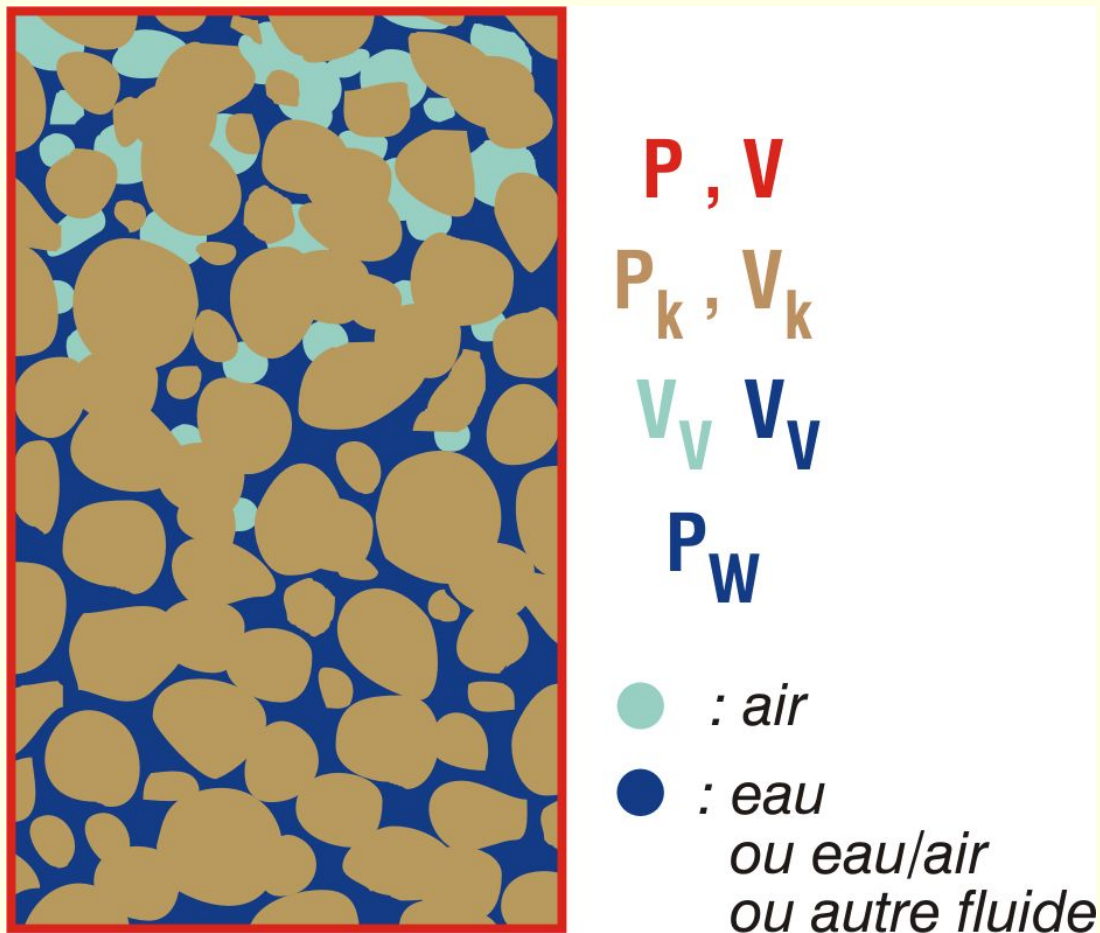


# Eau dans le sol

AUCE 1172

Cours 4

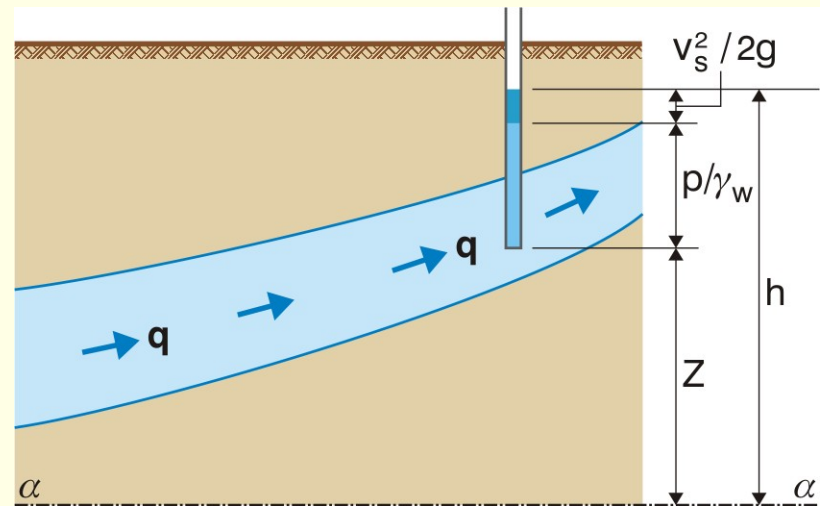
# Caractéristiques physiques d'un sol



# Équation de Bernoulli (1)

- On se place dans un milieu saturé en régime permanent
- Les particules de fluides suivent une trajectoire invariable au fil du temps (lignes de courant)
- Si on a un liquide parfait (incompressible et non visqueux), on peut appliquer le théorème de Bernoulli qui dit que la charge hydraulique reste constante le long d'un filet de fluide

$$h = z + \frac{p}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2g}$$



# Équation de Bernoulli (2)

Énergie cinétique

Énergie potentielle

$$h = \frac{v^2}{2g} + \frac{u}{\gamma_w} + Z$$

$h$  = la charge hydraulique

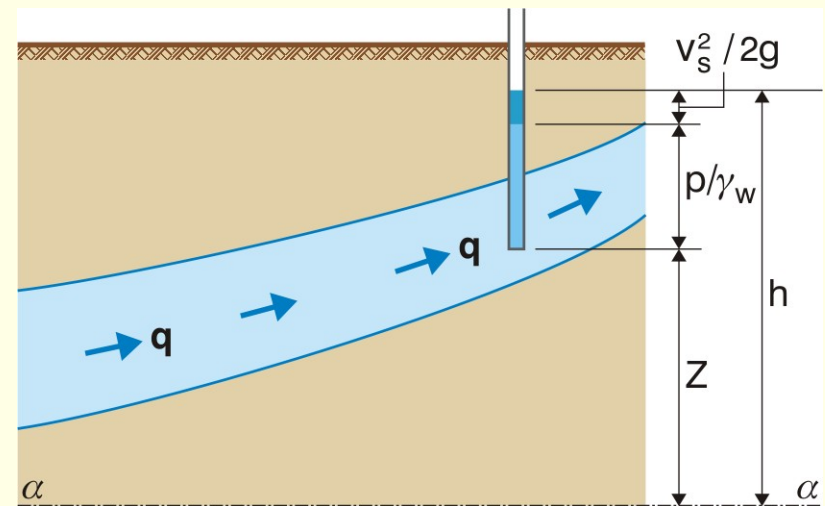
$u$  = la pression ( $p$ )

$v$  = la vitesse

$\gamma_w$  = le poids volumique de l'eau

$Z$  = l'altitude

- Mais la charge hydraulique varie....car il y a dissipation de l'énergie au sein de l'eau et au contact des grains
- D'autre part les vitesses d'écoulement sont faibles...on peut négliger l'énergie cinétique



# Équation de Bernoulli (3)

Hauteur piézométrique

$$h = \frac{u}{\gamma_w} + Z$$

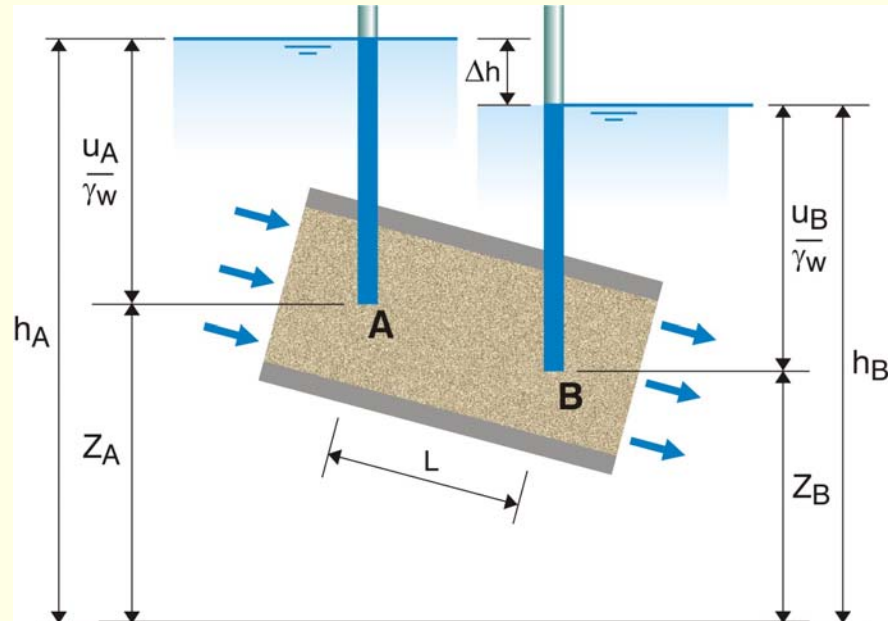
$$i = \frac{\Delta h}{L} = \frac{\Delta h}{\Delta s}$$

$\Delta h$  = différence de potentiel  
ou perte de charge

$i$  = le gradient hydraulique

$L$  ou  $\Delta h$  = la distance le long du  
filet de fluide

[www.GenieCivilPDF.com](http://www.GenieCivilPDF.com)



## Loi de Darcy

$$v = ki$$

$v$  = vitesse de percolation dans un sol saturé

$k$  = conductivité hydraulique ou coefficient de perméabilité en cm/sec

$i$  = gradient hydraulique

Quelques valeurs....

Type de sol	k (cm/sec)	Perméabilité relative
Gravier	> 1	Très perméable
Sable grossier	>10 <sup>-2</sup>	Perméable
Sable fin	10 <sup>-2</sup> ...10 <sup>-4</sup>	Moyennement perméable
Limon	10 <sup>-4</sup> ...10 <sup>-6</sup>	Peu perméable
Argile	<10 <sup>-7</sup>	(Quasi) imperméable

$$k = \frac{\gamma_w}{\eta} \bar{K}$$

$\bar{K}$  = perméabilité absolue (en cm<sup>2</sup>) ou Darcy  
 $\eta$  = viscosité de l'eau

# Influence de la température...

$$k_{20^{\circ}\text{C}} = \frac{\gamma_{w,20^{\circ}\text{C}}}{\eta_{20^{\circ}\text{C}}} \overline{K}$$

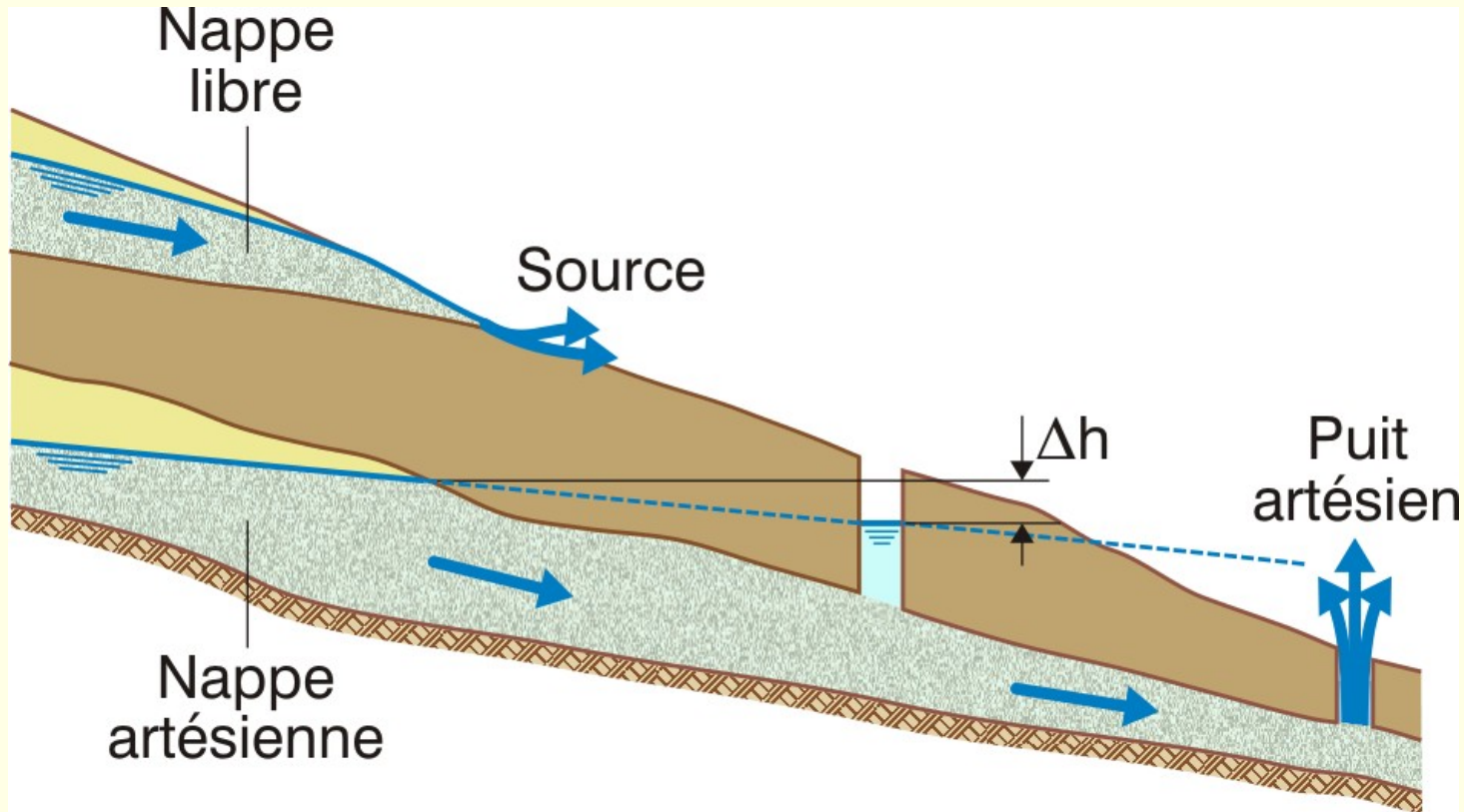


$$k_{20^{\circ}\text{C}} = \frac{\eta_T}{\eta_{20^{\circ}\text{C}}} \cdot k_T$$

$$k_T = \frac{\gamma_{w,T}}{\eta_T} \overline{K}$$

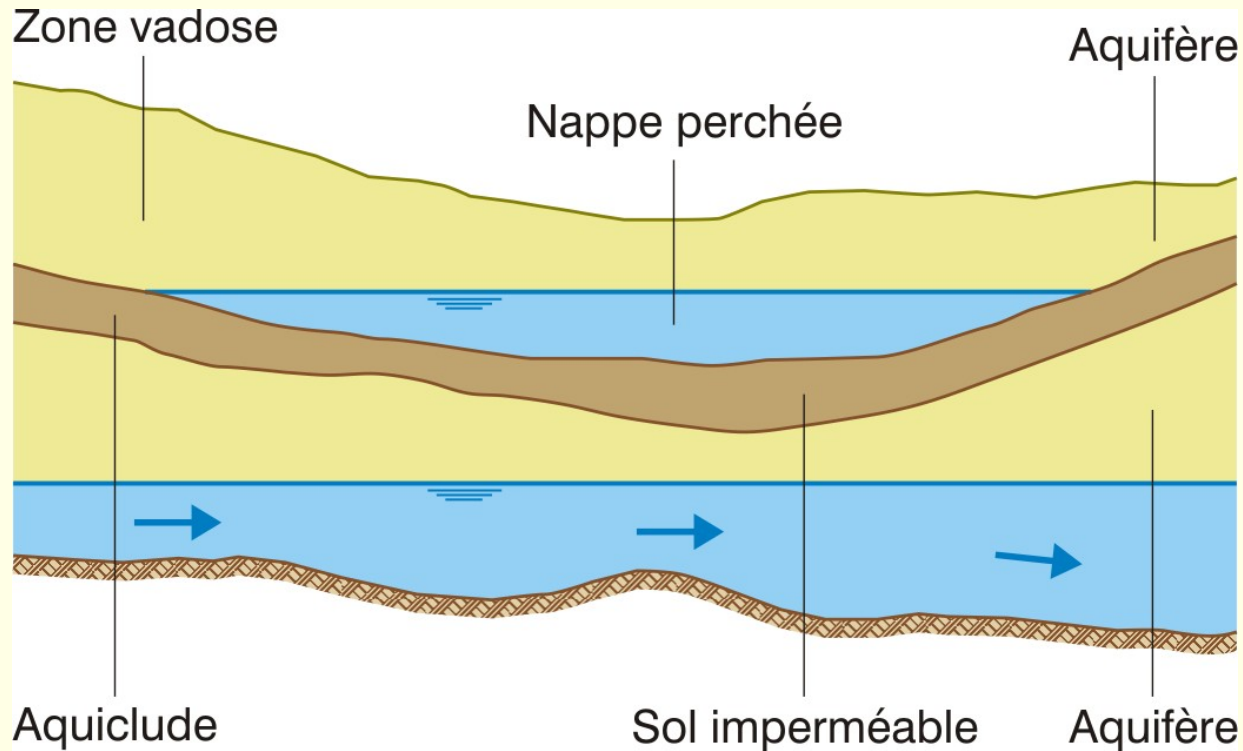
1.135 pour  $T = 15^{\circ}\text{C}$   
0.797 pour  $T = 30^{\circ}\text{C}$

# Nappe(s) phréatique(s)



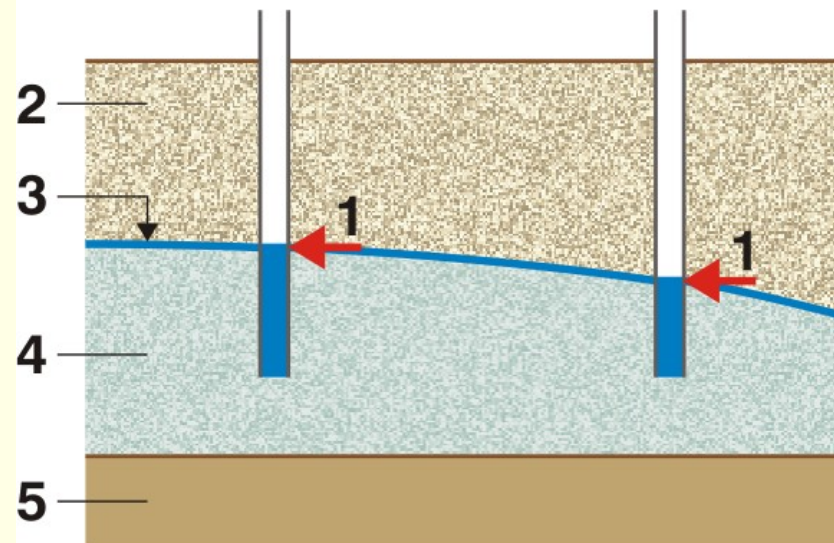


# Nappe libre au repos, nappe perchée



# Nappe libre

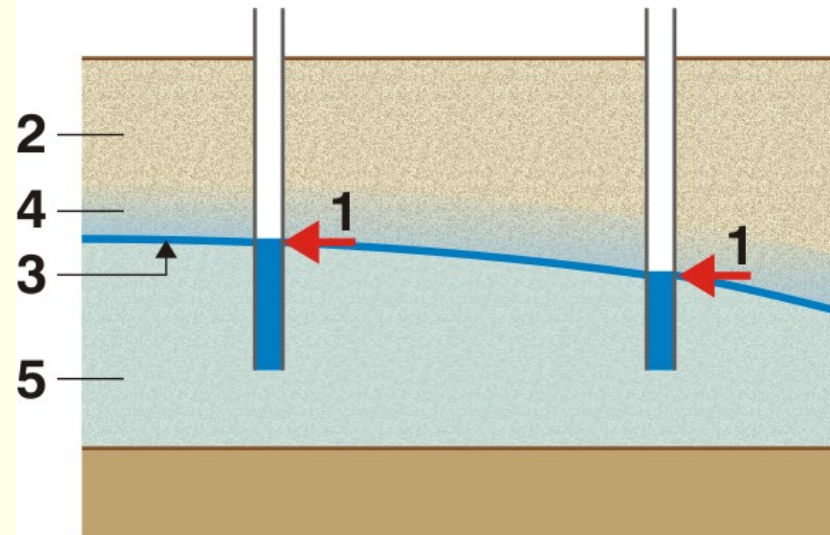
**Nappe phréatique dans une couche de sol perméable composé de gros grains**



1. Hauteur piézométrique
2. Partie de la couche non saturée d'eau de la nappe aquifère
3. Surface piézométrique
4. Couche perméable noyée
5. Couche imperméable inférieure

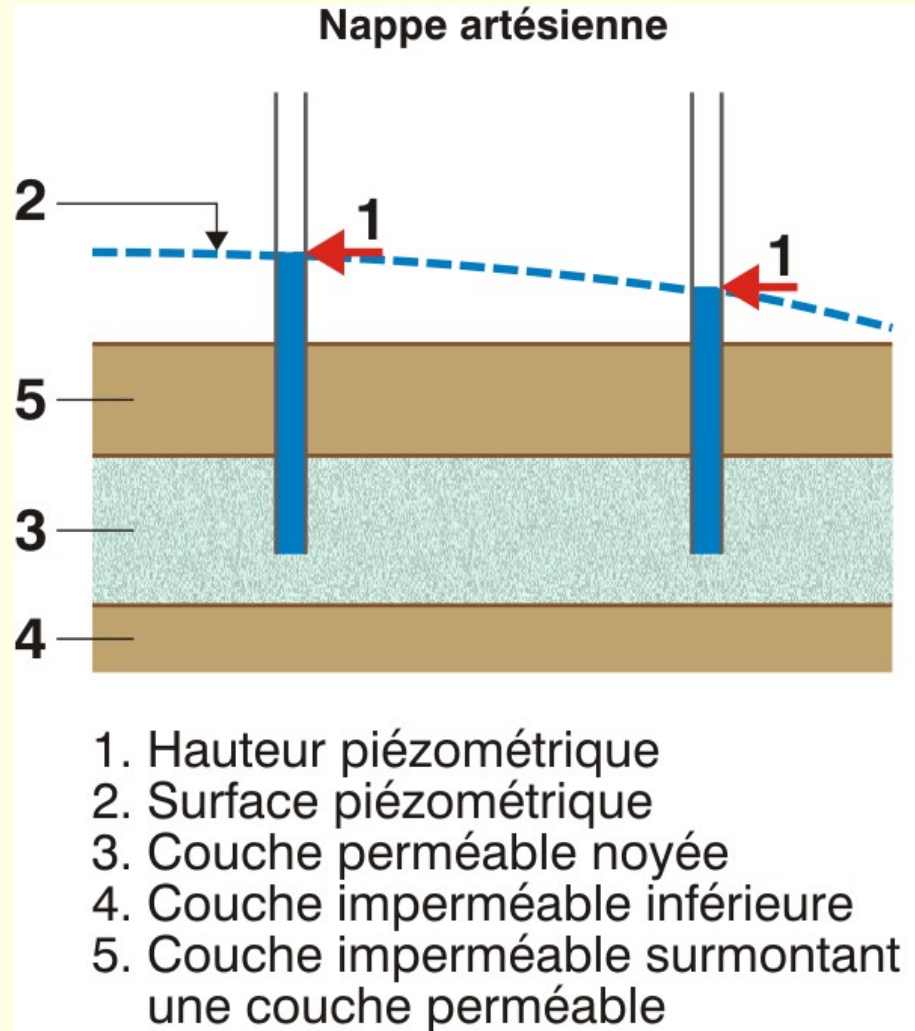
# Ascension capillaire

**Nappe phréatique dans une couche de sol perméable composé de grains assez fins**

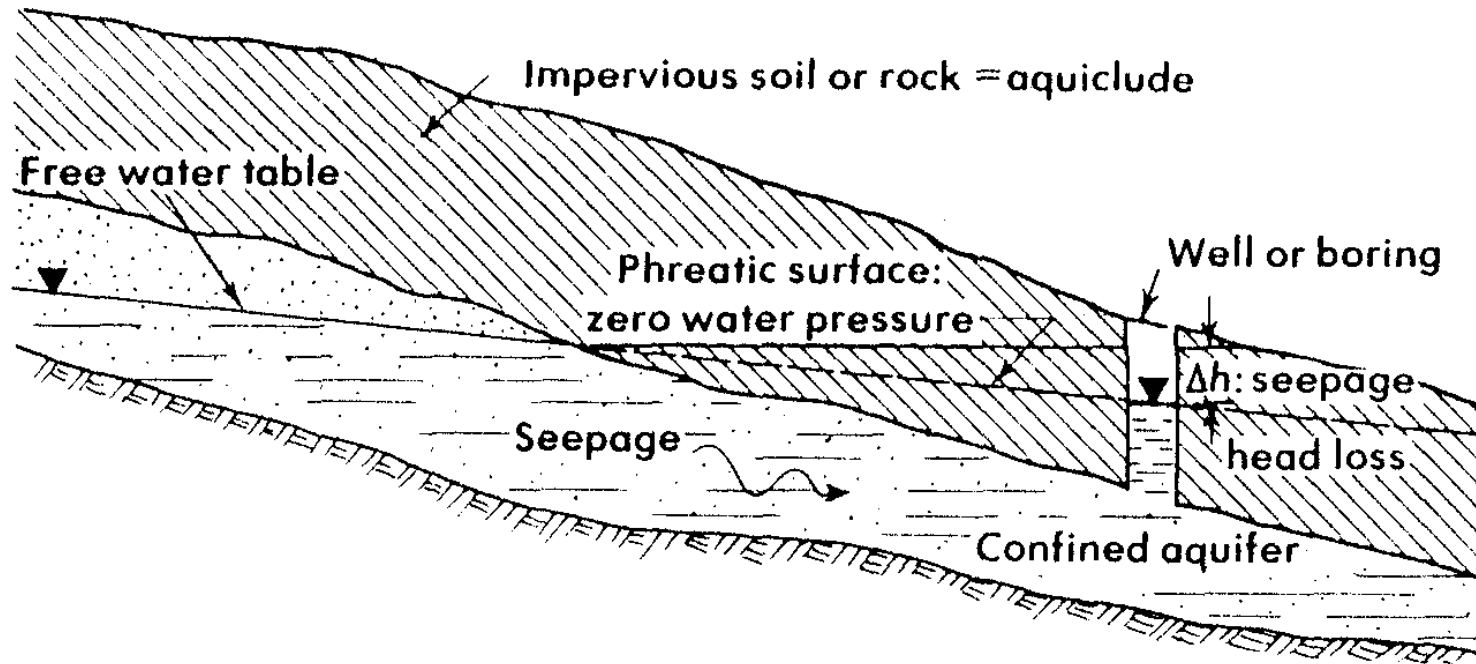


1. Hauteur piézométrique
2. Partie de la couche non saturée d'eau de la nappe aquifère
3. Surface piézométrique
4. Frange capillaire
5. Couche perméable noyée

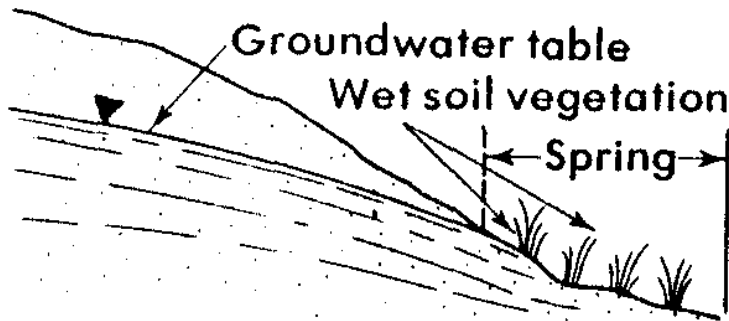
# Nappe artésienne ou captive



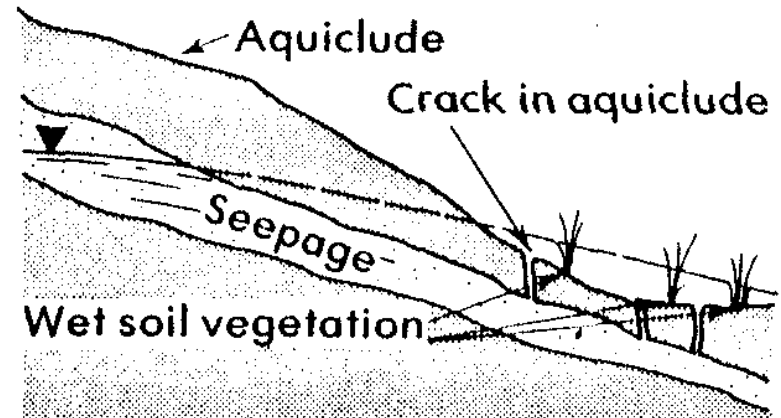
# Nappe libre / captive (artésienne)



# Source, puits artésien

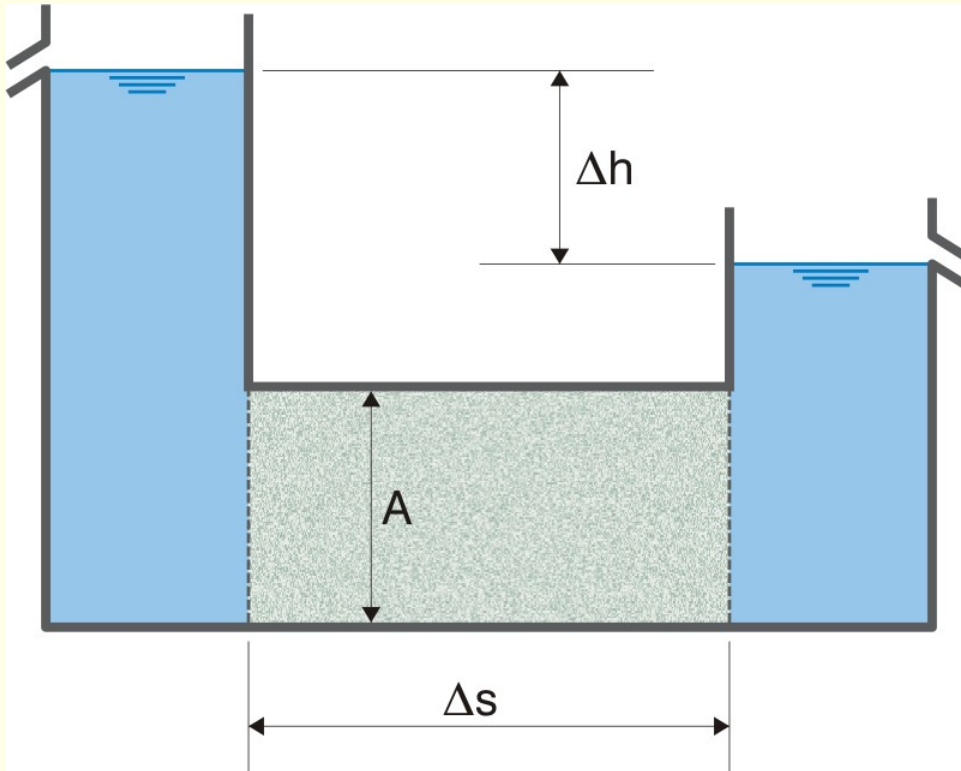


a. Free water table intersecting slope



b. Artesian spring — bubbling spring

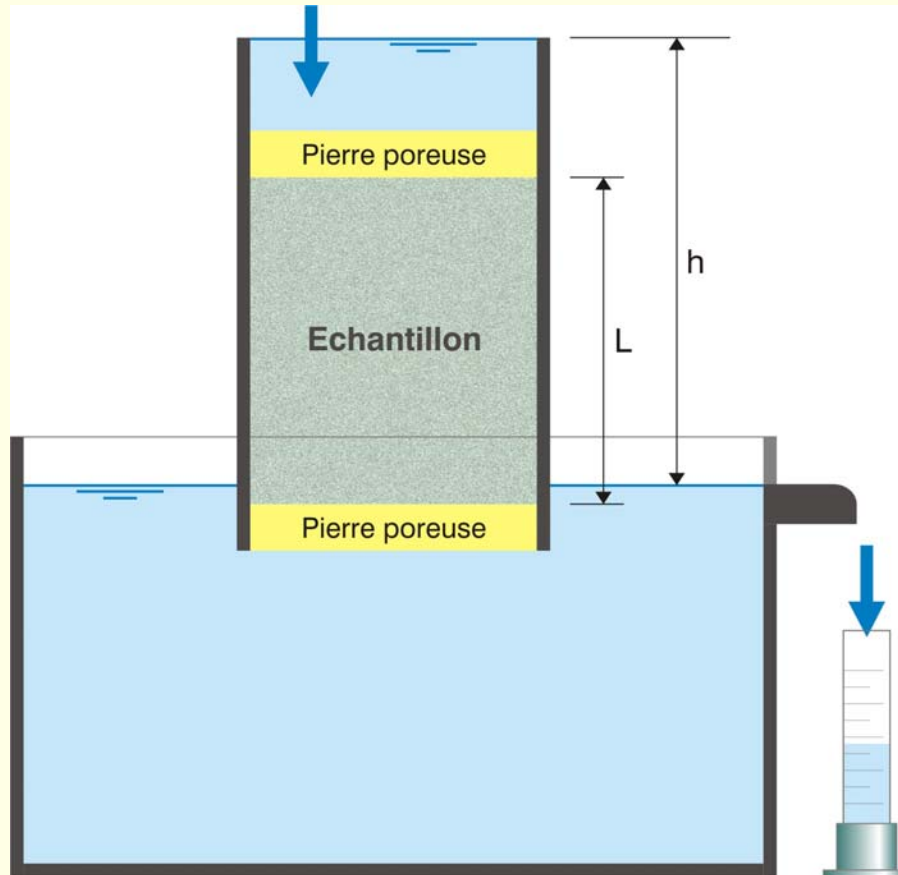
# Perméabilité: principe



$$v = k \frac{\Delta h}{\Delta s}$$

$$v = k \lim \frac{\Delta h}{\Delta s} = k \frac{dh}{ds}$$

# Perméamètre à charge constante (1)



$$Q = Avt$$

$$i = \frac{h}{L}$$

$$\rightarrow Q = A \left( k \frac{h}{L} \right) t$$

$$k = \frac{QL}{Aht}$$

$Q =$  volume collecté

$A =$  section de  
l'échantillon

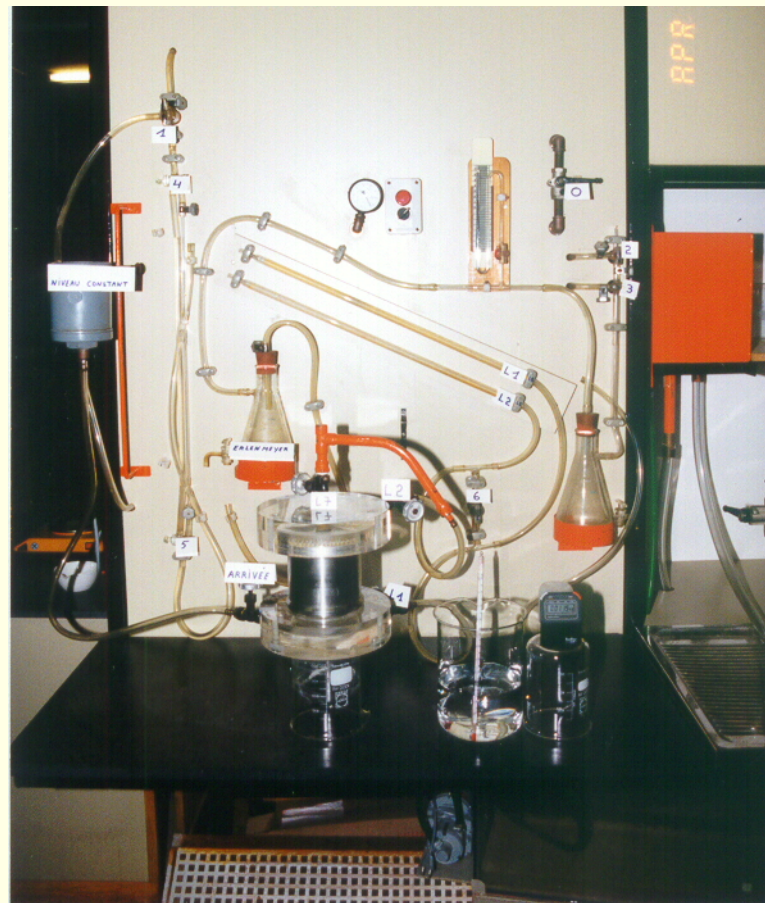
$t =$  temps de collecte

Pour sols à granulométrie grossière (sable)



# Perméamètre à charge constante (2)

Perméabilité des sables ou  
Sols à perméabilité  
importante



# Perméamètre à charge constante (8) principales mesures

- Teneur en eau ( $w_s$ )
- Pycnomètre ( $\gamma_s$ )
- Saturation (>97%)
- Volume d'eau
- Temps
- Température

Poids humide	(g)	939,98	
Poids sec	(g)	894,94	
Tare	(g)	249,77	
<b>TENEUR EN EAU</b>	(%)	<b>6,98</b>	<b>6,98 %</b>

Poids moule + matériau	(g)	4380,00	
Poids moule seul	(g)	2873,60	
Poids de matériau humide	(g)	1506,40	
Volume moule	(cm <sup>3</sup> )	946,20	
<b>POIDS VOLUMIQUE HUMIDE</b>	(kN/m <sup>3</sup> )	15,62	1,592 kg/m <sup>3</sup>
<b>POIDS VOLUMIQUE SEC</b>	(kN/m <sup>3</sup> )	14,60	1,488 kg/m <sup>3</sup>
<b>POIDS SPECIFIQUE</b>	(kN/m <sup>3</sup> )	25,94	2,644 kg/m <sup>3</sup>
<b>POURCENTAGE DE VIDES</b>	(%)	<b>43,72</b>	<b>43,72 %</b>
Poids spécifique de l'eau	(g/cm <sup>3</sup> )	0,99780	
<b>TENEUR EN EAU A LA SATURATION</b>	(%)	29,31	
<b>DEGRE DE SATURATION INITIAL</b>	(%)	<b>23,81</b>	<b>23,81 %</b>
Poids moule + matériau + flasques	(g)	8445,30	
Poids de matériau sec	(g)	1408,10	
Volume total (avec flasques)	(cm <sup>3</sup> )	1250,30	
Poids d'eau dans les flasques	(g)	303,43	
Poids moule + flasques	(g)	6321,10	
Poids total d'eau	(g)	412,67	
<b>TENEUR EN EAU SATURATION</b>	(%)	29,31	
<b>DEGRE DE SATURATION FINAL</b>	(%)	<b>99,97</b>	<b>99,97 %</b>

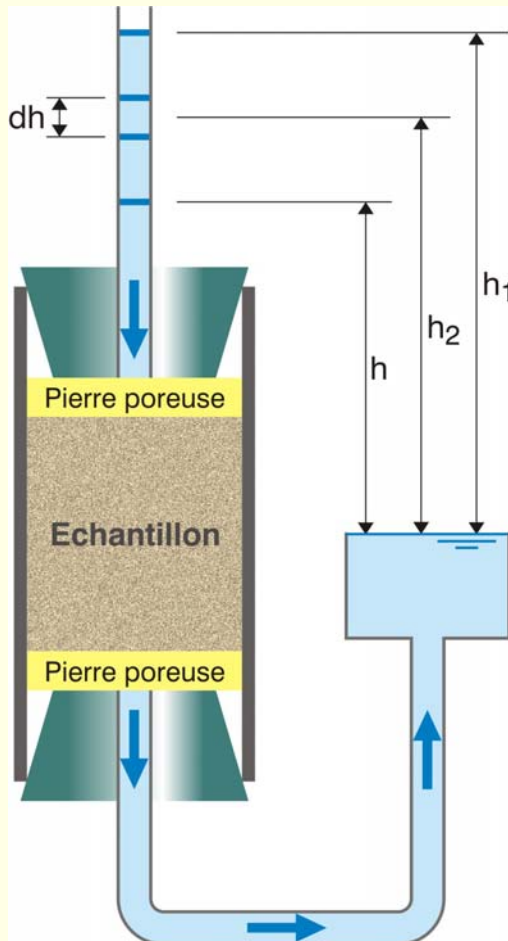
Hauteur moule	(cm)	11,63
Section moule	(cm <sup>2</sup> )	80,91368
sin alpha		0,40528
kn		0,6738

Poids eau	(g)	1744,00	1726,16	1706,19
Temps	(s)	300	300	300
Masse spécif. eau	(g/cm <sup>3</sup> )	0,99823	0,99823	0,99823
Rapports de visc.		0,769	0,769	0,769
I10	(cm)	36,9	36,9	36,9
I20	(cm)	12,8	12,8	12,8
I1	(cm)	19,6	19,6	19,6
I2	(cm)	30,1	30,1	30,1

PERMEABILITE	(cm/s)	5,97E-02	5,91E-02	5,84E-02
PERMEABILITE 10°C	(cm/s)	4,59E-02	4,54E-02	4,49E-02
PERMEABILITE 10°C, 40% vides	(cm/s)	3,09E-02	3,06E-02	3,03E-02

PERMEABILITE	(cm/s)	Moyenne	5,91E-02
PERMEABILITE 10°C	(cm/s)	Moyenne	4,54E-02 cm/s
PERMEABILITE 10°C, 40% vides	(cm/s)	Moyenne	3,06E-02 cm/s

# Perméamètre à charge variable (1)



$$q = Av = Aki = k \frac{h}{L} A = -a \frac{dh}{dt}$$

$$dt = \frac{aL}{Ak} \left( -\frac{dh}{h} \right)$$

$$t = \frac{aL}{Ak} \ln \frac{h_1}{h_2}$$

$$k = 2.3 \frac{aL}{At} \log \frac{h_1}{h_2}$$

$a$  = section de la pipette

$A$  = section de l'échantillon

$q$  = débit par unité de temps

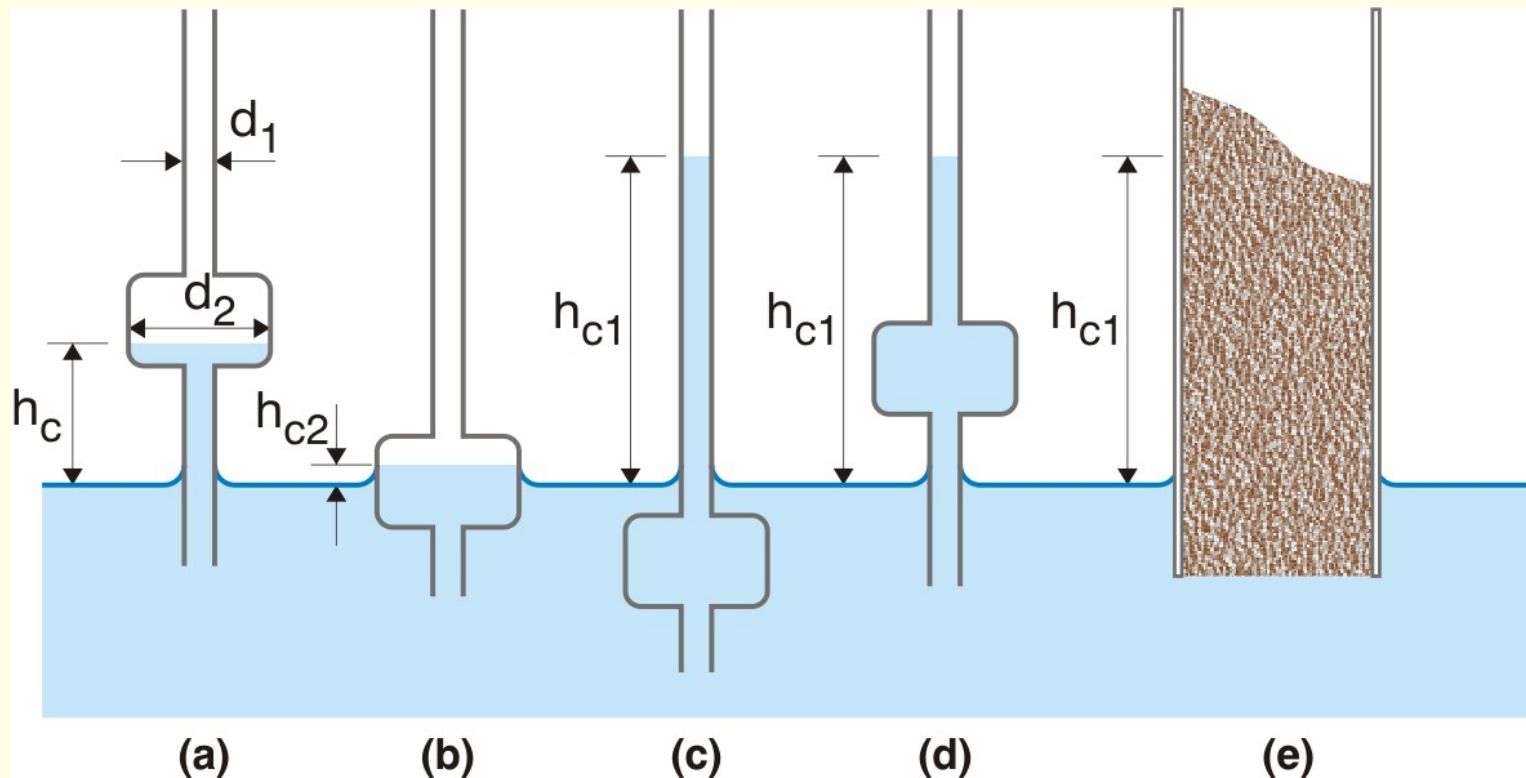
$t$  = temps de  $h_1$  à  $h_2$

## Perméamètre à charge variable (2)

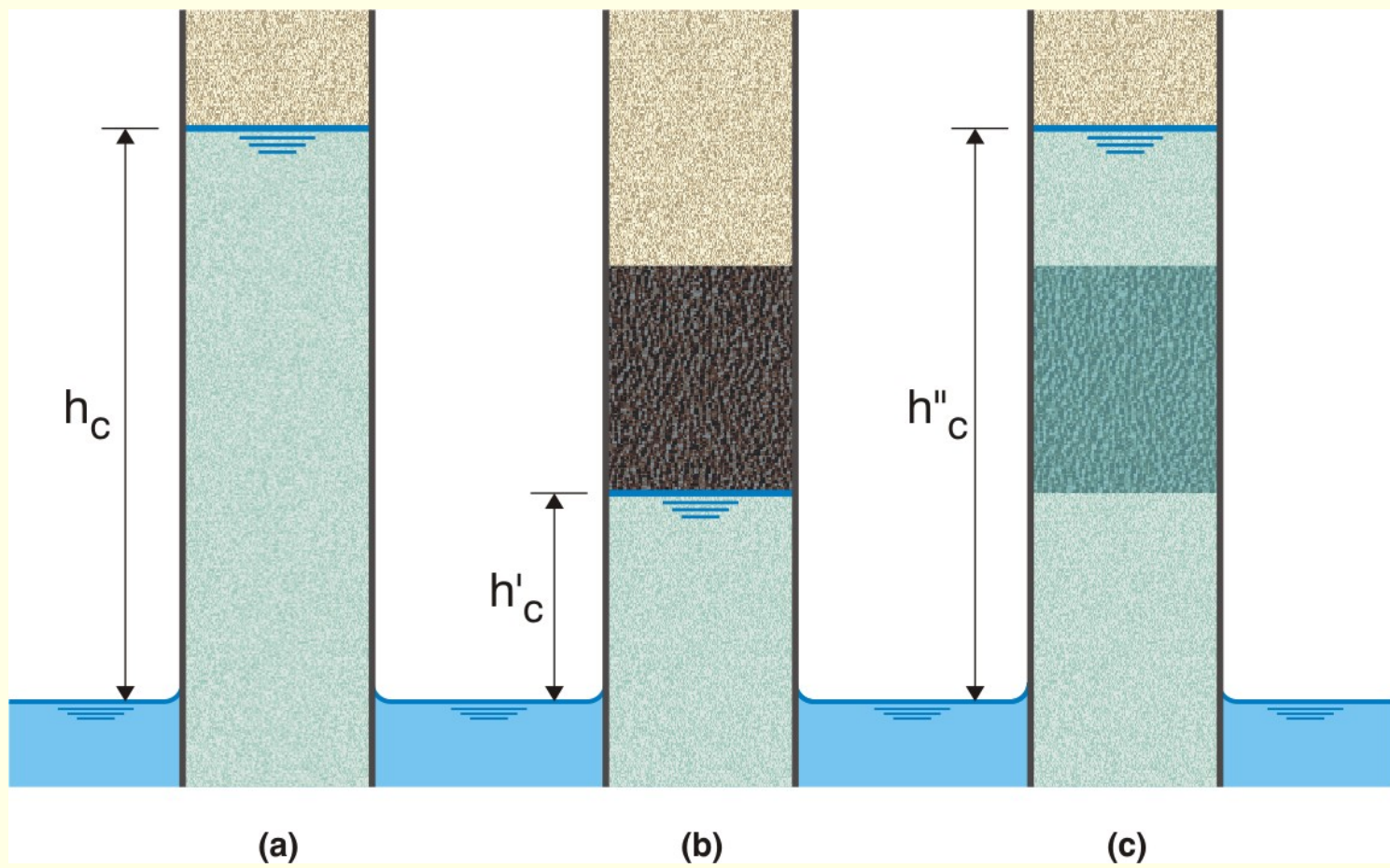
Perméabilité des sols à granulométrie fine comme les argiles



# Capillarité



# Capillarité



# Tension capillaire

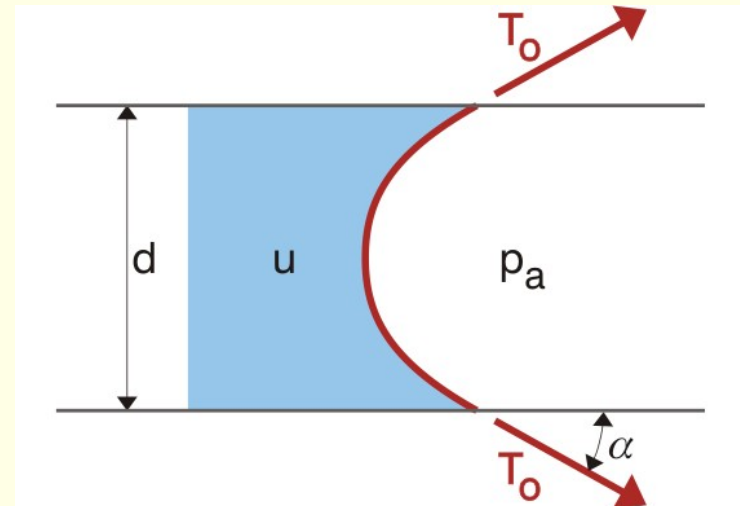
$$u \frac{\pi d^2}{4} + T_0 \pi d \cos \alpha = p_a \frac{\pi d^2}{4}$$

$$u = p_a - \frac{4T_0 \pi d \cos \alpha}{\pi d^2}$$

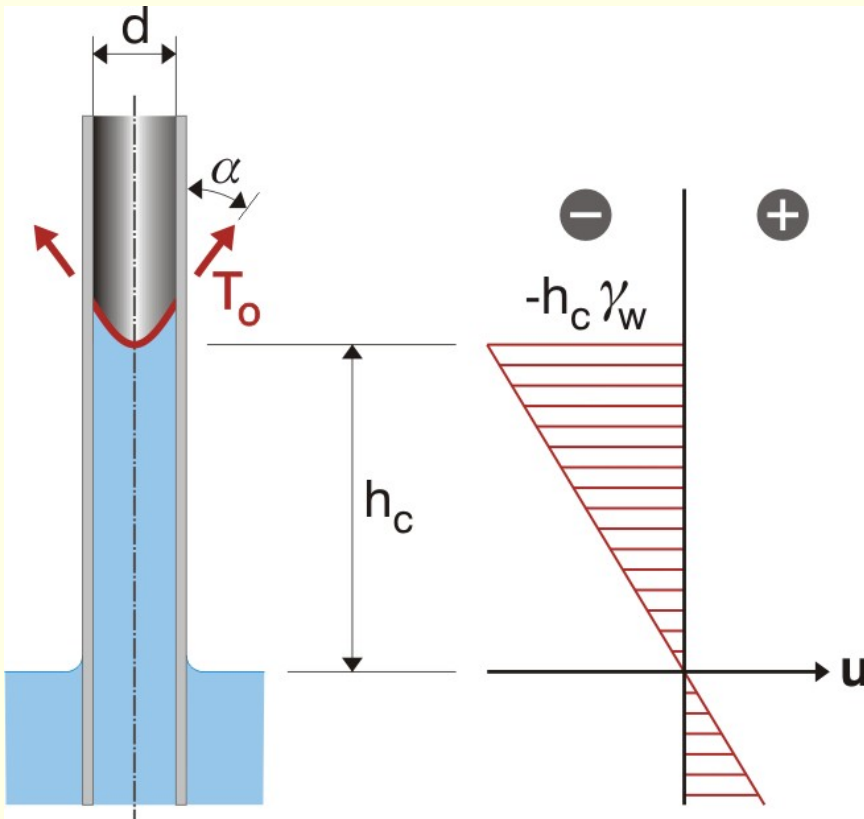
$$u = p_a - \frac{4T_0 \cos \alpha}{d}$$

$$u = - \frac{4T_0 \cos \alpha}{d}$$

$T_0$  = tension superficielle



# Hauteur d'ascension capillaire $h_c$



$$u = -h_c \gamma_w$$

$$h_c \gamma_w = \frac{4T_0 \cos \alpha}{d}$$

$$h_c = \frac{4T_0 \cos \alpha}{d \gamma_w} \leq \frac{4T_0}{d \gamma_w}$$



# Zones pendulaire, funiculaire et capillaire

