UNIVERSITE DU HAVRE
Laboratoire
Ondes et Milieux Complexes

ECOLE CENTRALE PARIS
Laboratoire de Mécanique des
Sols, Structures et Matériaux

Le concept de contrainte effective dans les sols partiellement saturés

Said Taibi, Jean-Marie Fleureau

Journée d'hommage au Professeur Jean BIAREZ « Du grain à l'ouvrage »- CFMS 12 Mars 2008-Paris

CONTRAINTES EFFECTIVES DANS LES SOLS NON SATURÉS

La notion de « contrainte effective » est peut être aujourd'hui le concept le plus controversé en mécanique des sols non saturé

Elle est définie à l'origine comme « ***…une fonction de la contrainte totale et de la pression interstitielle qui contrôle les effets mécaniques résultant des variations de contraintes….*** » et s'exerce exclusivement sur le squelette solide du sol

Cas des sols saturés

$$\sigma' = \sigma - \alpha \; p_w \, \delta \qquad \alpha = 1 - \frac{K_T}{K_s}$$ = coefficient de Biot

$K_s \to \infty \qquad \alpha = 1$

$$\boxed{\sigma' = \sigma - p_w \, \delta}$$

(Terzaghi, 1936)

Cas des sols Non Saturés

$$\sigma' = \sigma - p_a\,\delta + \chi\left(p_a - p_w\right)\delta$$

(Bishop, 1959 ; Bishop et Blight, 1963)

$\sigma_{net} = \sigma - p_a\delta$ contrainte totale nette

$s = p_a - p_w$ succion matricielle

$$\sigma' = \sigma_{net} + \chi s \delta$$

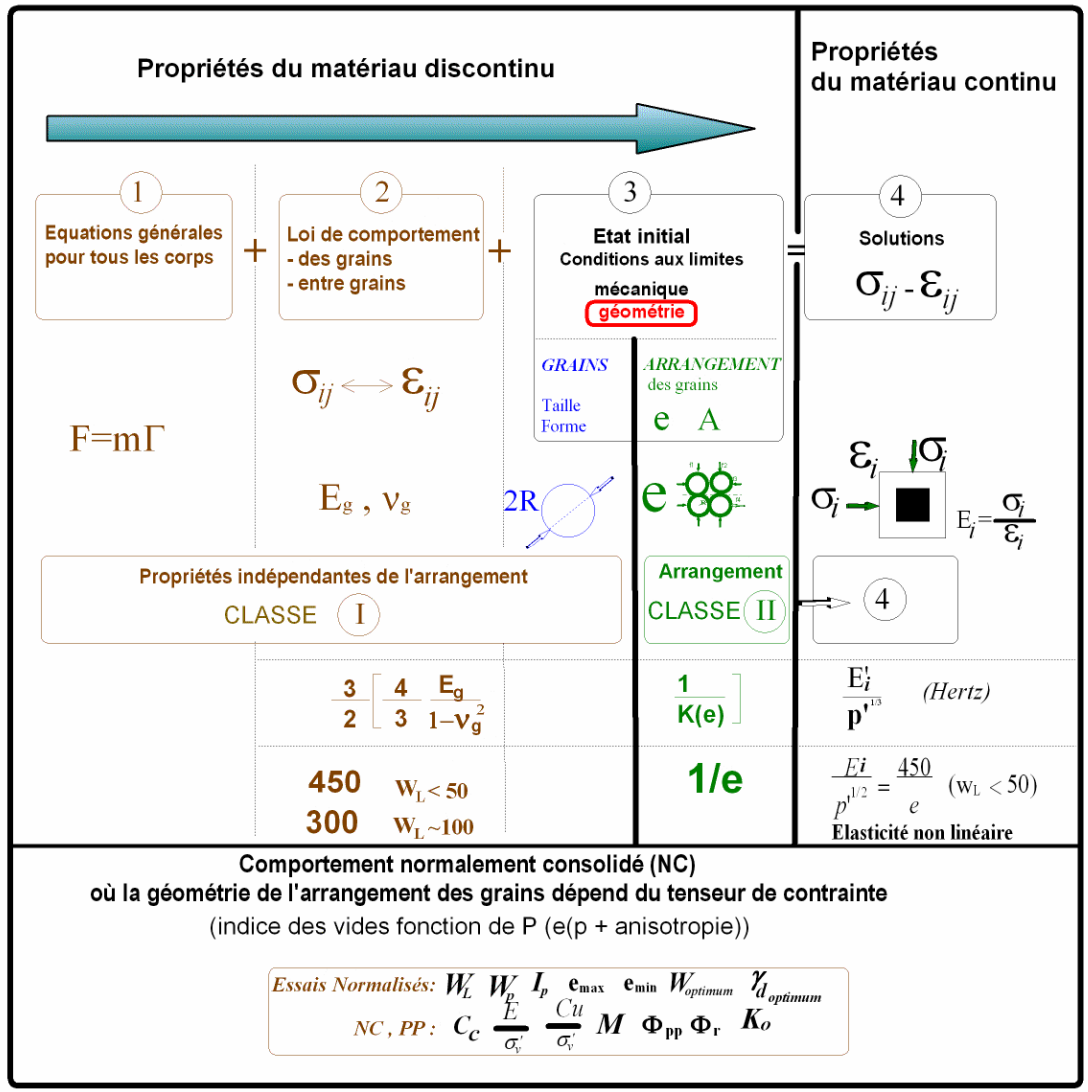
Différentes expressions du paramètre χ de Bishop

Expression de χ	paramètres
$\chi = S^w$	S^w : degré de saturation en eau *Hassanizadeh et Gray (1980)* *Lewis et Shrefler (1987)* *Bolzon et Schrefler (1995)* *Bolzon et al. (1996)* *Hutter et al. (1999)* *Wheeler et al. (2003)*
$\chi = 1$ pour $s < s_e$ $\chi = \dfrac{s_e + \dfrac{a_e}{s - s_e + a_e}(s - s_e)}{s}$ pour $s \geq s_e$	s : succion (kPa) s_e : succion d'entrée d'air a_e : paramètre fonction du sol *Kohgo et al. 1993*
$\chi = S^w\left(2 - S^w\right)$	S^w : degré de saturation en eau *Gudehus (1995)*
$\chi = \begin{cases} 1 & for \quad \dfrac{s}{s_e} \leq 1 \\ \left(\dfrac{s}{s_e}\right)^{-0.55} & for \quad 1 \leq \dfrac{s}{s_e} \leq 25 \\ 25^{0.45}\left(\dfrac{s}{s_e}\right)^{-1} & for \quad \dfrac{s}{s_e} > 25 \end{cases}$	s : succion (kPa) s_e : succion d'entrée d'air (de désaturation) *Khalili et Khabbaz (1998)* *Loret et Khalili (2000)* *Loret et Khalili (2002)* *Khalili et al. 2004* *Russel et Khalili (2006)*
$\chi = S^w$ $\dfrac{e}{e_s} = 1 - a\left[1 - \exp\left(b\xi\right)\right]$	$e(p')$: indice des vides (essai de compression isotrope à succion contrôlée) e_s (p') : indice des vides (essai isotrope saturé) $\xi = f(s)\left(1 - S^w\right)$ a=0.369 ; b=1.419 $f(s)$: fonction de la succion *Gallipoli et al. (2003)*
$\chi = \dfrac{1}{s + a}$	s : succion a : paramètre *Sun et al. (2003)*
$\chi = S^w$ ou $\chi = \sqrt{S^w}$	*Sheng et al. (2003)*

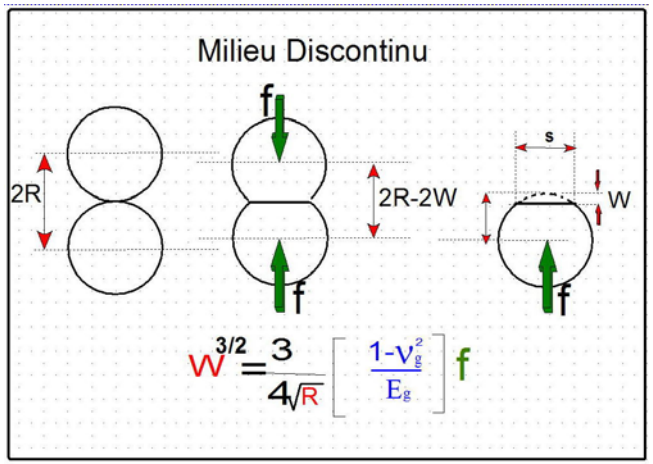
CONTRAINTE EFFECTIVE étendue aux sols NON SATURES (Biarez et al. 1993, 1994)

propriétés des matériaux discontinu→ propriétés du matériau continu

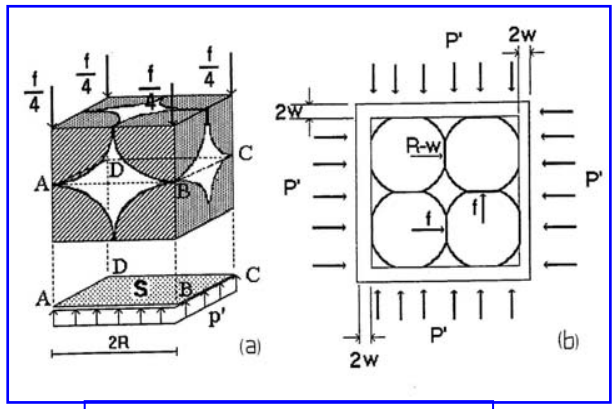
Matériau granulaire **saturé ou sec** →



Matériau granulaire **saturé ou sec**
Exemple de relations Milieu discontinu - Milieu continu



$$w^{3/2} = \frac{3}{4\sqrt{R}} \left[\frac{1-\nu_g^2}{E_g} \right] f$$



$$f = K R^2 P'$$

Un calcul de type Hertz montre qu'un ensemble de sphères a un comportement Elastique Non-Linéaire même avec des formées d'un matériau Elastique Linéaire. Cela provient de la modification de la surface de contact entre les sphères.

$$f = K R^2 P'$$

$$w^{3/2} = \frac{3}{4\sqrt{R}} \left[\frac{1-\nu_g^2}{E_g} \right] K R^2 P'$$

$$w^{3/2} = \frac{3}{4} R^{3/2} \left[\frac{1-\nu_g^2}{E_g} \right] K P'$$

Propriété de la matière (grains)

$$\zeta = \frac{P'}{\left(\frac{w}{R}\right)^{3/2}} = \frac{4}{3K} \left[\frac{E_g}{1-\nu_g^2} \right]$$

Densité de l'assemblage (e, γd)

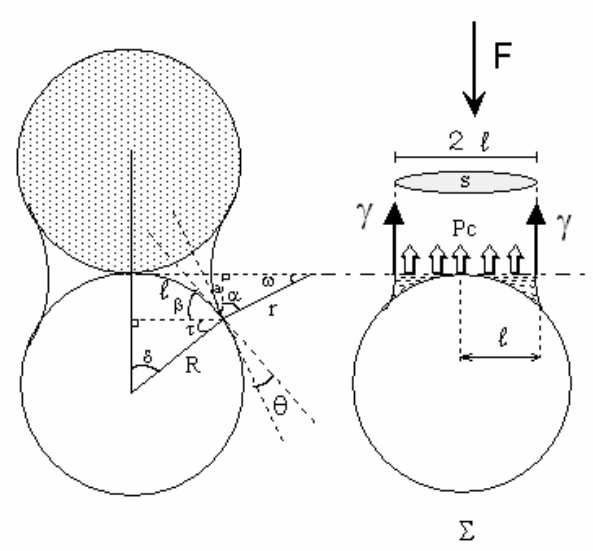
$$E_i = \frac{\Delta P'}{\left(\frac{\Delta w}{R}\right)} = \frac{\Delta P'}{\Delta \varepsilon} = \frac{3}{2} \zeta^{2/3} \sqrt[3]{P'}$$

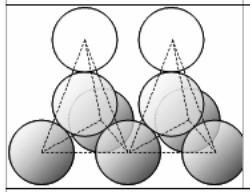
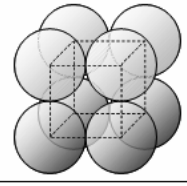
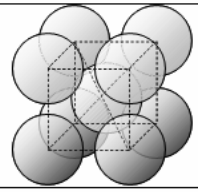
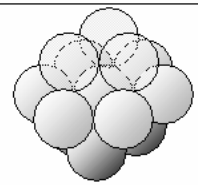
$$E_i = \alpha P'^{n}$$

$$f = K R^2 P'$$

nombre de contacts par sphère	4	6	8	12
e	2,4	0,9	0,6	0,3
K(e)	5,8	4	2,5	1,4

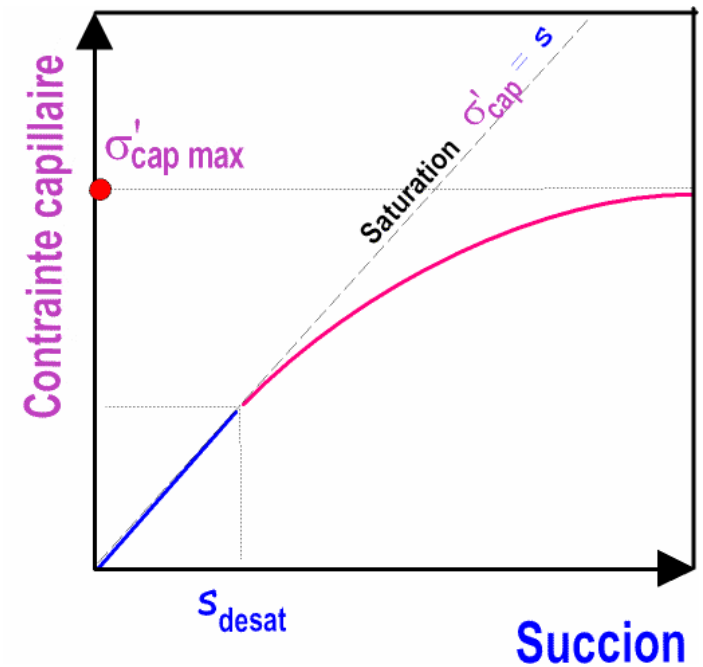
Matériau granulaire NON SATURE



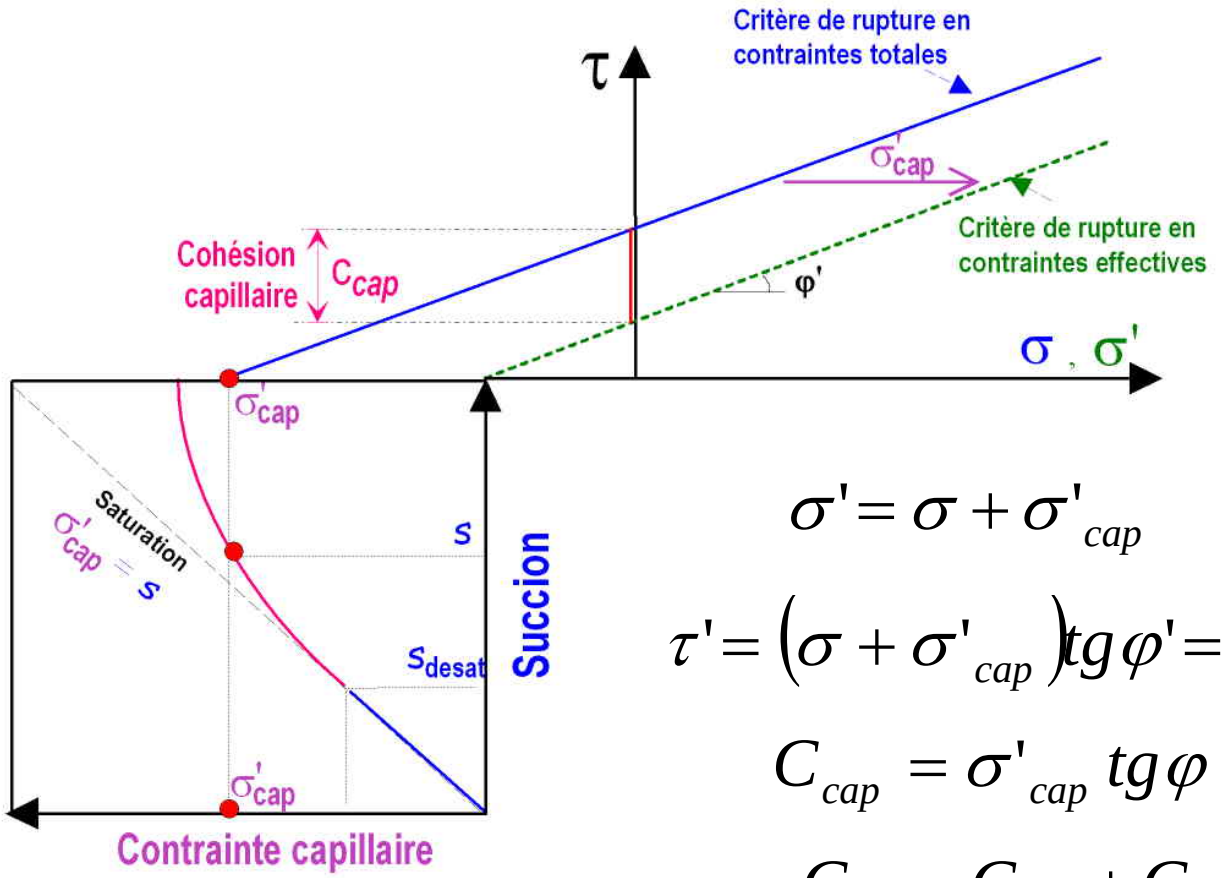
Tetraédrique	Cubique	Octaédrique	Dodecaedrique
			
Nombre de points de contact par sphère			
4	6	8	12
Indice des vides			
1.95	0.91	0.47	0.35

$$\sigma'_{cap} = \frac{\Sigma F_i}{S_{VER}}$$

$$\boxed{\sigma' = \sigma + \sigma'_{cap}}$$



Cohésion capillaire
Critère de rupture



$$\sigma' = \sigma + \sigma'_{cap}$$

$$\tau' = \left(\sigma + \sigma'_{cap}\right) tg\,\varphi' = \sigma\, tg\,\varphi' + \sigma'_{cap}\, tg\,\varphi'$$

$$C_{cap} = \sigma'_{cap}\, tg\,\varphi$$

$$C_{tot} = C_{nat} + C_{cap}$$

Modélisation micromécanique et l'étude par homogénéisation

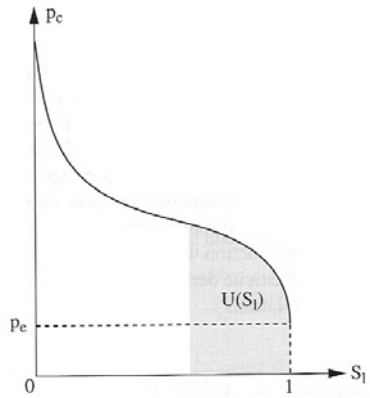
(Chateau & Dormieux 1995) → $\pi = S_g p_g + S_l p_l - U$

Approche thermodynamique de la notion de contrainte effective

Gray et Schrefler (2001)

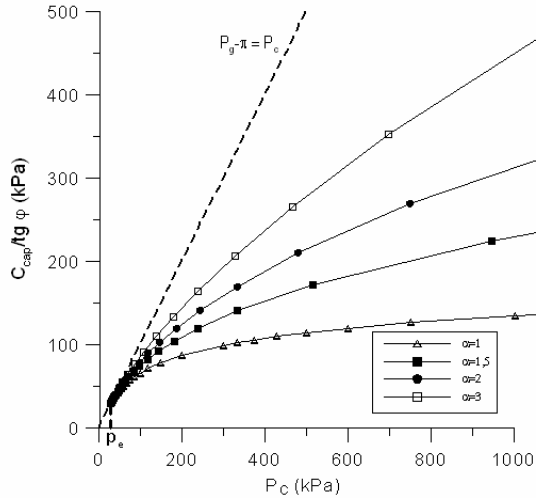
Coussy et Dangla (2002)

$$\sigma_{ij}' = \sigma_{ij} + \pi \delta_{ij} \qquad \pi = S_g p_g + S_l p_l - U(S_l, T)$$



(Dangla 2002) → élastoplasticité des sols non saturés

→ $C_{cap} = (p_g - \pi) tg\varphi = (p_c(S_l) S_l + U(S_l)) tg\varphi$



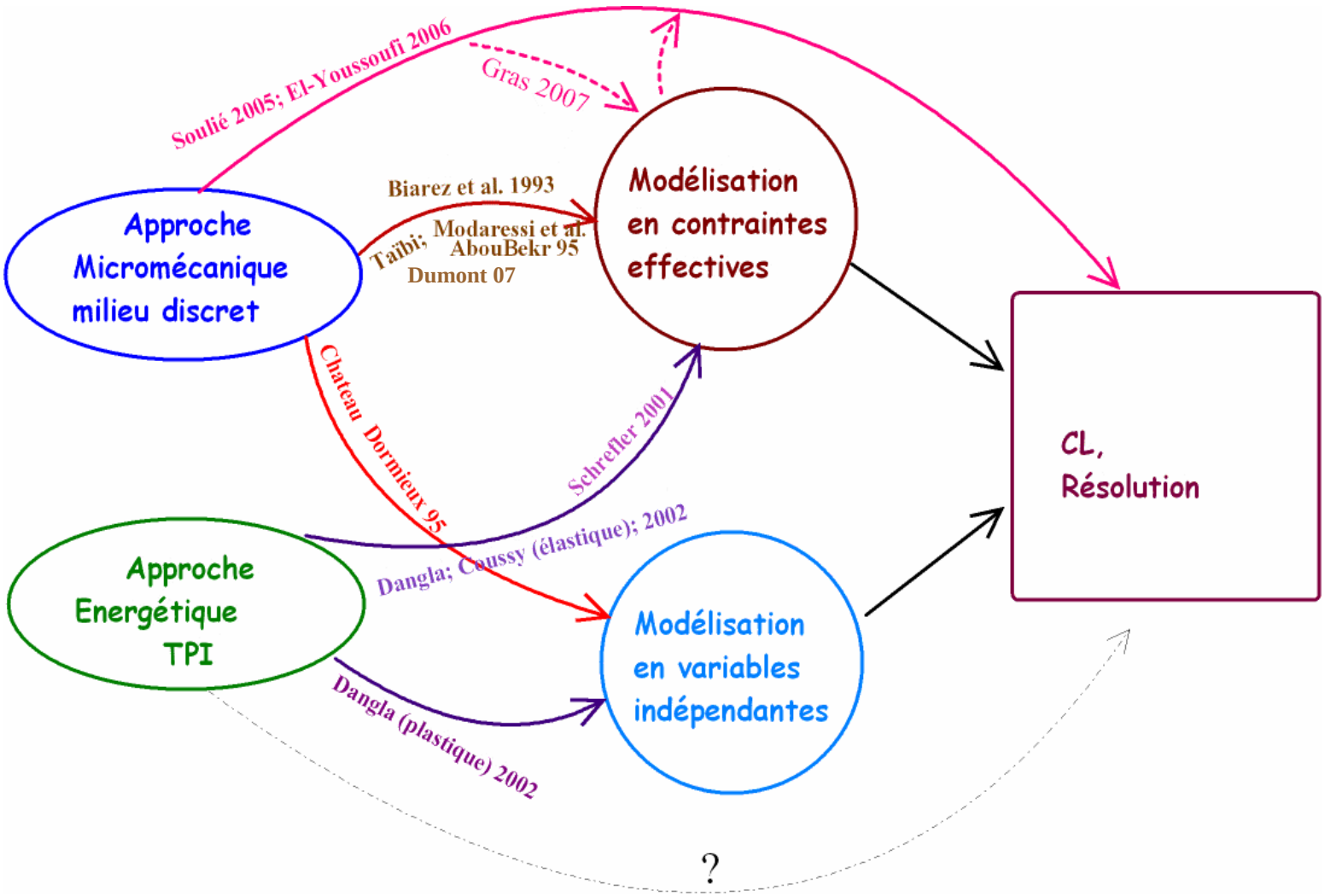
Un concept de contrainte effective généralisée associé à une loi de comportement élasto-plastique intégrant la définition d'une surface de charge fonction de la succion

(Kohgo et al, 1993; Modaressi et AbouBekr, 1994 ; Bolzon et al., 1996 ; Loret et Khalili, 2000 ; Khalili et Loret, 2001 ; Dangla, 2002 ; Khalili et al., 2004).

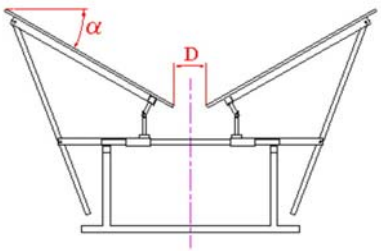
↓

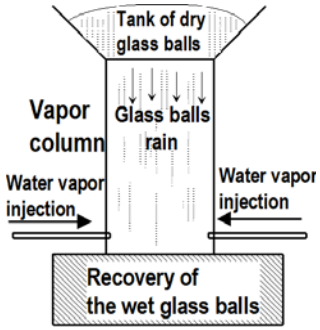
comportement mécanique unifié des sols avec un passage du domaine saturé au non saturé et réciproquement

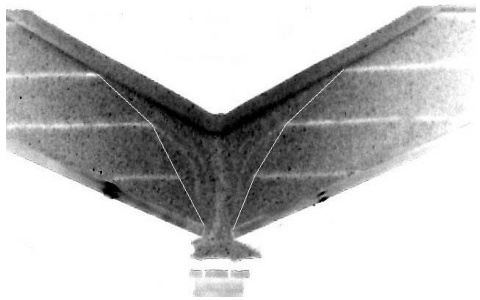
Synthèse: Résolution d'un problème de milieu poreux non saturé



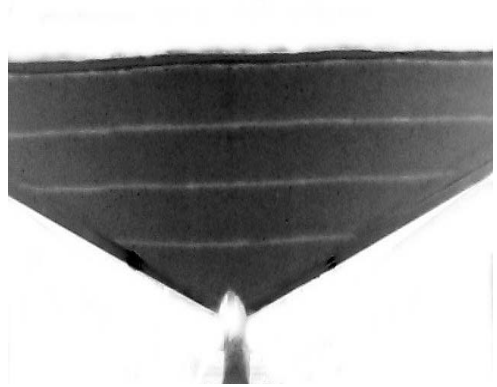
Exemple : Ecoulements de matières ensilées



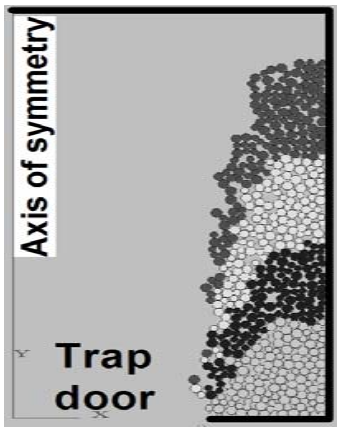


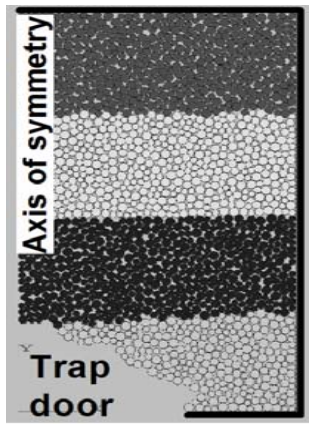


W = 0%



W = 0.1 %



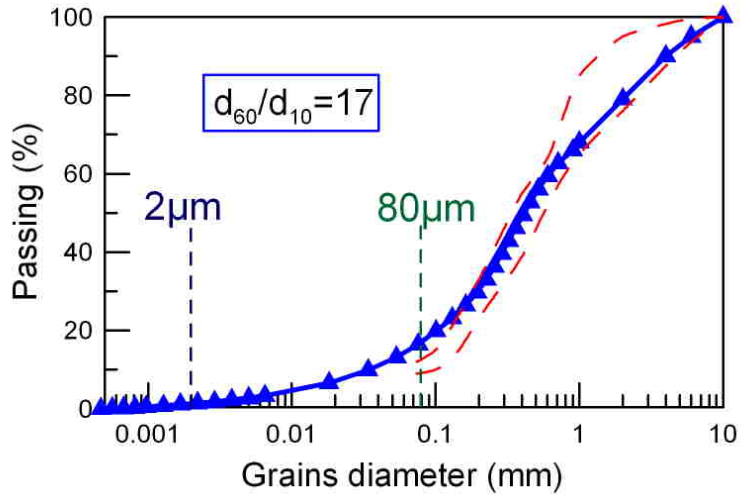


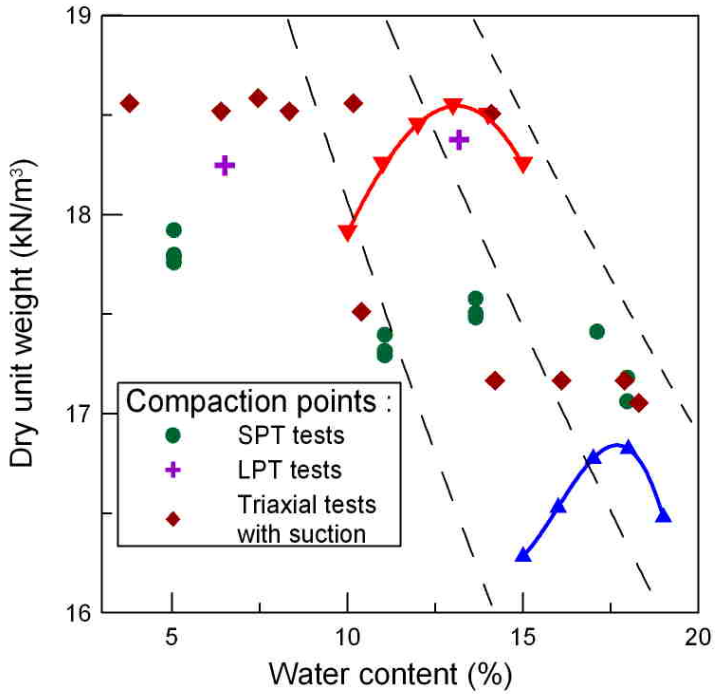
Average grain diameter	µm	300
Grain specific weight	kN/m^3	25
Internal friction angle	°	28
Interfacial friction angle	°	16.5
Normal Stiffness K_n	N/m	10^7
Shear Stiffness K_s	N/m	10^7
Capillary forces f_u	10^{-5}N	8; 80; 160

Interprétation de résultats d'essais sur le sable de Perafita non saturé

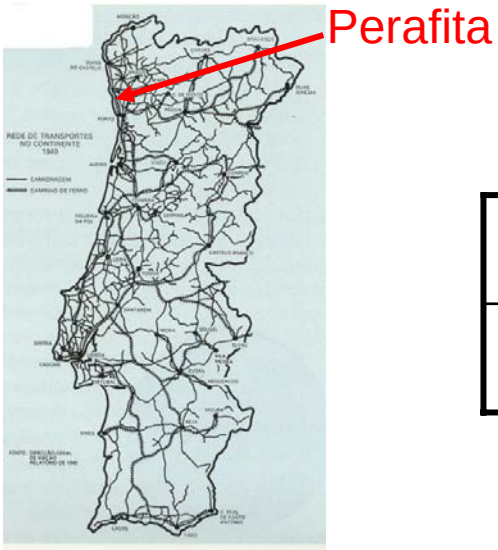
- Mesures de module élastique en petites déformations à différentes teneurs en eau
- Essais triaxiaux à différents w avec mesure de la succion
- Essais de drainage-humidification

Sable de Perafita (Portugal)





Sable fin silteux

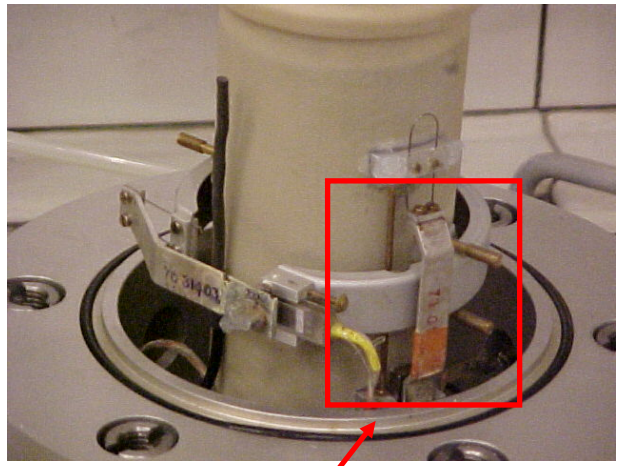


w_L	w_P	I_P
33	25	8

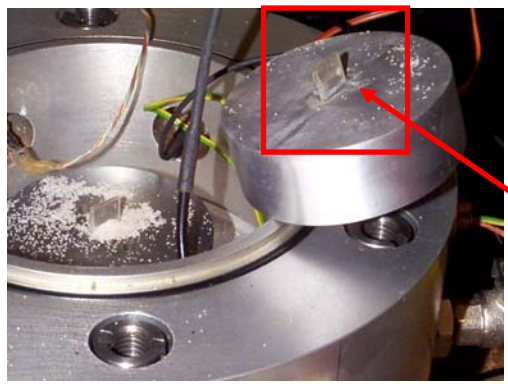
compacté dans différentes conditions

Mesure des propriétés dynamiques des sols à l'Ecole Centrale Paris

Capteurs de déformation locale (LDT)



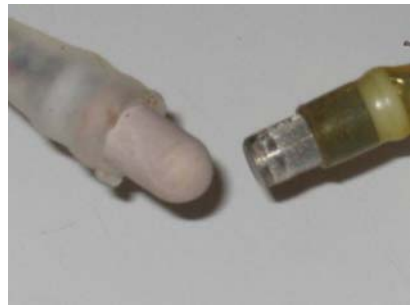
Capteurs à effet Hall



Bender elements

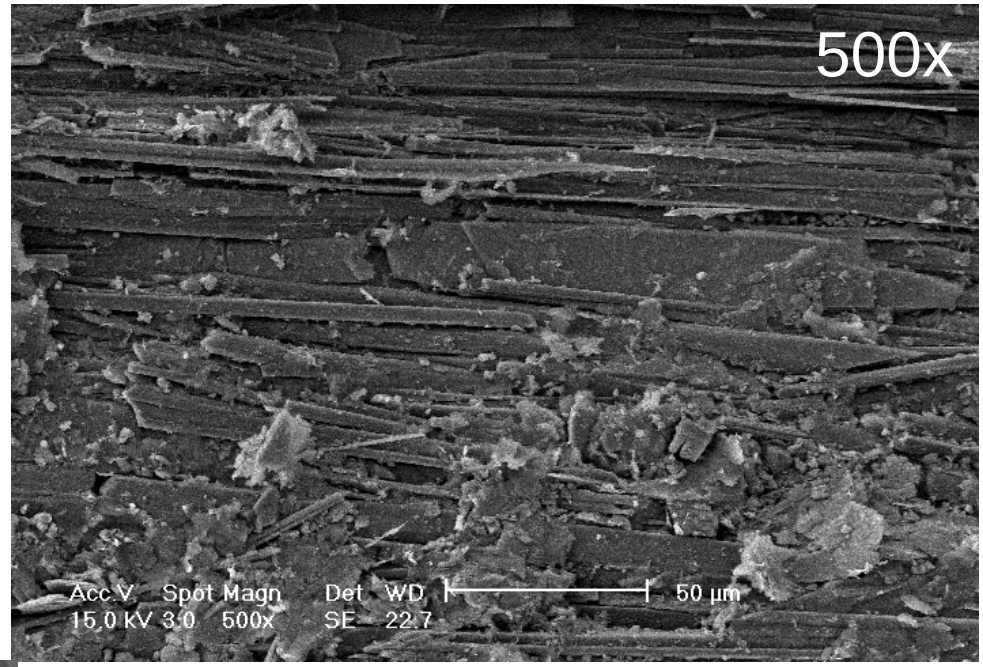
Mesure de la pression capillaire dans les sols non saturés à l'Ecole Centrale Paris

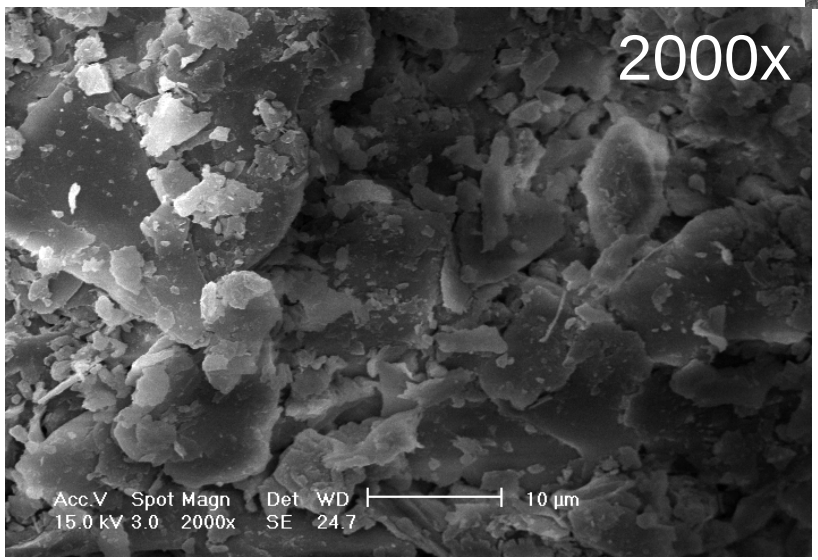
Montage tensio-métrique ou à surpression d'air



Psychromètre

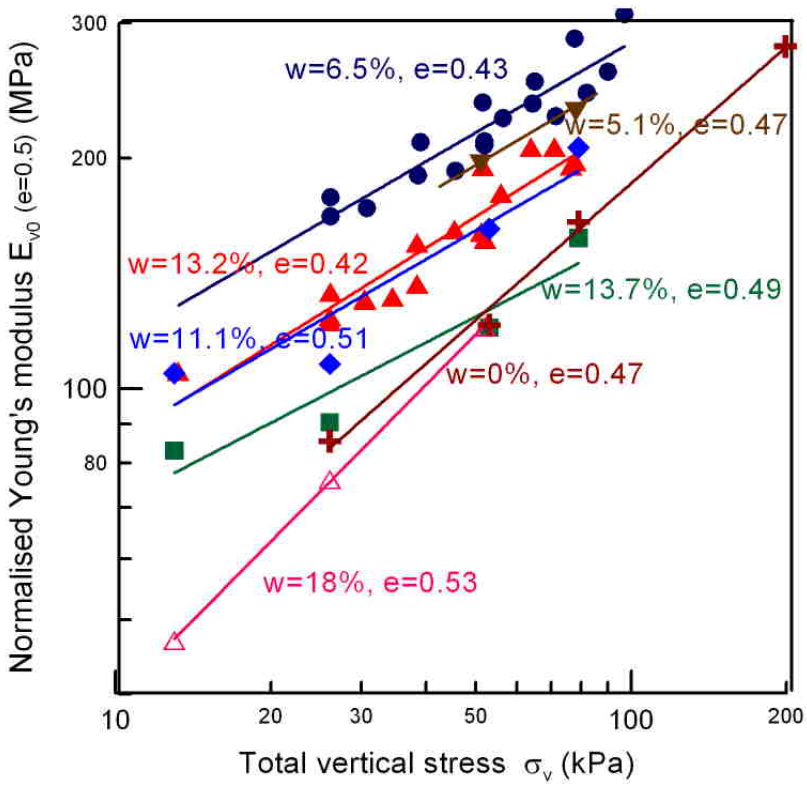
Les résultats aux grossissements de 2000x et 500x montrent des structures locales de plaquettes et d'aiguilles agglomérées

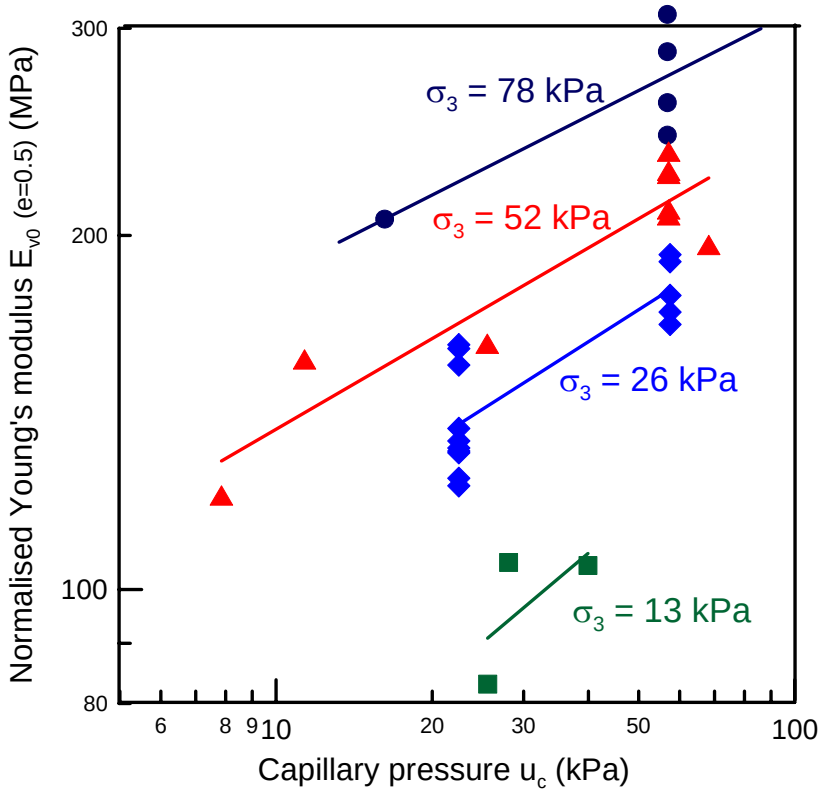




La structure du sable de Perafita correspond à un matériau détritique, qui porte les marques de l'altération physico-chimique du granit qui lui a donné naissance

Résultats obtenus sur le sable de Perafita en très petites déformations

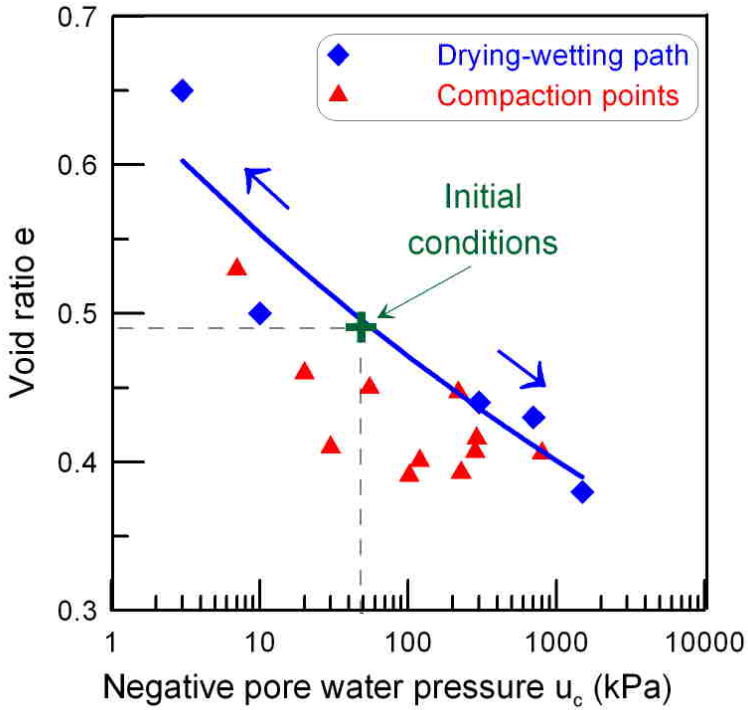


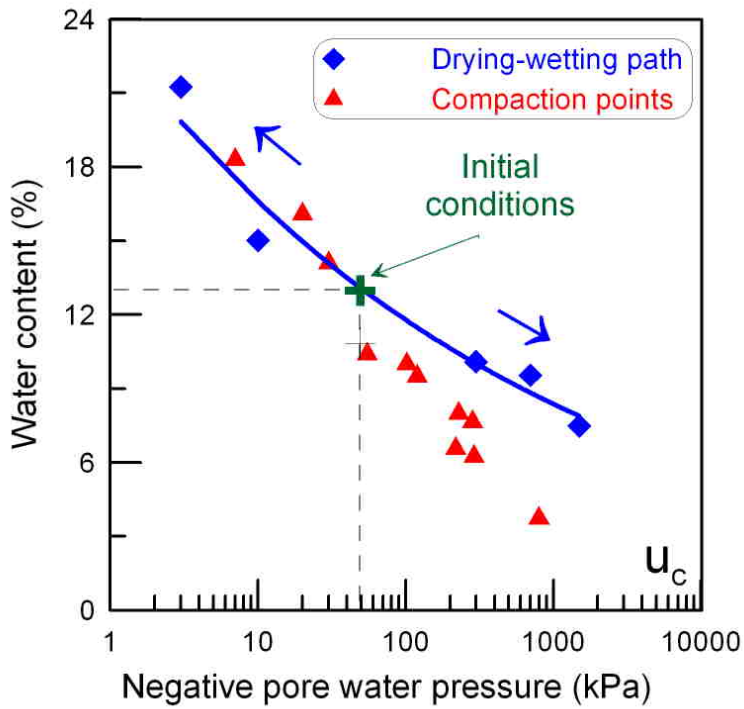


$E(\sigma_1)$

$E(u_c)$

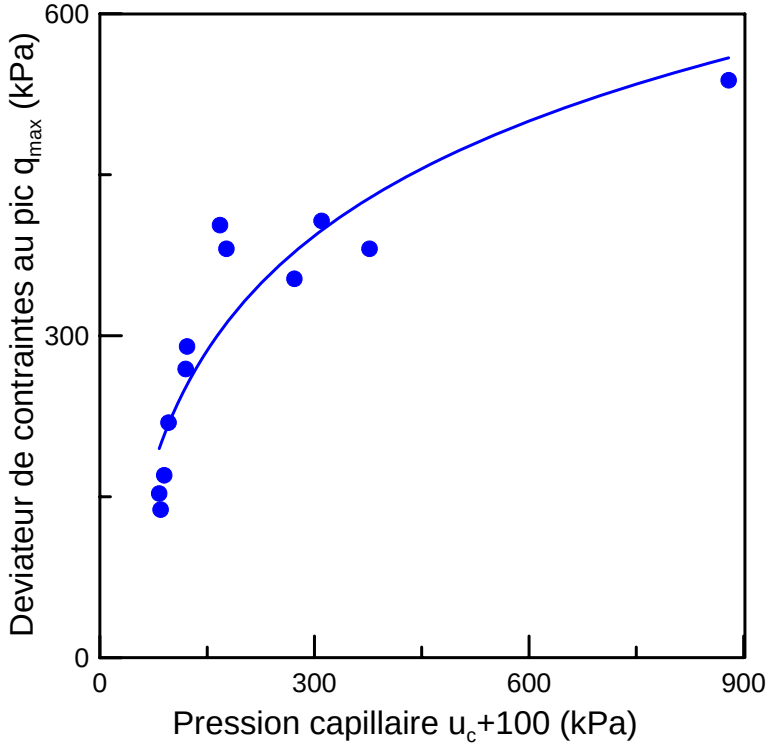
Comportement hydrique du sable de Perafita non saturé

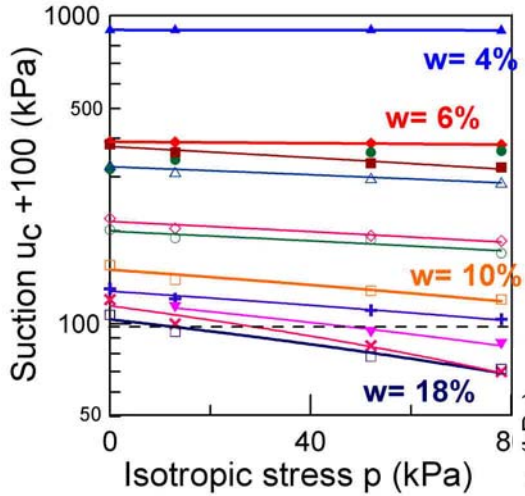




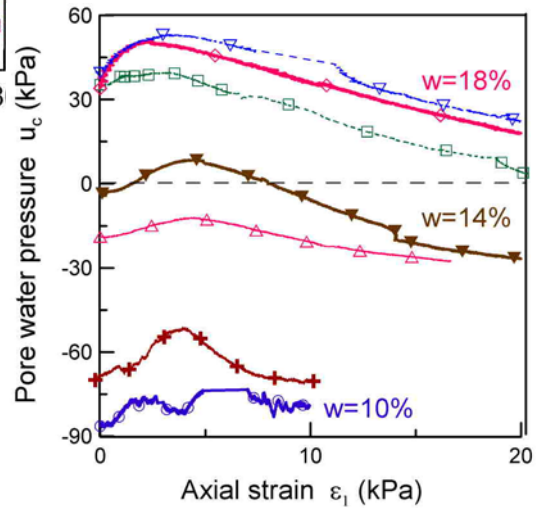
Chemins de séchage-humidification sur le sable de Perafita compacté à w_{opt} et γ_{dmax}

Chargements isotropes et déviatoires en grandes déformations avec mesure de u_c





u_c vs. p

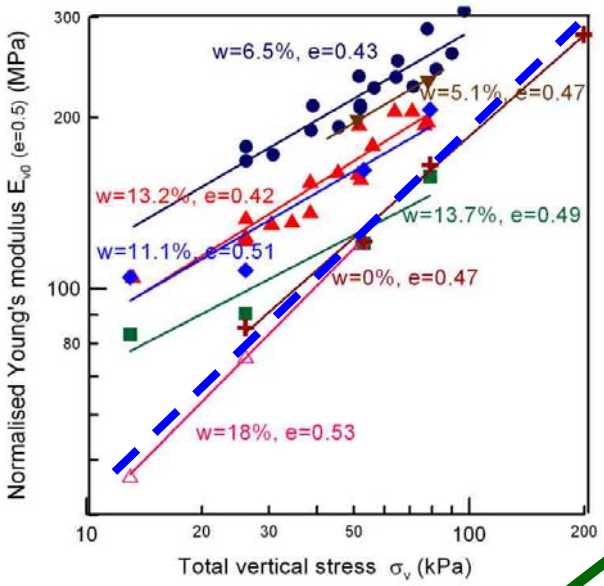


$-u_c$ vs. ε_1

Déviateur maximum-
Pression capillaire

Pression int. - Contr. Isotrope
ou Déformation axiale (w > 10%)

Interprétation des mesures de module en contraintes effectives généralisées

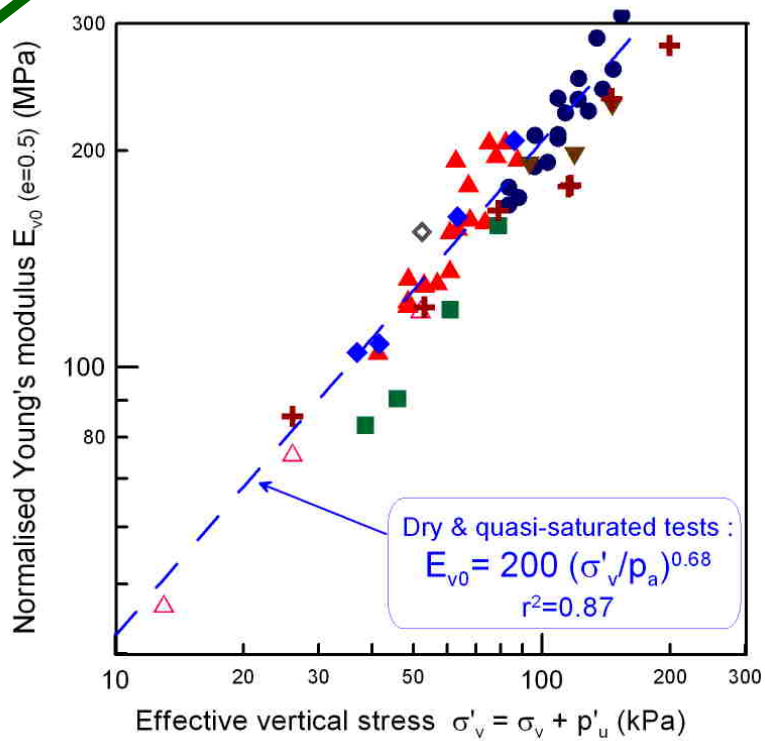


Contraintes totales

$\sigma'_v = \sigma_v + p'_u$

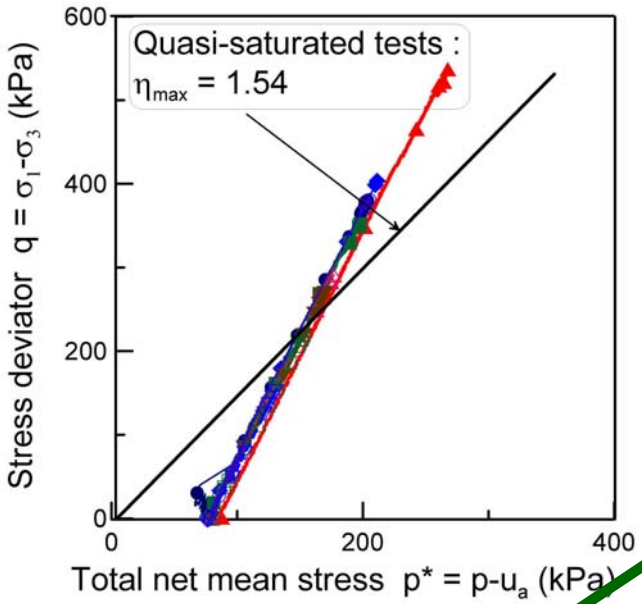
D=3.4µm

Contraintes effectives



Sable de PERAFITA

Interprétation des essais déviatoires en grandes déformations

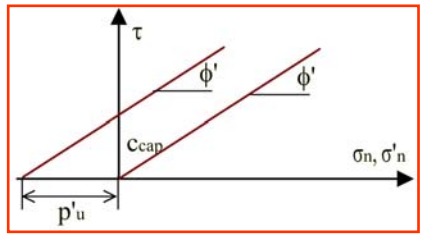


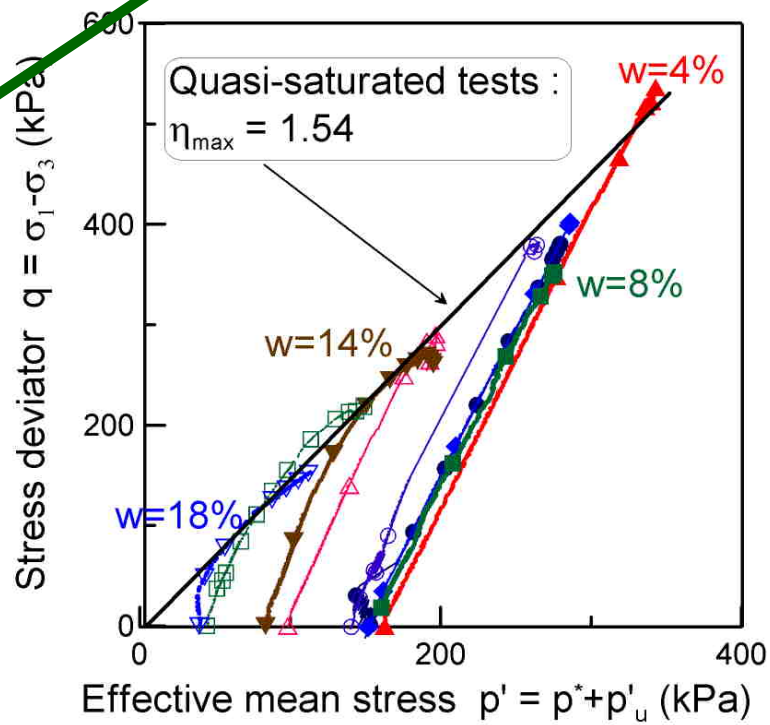
$p' = p^* + p'_u$

D=3.4µm

Chemins en contraintes effectives

Chemins en contraintes totales





Merci……