Delta}{\partial\ (\log\ t)} = \mathbf{17.25} \ \Rightarrow \ \mathbf{T} = \frac{\mathbf{0.183\ Q}}{\mathbf{a}} = \mathbf{5.4 \cdot 10^{-3}\ \ m^2/s}$$

Calcul du coefficient d'emmagasinement S

Introduction des coordonnées d'un point quelconque (15, 1000 par ex.) dans l'éq. de Jacob et calcul de S ➡ S = 6.3 %

Détermination de T et S
Méthode de la courbe standard

$$\Delta = \frac{Q}{4\ \pi\ T}\ W(u) \qquad \text{avec:}$$

$$u = \frac{x^2\ S}{4\ T\ t} \qquad \text{soit:} \qquad t = \frac{x^2\ S}{4\ T\ u}$$

On peut en tirer les valeurs de T et de S:

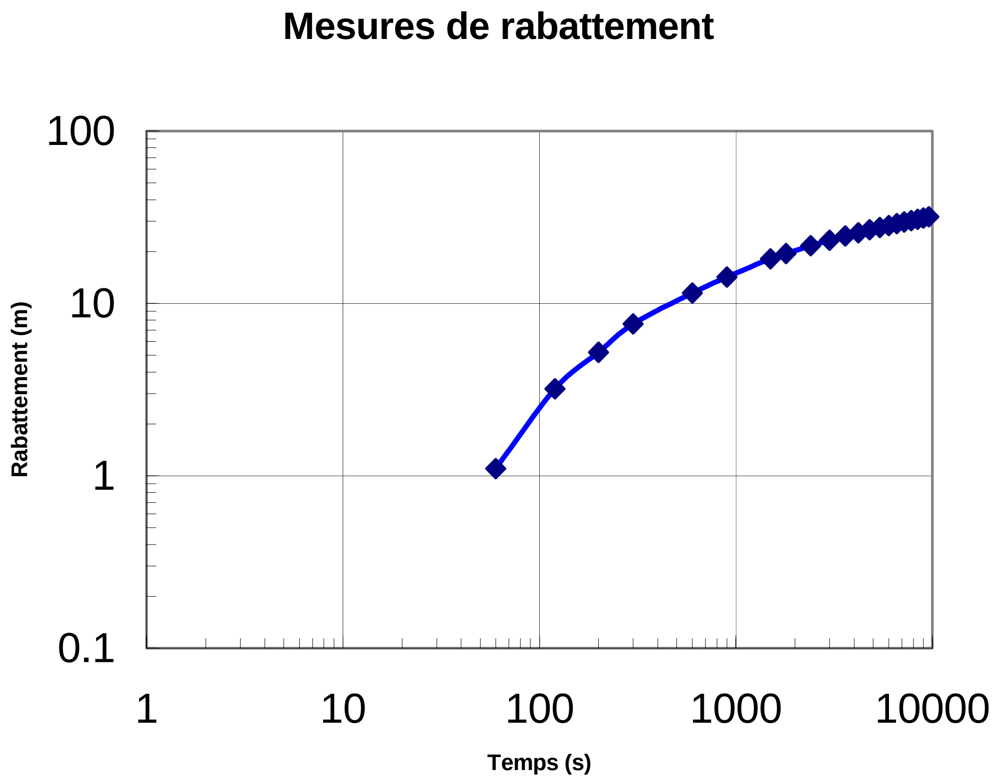
$$T = \frac{Q}{4\ \pi\ \Delta}\ W(u) \qquad S = \frac{4\ T\ t\ u}{x^2}$$

Sous forme log, les éq. de Theiss deviennent:

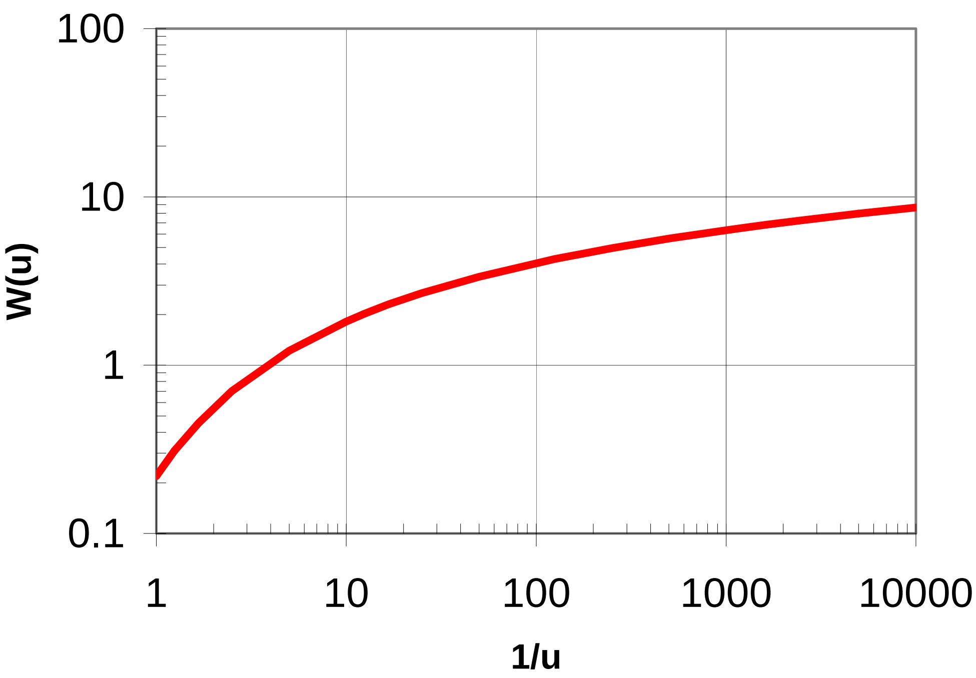
$$\log \Delta = \log W(u) + C \qquad \text{avec:} \qquad C = \log \frac{Q}{4\ \pi\ T}$$

$$\log\ t\ = \ \log \frac{1}{u} + C' \qquad \text{avec:} \qquad C' = \log \frac{x^2\ S}{4\ T}$$

Ces 2 éq. sont similaires. La loi de variation de log Δ en fonction de log t (mesures) sera donc identique à la loi qui lie log W(u) à log 1/u (courbe standard). On superpose les 2 courbes en conservant les axes parallèles, de telle sorte que la zone de superposition soit maximale. Dans cette zone, on choisit un point quelconque qui définit 2 paires de valeurs (Δ, W(u) et t, 1/u), à partir desquelles on calcule T et S.



Détermination T et S par la méthode de la courbe standard



Courbe standard

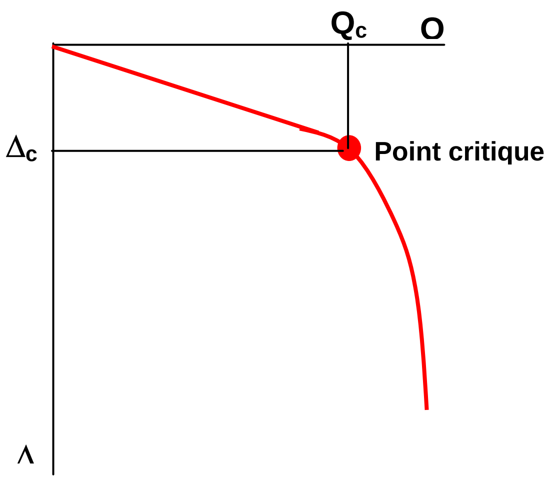
Etude du rabattement dans un puits à partir des équations de Dupuit

Cas d'une nappe libre: $Q = \pi K_S \dfrac{(h^2 - z_o^2)}{\ln(R/r)}$

Δ	:	rabattement ($\Delta = h - z_o$)
h	:	hauteur de la nappe avant pompage
z_o	:	hauteur de l'eau dans le puits, en régime permanent

$$\boxed{Q = \pi K_S \frac{(2h - \Delta)\Delta}{\ln(R/r)} = C(2h - \Delta)\Delta}$$ avec: $C = \dfrac{\pi K_S}{\ln(R/r)}$

$Q(\Delta)$: courbe caractéristique ou caractéristique du puits



Lorsque la pente de la courbe caractéristique augmente brutalement, le *point critique* est atteint.

Le débit critique Q_c correspond au débit maximum que l'on peut extraire de l'ouvrage.

Le débit spécifique q_Δ est le débit de pompage pour un rabattement unitaire: $q_\Delta = \dfrac{Q}{\Delta}$, **soit:** $q_\Delta = C(2h - \Delta)$

Le débit spécifique varie donc linéairement avec le rabattement et diminue lorsque le rabattement augmente.

Etude du rabattement dans un puits à partir de l'équation de Theiss

T et S sont supposés connus

$$\Delta = \frac{Q}{4\ \pi\ T}\ W(u) \qquad u = \frac{x^2\ S}{4\ T\ t}$$

Sur le pourtour du puits (x = r) et pour une durée de pompage t donnée:

$$u = \frac{r^2\ S}{4\ T\ t} \quad \rightarrow \quad u \text{ et } W(u) = \text{cstes}$$

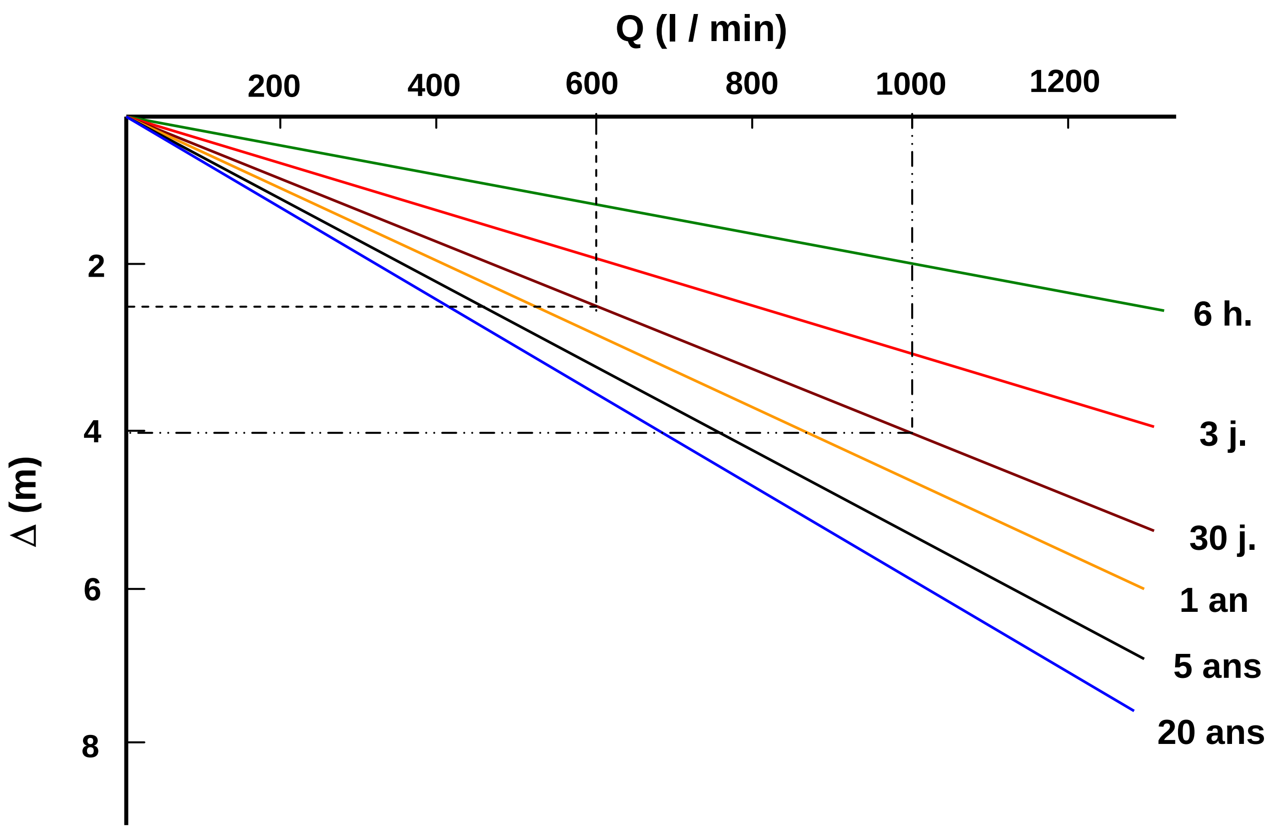
$$\Delta = C\ Q \qquad C = \frac{1}{4\ \pi\ T}\ W(u)$$

Δ : **rabattement**

Q : **débit de pompage**

T : **transmissivité de l'aquifère**

S : **coefficient d'emmagasinement de l'aquifère**



Droites caractéristiques $\Delta = f(Q)$

pour différentes durées de pompage