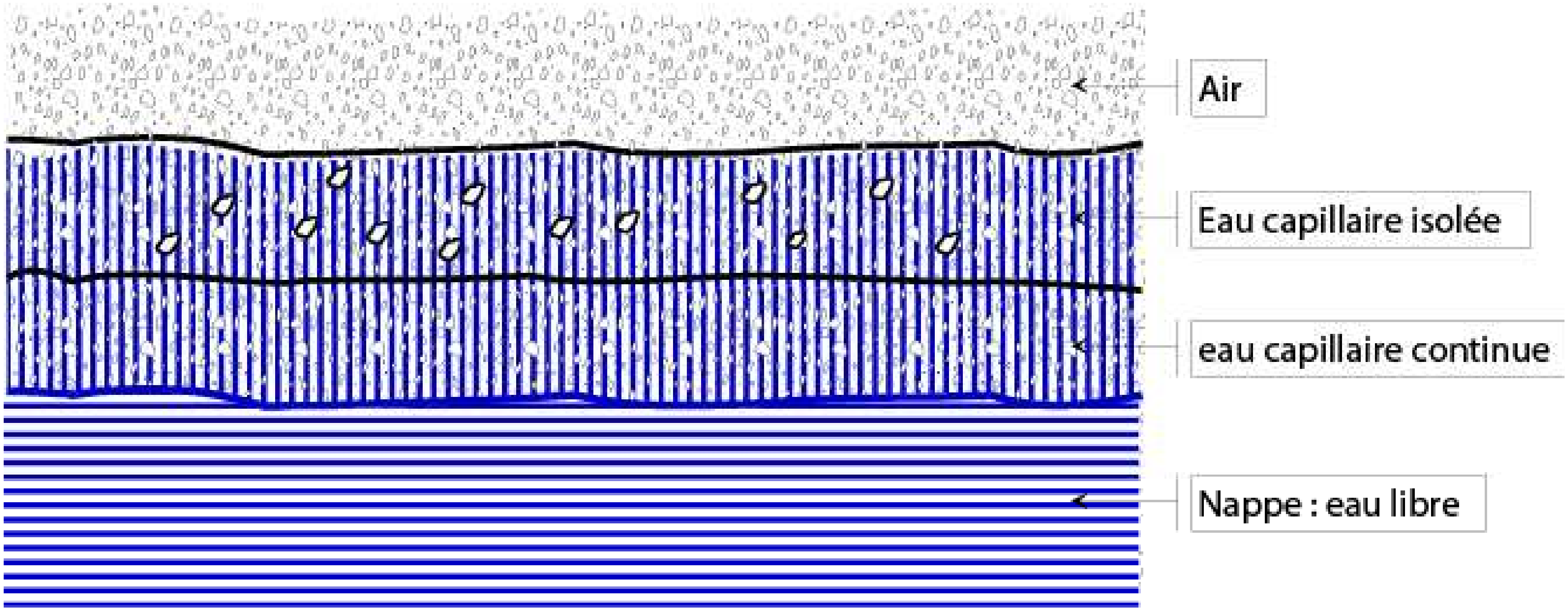
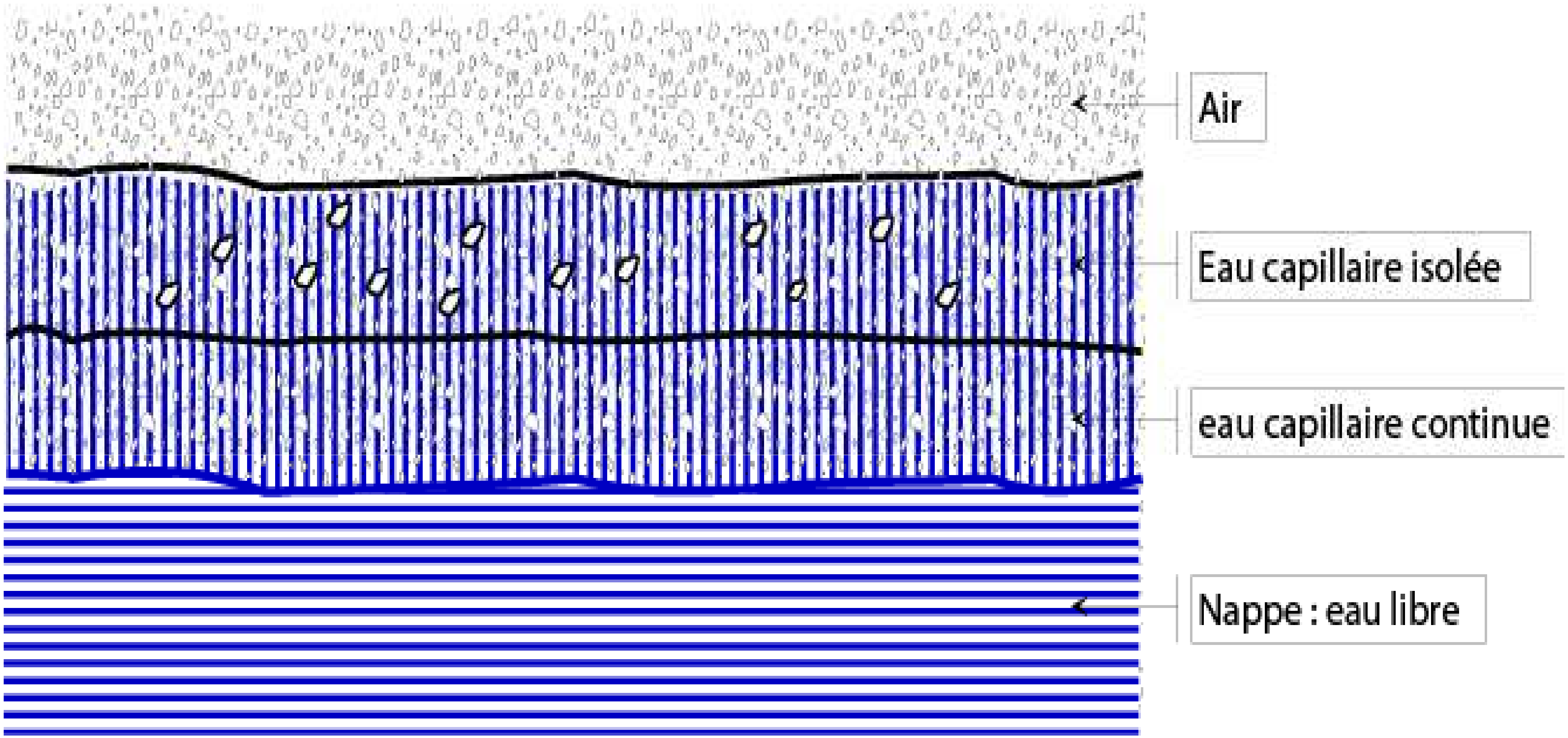
L'EAU DANS LE SOL

Rappels



Dans un sol, l'eau se présente sous trois formes

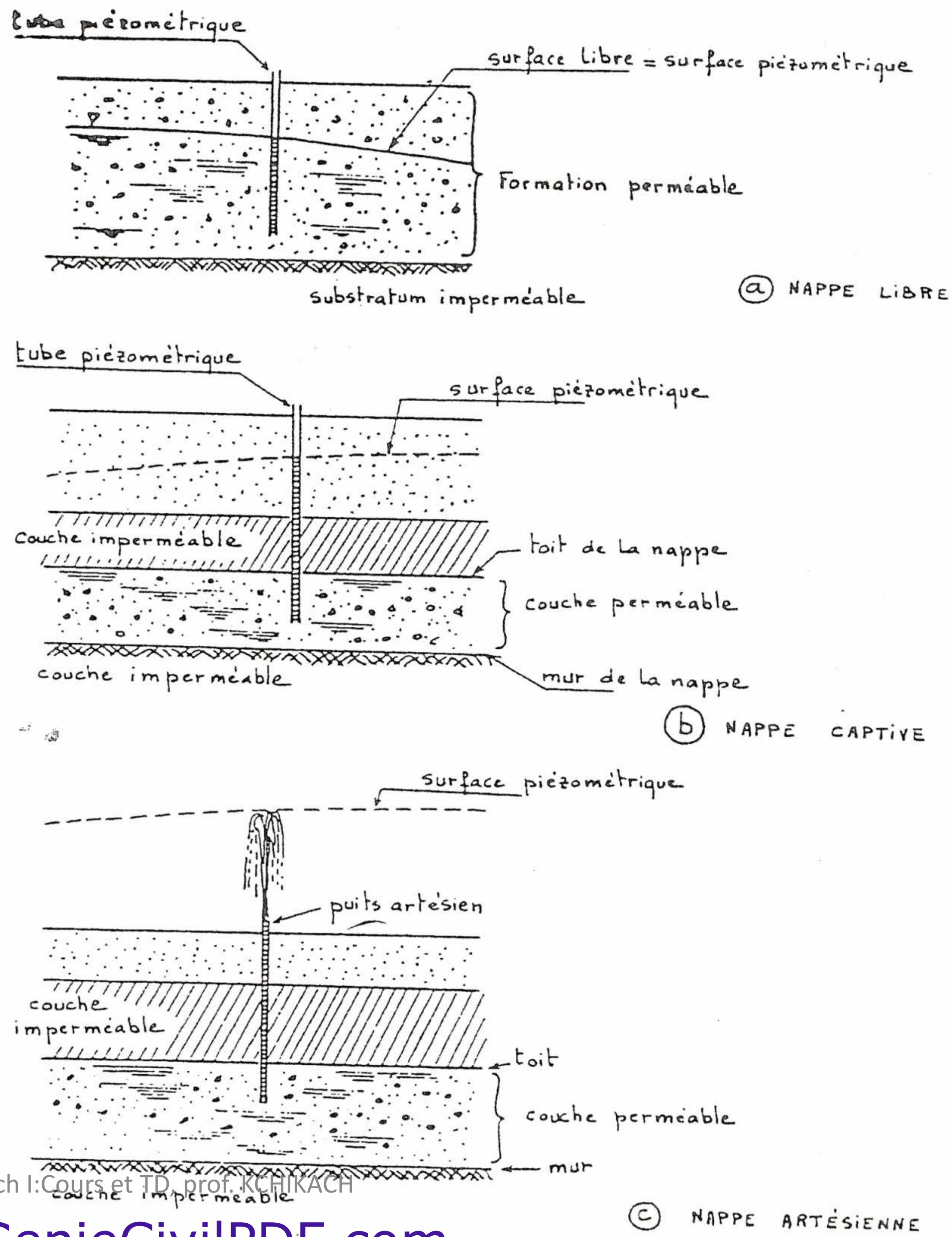

Air
Eau capillaire isolée
eau capillaire continue
Nappe : eau libre

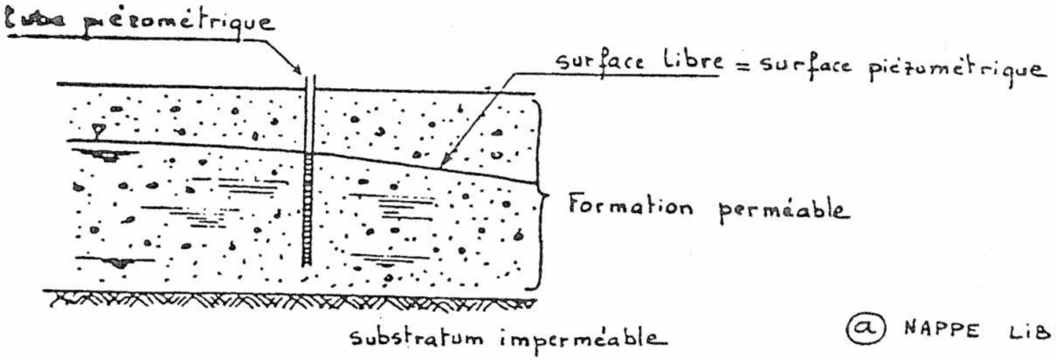
<u>Eau adsorbée:</u> **résulte de l'attraction entre les grains du sol (chargé négativement) et les cations H^+ de l'eau. Il s'agit d'eau liée.**

<u>Eau capillaire:</u> **en équilibre sous l'action de la pesanteur d'une part et les forces de tension qui se développent à l'interface eau/air.**

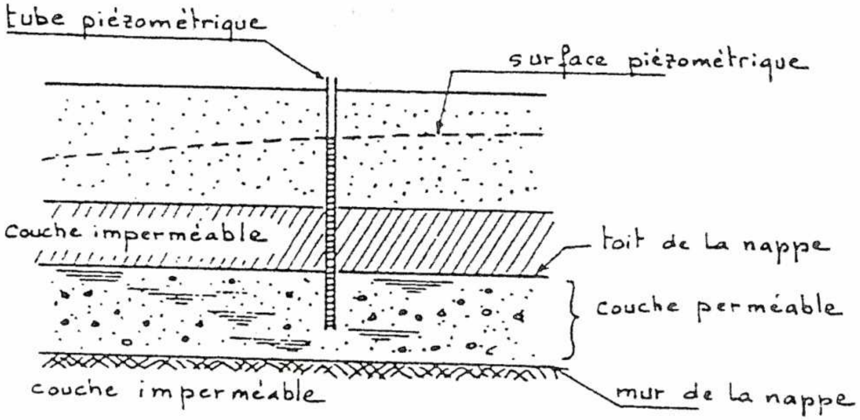
<u>Eau libre:</u> **eau soumise aux lois des écoulements hydrauliques: nappe deau souterraine.**

On distingue trois types de nappes:

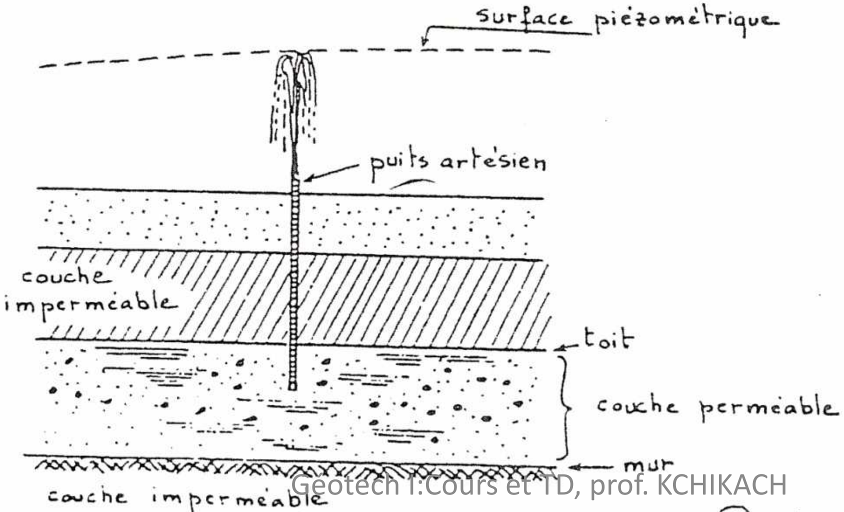




ⓐ NAPPE LIBRE



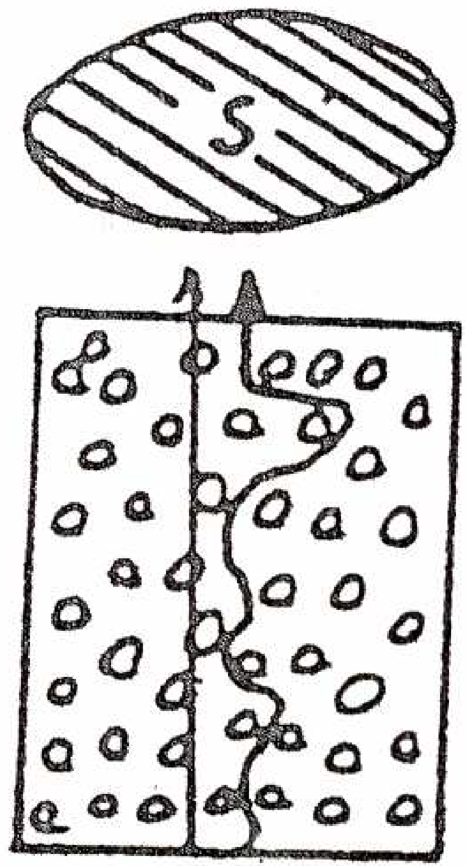
ⓑ NAPPE CAPTIVE



ⓒ NAPPE ARTÉSIENNE

Vitesse de l'eau dans le sol: considérons un échantillon de sol sous forme de cylindre de section S traversé par un débit Q

$$V = \frac{Q}{S}$$



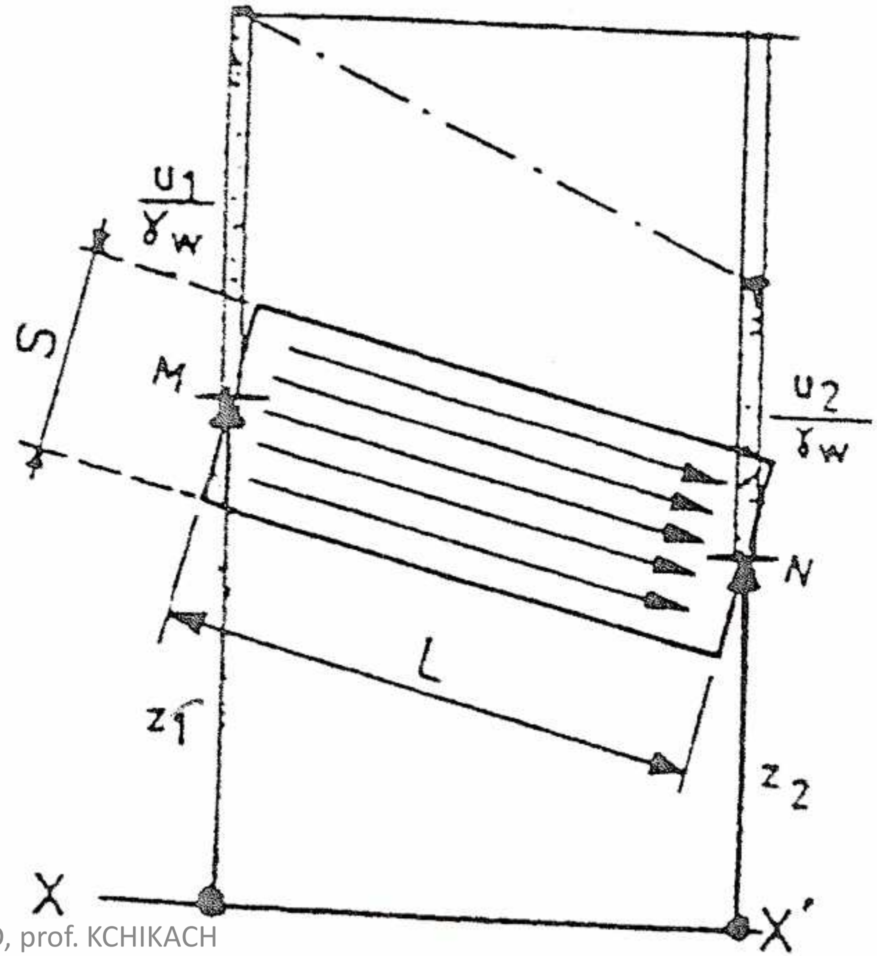
L'eau ne circule qu'à travers les pores, la section réelle S est en fait nS;

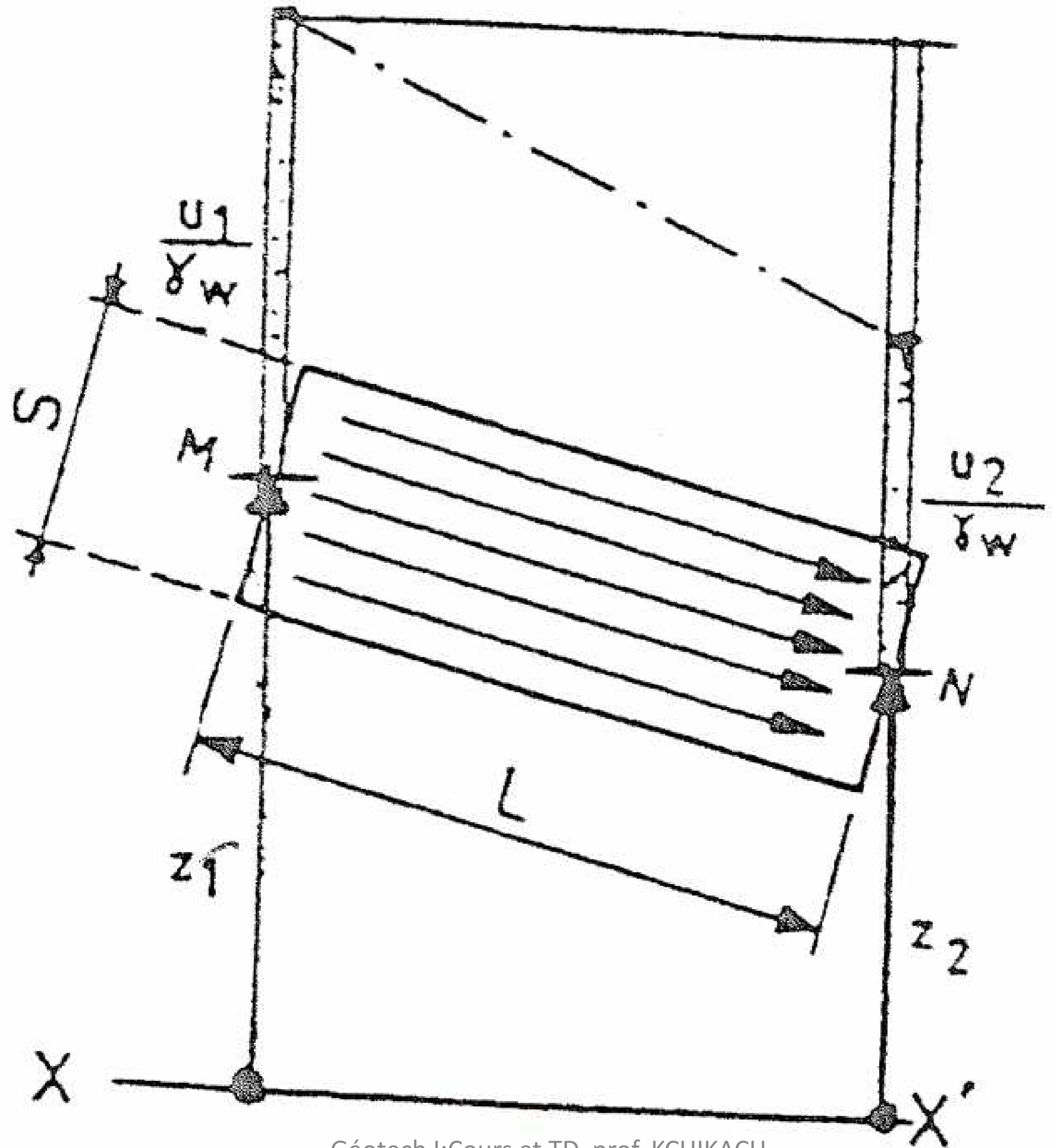
n: porosité

V est exprimé en cm/s. Dans la pratique V<10cm/s

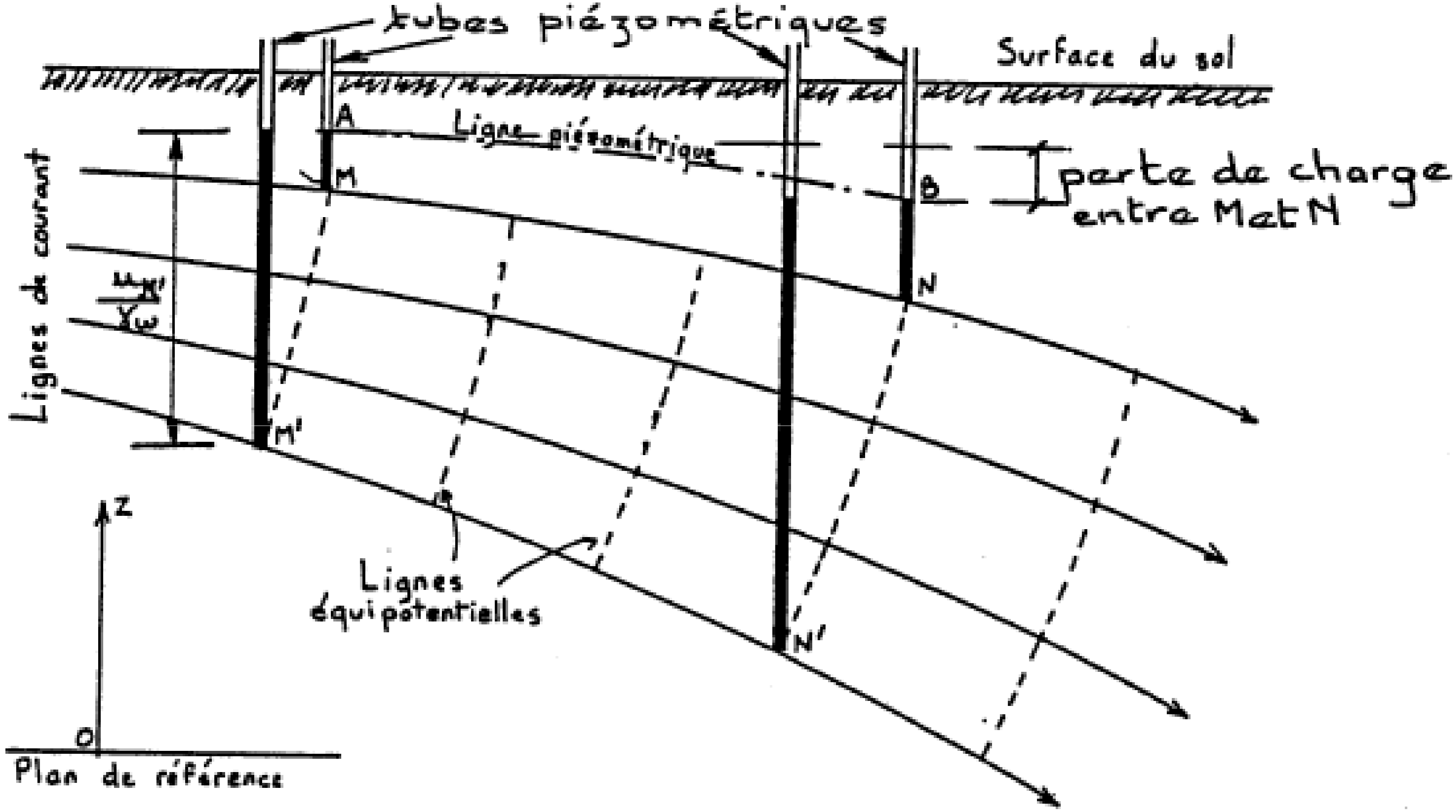
Charge hydraulique:

Considérons un écoulement linéaire (en hydraulique du sol, on travail avec écoulement en régime permanent laminaire)





u1
γw
S
M
u2
γw
N
L
z1
z2
X
X'


tubes piézométriques
Surface du sol
A
Ligne piézométrique
M
B
perte de charge entre M et N
N
Lignes de courant
$\frac{u_{M'}}{\gamma_w}$
M'
N'
Z
Lignes équipotentielles
O
Plan de référence

On appelle charge hydraulique en un point M

$$h_1 = \frac{v^2}{2g} + \frac{U_1}{\gamma_w} + z_1$$

h_1: exprimé en mètre d'eau
Z_1: côte de M
U_1: pression de l'eau interstitielle en M
V: vitesse

$V^2/2g$: négligeable car avec v=10cm/s on trouve 0.5mm

La charge hydraulique décroit le long d'un filet liquide: h1>h2 . Le mouvement dissipe donc de l'énergie (perte de charge) soit dans l'eau elle-même soit au contact avec les grains.

La charge hydraulique est mesurée en un point donné par l'altitude du niveau atteint par l'eau dans un tube piézométrique placé au point considéré.

Gradient hydraulique: rapport de la perte de charge à la longueur de la conduite.

$$i = \frac{\Delta h}{L} = \frac{h_1 - h_2}{L}$$

L: distance MN, longueur de la conduite

Rappel: Loi de Darcy:

$$\boxed{v = ki}$$

V: vitesse de décharge, c'est la charge par la section

K: coefficient de perméabilité (cm/s)

On retient pour ordre de grandeur: 10^{-6} cm/s représente environ 30cm/an

SOL	K(cm/s)
Graviers	$10^{-1} < k < 10^{2}$
Sables	$10^{-3} < k < 10^{-1}$
Limons	$10^{-7} < k < 10^{-3}$
Argile	$10^{-11} < k < 10^{-7}$
Roche non fissurée	$10^{-10} < k < 10^{-8}$

Dans la pratique on applique souvent:

sable à granulométrie serrée:

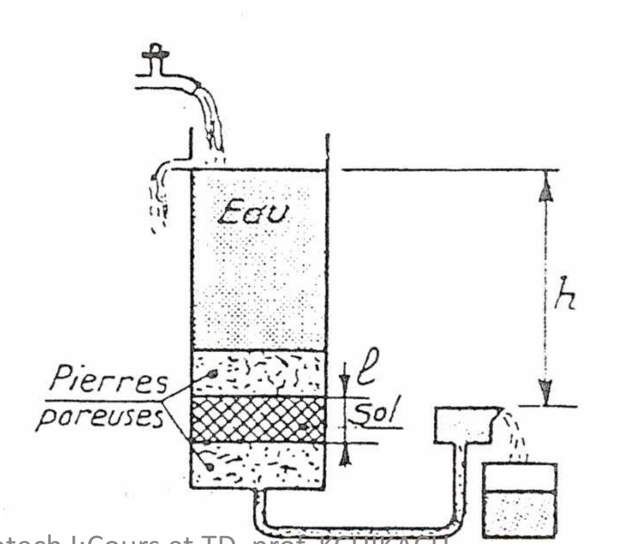
$$k(cm/s) = 100\, d_{10}^{2}$$

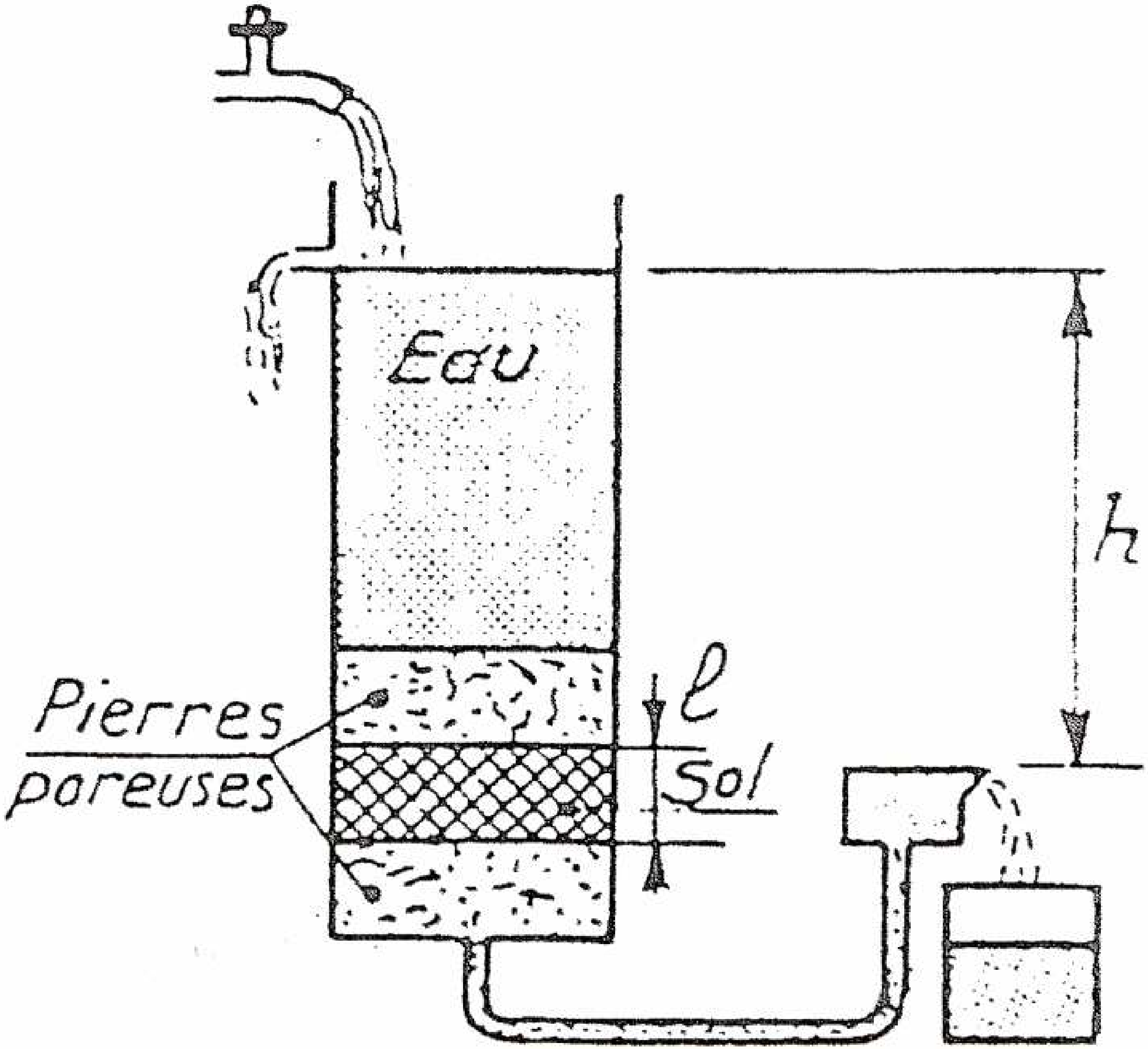
sable à granulométrie moyennement étalée:

$$k(cm/s) = 125\, d_{10}^{2}$$

Ex: un échantillon de sable grossier a 15cm de hauteur et 5.5 cm de diamètre. Il est placé dans un perméamètre à niveau constant. L'eau percole à travers l'échantillon sous une charge de 40cm. En 6s, on recueille 40g d'eau. Quelle la valeur de K?

Rép.





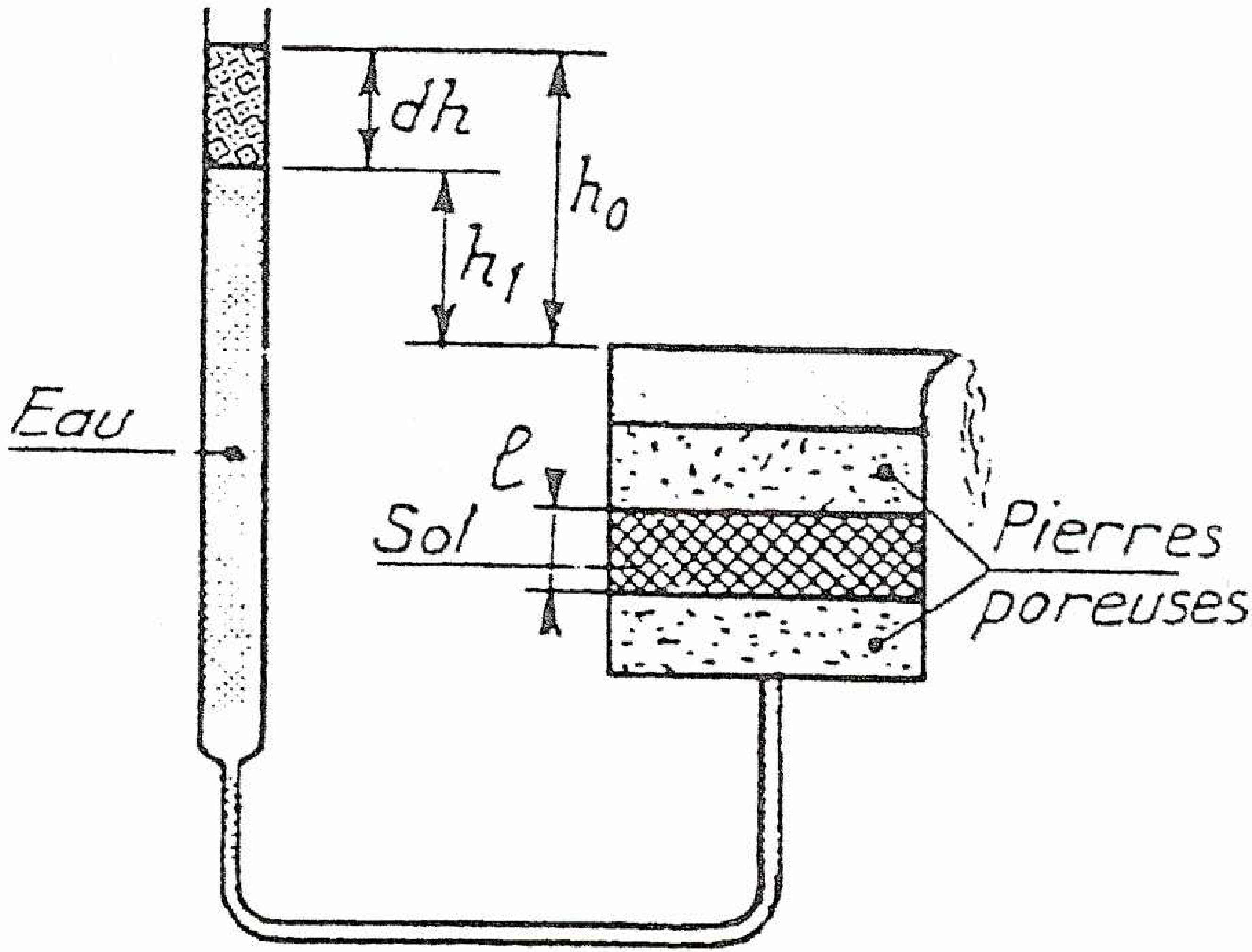
Eau
h
ℓ
Pierres
poreuses
Sol

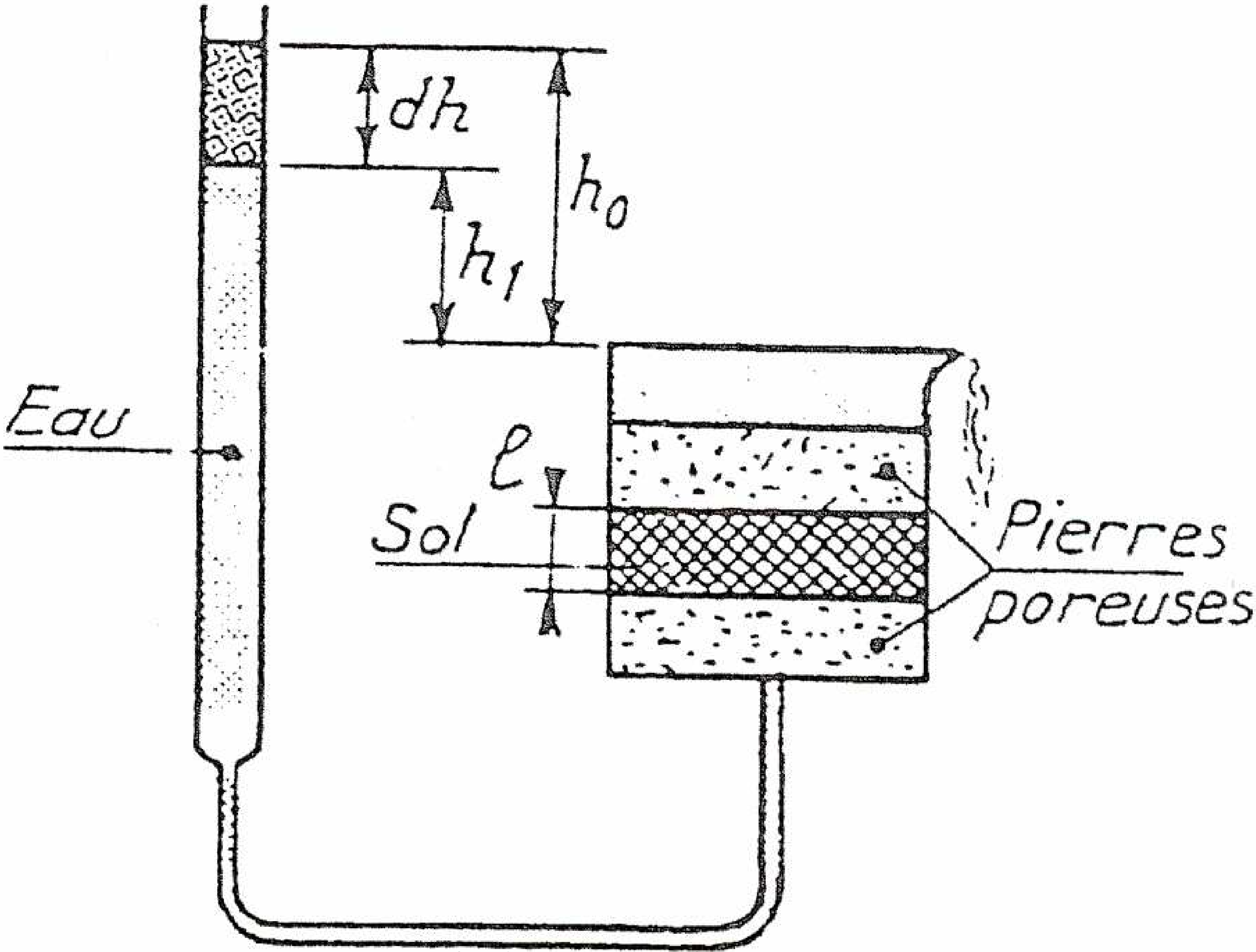
Perméamètre à charge constante: (sol perméable: sables et graviers)

On s'arrange, grâce à un système de trop-pleins, pour avoir une charge constante h. on mesure la quantité d'eau recueillie à la sortie pendant un temps donné et on en déduit k.

V=ki ou k=v/i

Perméamètre à charge varaible: (sol peu perméable: limons et argiles)





dh
h_0
h_1
Eau
ℓ
Sol
Pierres
poreuses

L'éprouvette d'essai est en communication avec une autre éprouvette graduée.

à t_0 on a h_0

t_1 on a h1 : correspondant au passage par perméabilité d'une quantité d'eau dQ à travers le sol.

Soit s: section de l'éprouvette graduée, dQ est donc:

$$dQ=s(h_0-h_1)=s\ dh$$

Or d'après la loi de Darcy: dQ=v S dt

S: section de l'éprouvette d'essai

dQ= k (h/L) S (t_1-t_0)

s dh = k (h/L) S dt

$$\frac{dh}{h} = k\frac{S}{sL}dt$$

La résolution de l’équation donne:

$$k = \frac{2.3\, s\, L}{S\,(t_1 - t_0)} \log \frac{h_0}{h_1}$$

Ex: on procède à un essai de perméabilité à charge variable sur un sable graveleux et on obtient:

$s=625mm^2$

$A=1073mm^2$

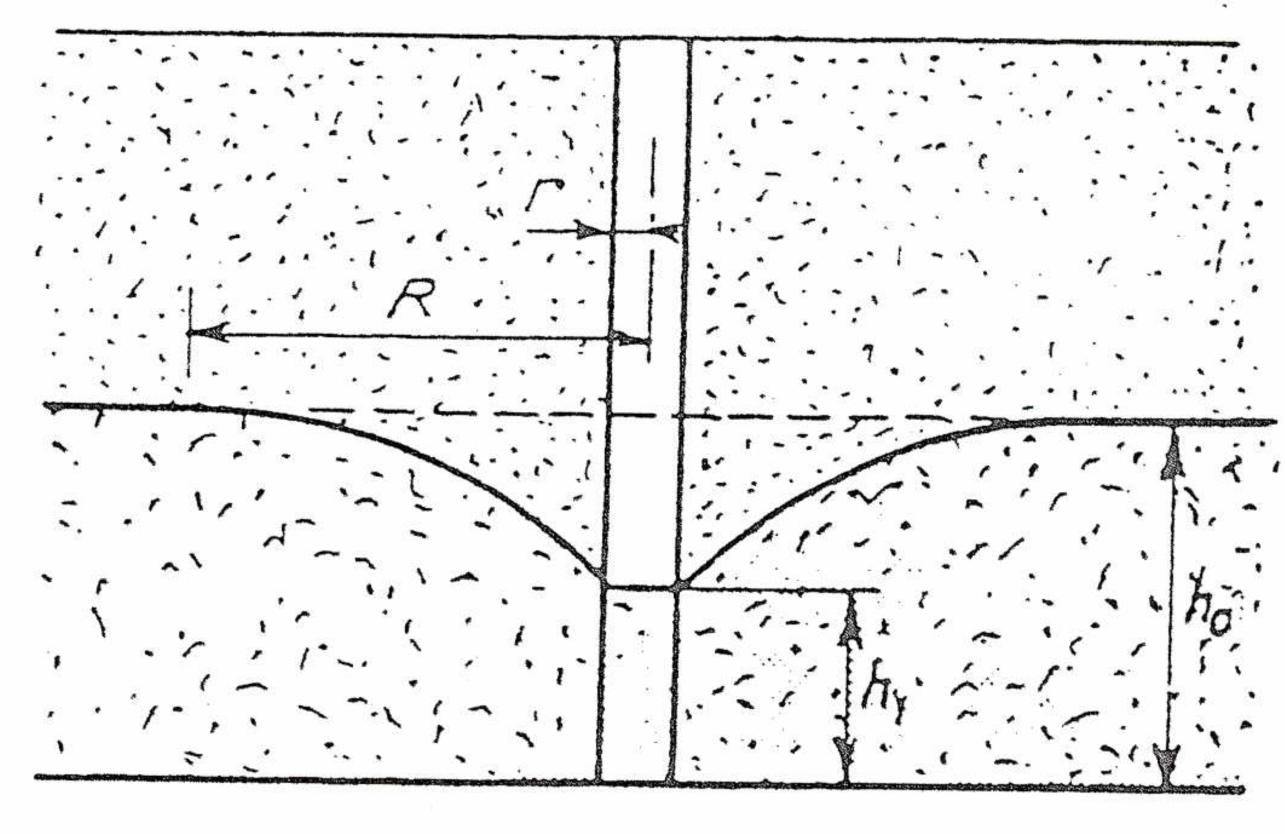
$L=162.8mm$

$h_1=1602mm$

$h_2=801mm$

$\Delta t=90s$

Détermination de k in-situ: essai de Dupuit



Essai de Dupuit

Les mesures au labo ne sont jamais représentatifs à 100% de la réalité du terrain. L'échantillon pris est petit et souvent remanié.

Dans la pratique, on fore un trou dans la nappe. On y introduit un tube crépiné et on pompe l'eau jusqu'à créer un régime permanent caractérisé par un débit Q d'eau et un abaissement de la nappe de $\Delta h = h_0 - h_1$

On montre que:

$$k = \frac{\ln \frac{R}{r}}{\pi (h_0^2 - h_1^2)} Q$$

R: déterminé par l’implantation de plusieurs piézomètres. L’expérience montre que $100r < R < 300r$

Ex: niveau piézo = 13m par rapport au mur de la nappe, r=15cm. On pompe pendant 24, l’écoulement devient permanent et le débit se stabilise à 5.4 m^3/heure. Le rabattement de la nappe est de 4m. Déterminer k? on considérant R=100r

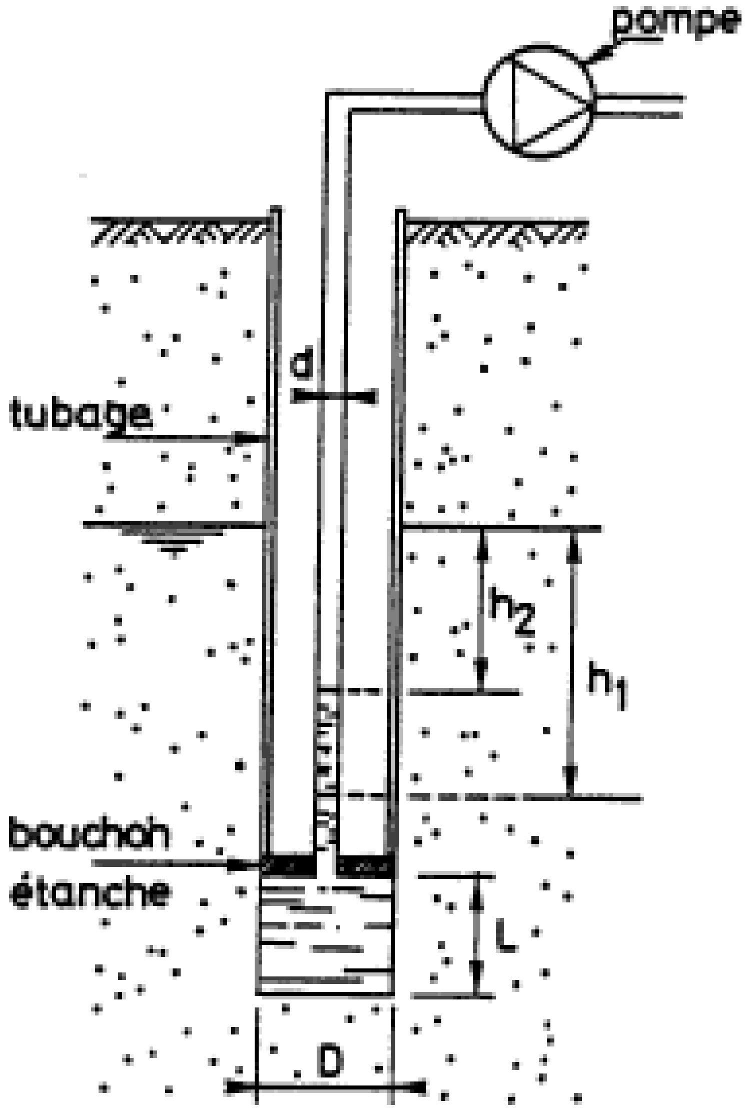
Essai Lefranc:

. **Dans les terrains relativement perméables (k > 10^{-5}m /s) on pompe dans la cavité à débit constant q sous charge constante h:**

$$q = C \cdot k \cdot h$$

$$k_L = \frac{q}{C \cdot h}$$

$$C = \frac{2\pi L}{\ln \frac{2L}{D}}$$



Essai Lefranc

. Dans les terrains moins perméables (k< 10-5 m/s), on procède à charge variable du fait des faibles débits mis en jeu (régime transitoire).
Après avoir pompé l'eau dans la cavité, on arrête le pompage et on observe la remontée de l'eau dans le tube central. Soient h1 et h2 les deux mesures de la charge effectuées aux temps t1 et t2 .

$$\ln \frac{h_1}{h_2} = \frac{4\,C\,.\,k}{\pi\,.\,d^2}\,(t_2 - t_1)$$

$$k = \frac{\pi\,.\,d^2}{4\,C}\,.\,\frac{\ln \dfrac{h_1}{h_2}}{t_2 - t_1}$$

k est aussi fonction de la forme des grains et de e. Casagrande a établi la formule empirique suivante:

$$K=1.4k_{0.85}\,e^2$$

$k_{0.85}$: représente le coefficient de perméabilité du matériau lorsque son e=0.85

Ex: un échantillon de sable à granulométrie étalée et à grains arrondis a un indice des vides de 0.62 et un k de $2.5x10^{-2}$ cm/s. Estimer k pour ce matériau si e=0.73

$$k_{0.85} = \frac{k}{1.4e^2} = \frac{2.5x10^{-2}}{1.4(0.62)^2} = 4.64x10^{-2}\,cm/s$$

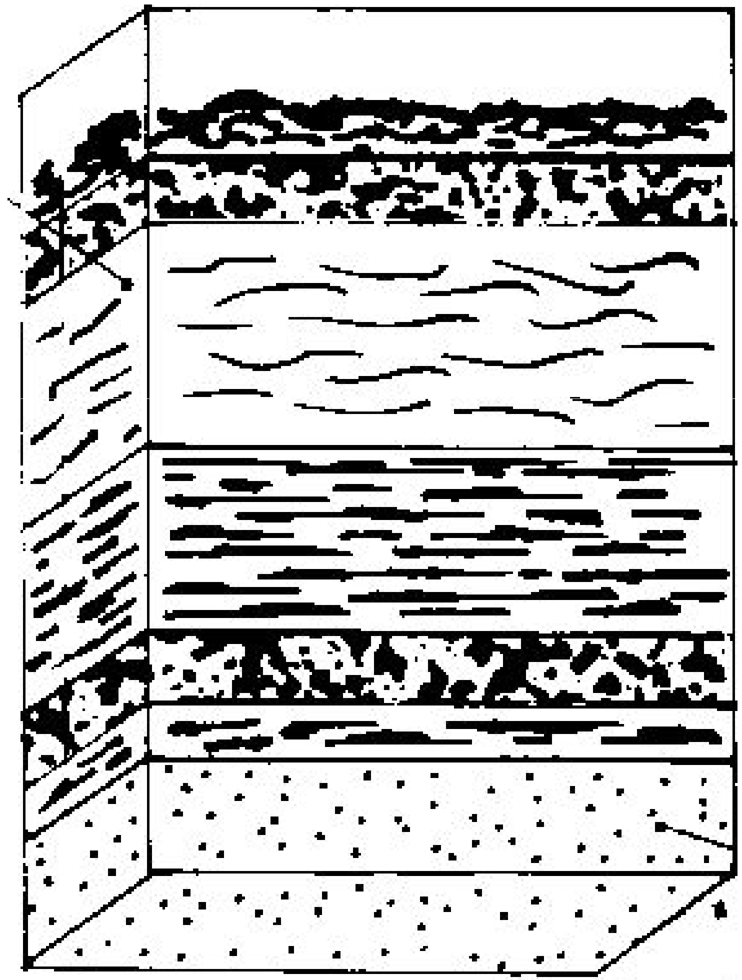
donc pour e=0.73

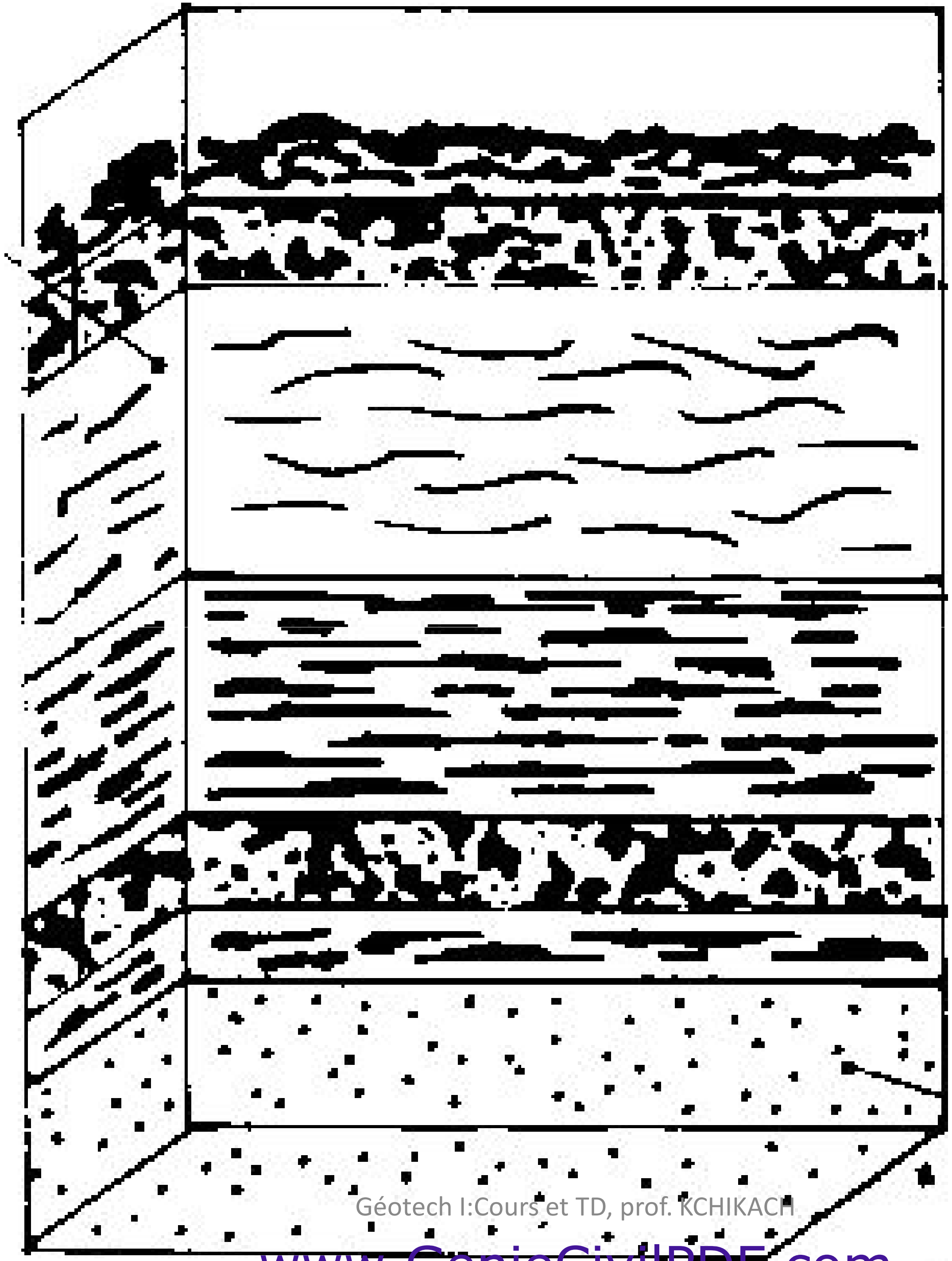
$$K=1.4k_{0.85}(O.73)^2$$

$$K= 1.4\ (4.64x10^{-2})x(0.73)^2=3.5x10^{-2}\ cm/s$$

Sur le terrain, le sol est stratifié, il faut donc calculer k équivalent

Soient:
K1, k2,…kn: perméabilité des différentes couches
H1, H2,…Hn: leurs épaisseurs
H=H1+H2+…Hn: épaisseur totale
h: charge totale
K_v: perméabilité moyenne perpendiculairement à la stratification
k_H: perméabilité moyenne parallèlement à la stratification





Écoulement perpendiculaire à la strati.

On peut écrire que le débit et donc la vitesse de décharge est la même pour chaque couche

$$v = \frac{h}{H} k_V = k_1 i_1 = k_2 i_2 = \ldots = k_n i_n$$

$$h = H_1 i_1 + H_2 i_2 + \ldots + H_n i_n$$

$$\text{car } h = h_1 + h_2 + \ldots + h_n$$

de la première équation on tire:

$$i_1 = \frac{h}{H}\frac{k_v}{k_1};i_2 = \frac{h}{H}\frac{k_v}{k_2};...;i_n = \frac{h}{H}\frac{k_v}{k_n}$$

On porte dans la deuxième équation et on a:

$$h = H_1\frac{h}{H}\frac{k_v}{k_1} + H_2\frac{h}{H}\frac{k_v}{k_2} + ... + H_n\frac{h}{H}\frac{k_v}{k_n}$$

$$h = \frac{hk_v}{H}\left(\frac{H_1}{k_1} + \frac{H_2}{k_2} + \ldots + \frac{H_n}{k_n}\right)$$

donc

$$k_v = \frac{H}{\frac{H_1}{k_1} + \frac{H_2}{k_2} + \ldots + \frac{H_n}{k_n}} = \frac{H}{\sum \frac{H_i}{k_i}}$$

Écoulement parallèle à la strati.

On peut écrire que le débit totale sera la somme du débit dans chaque couche pour une tranche d'épaisseur unité et un gradient i

$$Q = Q_1 + Q_2 + \ldots + Q_n$$

$$\text{or} \quad Q = v.H.1 = v.H = k_H.H.i$$

$$k_H.H.i = k_1 H_1 i + k_2 H_2 i + \ldots + k_n H_n i$$

$$k_H = \frac{k_1 H_1 + k_2 H_2 + \ldots + k_n H_n}{H}$$

$$k_H = \frac{\Sigma k_i H_i}{H}$$

Ex: un terrain comprend trois couches horizontales d'égales épaisseurs. Le coefficient de perméabilité des deux couches extrêmes est de 10^{-3} cm/s. celui de la couche intermédiaire est de 10^{-2} cm/s. on demande K_H, k_v et le rapport.

Rép. $H1=H2=H3=H/3$

$H=H1+H2+H3$

$$k_1 = k_3 = 10^{-3}\,cm/s$$

$$k_2 = 10^{-2}\,cm/s$$

$$k_H = \frac{\Sigma k_i H_i}{H} = \frac{\frac{H}{3}(k_1 + k_2 + k_3)}{H} = 0.4\,10^{-2}\,cm/s$$

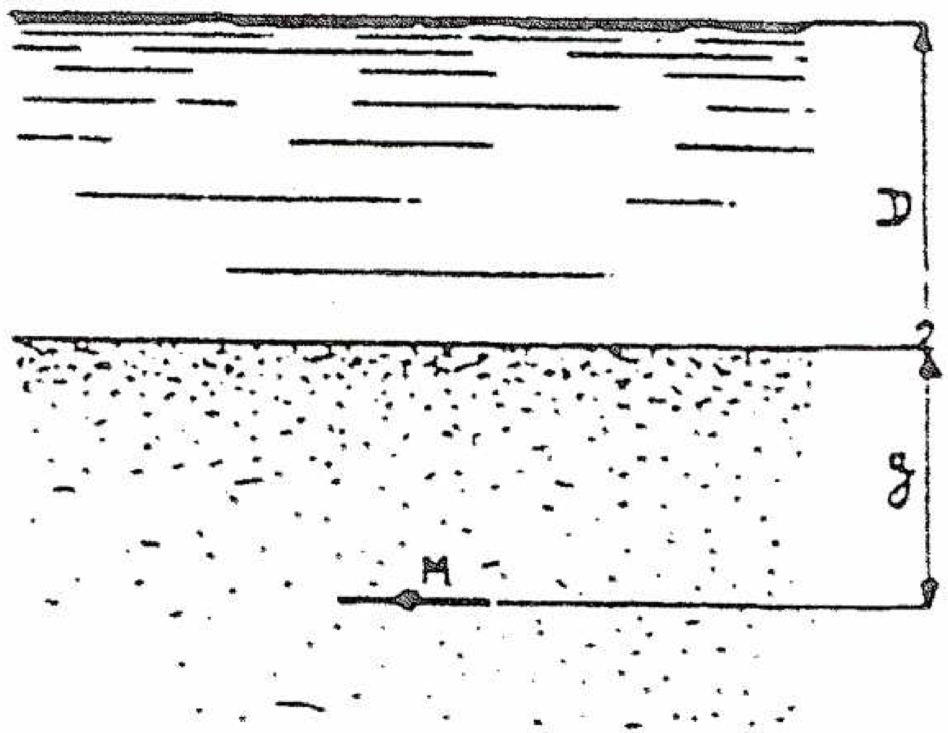
$$k_V = \frac{H}{\sum \frac{H_i}{k_i}} = 1.4\,10^{-3}\,cm/s$$

$$\frac{k_H}{k_V} = 2.9$$

Effet de l'eau sur la contrainte effective: postulat de Terzaghi

Les efforts se transmettent dans le sol à travers les grains et l'eau interstitielle.

Soit la figure



σ Et τ composantes normale et tangentielle de la contrainte totale s'exersant au point M. les composantes σ' et τ' de la contrainte effective au même point sont données par:

$$\sigma' = \sigma - u$$
$$\tau' = \tau$$

postulat de Terzaghi

u: pression du fluide

Au point M on:

$$\sigma = \gamma_w \cdot D + \gamma . z$$

et

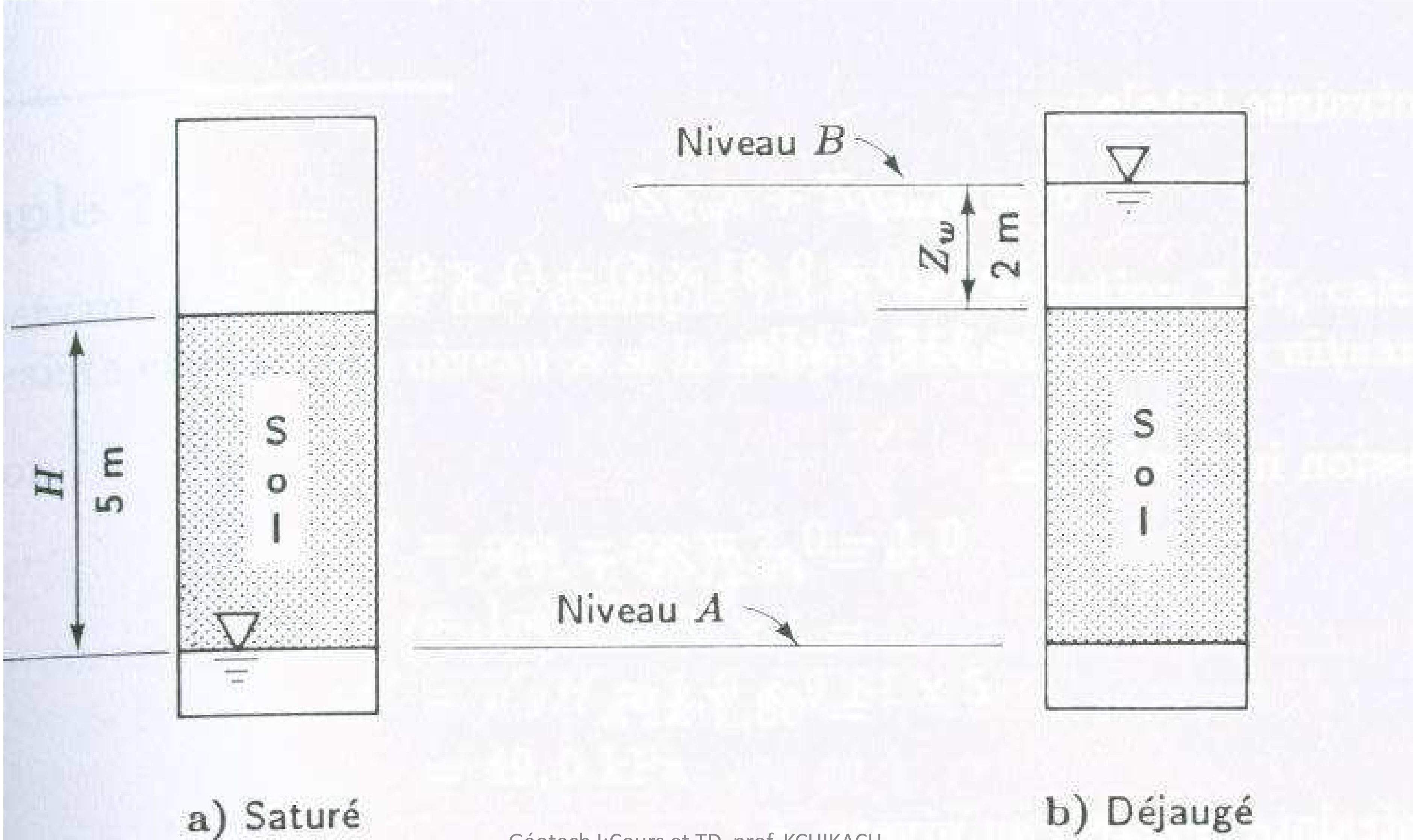
$$u = \gamma_w (D+z)$$

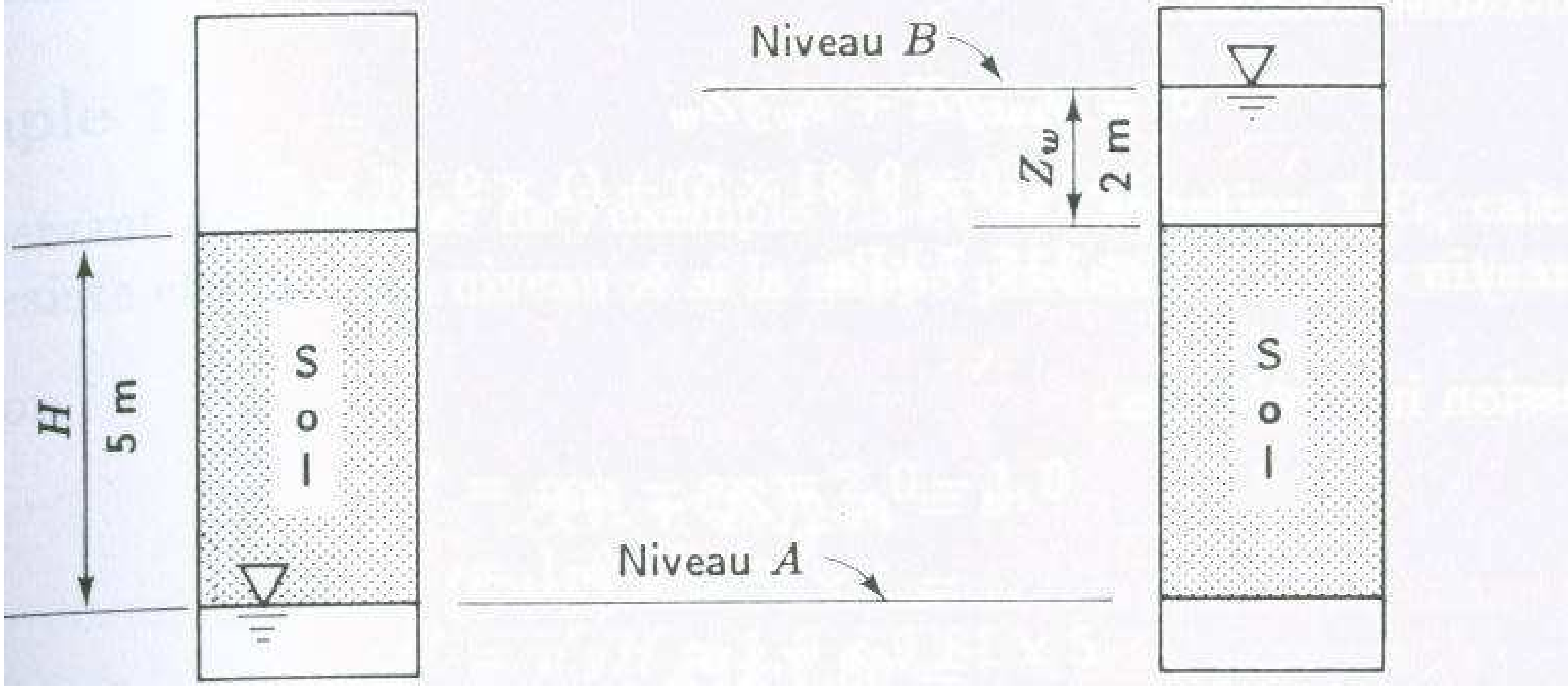
donc $\sigma' = \sigma - u = (\gamma - \gamma_w) z = \gamma' z$

Du point de vue des contraintes effectives, tout se passe comme s'il n'y avait pas d'eau à condition de remplacer γ par γ' (poids volumique déjaugée)

<u>Exercice:</u> **le niveau d'eau dans un dépôt de sable fin est à 1.2m au dessous de la surface topo. γ de ce sable est $2.03 t/m^3$. quelle est la pression verticale effective sur un plan horizontal situé à 3.60m sous la surface du sol.**

Exercice: soit le sol de la figure





a) Saturé

b) Déjaugé

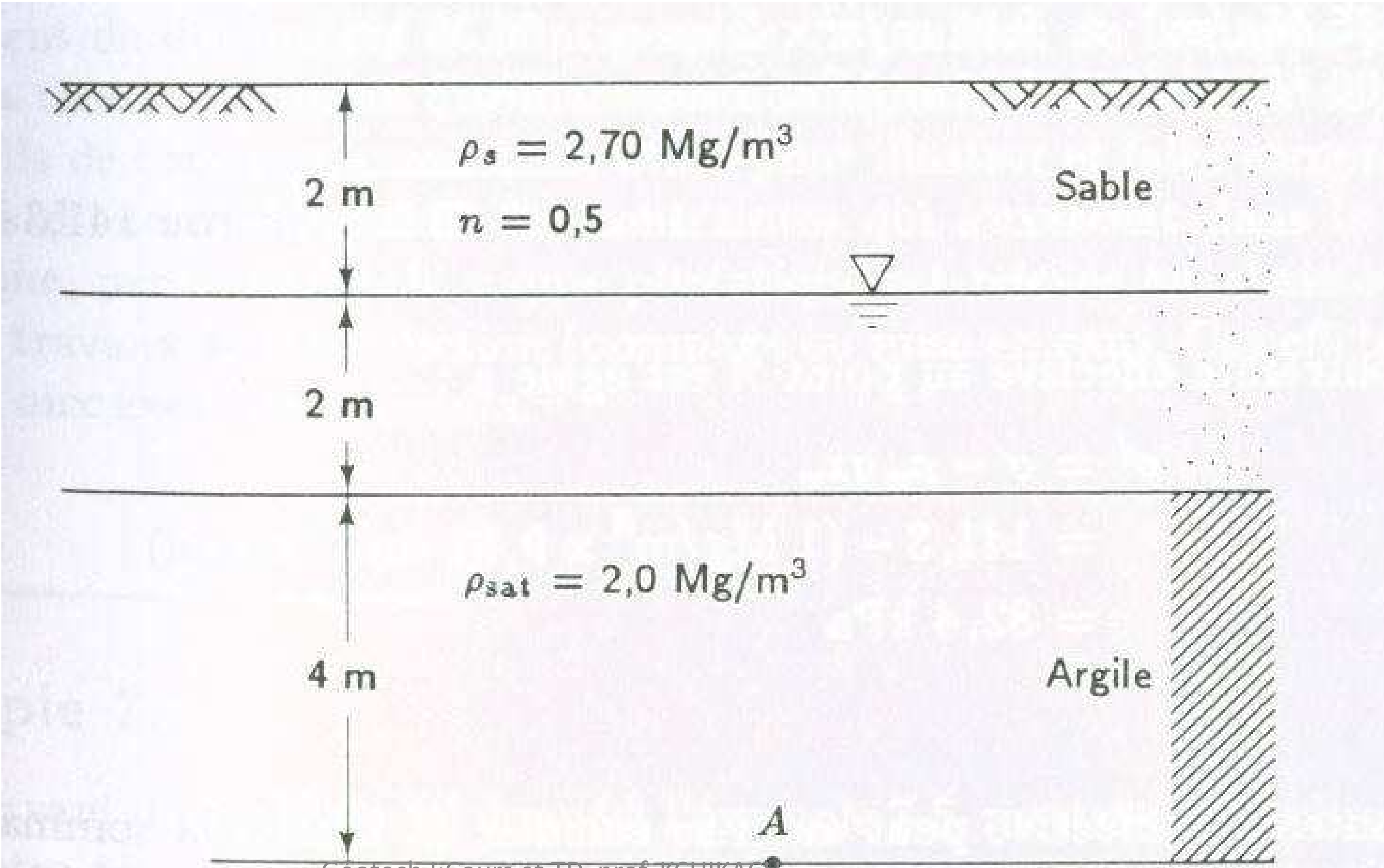
La masse volumique du sol saturé est 2 Mg/m^3. calculer les contraintes totales et les contraintes effectives ainsi que la pression interstitielle au niveau A lorsque la nappe est au niveau A et lorsque la nappe est au niveau B.

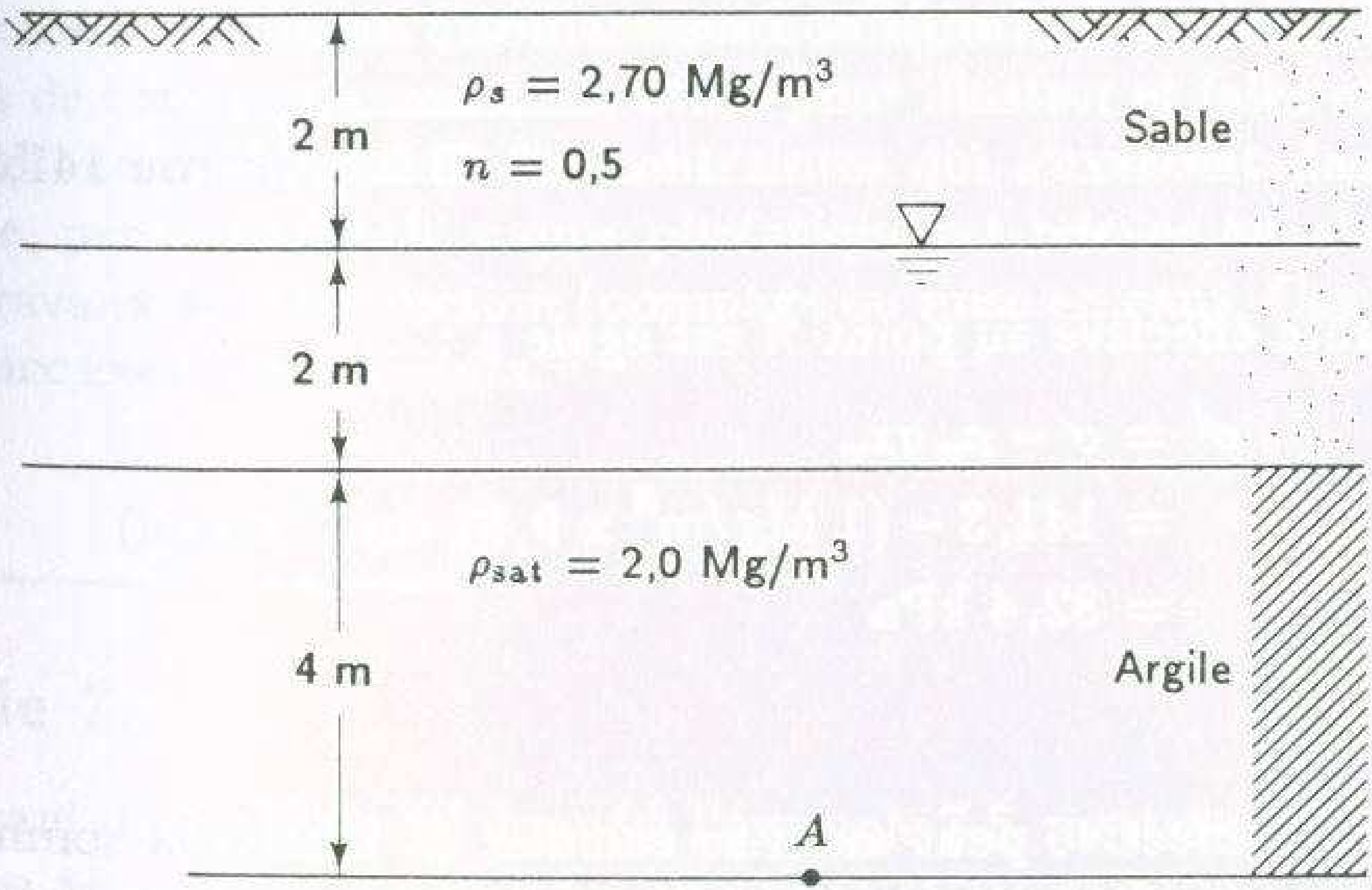
Grandeur	Unité	Symbole SI	Formule
accélération	mètre par seconde carrée	m/s^2	—
aire	mètre carré	m^2	—
aire	hectare*	ha	$hm^2 = 10^4\ m^2$
masse volumique	kilogramme par mètre cube	kg/m^3	—
force	newton	N	$kg{\cdot}m/s^2$
fréquence	hertz	Hz	$1/s$
moment d'une force	newton-mètre	$N{\cdot}m$	$kg{\cdot}m^2/s^2$
puissance	watt	W	J/s
pression	pascal	Pa	N/m^2
contrainte	pascal	Pa	N/m^2
poids volumique	newton par mètre cube	N/m^3	$kg/s^2{\cdot}m^2$
vitesse	mètre par seconde	m/s	—
potentiel électrique	volt	V	W/A
volume	mètre cube	m^3	—
volume	litre	L	$dm^3 = 10^{-3}\ m^3$
travail (énergie)	joule	J	$N{\cdot}m$

On voit bien que le fait d'abaisser la nappe du niveau B au niveau A entraine une multiplication par 2 de σ'. Donc si on pompe par exemple l'eau pour l'AEP, ceci va engendrer forcement un tassement et causer des dommages substantielles aux rues, aux édifices, aux conduites, etc.

Exercice:

Soit le sol ci-dessous. Calculer la contrainte totale σ et effective σ' au point A.



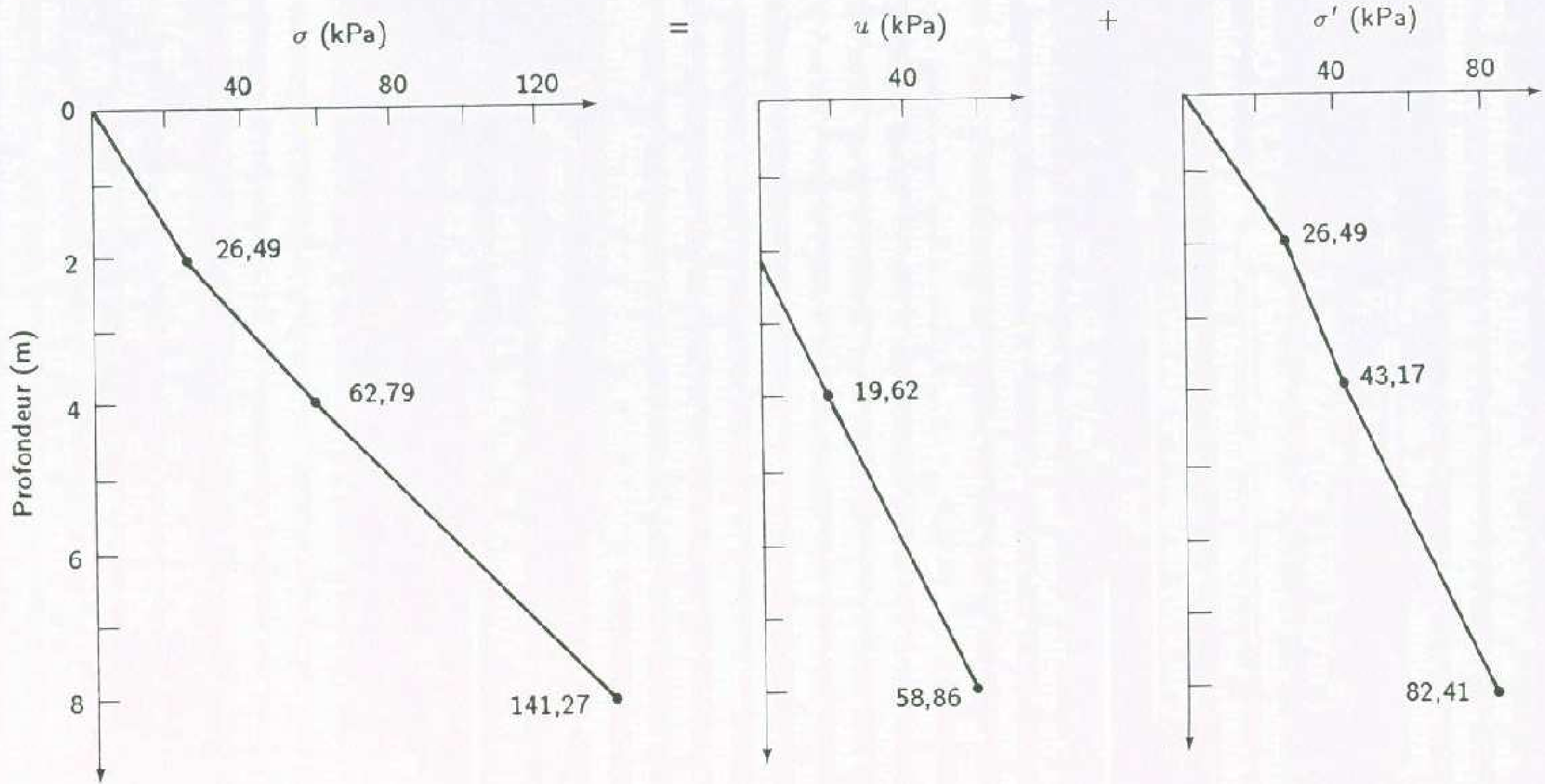


$\rho_s = 2,70 \text{ Mg/m}^3$
$n = 0,5$
2 m
2 m
4 m
Sable
$\rho_{sat} = 2,0 \text{ Mg/m}^3$
Argile
A

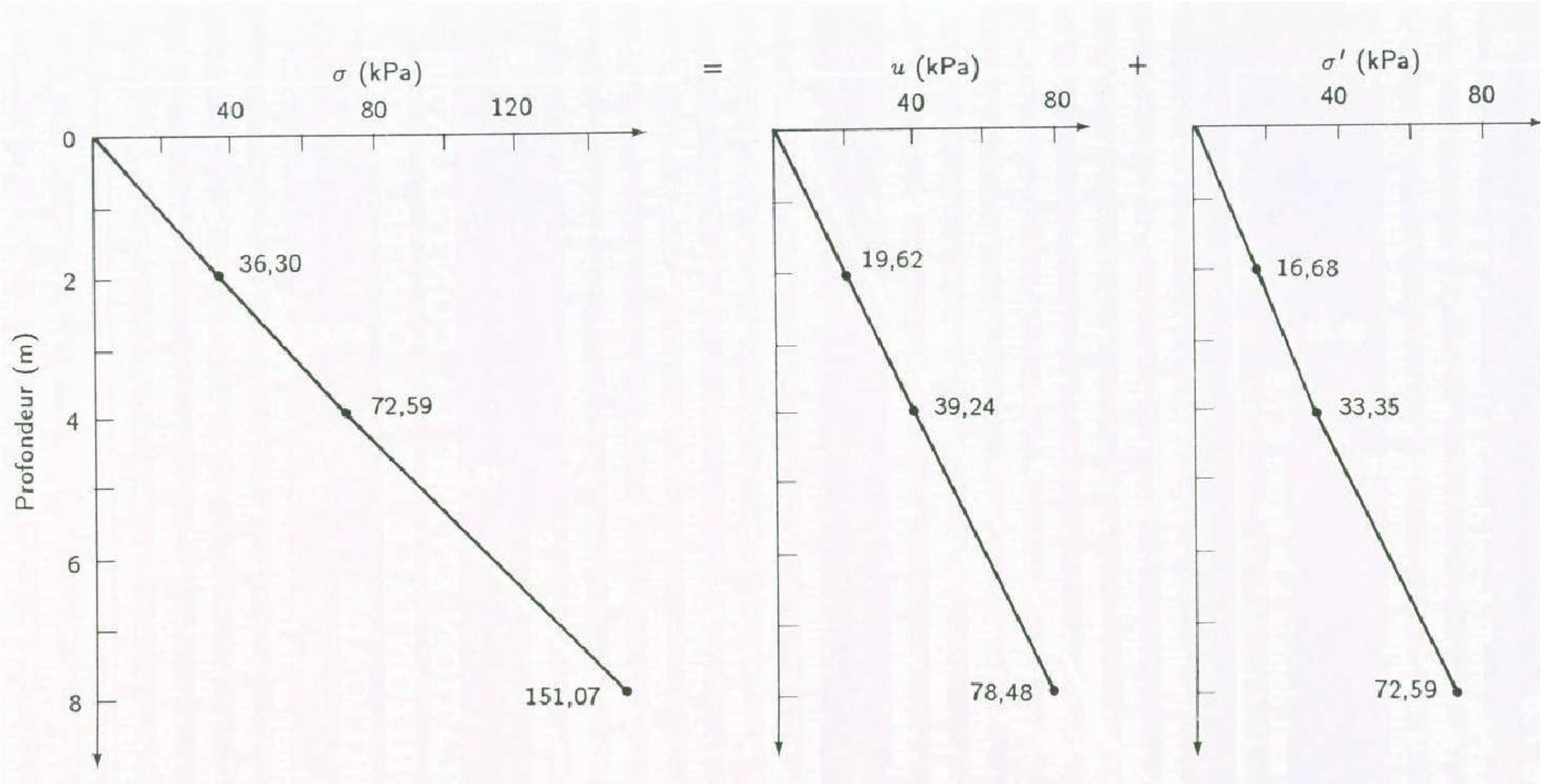
Représentation graphique de σ, u et σ’

$u = \rho_w \, g \, z_w$: pression interstitielle

$\sigma' = \sigma - u$

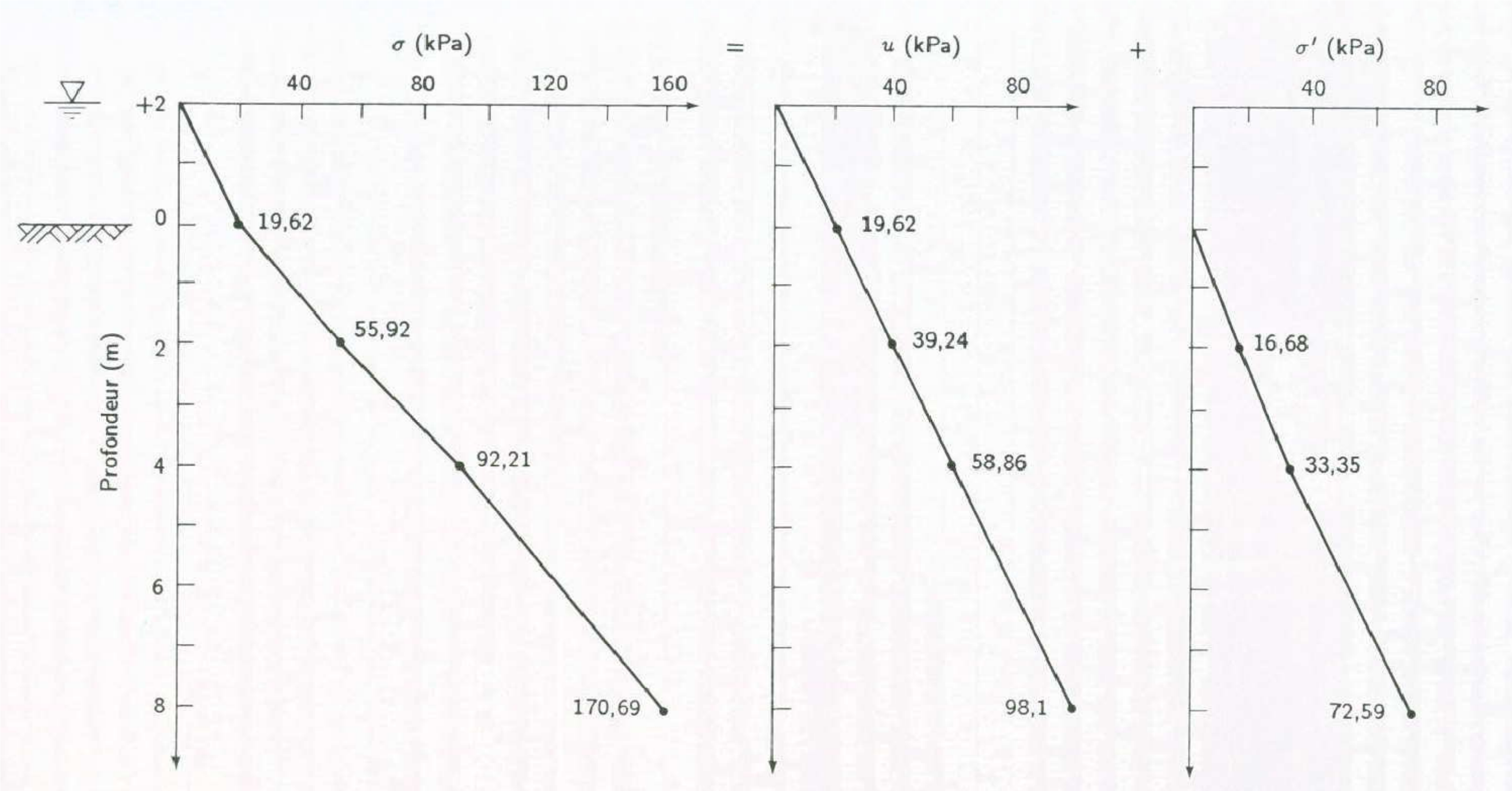


Si la nappe affleure



On remarque que la contrainte effective a diminué au point A. si le niveau de la nappe est abaissé sous sa position originale, cette contrainte aurait augmenté.

Niveau piézo. À +2m



La contrainte totale et la pression interstitielle continuent à augmenter. La contrainte effective reste constante dès qu'on dépasse la surface topo.

On en déduit de cet exemple qu'un abaissement du niveau piézo entraine une augmentation de σ' et donc une compression d'argile pour notre cas qui se manifesterait par un tassement.

Relation entre contrainte horizontale et verticale

Selon les principes de la MF, la pression dans un liquide est la même dans toutes les directions. Ceci ne s'applique pas au contraintes dans le sol où généralement:

$$\boxed{\sigma_h = K\sigma_v}$$

K: coefficient de pression de terre

La position de la nappe est susceptible de fluctuer et les contraintes totales aussi. K n'est donc pas constant pour un sol donné.

On peut éviter ce problème on travaillant avec les contraintes effectives.

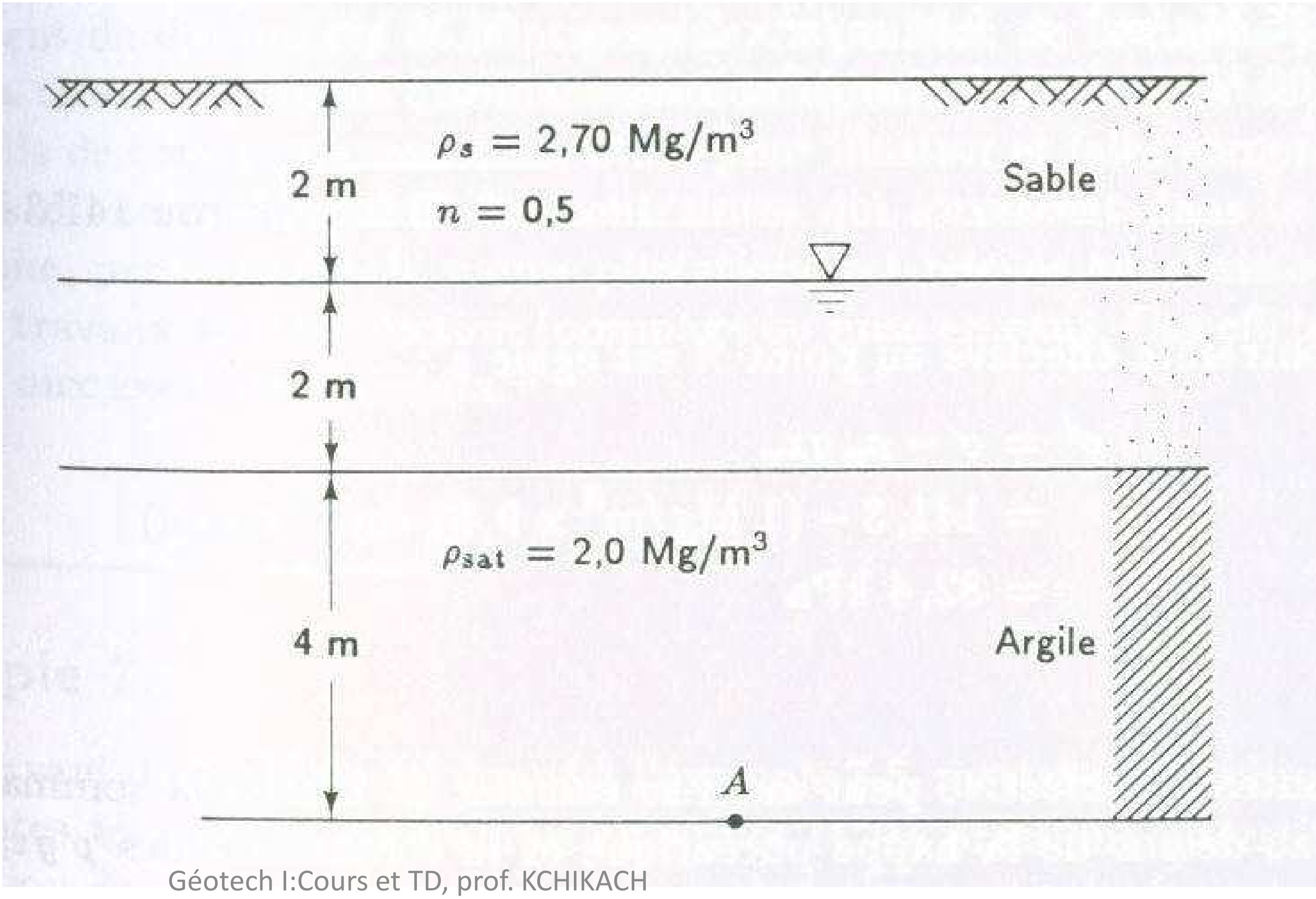
$$\boxed{\sigma'_h = K_0 \sigma'_v}$$

K_0 est appelé coefficient de terre au repos. Il conserve la même valeur pour une même couche quelque soit la position de la nappe phréatique.

Dépôts sédimentaires n'ayant jamais subi de charge: k_0 =0.4 à 0.5

Dépôts ayant été lourdement chargé k_0>3

Exemple:

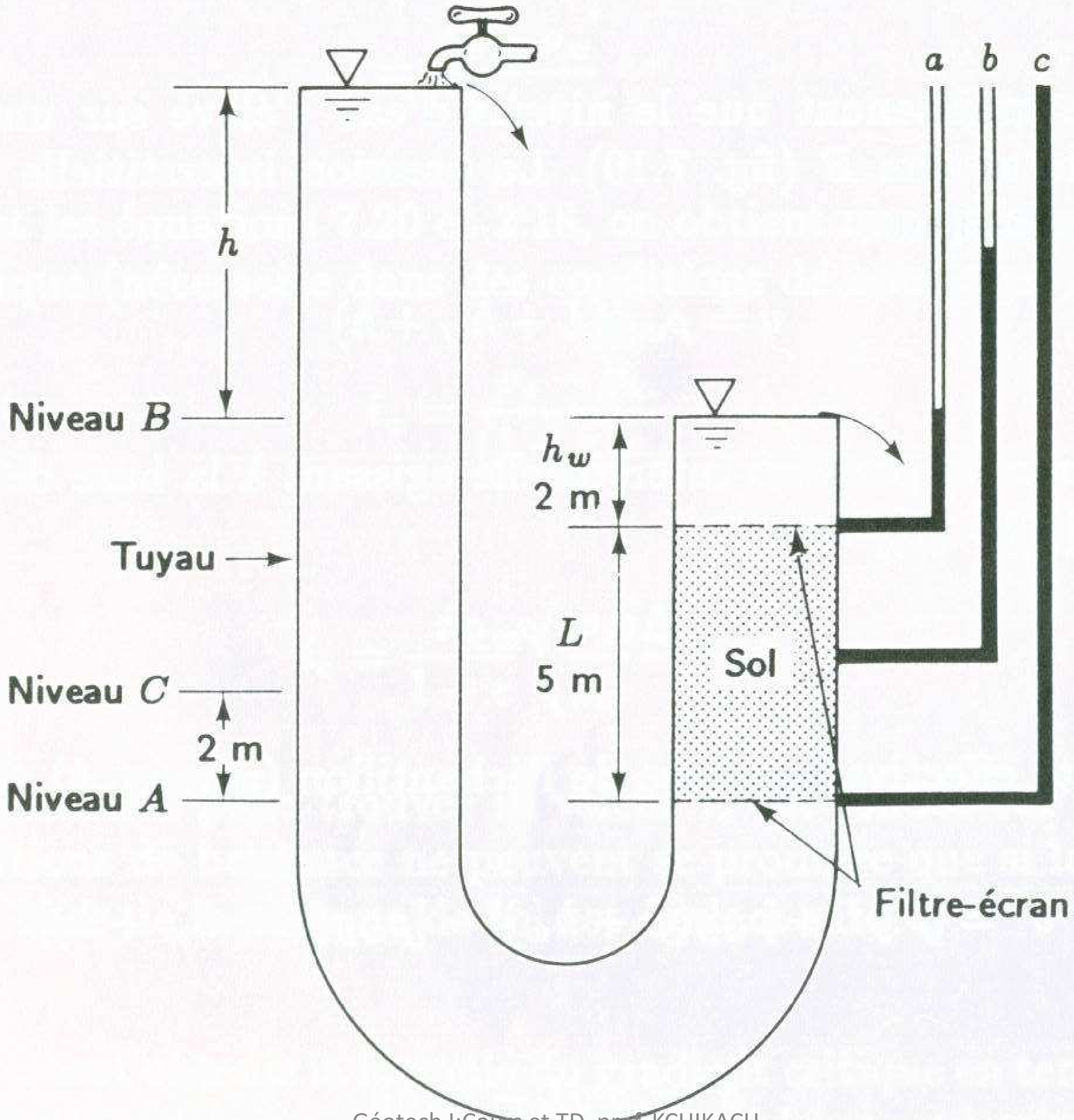


On suppose que k_0=0.6, calculer les contraintes horizontales effectives et totales à 4m et à 8m de profondeur et évaluer la valeur de K à ces profondeurs

Réponse:

Forces d’ecoulement, sable boulant et liquéfaction

Quand l’eau percole à travers le sol, elle exerce sur chaque grain une trainée appelée force d’écoulement. Cette force agit directement sur la contrainte effective qui s’exerce dans le sol.


a
b
c
h
Niveau B
h_w
2 m
Tuyau
L
5 m
Sol
Niveau C
2 m
Niveau A
Filtre-écran

Lorsque le niveau d'eau atteint la position B, tous les piézomètres se stabilisent au même niveau que B.

Si le niveau d'eau dans le tuyau est abaissé sous B, l'eau s'écoulera du haut vers le bas dans le sol et vice versa si le niveau est élevé au dessus de B.

Plus la charge h au dessus de B est élevée plus la force d'écoulement transmise au sol est importante.

Avec l'augmentation de ces forces on arrive à réduire graduellement l'influence des forces gravitationnelles agissant sur la colonne du sol jusqu'à ce que ce dernier entre en état de boulance

Une masse de sol est en état de boulance lorsque les contraintes effectives dans toute la masse sont égales à zéro.

En d'autre terme, lorsque l'écoulement est vertical ascendant, le vecteur gradient hydraulique i est vertical et dirigé vers le haut. La force d'écoulement s'oppose donc directement à la force de pesanteur. Si le gradient hydraulique est suffisamment élevé la résultante de ces deux force est dirigée vers le haut et les grains du sol sont entraînés par l'eau: il y a phénomène de boulance. Le gradient hydraulique critique est le gradient hydraulique pour lequel la résultante de ces forces est nulle.

$$\boxed{i_c = \frac{\gamma'}{\gamma_w}}$$

Le phénomène de boulance peut provoquer des accidents graves si des constructions sont fondées sur le sol où il se produit, ou si le terrain lui-même fait partie de l'ouvrage: digue ou barrage en terre, fond de fouille.,.

Dans tous les problèmes d'hydraulique des sols, il importe de vérifier que les gradients hydrauliques ascendants réels sont suffisamment inférieurs au gradient critique i_c .

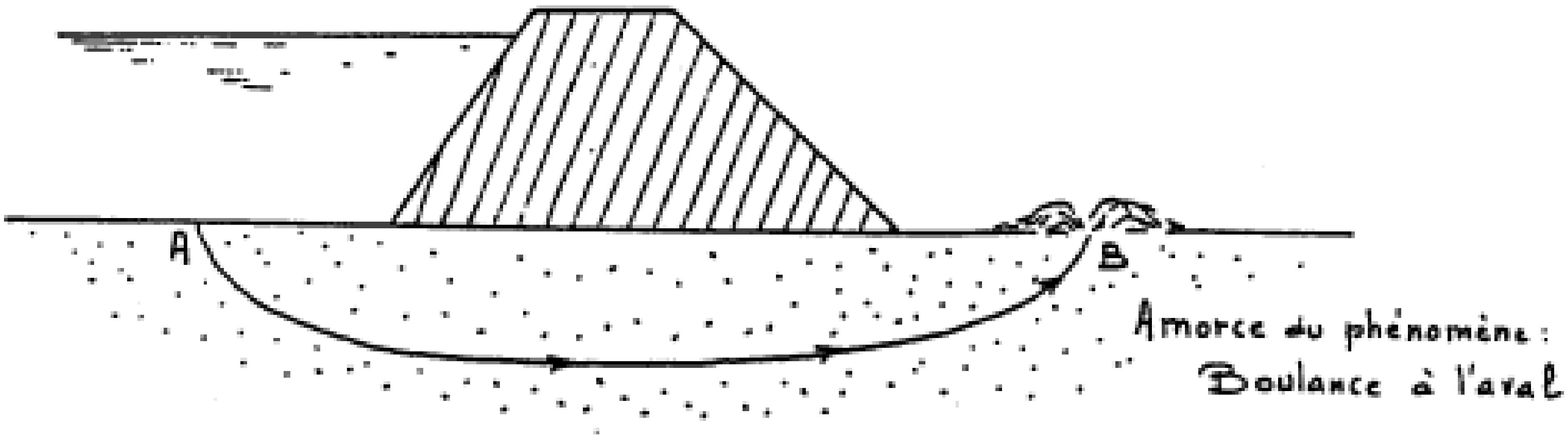
Dans le cas des sables et graves, ic est voisin de 1. en effet:

$$\gamma' = (\gamma_s - \gamma_w)(1 - n) \quad \text{donc} \quad i_c = \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1\right)(1 - n)$$

En prenant une porosité n=40% (valeur moyenne pour sable et grave) et γ_s=26.5 kN/m^3, on trouve ic≈1

Phénomène de renard:

Le phénomène de boulance apparaît dans le cas d'un écoulement vertical ascendant. Dans le cas général d'un écoulement en milieu perméable, l'eau peut atteindre localement des vitesses élevées susceptibles d'entraîner les particules fines du sol. De ce fait, le sol étant rendu localement plus perméable, la vitesse de décharge augmente et le phénomène s' amplifie. Des éléments plus gros vont être entraînés tandisque l'érosion progressera de manière régressive le long d'une ligne de courant. Un conduit se forme par où l'eau s 'engouffre et désorganise complètement le sol. C 'est le phénomène de renard.



Phénomène de renard

PROTECTION DES OUVRAGES CONTRE LA BOULANCE: FILTRES

Le phénomène de boulance des sables peut être évité par la réalisation de filtres constitués de couches de matériaux perméables de granulométrie choisie de manière à permettre à l'eau d e s'écouler sans entraînement de particules. Par leur poids propre, ils chargent le terrain sous-jacent et y provoque une augmentation des contraintes effectives.

Leur granulométrie est étudiée de manière à :
- Retenir les particules de sol sous-jacent entraînées par l 'écoulement (critère de rétention),
-ne pas sensiblement diminuer la perméabilité du sol (critère de perméabilité).
On retiendra la règle suivante:

$$4{,}5\ D_{15}\ (\text{terrain}) \leq D_{15}\ (\text{filtre}) \leq 4{,}5\ D_{85}\ (\text{terrain})$$

Quelle doit être la hauteur h au dessus de B pour avoir l'état de boulance?

Au point A quant le niveau d'eau est au point B

$$\sigma=\rho_{sat}\, g\, L + \rho_w\, g\, h_w = \rho' g L + \rho_w g (L + h_w)$$

$$u = \rho_w\, g\, (L + h_w)$$

$$\sigma' = \sigma - u = \rho'\, g\, L$$

<u>On suppose maintenant que le niveau d'eau s'élève à h au dessus de B.</u>

$u = \rho_w\ g\ (L + h_w + h)$ et donc la différence de pression interstitielle agissant au point A est $\Delta u = \rho_w\ g\ h$

et

$$\sigma' = (\rho' g L + \rho_w g (L + h_w)) - (\rho_w g (L + h_w + h))$$
$$= \rho' g L - \rho_w\ g\ h$$

donc la diminution de σ' correspond exactement à l'augmentation de Δu

Boulance càd $\sigma' = \rho' g L - \rho_w g h = 0$ donc $h = (\rho' L)/\rho_w$

$$\frac{h}{L} = \frac{\rho'}{\rho_w} = i_c$$

i_c: gradient hydraulique critique pour avoir la boulance

On a: $$\boxed{\rho = \frac{\rho_s (1+w)}{1+e}}$$

de plus $V_w = S_r\, V_v = S_r\, e$

$M_w = \rho_w V_w = w\, M_s = w\, \rho_s\, V_s$

$\rho_w\, Sr\, e = w\, \rho_s\, (V_s = 1)$

$w = (\rho_w\, Sr\, e) / \rho_s$

$$\boxed{\rho = \frac{\rho_s \left(1 + \frac{\rho_w Sr\, e}{\rho_s}\right)}{1+e} = \frac{\rho_s + \rho_w Sr\, e}{1+e}}$$

à la saturation on aura Sr=1

$$\boxed{\rho_{SAT} = \frac{\rho_s + \rho_w \, e}{1+e}}$$

$\rho' = \rho_{sat} - \rho_w = (\rho_s - \rho_w)/(1+e)$

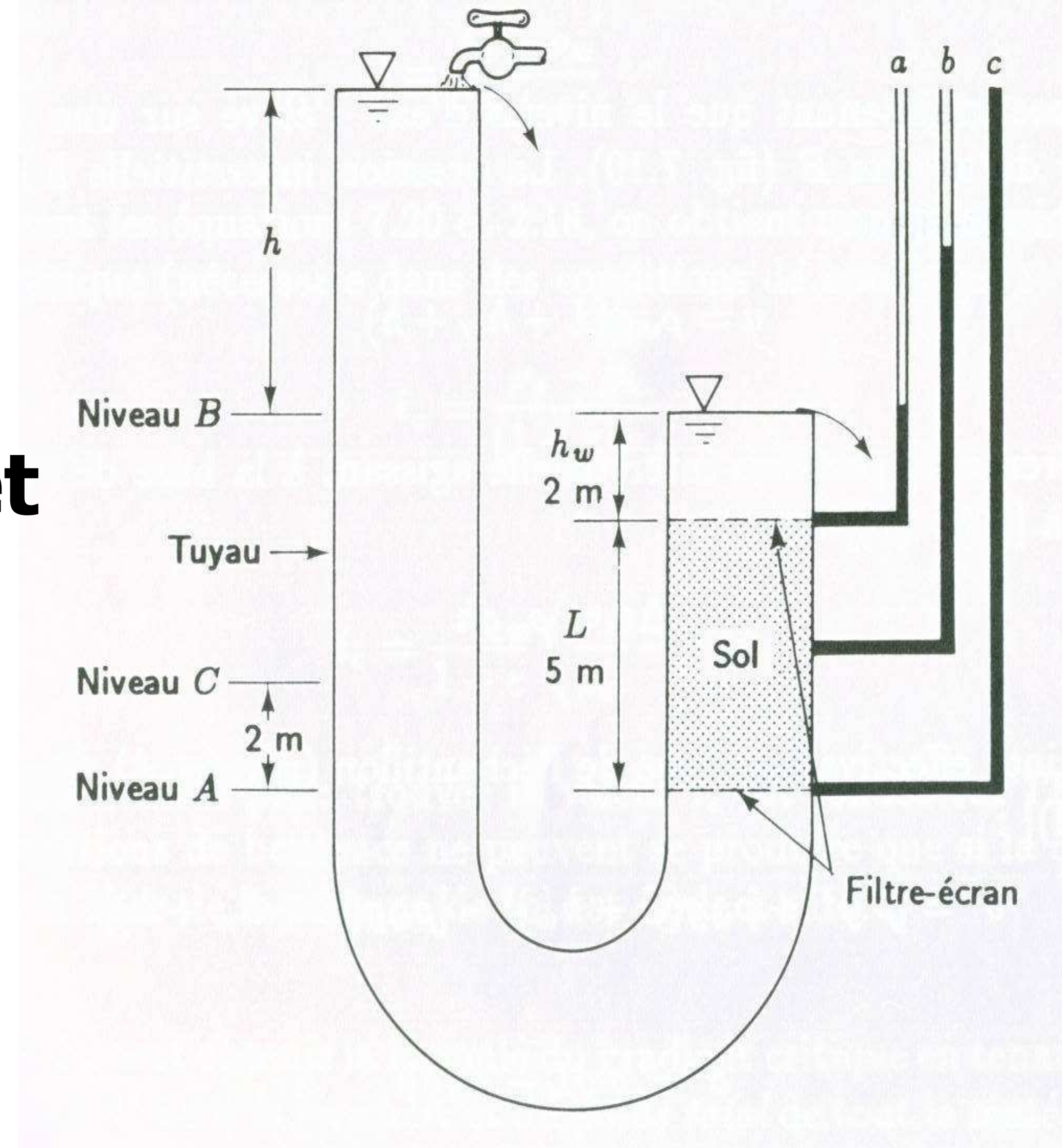
donc

$i_c = (\rho_s - \rho_w)/(1+e)\rho_w$

$$\boxed{i_c = \frac{1}{1+e}\left[\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right]}$$

Ex:

Trouver la charge qui produira un état de boulance et le gradient hydraulique critique sachant que $\rho_{sat} = 2t/m^3$, $\rho_s = 2.65t/m^3$ et $e = 0.65$



Même si elles n’entrainent pas nécessairement la boulance, les forces d’écoulement sont présentent dans toute masse du sol soumise à un gradient hydraulique. Les sables sont plus sensibles que les argiles aux forces d’écoulement

Pour avoir boulance (Planche) il faut que la force de l'eau qui s'exerce vers le haut sous l'effet de h soit égale à la force effective exercée vers bas par le poids de la colonne du sol déjaugé.

Force vers le haut = force vers le bas

$$\rho_w \, g \, h \, A = \rho' \, g \, L \, A$$

$$\rho_w g h A = \frac{\rho_s - \rho_w}{1+e} g L A$$

La force vers le haut :ρ_w g h A est distribuée uniformément à travers le volume LA

Donc $$\frac{\rho_w \mathbf{ghA}}{\mathbf{LA}} = \rho_w \mathbf{gi} = \mathbf{j} = \rho' \mathbf{g}$$

Ex: pour notre exemple calculer j pour l'état de boulance

$$j = i\rho_w g = \frac{5}{5} x 1 x 9.81 = 9.81 kN/m^3$$

ou

$$j = \rho' g = \frac{\rho_s - \rho_w}{1+e} g = \frac{2.65-1}{1+0.65} x 9.81 = 9.81 kN/m^3$$

Si le niveau d'eau est au niveau C (Planche)

dans ce cas l'écoulement se fait vers le bas

Calculer le gradient hydraulique, la contrainte effective et la force d'écoulement au point.

Gradient hydraulique

$$\mathbf{i} = \frac{\Delta \mathbf{h}}{\mathbf{L}} = \frac{-5}{5} = -1$$

Contrainte effective en A

$$F_{SOL}\downarrow = \rho_{SAT} gLA = 2x9.81x5x1 = 98.1kN\downarrow$$

$$F_{EAU\ haut}\downarrow = \rho_{w} gh_{w} A = 1x9.81x2x1 = 19.6kN\downarrow$$

$$F_{EAU\ bas}\uparrow = \rho_{w} gh_{w} A = 1x9.81x2x1 = 19.6kN\uparrow$$

$$\Sigma F = 98.1 + 19.6 - 19.6 = 98.1kN\downarrow$$

et donc $\sigma' = F/A = 98.1 kN/m^2$

Force d’écoulement en A

$$j = \rho_w gi(vol) = 1x9.81x(-1)x5x1 = 49kN$$

dans le sens de l’écoulement

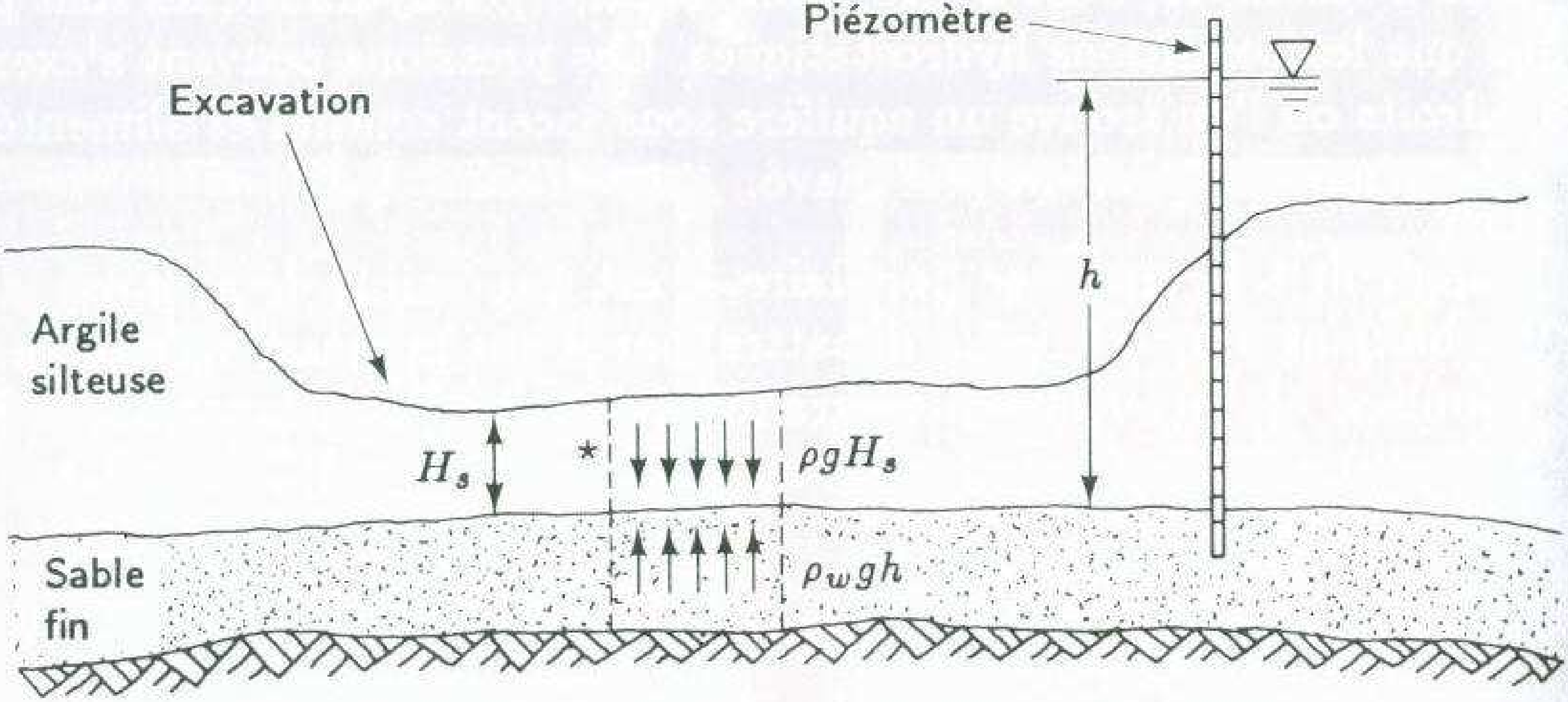
Dans la pratique on peut trouver le phénomène de boulance des sable dans les batardeaux en bordure de rivière. Naturellement, l’eau de la rivière s’infiltre et percole vers l’excavation et on doit pomper continuellement.

Dans les digues d’inondation, l’eau s’infiltre sous la digue et si le gradient hydraulique est élevé, on assistera au phénomène de boulance localisé qui peut se propager et miner complétement la digue.

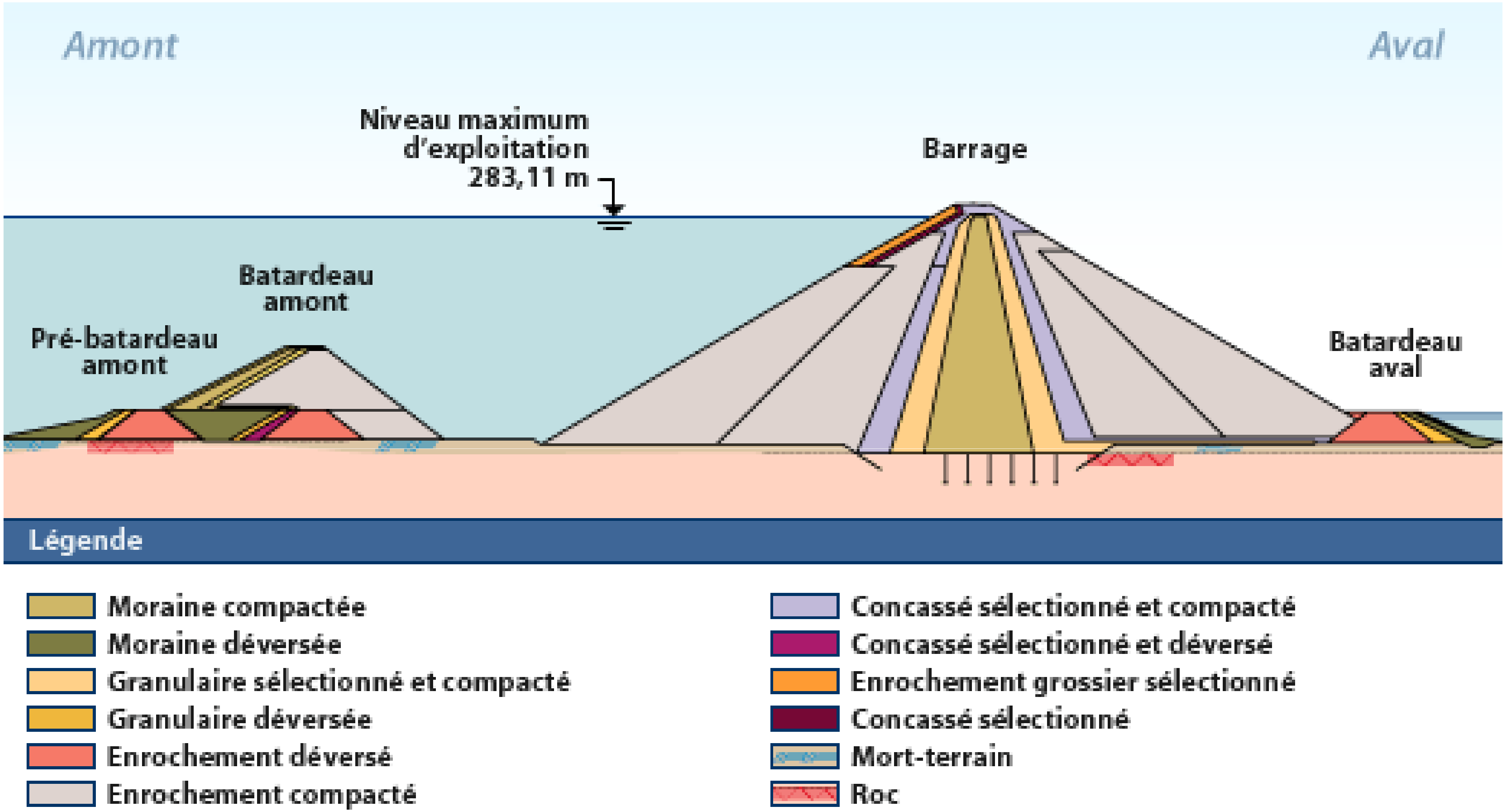
Ex:

Soit le chantier (Planche). L’argile agit comme une barrière étanche qui empêche l’écoulement vers le haut. La proximité d’une rivière donne lieu à des conditions d’atésianisme. Si Hs n’est suffisamment grand, la pression du soulèvement qui s’exerce au centre de l’excavation peut faire éclater le fond.

Calculer Hs minimale d’argile à conserver pour éviter ce phénomène



* Ne pas tenir compte de la résistance au cisaillement le long des parois.


Amont
Aval
Niveau maximum d'exploitation 283,11 m
Barrage
Batardeau amont
Pré-batardeau amont
Batardeau aval
Légende
Moraine compactée
Moraine déversée
Granulaire sélectionné et compacté
Granulaire déversée
Enrochement déversé
Enrochement compacté
Concassé sélectionné et compacté
Concassé sélectionné et déversé
Enrochement grossier sélectionné
Concassé sélectionné
Mort-terrain
Roc

Grandeur	Unité	Symbole SI	Formule
accélération	mètre par seconde carrée	m/s^2	—
aire	mètre carré	m^2	—
aire	hectare*	ha	$hm^2 = 10^4\ m^2$
masse volumique	kilogramme par mètre cube	kg/m^3	—
force	newton	N	$kg{\cdot}m/s^2$
fréquence	hertz	Hz	$1/s$
moment d'une force	newton-mètre	$N{\cdot}m$	$kg{\cdot}m^2/s^2$
puissance	watt	W	J/s
pression	pascal	Pa	N/m^2
contrainte	pascal	Pa	N/m^2
poids volumique	newton par mètre cube	N/m^3	$kg/s^2{\cdot}m^2$
vitesse	mètre par seconde	m/s	—
potentiel électrique	volt	V	W/A
volume	mètre cube	m^3	—
volume	litre	L	$dm^3 = 10^{-3}\ m^3$
travail (énergie)	joule	J	$N{\cdot}m$