•Etude des sols

- Chapitre I
  •Propriétés physiques des sols – Compactage des Sols
- Chapitre II
  •Contraintes dans les sols
- Chapitre III
  •Hydrauliques des sols
- Chapitre IV
  •Tassement et Consolidation

•Chapitre II

•Contraintes dans les sols

•Objectifs de ce chapitre

- Concept de contrainte effective
  - Sols saturés
  - Sols partiellement saturés
- Effet de la fluctuation de la nappe phréatique
- Contrainte neutre
- Capillarité

•1- Introduction

•1.1 Nappe phréatique

➢Au dessous de la nappe phréatique

Sol totalement saturé

➢Au dessus de la nappe phréatique

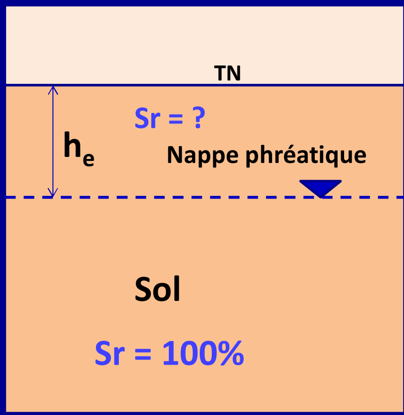
Sol partiellement saturé

Sr = ?

- dimensions des particules

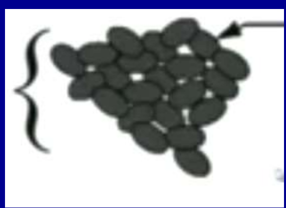
-Distance / nappe phréatique

-- phénomène de capillarité



Le sol = Squelette de particules solides renfermant des vides (air + eau)

Squelette Solide



Particules du sol

Forces inter-particules

→ réarrangement des particules (glissement, rotation)

→ variation de volume

- Sol totalement saturé

Drainé ⟶ variation de volume

Non drainé ⟶ pas variation de volume

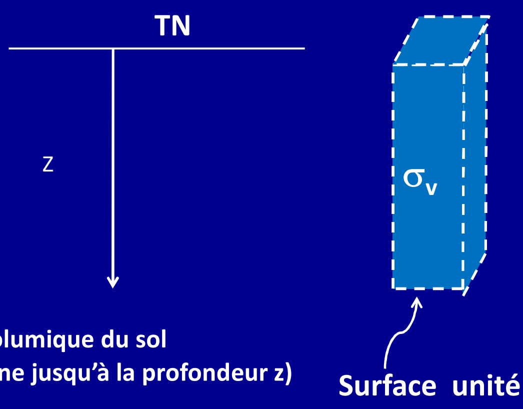
(eau est incompressible)

- Sol partiellement saturé

Drainé et non drainé ⟶ variation de volume

- compression de l'air ds les vides
- réarrangement des particules

Contrainte verticale due aux poids des terres



γ= poids volumique du sol
(homogène jusqu'à la profondeur z)

$$\sigma_v = \gamma \cdot z$$

Contrainte verticale totale

- la contrainte totale est supportée par:
  la squelette solide + eau dans les vides

- la contrainte supportée par la squelette solide

→ Résistance + les caractéristiques de compressibilité du sol

- la contrainte totale est mesurable

Contrainte verticale totale = f(z)

Cas 1: Sol homogène

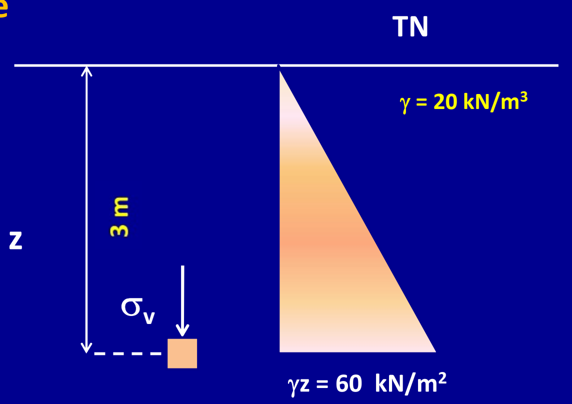
Exemple:

Soit $\gamma = 20\ kN/m^3$

$Z = 3\ m$

$\sigma_v = \gamma z = 20 \times 3$

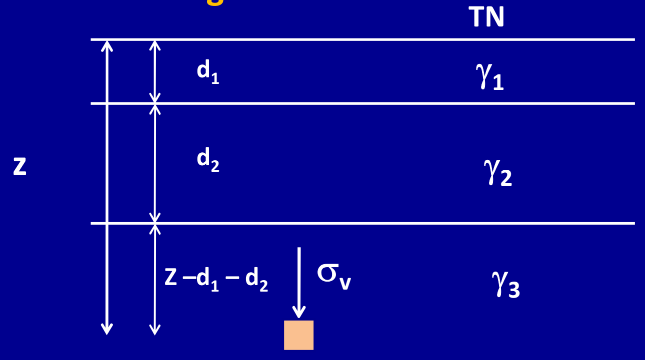
$= 60\ kN/m^2$



$$\boxed{\sigma_v = \gamma z}$$

Contrainte verticale totale

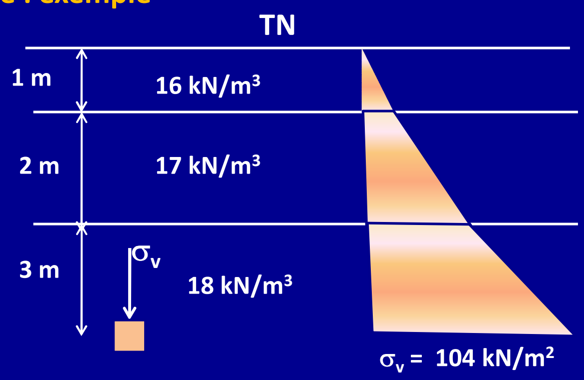
Cas 2: Sol non homogène



$$\sigma_v = \gamma_1 d_1 + \gamma_2 d_2 + \gamma_3 (z-d_1-d_2)$$

Contrainte verticale totale

Cas 2: Sol non homogène : exemple



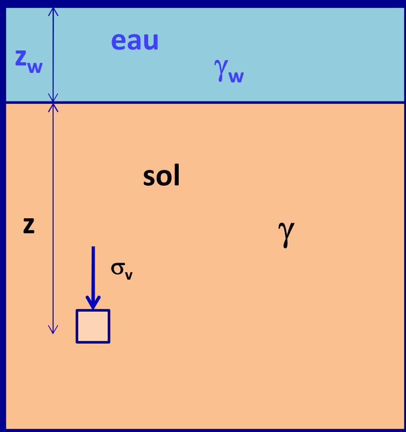
Contrainte verticale totale

Cas 3: Sol sous eau retenue

$$\sigma_v = \gamma\, z + \gamma_w \cdot Z_w$$

γ = poids volumique du sol saturé

γ_w = poids volumique de l'eau

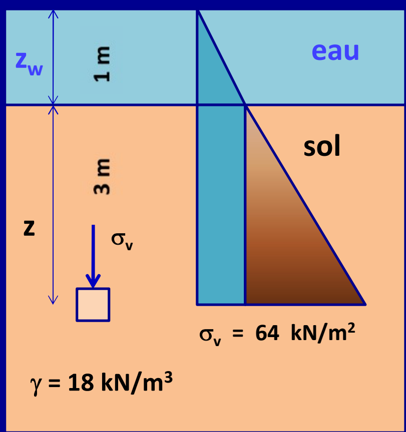


Contrainte verticale totale

Cas 3: Sol sous eau retenue: exemple

Soit γsat = 18 kN/m^3
γ_w = 10 kN/m^3
Z = 3 m
Z_w = 1 m

$\sigma_v = \gamma z + \gamma_w \cdot z_w$
σ_v = 64 kN/m^2



Contrainte verticale totale

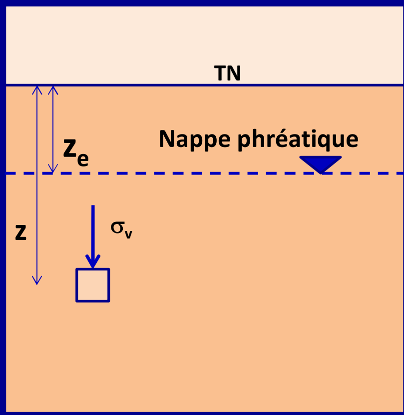
Cas 4: Contrainte totale dans le cas des sols non saturés

- Au dessous de la nappe phréatique

Condition du sol totalement saturé

- Au dessus de la nappe phréatique

Condition complexe = sol partiellement ou totalement saturée dépendant de la capillarité du sol



Contrainte verticale totale

Cas 5: sols supportant une charge surfacique

$$\sigma_v = \gamma z + f(q)$$

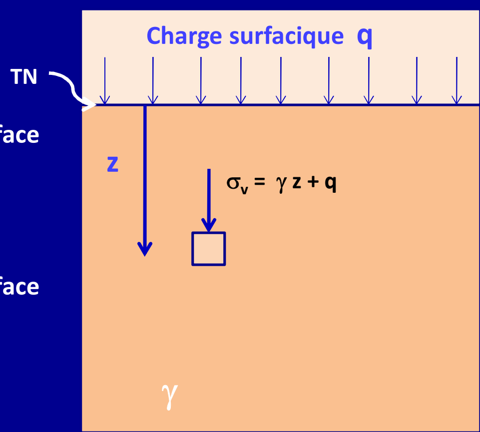
- Charge appliquée sur une surface très large

⟶ q est cte

- Charge appliquée sur une surface limitée

⟶ q = f(z)

Théories de distribution des contraintes en fonction de z



Pression interstitielle

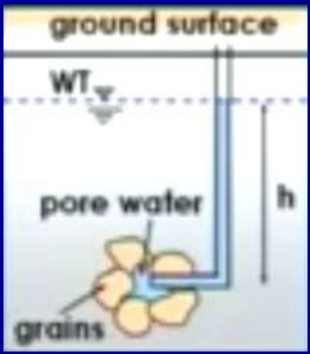
C'est la pression dans l'eau (vides autour et entre les grains)

u = pression interstitielle

Pression interstitielle

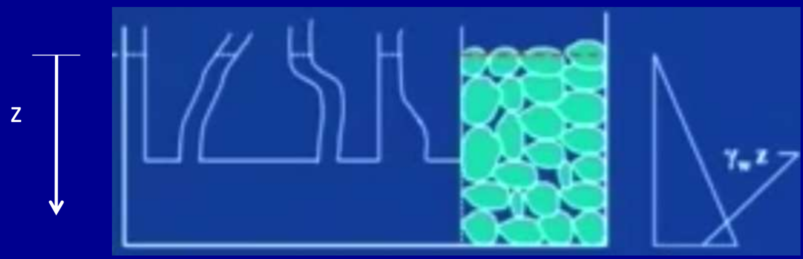
Pression dans l'eau en condition statique
(condition de non écoulement) est égale à la pression hydrostatique

$u = \gamma_w \cdot h$



Pression interstitielle

- Les vides dans le sol sont interconnectés ,
Simulation = complexe collection de tubes irréguliers



- mesurer u : piézomètres, transducteur

Postulat de Terzaghi

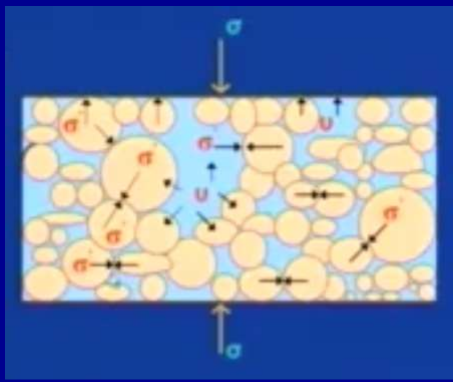
Toute variation de contrainte due à la compression, distorsion, cisaillement correspond à une variation de contrainte effective

$$\boxed{\sigma' = \sigma - u}$$

σ' = contrainte effective

Contrainte effective

- contrainte effective est la contrainte entre les grains du sol
- à l'origine des changement de résistance, volume et forme
- Paramètre non physique

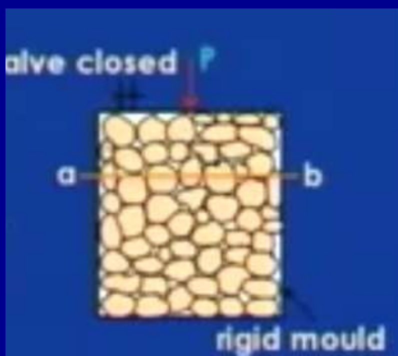


Contrainte effective

Simulation: Piston

Sol sec

- une pression P appliquée à la surface du sol à travers un piston
- la pression P est transférée aux grains du sol à travers les points de contact



$\sigma_a = P/A = \sigma'$

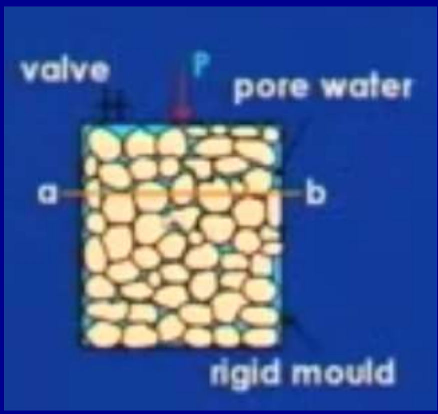
A: surface de la section a-a de la moule

Contrainte effective

Simulation: Piston

Sol totalement saturé

- Robinet fermé. La pression est supporté par l'eau des pores et non les grains
- la pression développée dans l'eau est dite pression interstitielle ou pression neutre, u

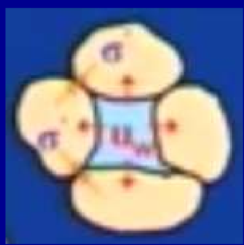


u = P/A

Simulation: Piston

Le robinet ouvert = drainage du sol

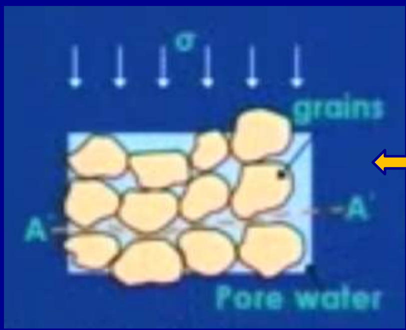
$$\sigma_t = \sigma' + u$$

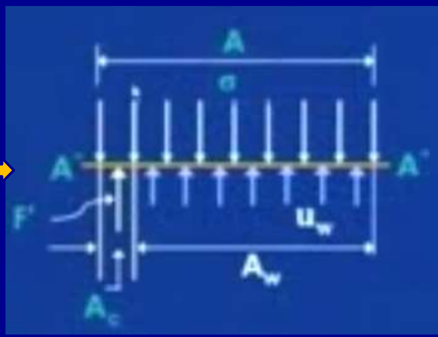


Drainage total du sol

$$\sigma_t = \sigma' , u = 0$$

Concept de Contrainte effective ou contrainte inter-granulaire





Elt Sol totalement saturé en équilibre

Le plan ondulé A'A' passe à travers les points de contacts entre les particules

le plan A''A'' correspond à A'A'

Contrainte effective

En équilibre:

$\sigma A = F' + u_w\, A_w$

avec

$A_c + A_w = A$

$\sigma = F'/A + u_w\, (A_{w/A})$

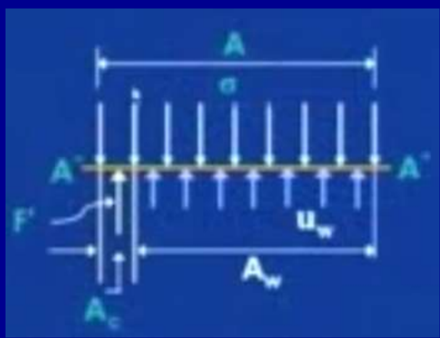
$\sigma = \sigma' + u_w\, (1 - A_c / A_w)$

$\sigma = \sigma' + (1 - \underbrace{a}_{0})\, u_w$

a = surface de contact entre particules par unité de surface du sol

Ds les matériaux granulaires

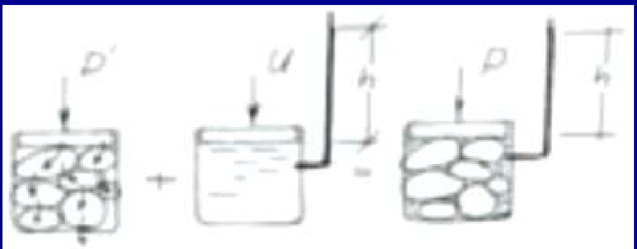
Lambe et Whitman, 1969



$\sigma' \neq F'/A_c$

$\boxed{\sigma' = \sigma - u}$

Contrainte effective



$\sigma' \quad + \quad u \quad = \quad \sigma$

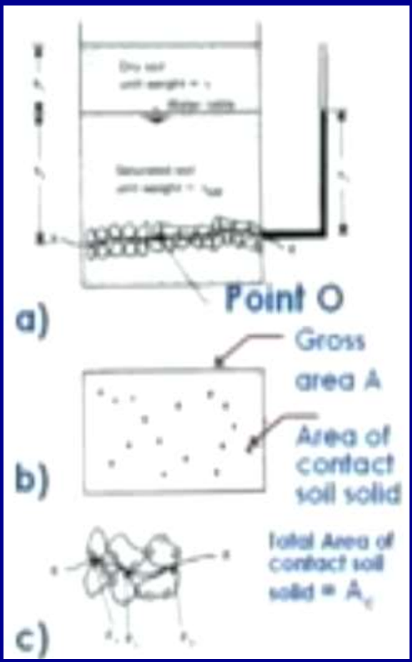
σ' = définir?

Au point O:

σ = ?

u = ?

σ '= ?



Contrainte effective dans les sols partiellement saturés

- eau dans les vides est discontinue
- l'air occupe un volume important dans les vides

La contrainte totale au niveau d'un point = (contrainte effective + pression de l'air + pression de l'eau ds les vides)

Particules solides

Contrainte effective dans les sols partiellement saturés

Bishop (1960)

$$\sigma = \sigma' + u_a - \Psi (u_a - u_w)$$

Ψ est la surface occupée par l'eau dans une section unité du sol

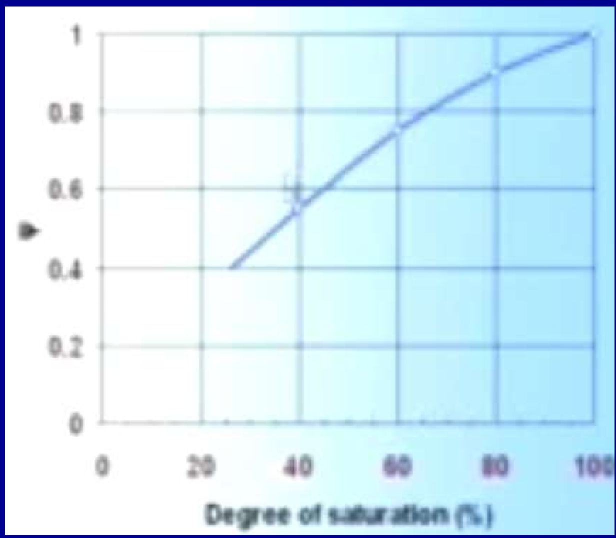
Pour les Sol sec $\Psi = 0$ ($S_r = 0$)

Pour les Sol saturés $\Psi = 1$ ($S_r = 100\%$)

$0 < S_r < 1$ Ψ est déduite à partir d'abaque

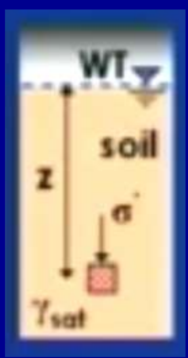
Bishop (1960) à déterminé la variation de Ψ en fonction de Sr pour différent sols, en se basant sur des essais triaxiaux sur des échantillons non saturés

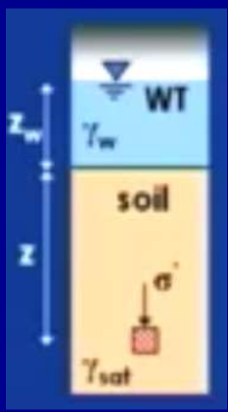
Contrainte effective dans les sols partiellement saturés



Bishop (1960)

Effet de la nappe phréatique sur la contrainte effective





$\sigma_v' = \gamma' z$

$\sigma_v' = \gamma' z$

→ La contrainte effective est non affectée par le niveau de l'eau au dessus du sol

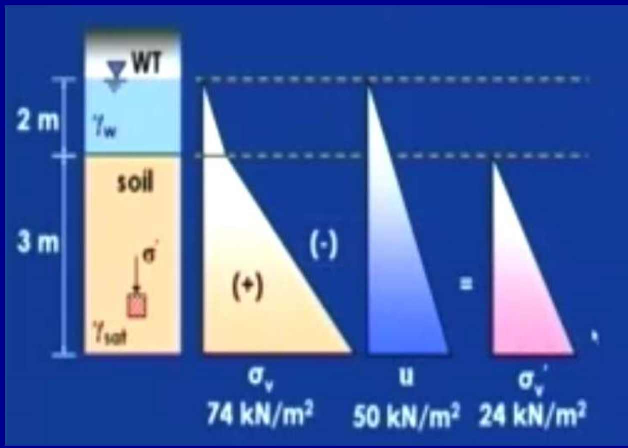
Exemple 1:

Soit
γ sat = 18 kN/m^3
γ_W = 10 kN/m^3
Z = 3 m
Z_w = 2 m

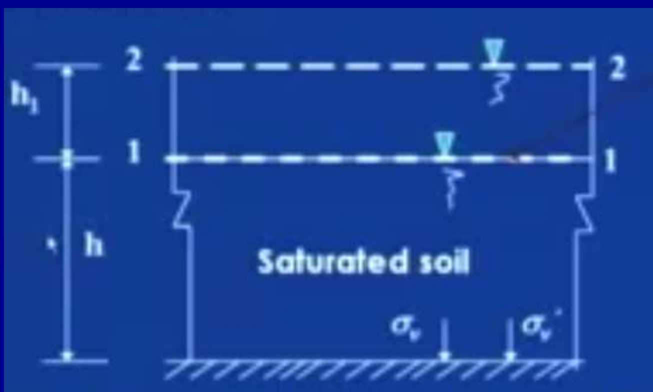
Exemple 2:

Soit
γ sat = 18 kN/m^3
γ_W = 10 kN/m^3
Z = 3 m
Z_w = 2000 m

$\sigma_v' = ?$
déduire



Fluctuation de la nappe phréatique et contrainte effective



TN

1. 1 = Niveau initial de la nappe phréatique (niveau TN)
2. 2 = Niveau de la nappe est plus élevé (cas de pluie)

Fluctuation de la nappe phréatique et contrainte effective

1 - 1 = Niveau initial de l'eau (avant pluie)

$\sigma_v = \gamma_{sat}\, h$
$u_w = \gamma_w\, h$
$\sigma'_v = \gamma'\, h$

2 = Niveau de la nappe (cas de pluie)

$\sigma_v = \gamma_{sat}\, h + \gamma_w\, h_1$
$u_w = \gamma_w\,(h + h_1)$
$\sigma'_v = \gamma'\, h$

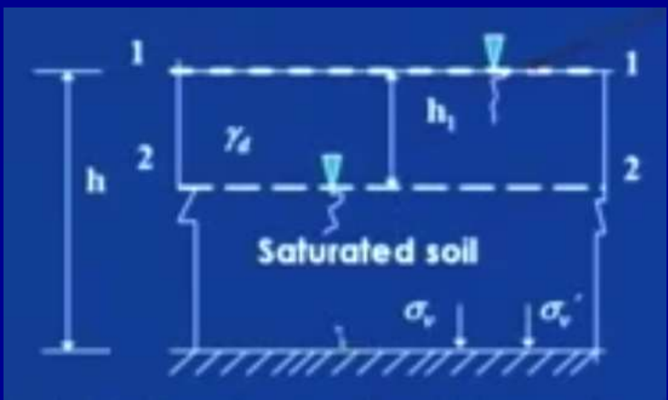
→ Conclure

- le niveau de la nappe d'eau est au dessus du nv TN

si le niveau d'eau augmente alors σ et u augmentent alors que la contrainte effective demeure inchangeable

Fluctuation de la nappe phréatique et contrainte effective

TN



1 – 1 = Niveau initial de la nappe phréatique (niveau TN)
2 - 2 = Niveau de la nappe est moins élevé (en été)

Fluctuation de la nappe phréatique et contrainte effective

1 - 1 = Niveau initial de l'eau (pluie)

$\sigma_v = \gamma_{sat}\, h$
$u_w = \gamma_w\, h$
$\sigma'_v = \gamma'\, h$

2 = Niveau de la nappe (après pluie)

$\sigma_v = \gamma_{sat}\,(h - h_1) + \gamma_d\, h_1$
$u_w = \gamma_w\,(h - h_1)$
$\sigma'_v = \gamma'\, h + h_1\,(\gamma_d - \gamma')$
$\sigma'_v > \gamma'\, h$

$\longrightarrow$ Conclure

Une baisse soudaine du niveau de la nappe aboutit à une augmentation de la contrainte effective $\longrightarrow$ pourra aboutir à un entassement des grains et donc tassement de la structure

Fluctuation de la nappe phréatique et contrainte effective

L'effet de la fluctuation de la nappe phréatique sur la distribution de la contrainte effective en profondeur est :

- cas1 : Si le niveau de la nappe d'eau est au dessus du nv TN alors la fluctuation de la nappe n'affecte pas la contrainte effective dans le sol
- cas2 : Si la nappe d'eau est au dessous du niveau TN
  - alors une élévation de la nappe aboutit à une baisse de la contrainte effective
  - alors qu'une baisse du niveau de la nappe aboutit à une augmentation de la contrainte effective

contrainte neutre ou pression interstitielle u

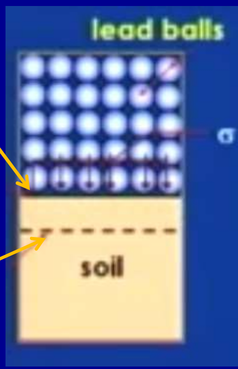
- variation d'indice de vide de e_0 vers e_1

➡

Aboutit à un changement autres propriétés mécaniques du sol

Surface avant chargement

Surface après chargement



Rque: seulement la contrainte effective pourrait Aboutir à un changement de volume du sol et produire une résistance au cisaillement

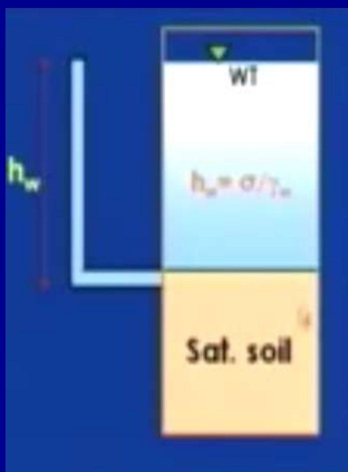
contrainte neutre ou pression interstitielle u

Une augmentation de la pression due à la hauteur d'eau

➡

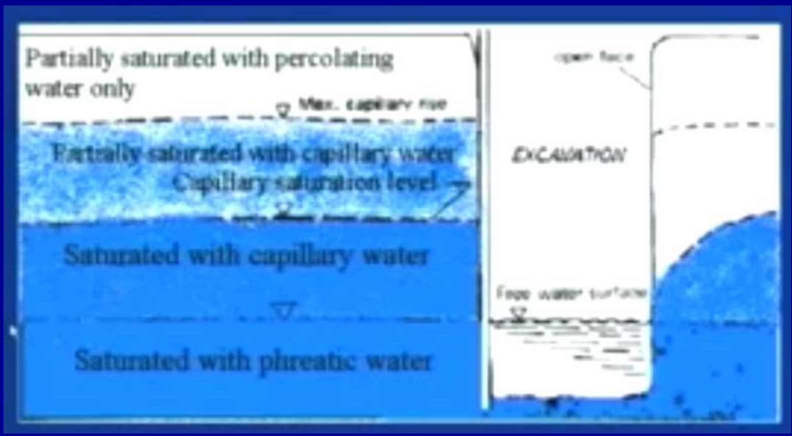
N'aboutit à aucune modification, ni de l'indice des vides , ni des paramètres mécaniques

Alors la pression produite par l'eau est aussi dites pression neutre

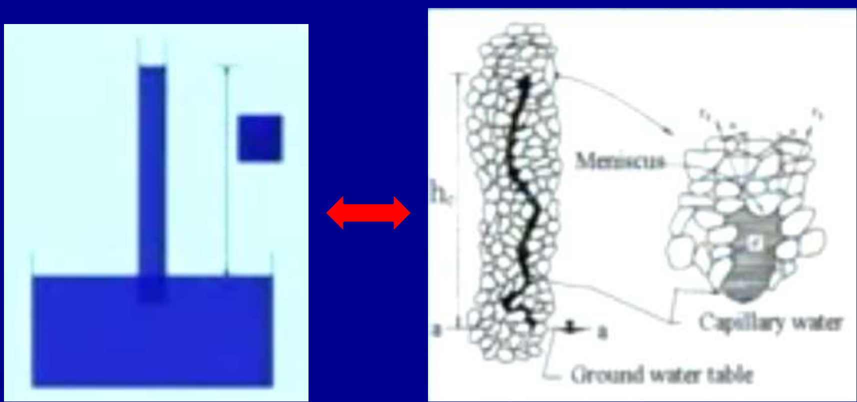


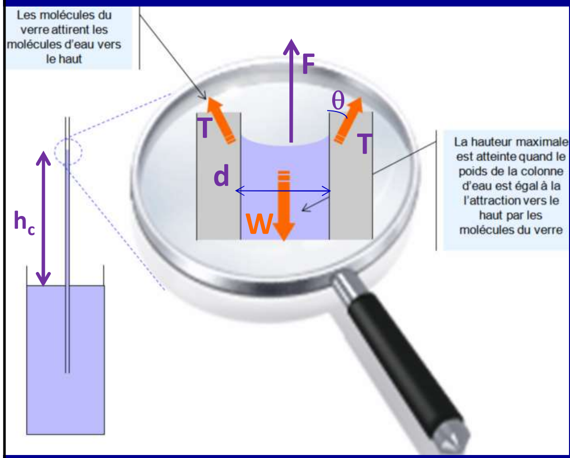
la pression neutre ne pourrait ni aboutir à un changement de volume du sol, ni produire une résistance au cisaillement

Capillarité



Remontée Capillaire





F = W

F = T. π.d. cos (θ)

$$u_c = \frac{F}{A} = \frac{T.\pi.d.\cos(\theta)}{\left(\frac{\pi.d^2}{4}\right)}$$

$$u_c = \frac{4.T\cos(\theta)}{d} = h_c.\gamma_w$$

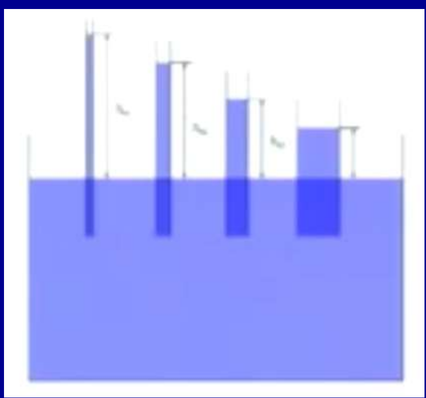
Eau pure, d petit ⟶ θ = 0

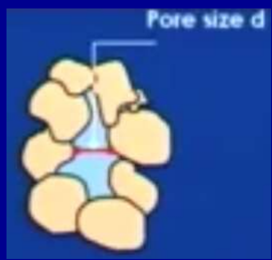
$$u_c = \frac{4T}{d} = h_c.\gamma_w$$

$$h_c = \frac{4T}{\gamma_w d}$$

T = tension de surface = 0,074 N/m à 20 ° C

Hauteur de capillarité





Hauteur de la remontée capillaire est fonction du diamètre du tube

pour les sols

$$d = e\ D_{10}$$

Remontée capillaire pour différents types des sols

Type de sol	D_{10} (mm)	Remontée capillaire (cm)
Gros gravier	0,82	6
Gravier fin	0,3	20
Gravier silteux	0,06	68
Sable moyen	0,02	120
Silt	0,006	180
Argile	< 2 µm	mètres

Contrainte effective due à la capillarité