

Journée technique CFBR – CFMS – SPTF FNTP du 16 mai 2019

23 Avenue Condorcet, Villeurbanne



Le comportement des sols en fonction du degré de saturation

*Luc Boutonnier, Egis
Thierry Dubreucq, IFSTTAR*

Journée organisée par :



CONCEPTION ET CONSTRUCTION des ouvrages en sols fins



Objectif: modèle conceptuel pour appréhender de manière simplifiée le comportement des ouvrages en sols fins

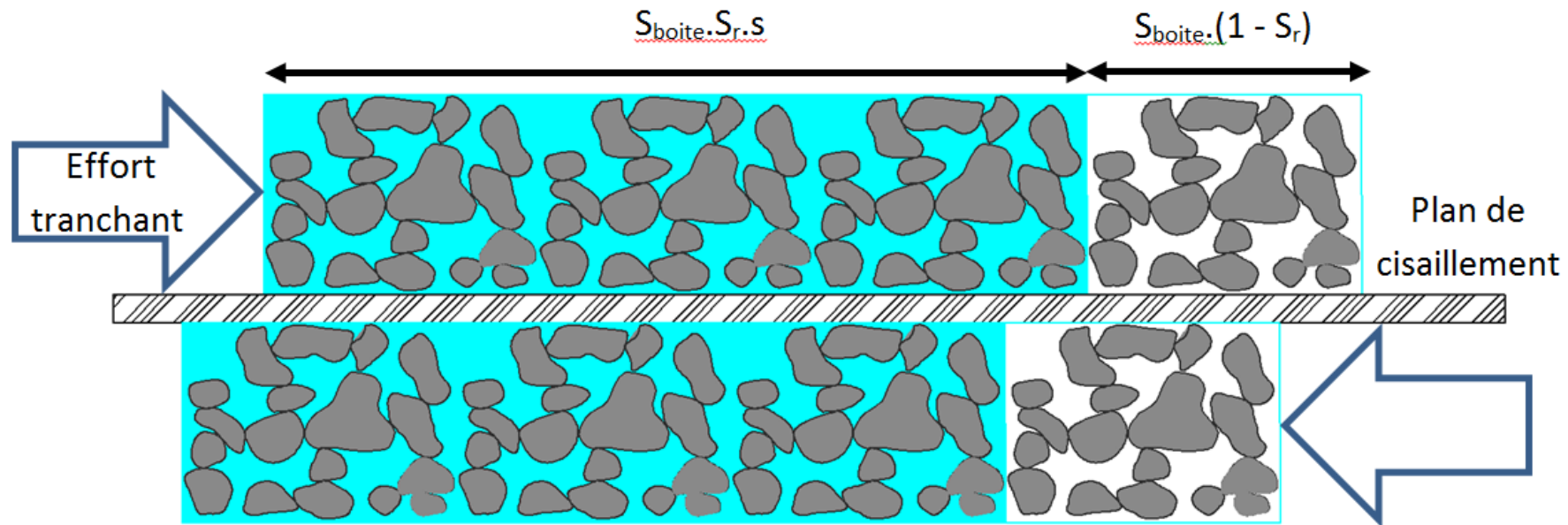
Sommaire

- Dualité du comportement: χ (cisaillement) et volumique
- Comportement en fonction de S_r
- Calcul de χ depuis l'optimum
- Effet de l'histoire

Comportement au cisaillement: le coefficient χ

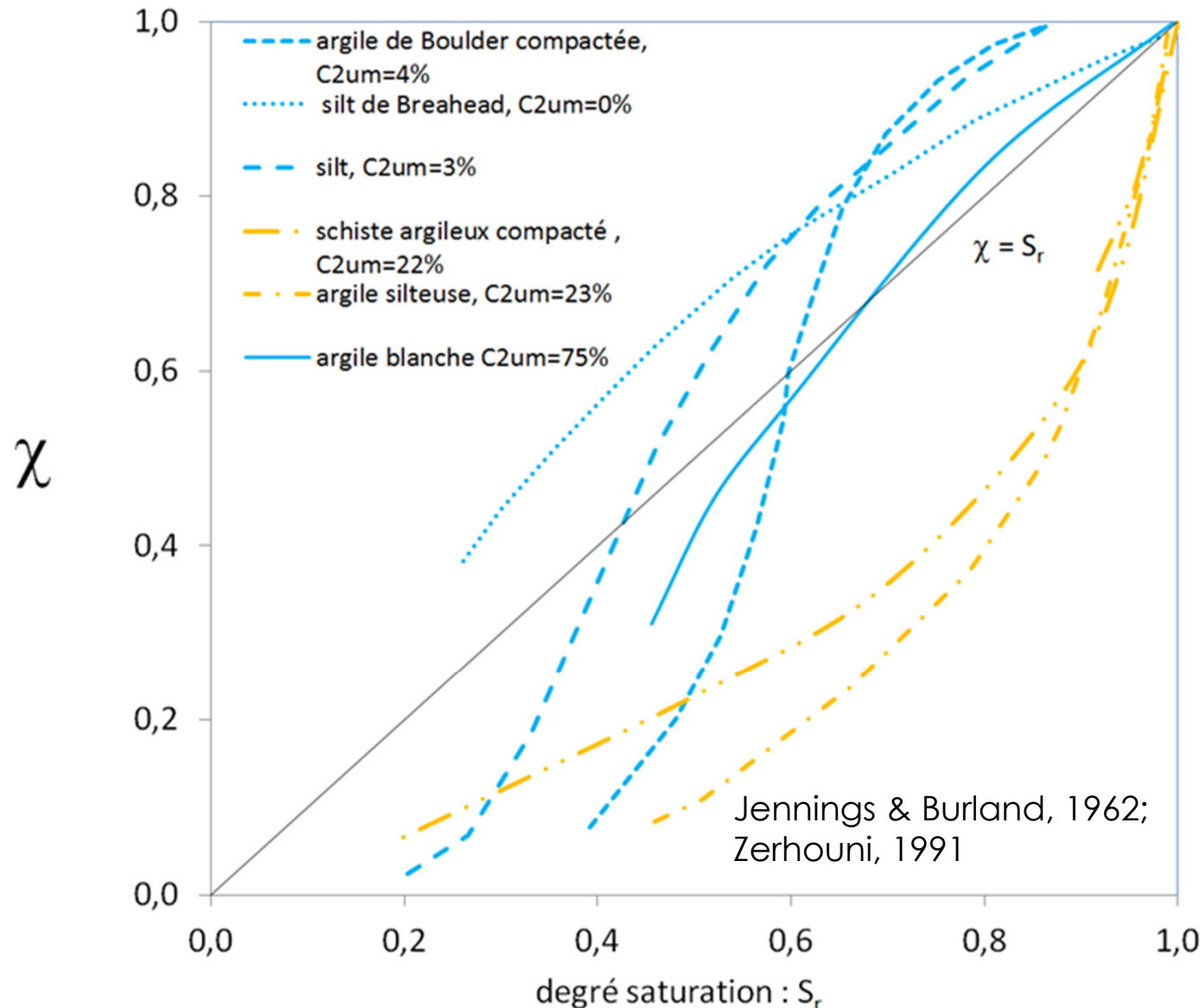
$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \varphi' + \underbrace{\chi s \cdot \tan \varphi'}_{\substack{-u_w \text{ saturé}}} \approx c' + \underbrace{(\sigma_n + \chi s)}_{\sigma_n' \text{ non saturé}} \tan \varphi' \quad (\text{Bishop})$$

$$s = u_a - u_w \approx -u_w \quad \tau_{\text{cap}} = \sigma_{\text{cap}} \cdot \tan \varphi' \quad \sigma_n' \text{ non saturé}$$



$$\tau = c' + \sigma_n \tan(\varphi') - S_r u_w \tan \varphi' \quad \Rightarrow \quad \chi = S_r$$

Mesure du coefficient χ



Mesure au triaxial
(cisaillement)

Explication du
faisceau de
courbes?

Comportement
sous chargement
isotrope ou
oedométrique?

coefficient χ et module

$$p' = p - \chi u_w = p + \chi s$$

$$E = E_{\text{ref}} \cdot \left(\frac{p'}{p'_{\text{ref}}} \right)^n$$

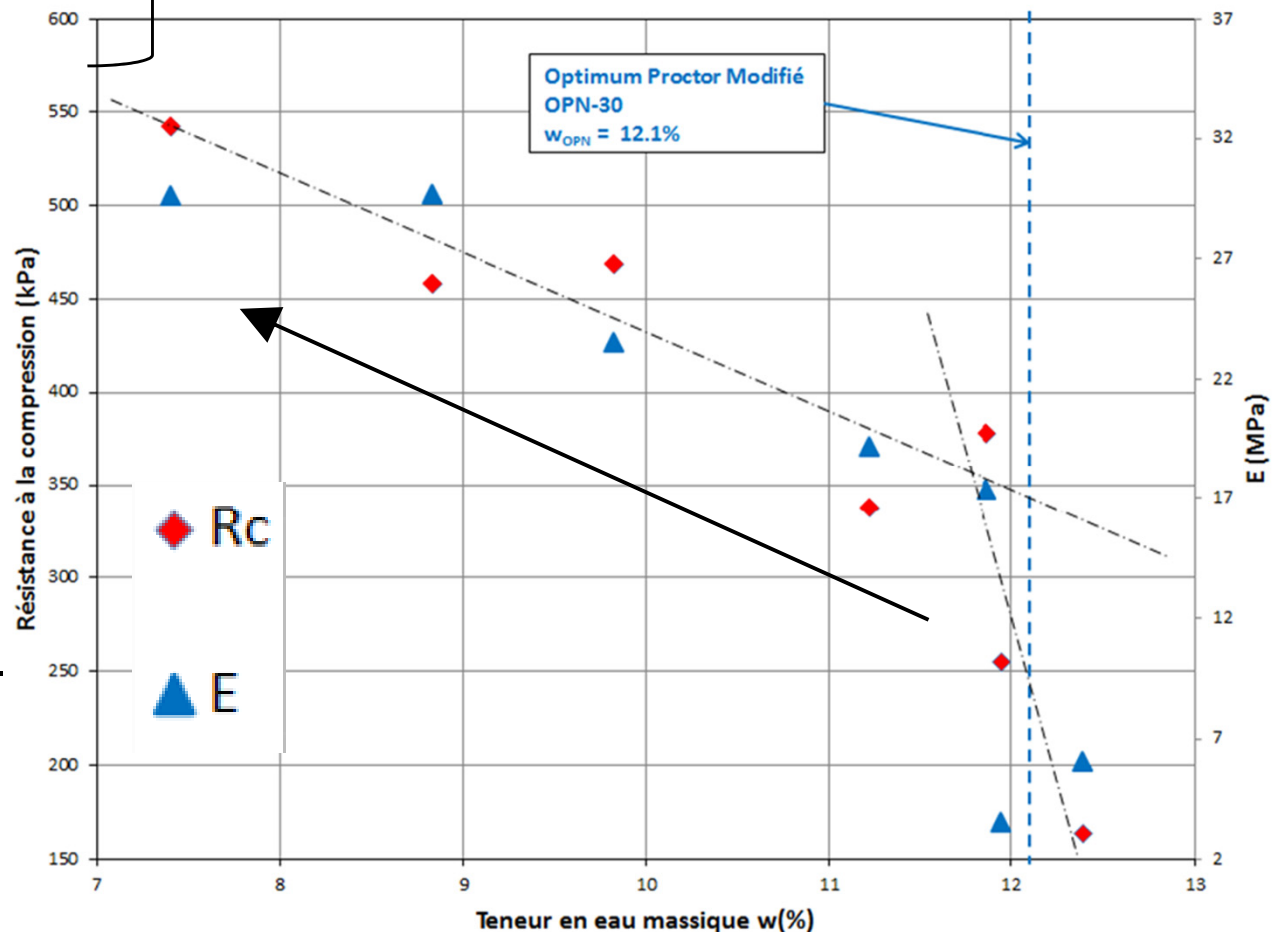
$$R_c = \chi s \cdot \frac{2 \cdot \sin(\varphi')}{1 - \sin(\varphi')}$$

$$n = 1 \text{ (limon)}$$

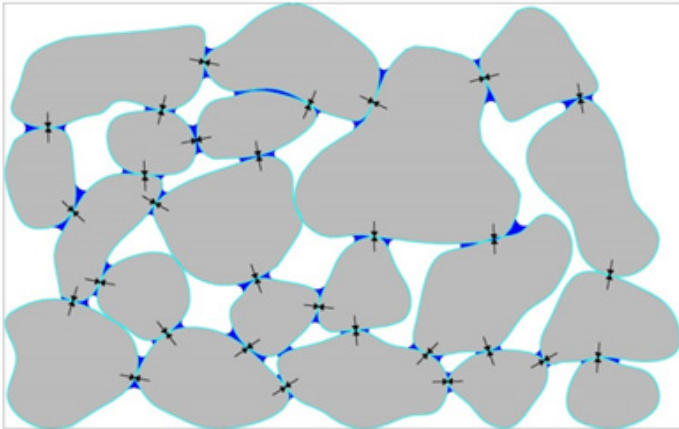
$$\frac{R_c}{R_{c \text{ OPM}}} = \frac{E}{E_{\text{OPM}}} = \frac{\chi s}{1 \cdot s_{\text{OPM}}}$$

$$\sigma'_{\text{cap}} = \chi s$$

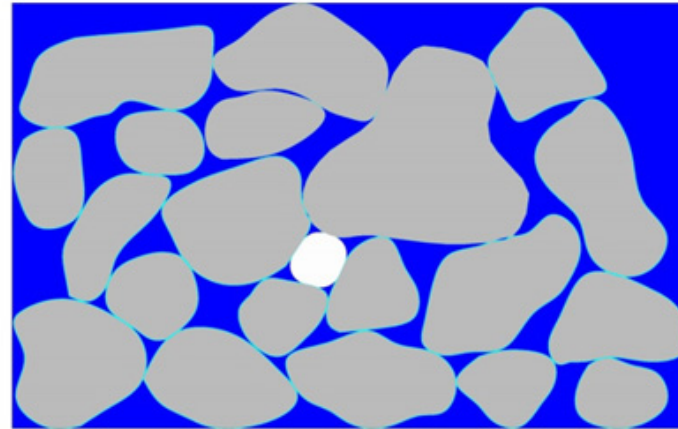
$$\Rightarrow E = E_{\text{ref}} \cdot \left(\frac{\chi s}{p'_{\text{ref}}} \right)^n \text{ pour } p \approx 0$$



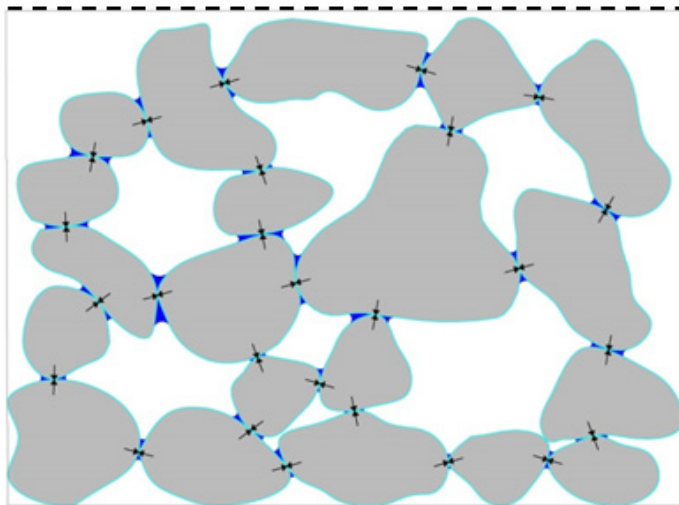
Comportement volumique à l'imbibition: limons et sables



Avant imbibition (structure dense)



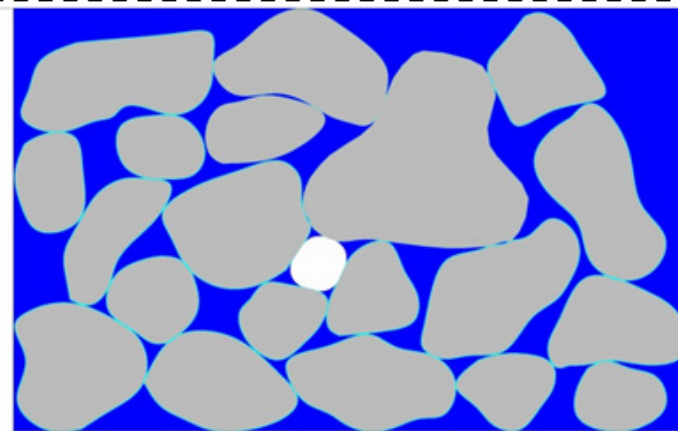
Après imbibition (structure dense)



Avant imbibition (structure lâche)

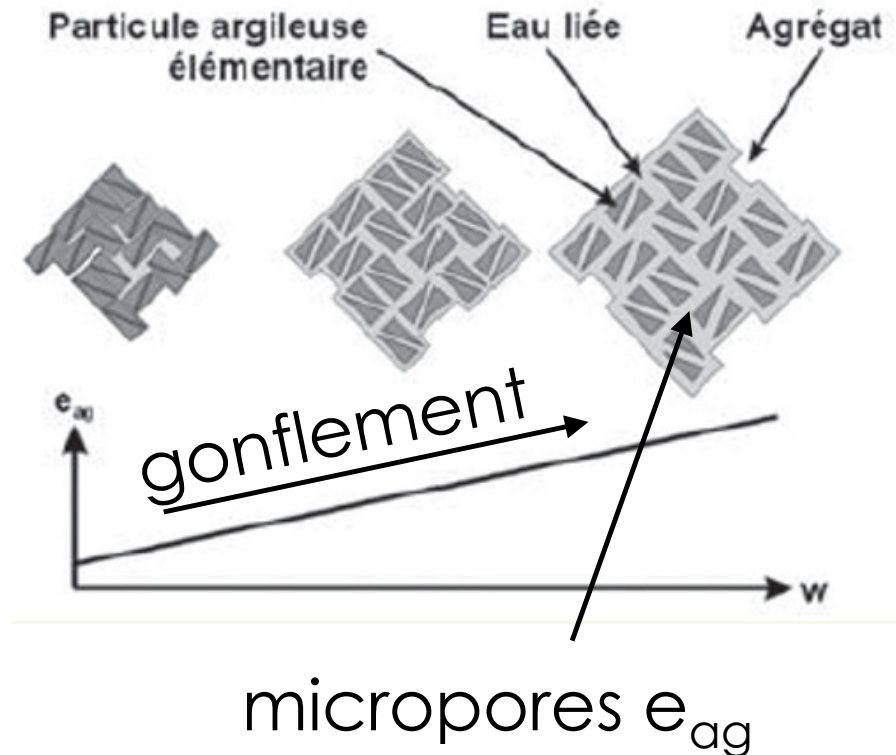
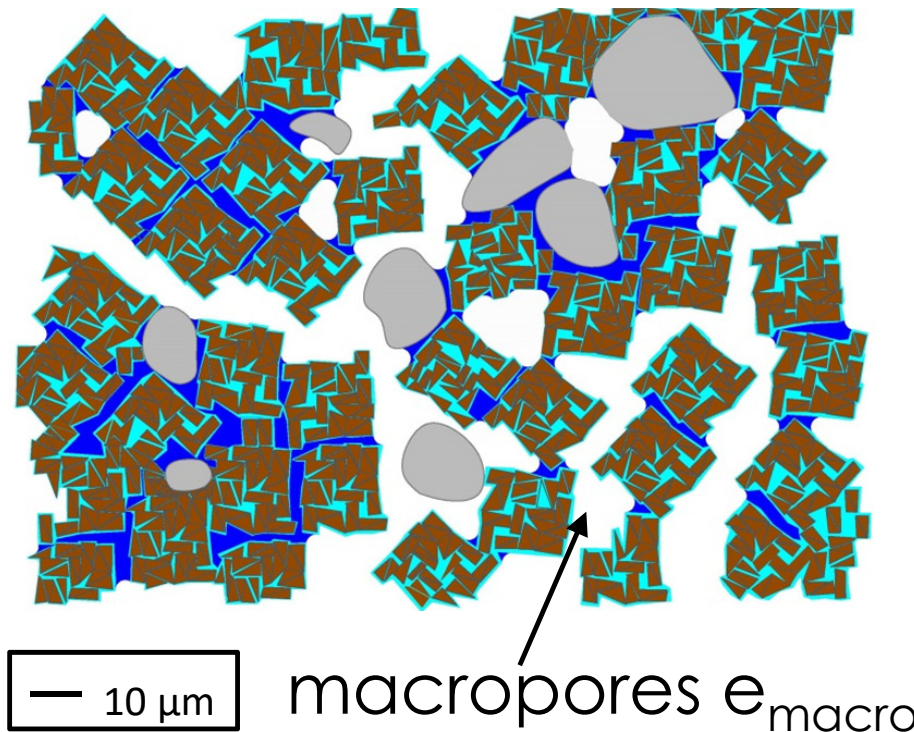


Effondrement



Après imbibition (structure dense)

Comportement volumique à l'imbibition dans les argiles



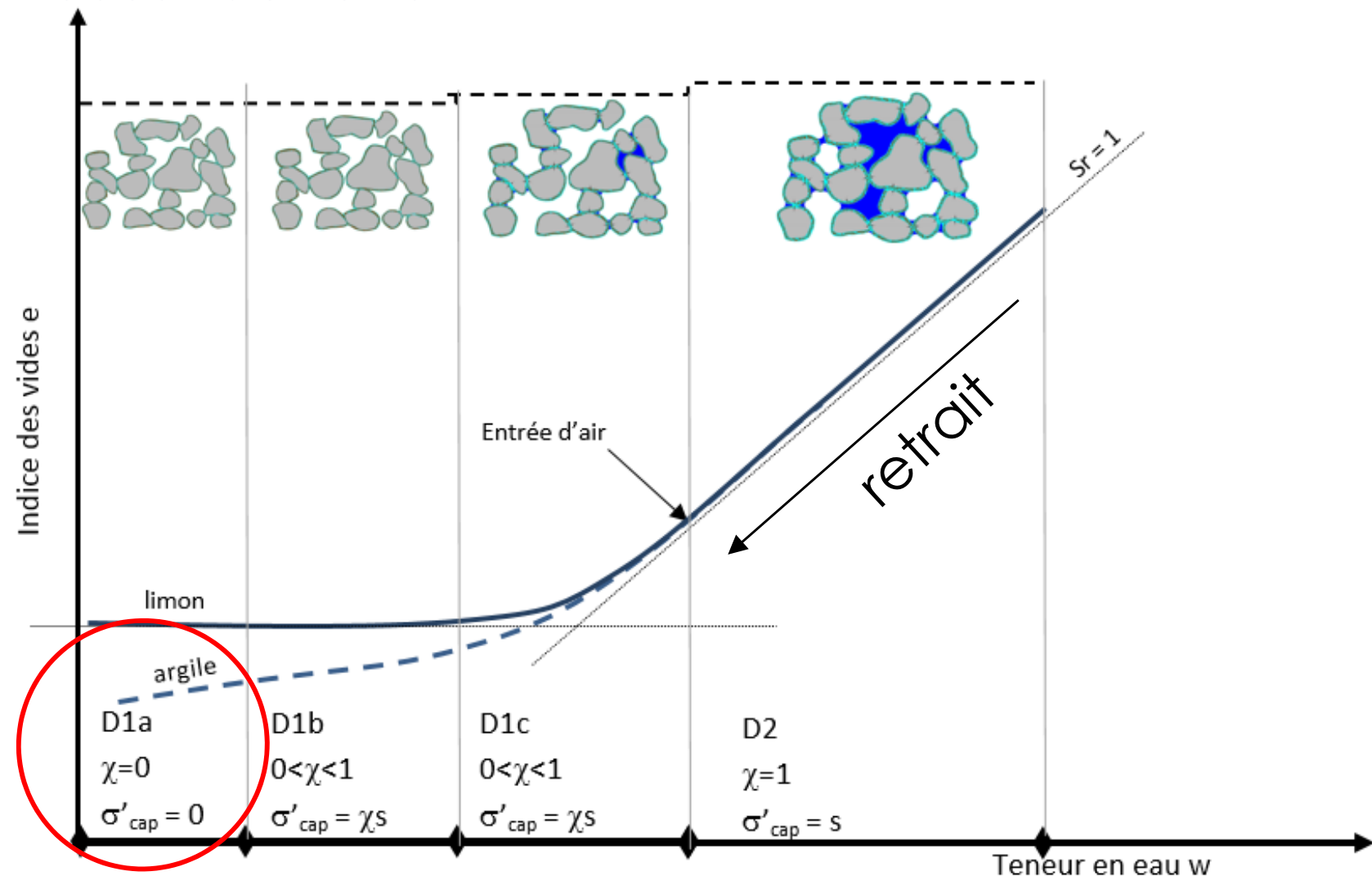
Imbibition sous charge

$$\Delta e_{macro} + \Delta e_{ag} < 0 : \text{effondrement}$$

$$\Delta e_{macro} + \Delta e_{ag} > 0 : \text{gonflement}$$

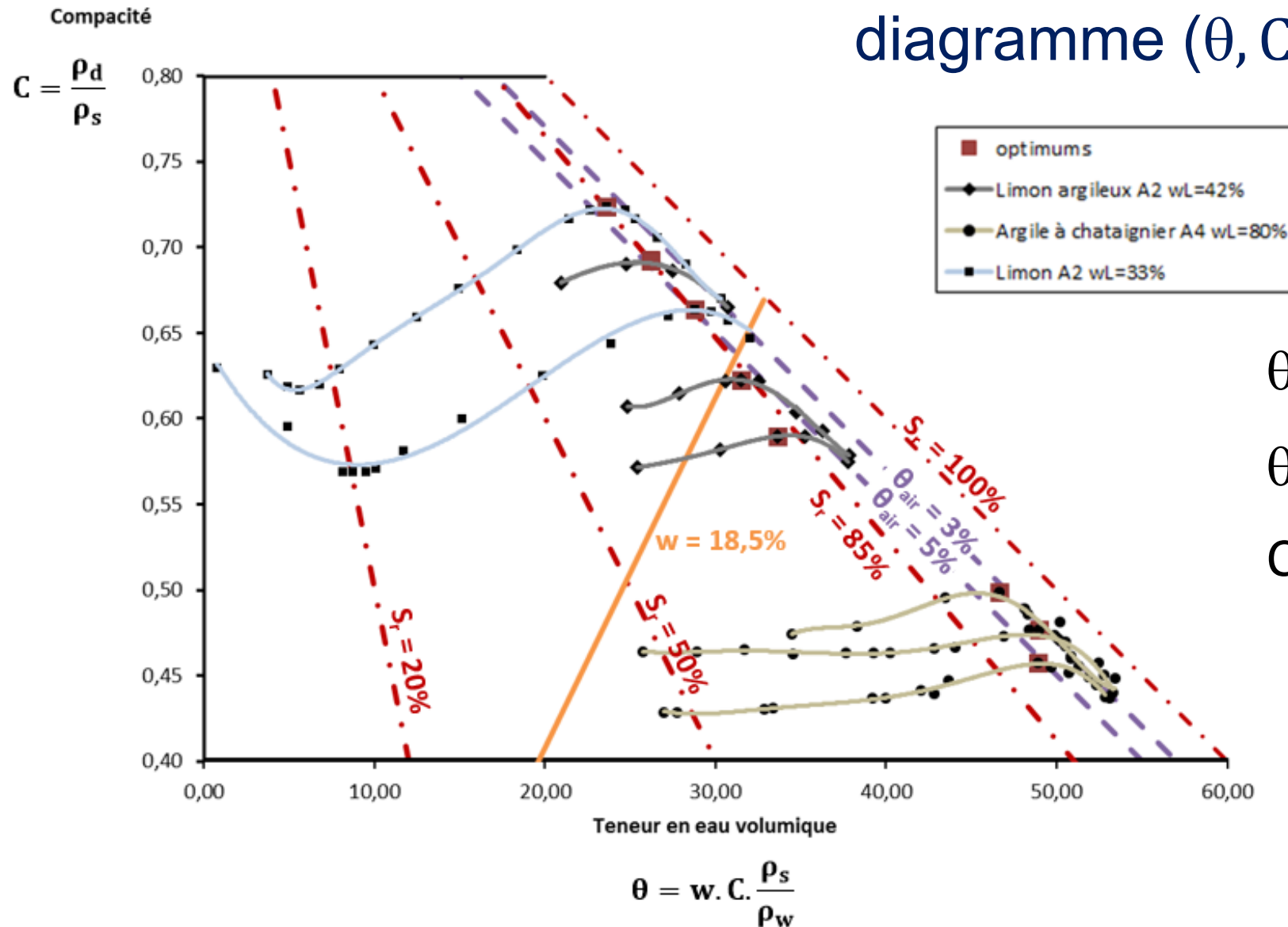
Sources: Ferber (2005),
Romero et al. (1999, 2011)

Les limites de χ et des contraintes effectives dans les argiles: essai de retrait



Comportement des sols compactés fonction de S_r :

diagramme (θ, C)



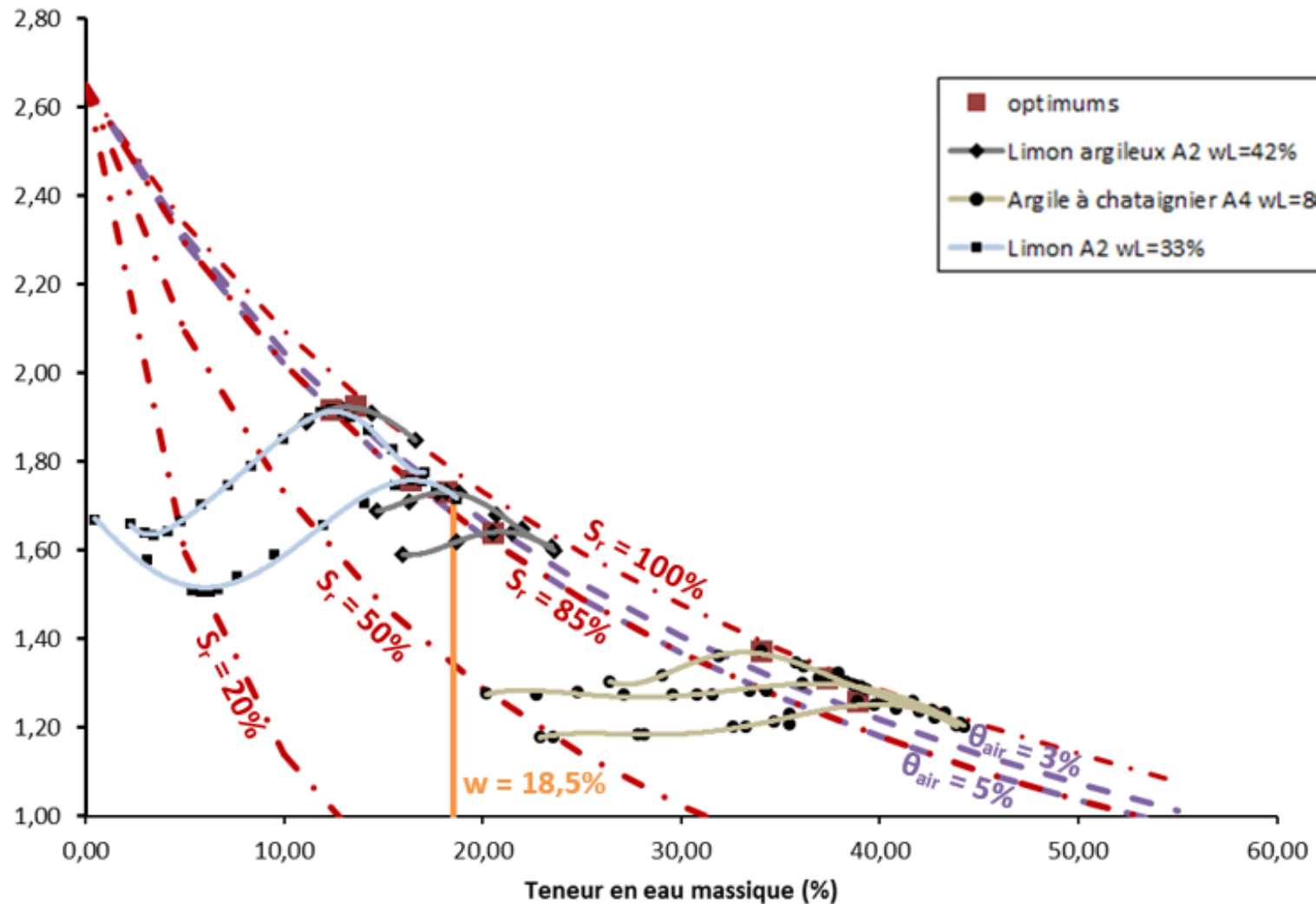
$$\theta = V_W/V_T$$

$$\theta_A = V_A/V_T$$

$$C = V_S/V_T$$

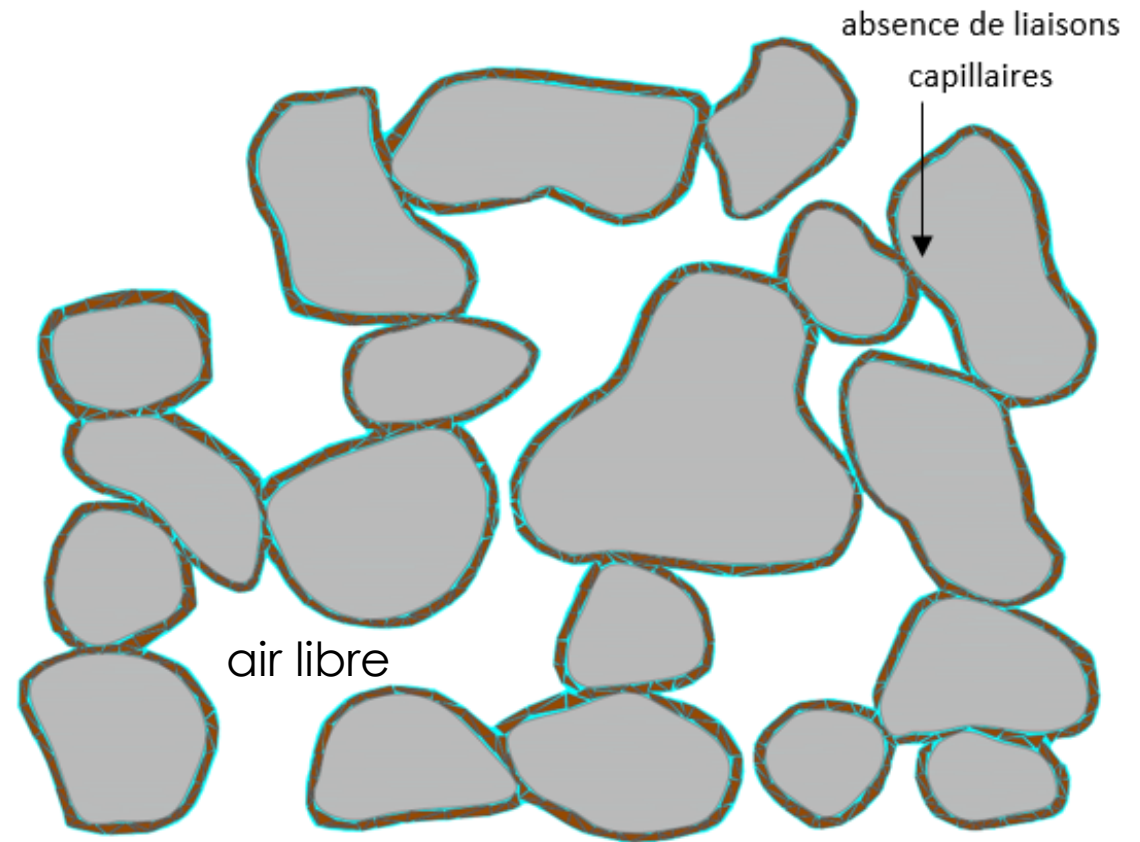
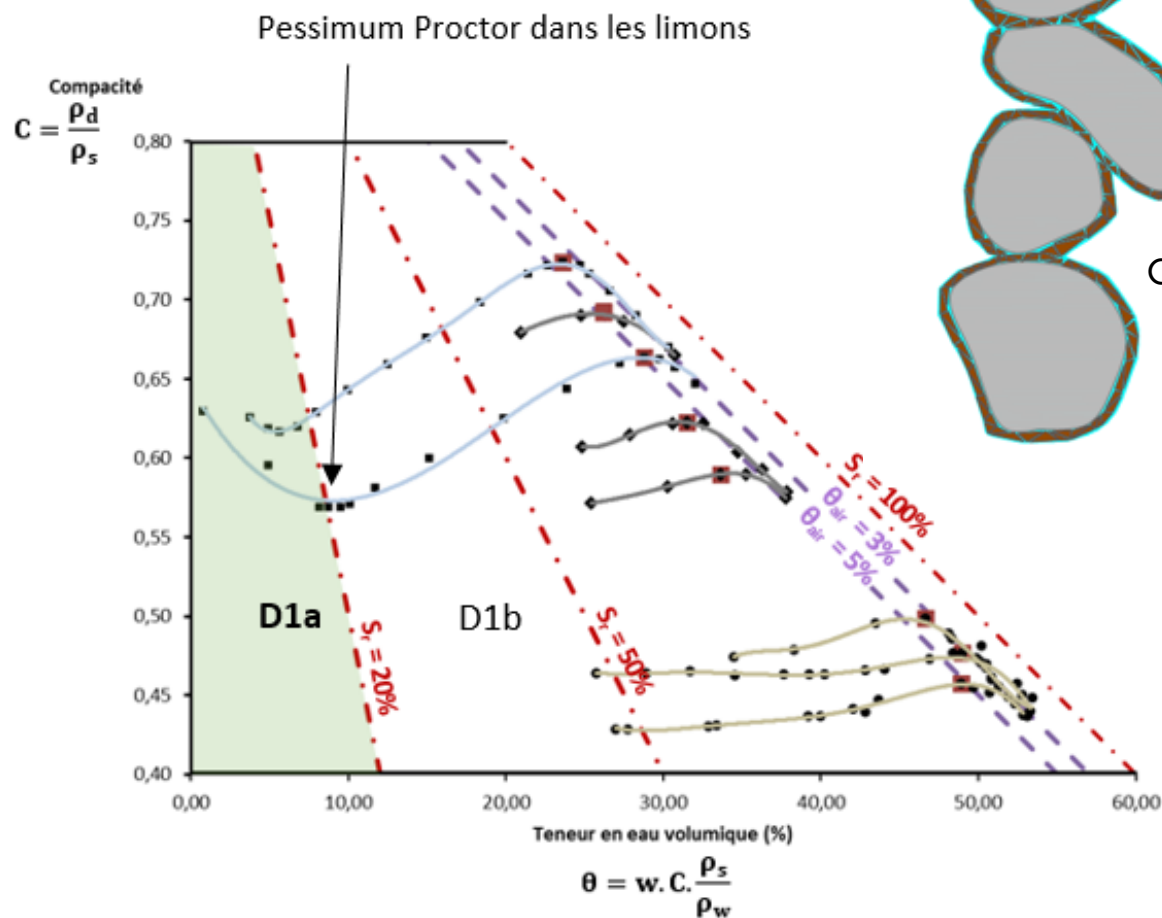
diagramme (w, ρ_d)

densité sèche



Domaine D1a

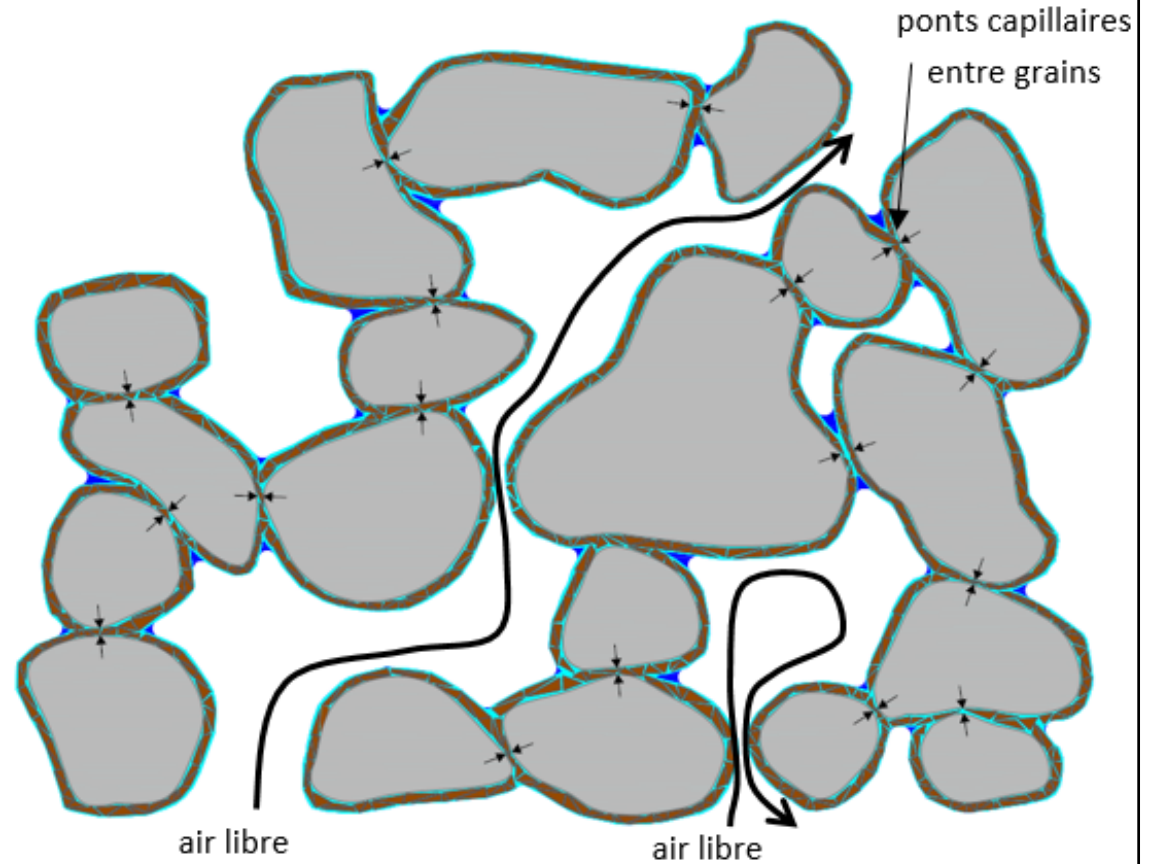
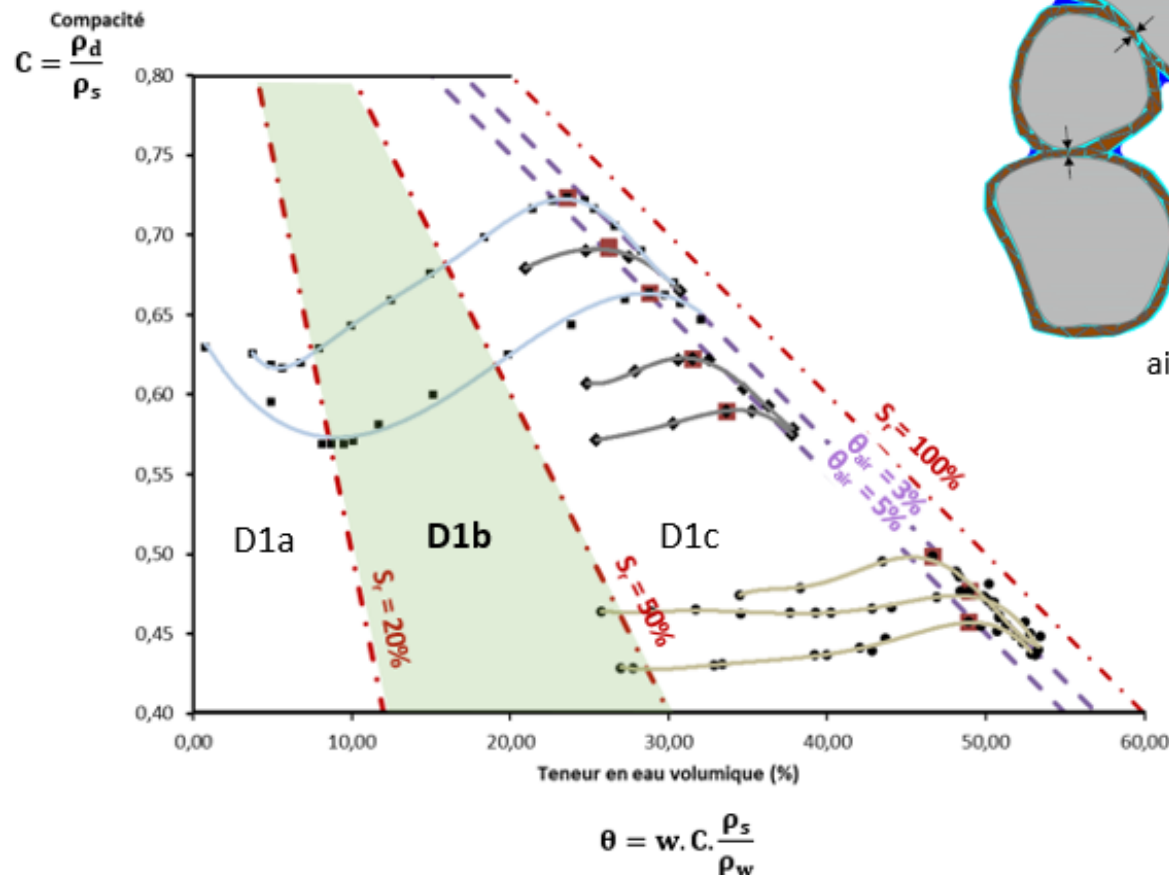
$S_r < 20\%$ (limons)



$\chi = 0$ $\sigma_{cap} = 0$
 Risque effondrement faible
 Risque gonflement (argiles)

Domaine D1b

$S_r = 20\%$ à $50/60\%$ (limite s/ts du GTR)

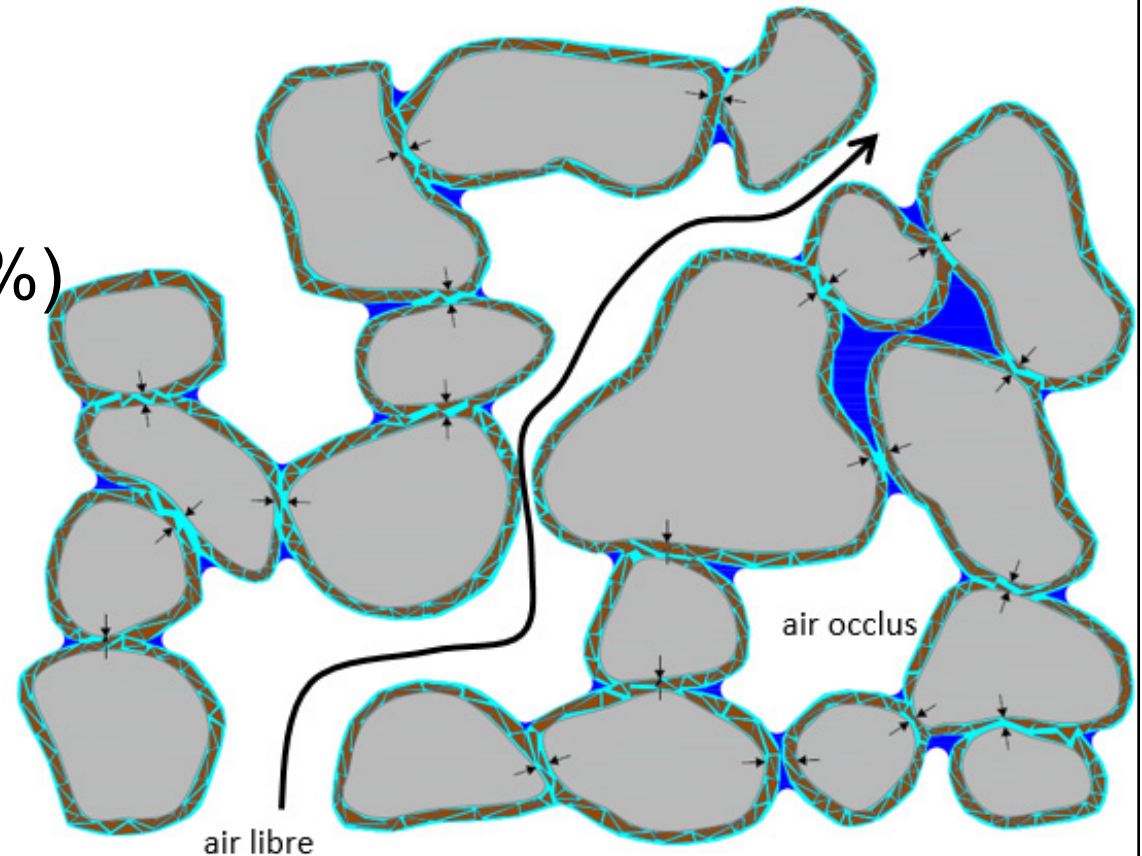
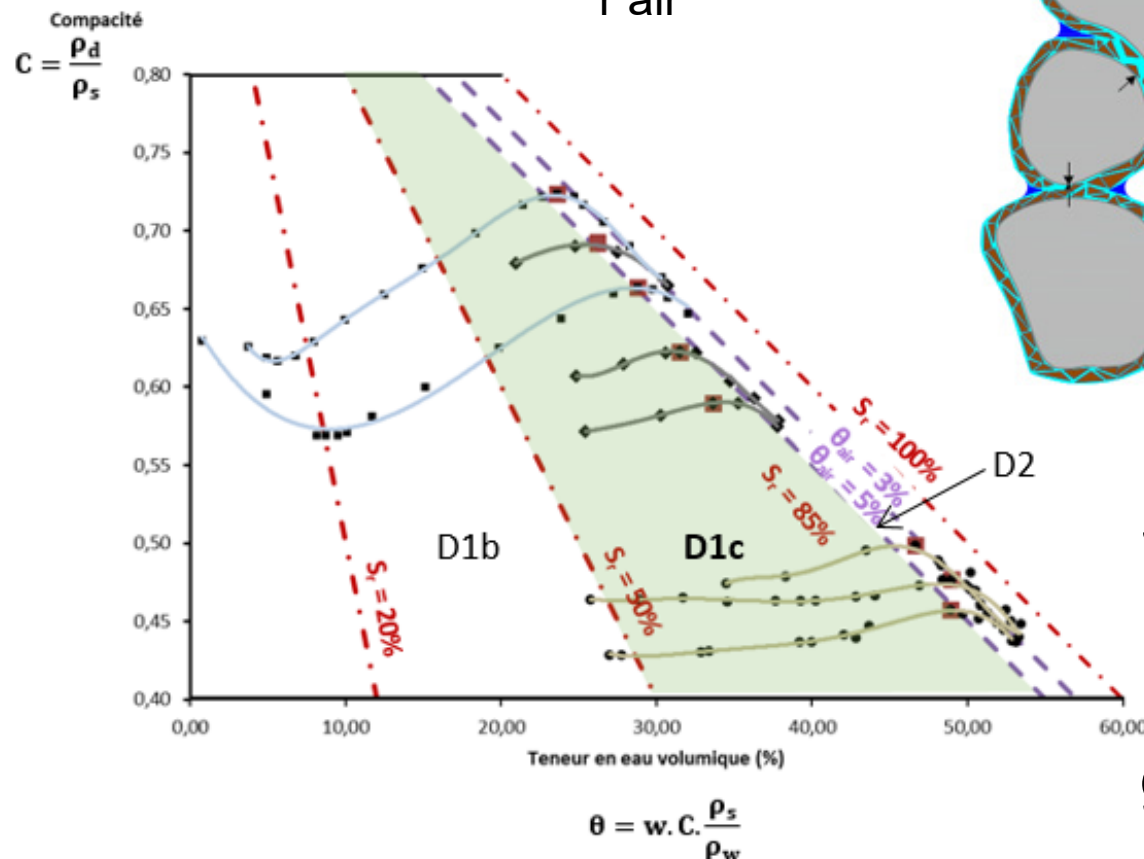


$0 < \chi < S_r$ et $\sigma_{cap} = \chi S \approx -\chi u_w$
 risque effondrement (limons)
 risque effondrement ou gonflement (argiles)

Domaine D1c

$$S_r = 50/60\% \text{ à } 80/95\% (\theta_A \approx 5\%)$$

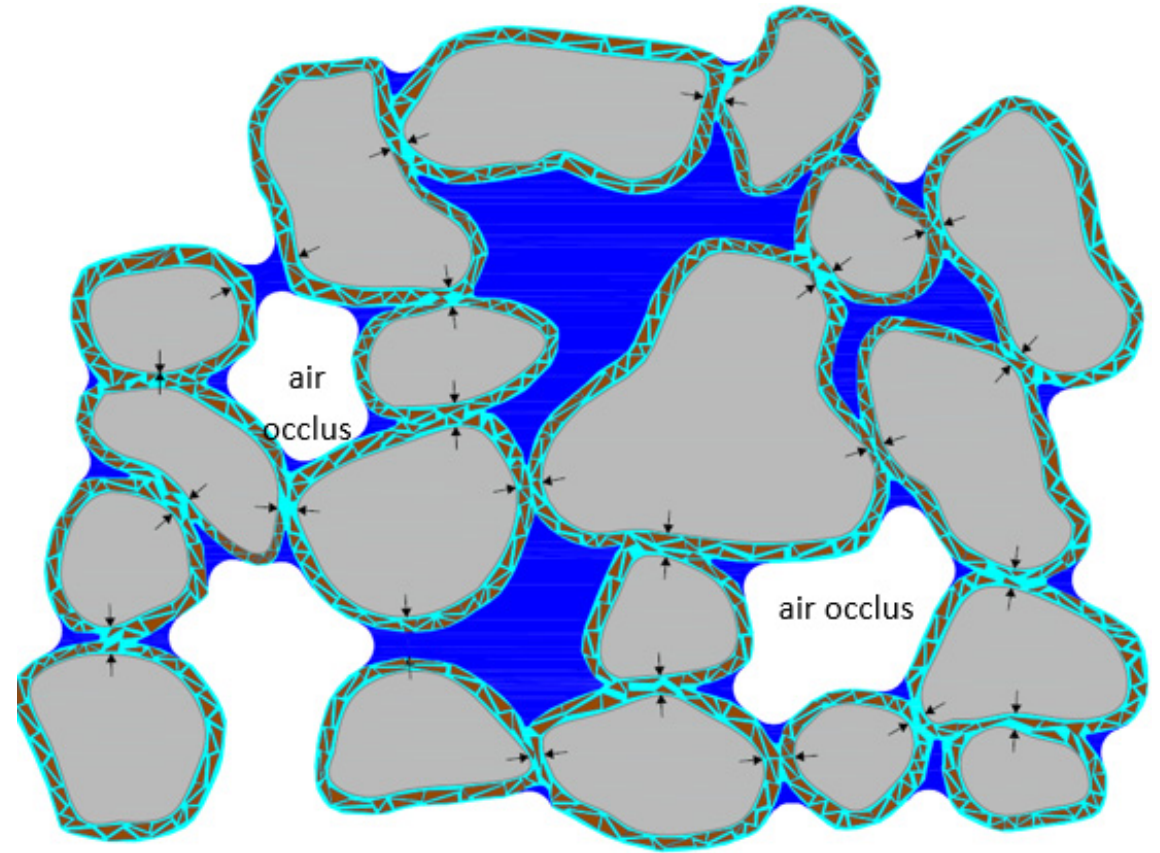
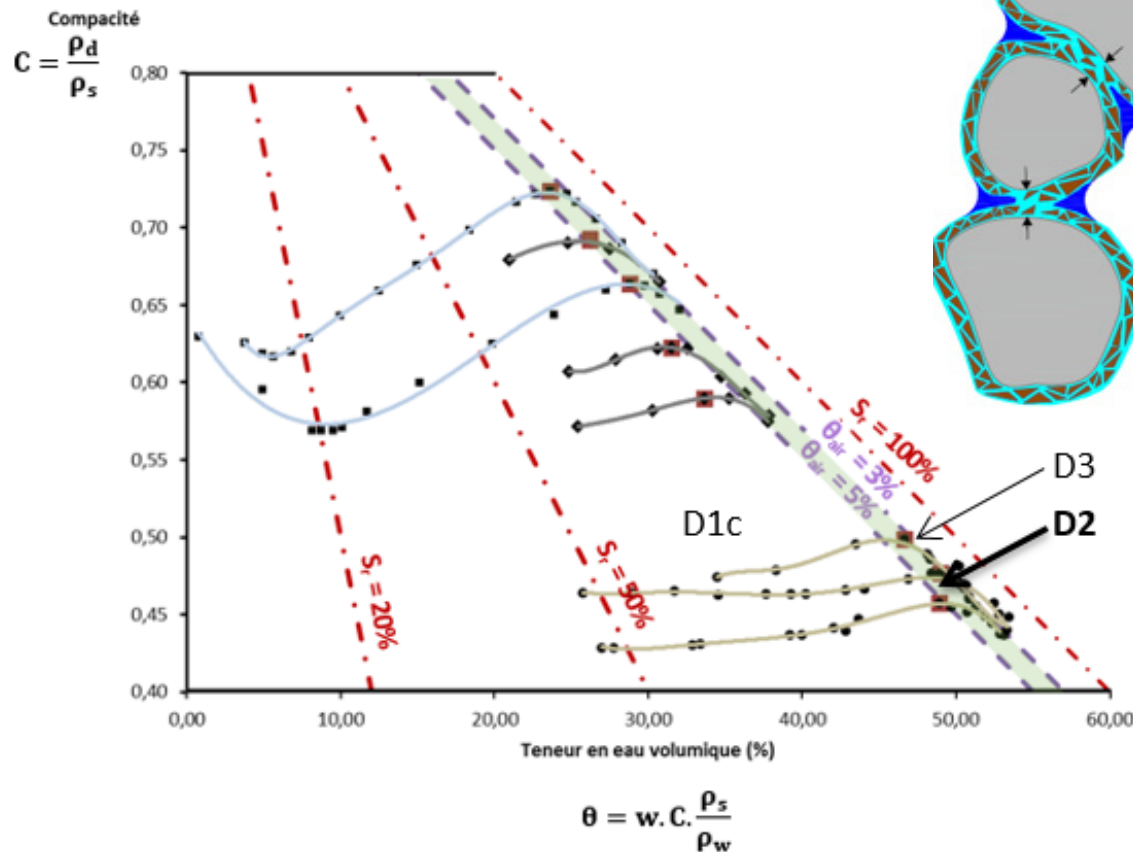
$S_{r \text{ air}}$



$S_r < \chi < S_{r \text{ air}} \quad \sigma_{\text{cap}} = \chi s \approx -\chi u_w$
 risque d'effondrement (limon)
 risque d'effondrement ou de gonflement (argiles)

Domaine D2

$$S_r = \underbrace{80/95\%}_{S_r \text{ air}} \text{ à } \underbrace{90/99\%}_{S_{re} \approx 96\%}$$



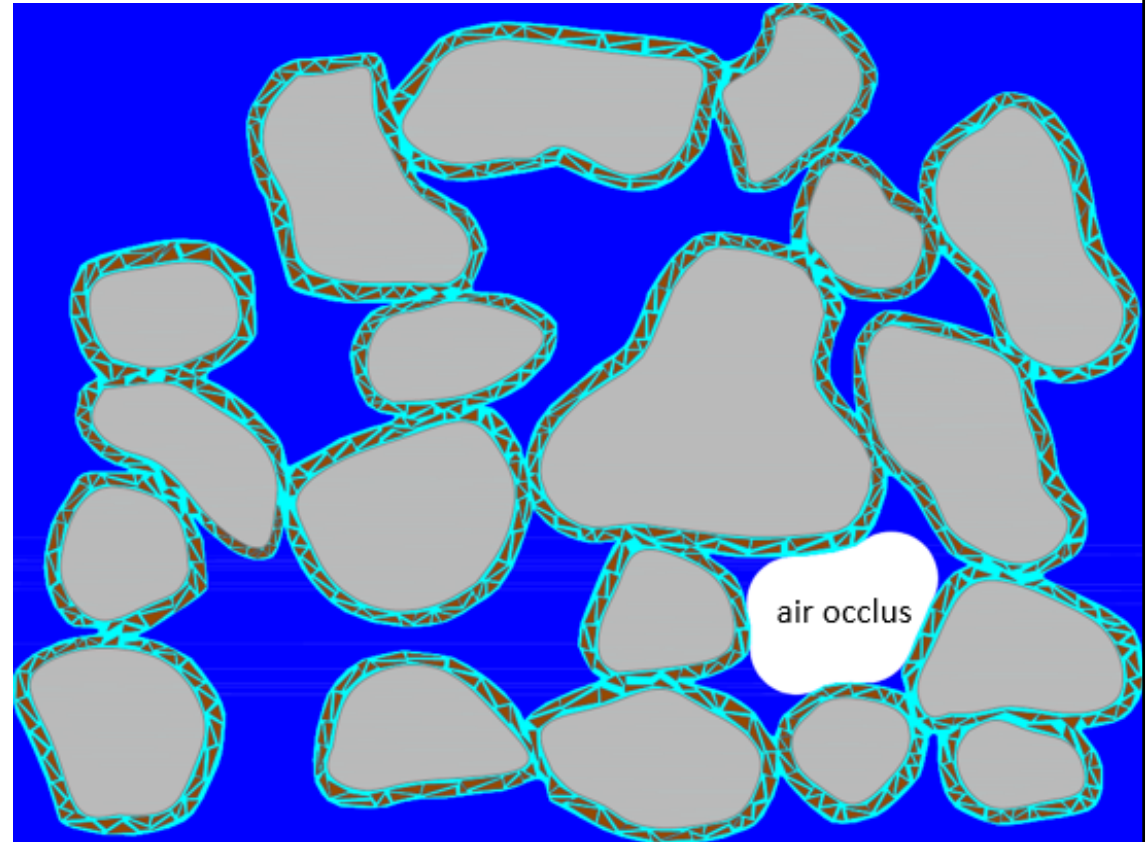
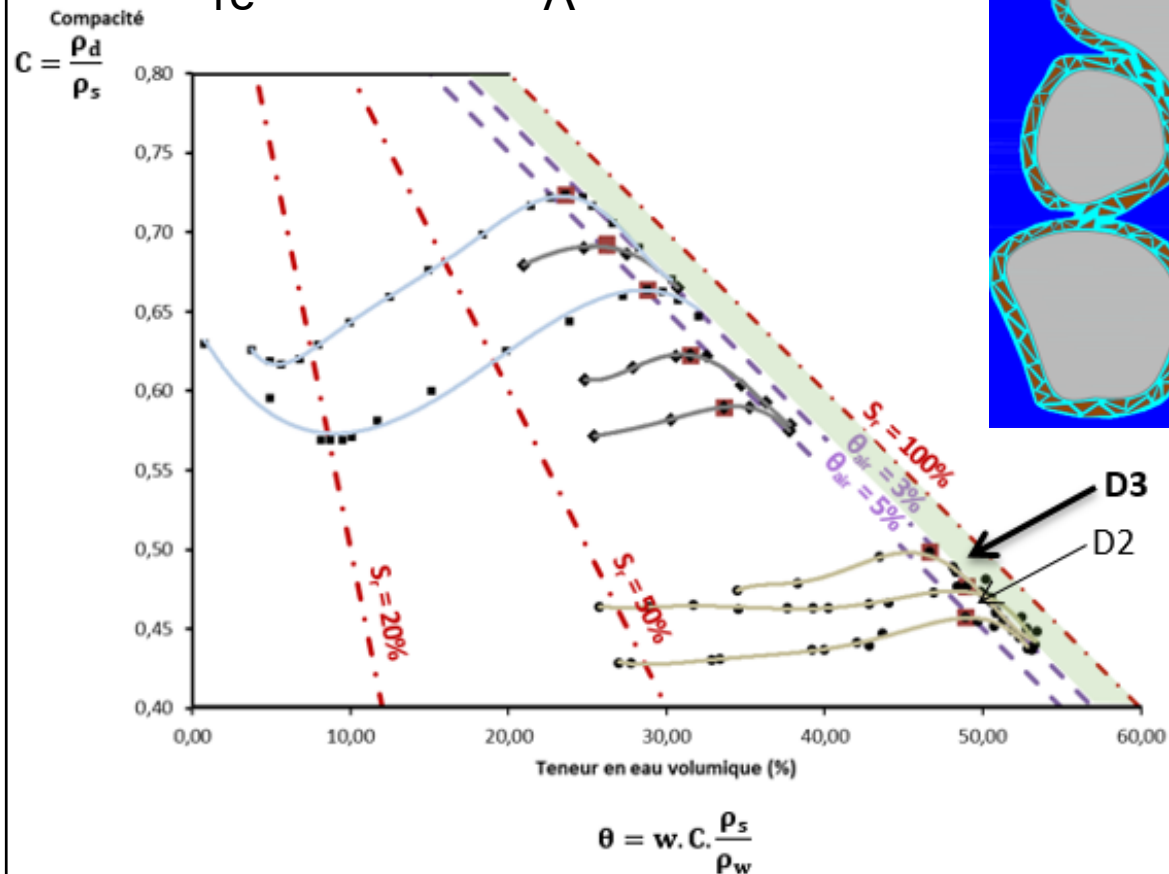
$\chi = 1$ (Terzaghi)

$\sigma_{cap} = s = -u_w$ c_f équivalent
pas de risque d'effondrement
risque de gonflement (argiles)

Domaine D3

$$S_r = 90/99\% \text{ à } 1$$

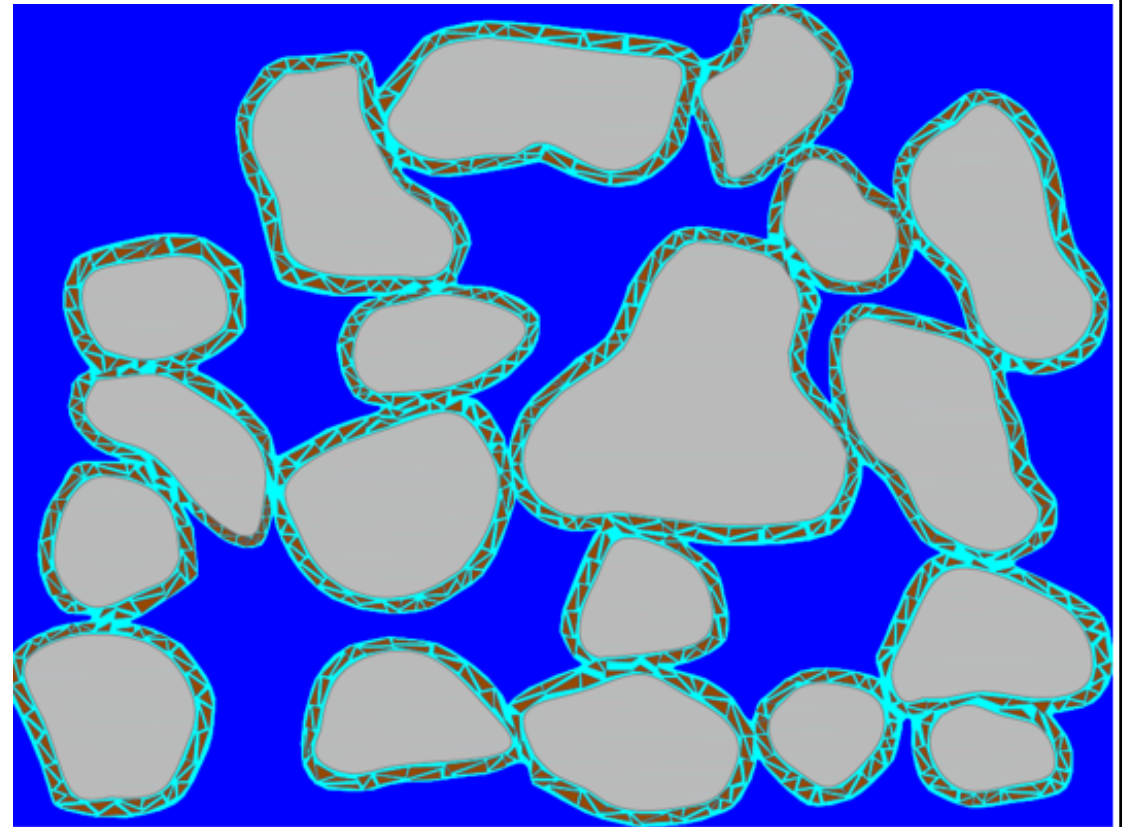
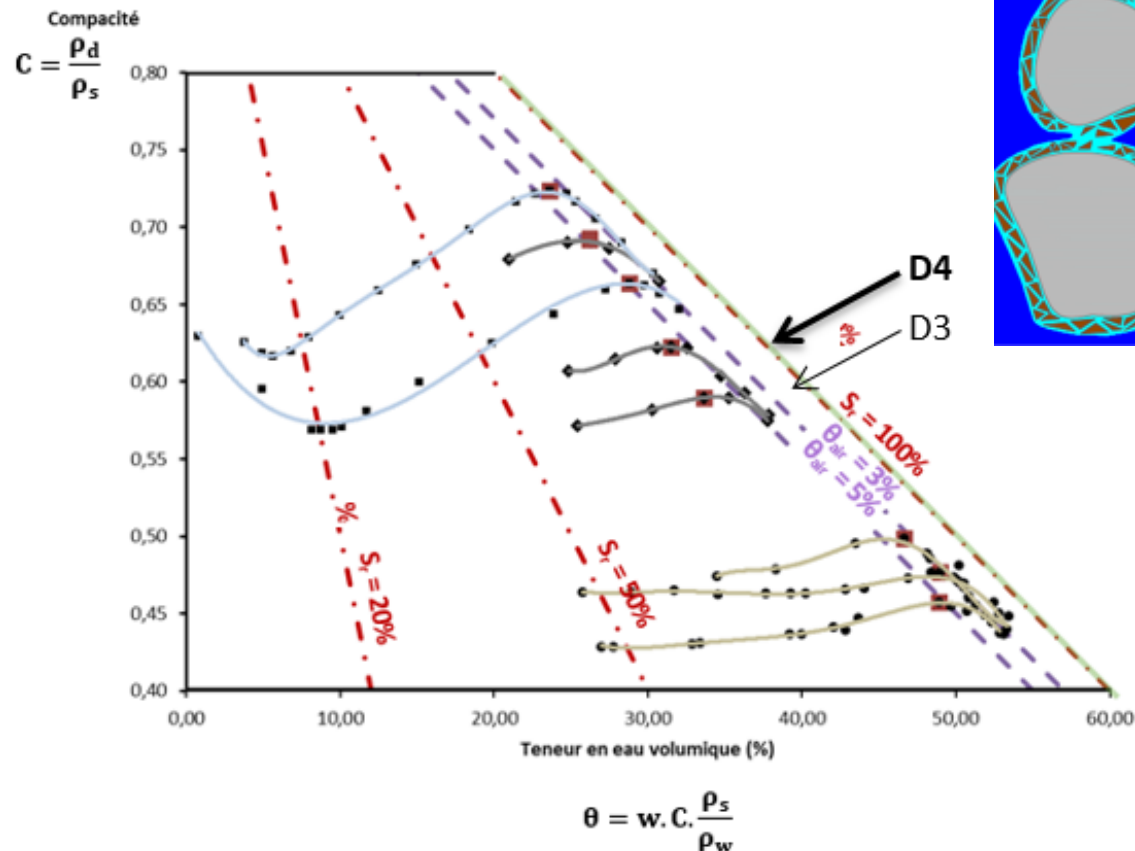
$$S_{re} \approx 96\% \quad \theta_A \approx 1 \text{ à } 2\%$$



$u_w > 0$ (Terzaghi)
 c_f équivalent

Domaine D4

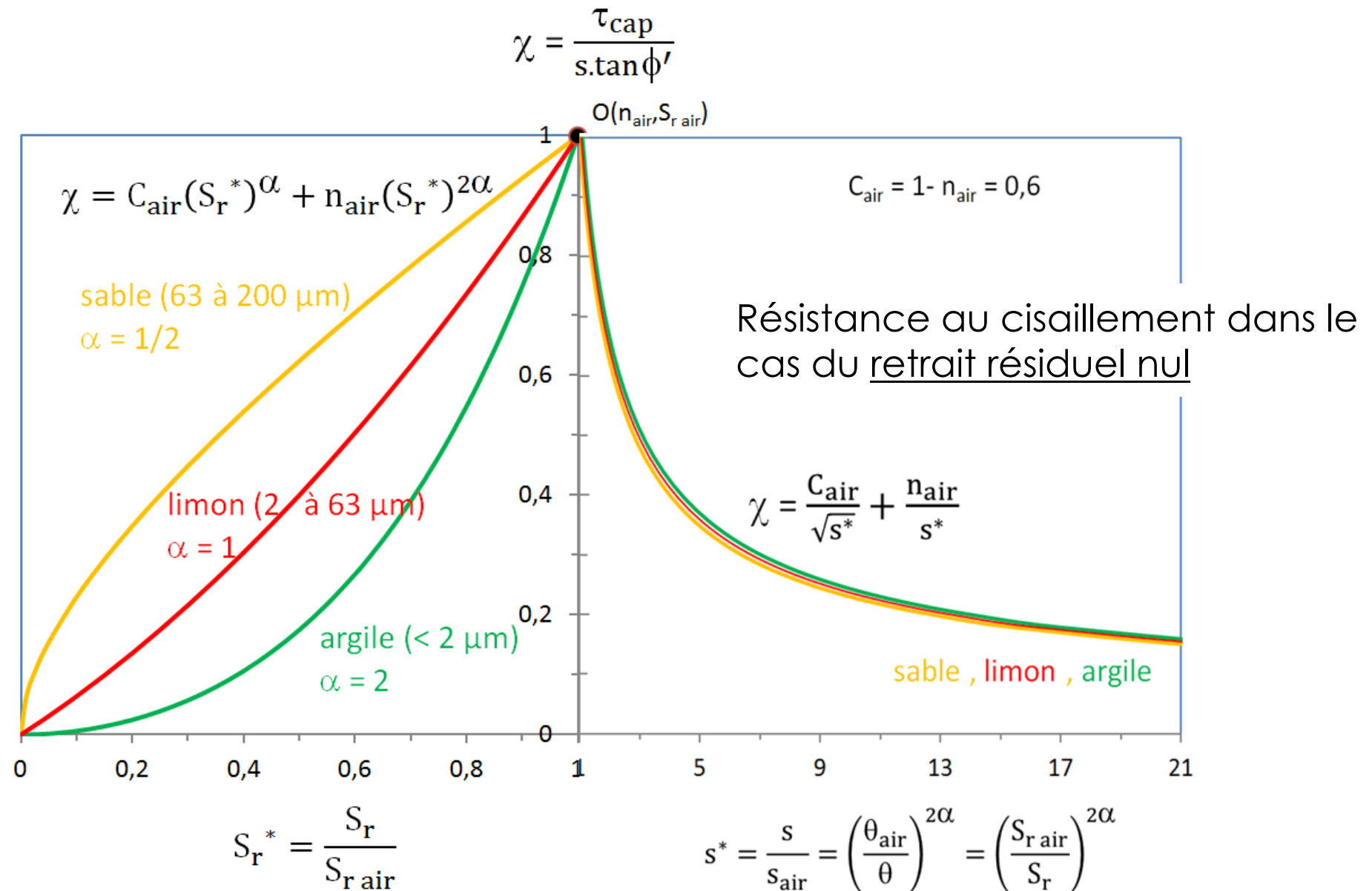
$$S_r = 1$$



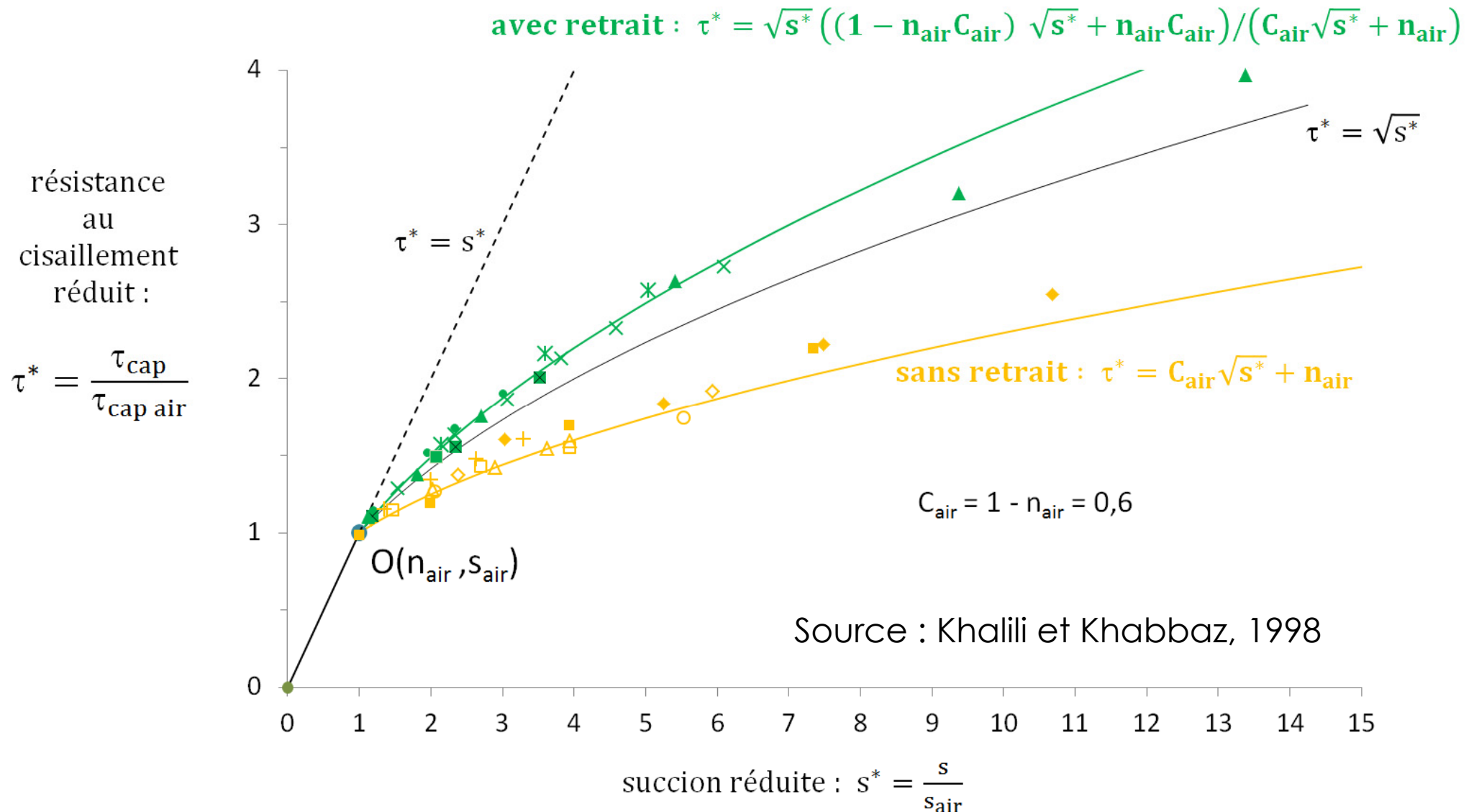
$$u_w > u_{w \text{ sat}} \text{ (Terzaghi)}$$

$$C_f = C_w$$

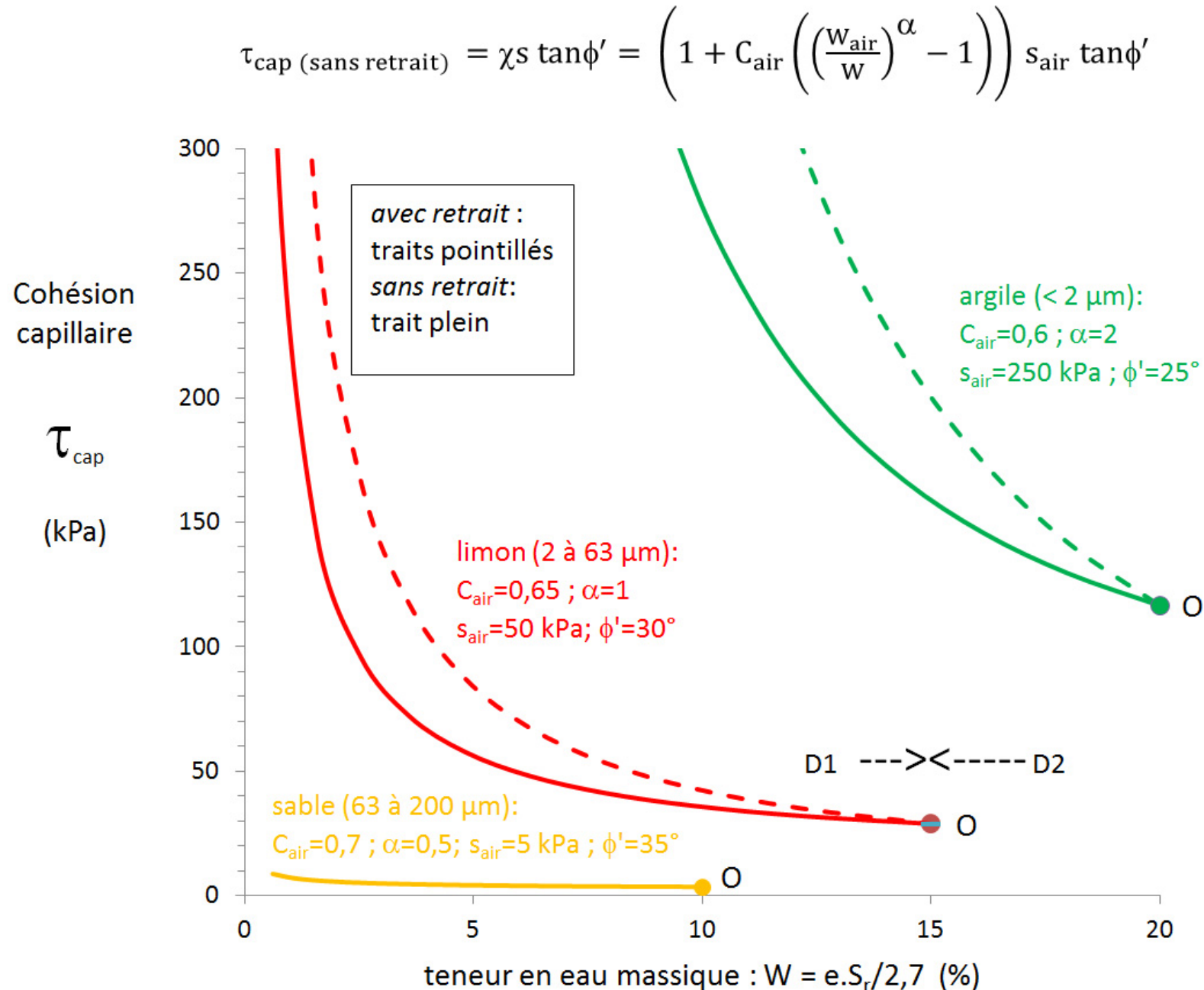
Modèle Terredurable, côté sec de l'Optimum (D1)



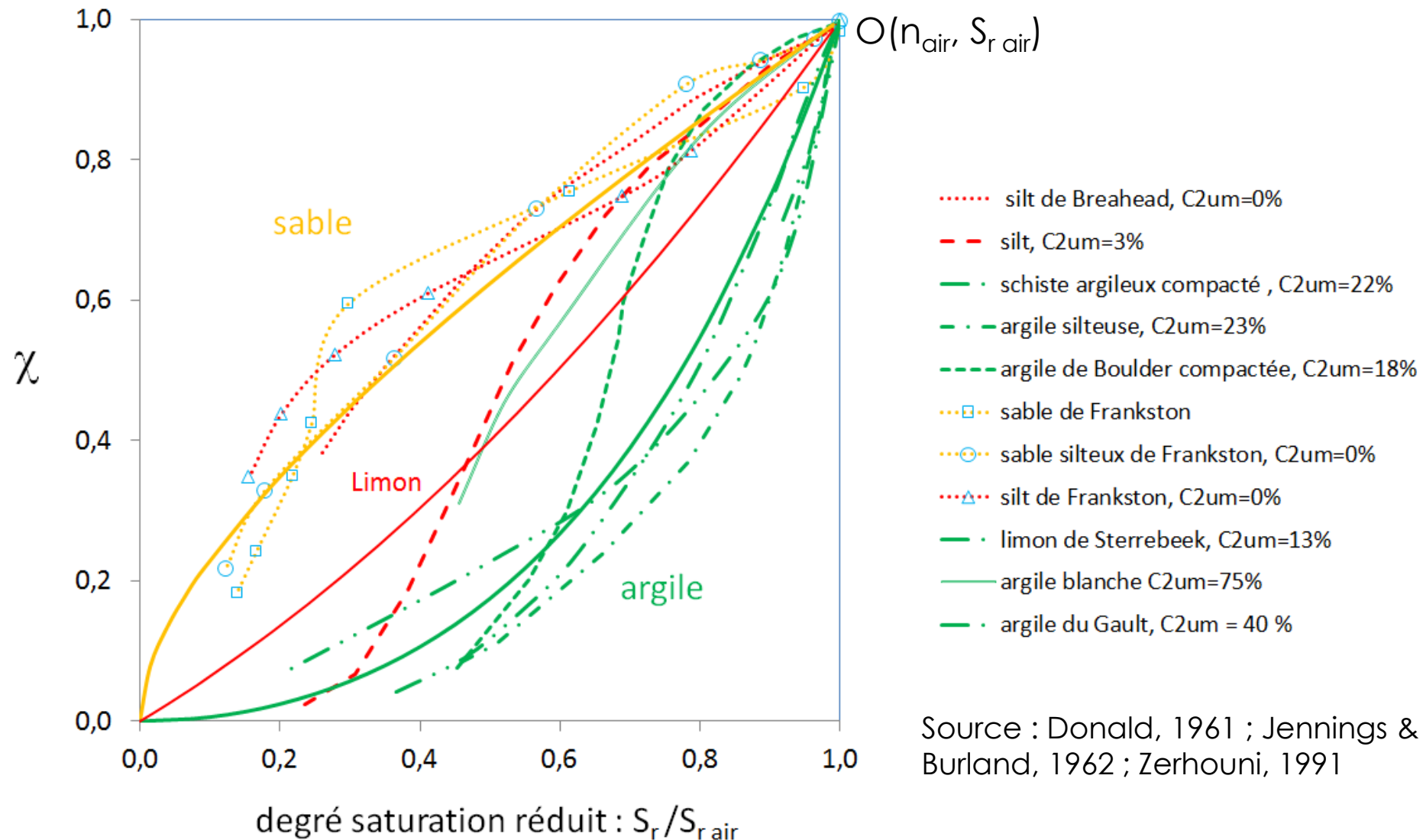
Résistance au cisaillement en fonction de la succion



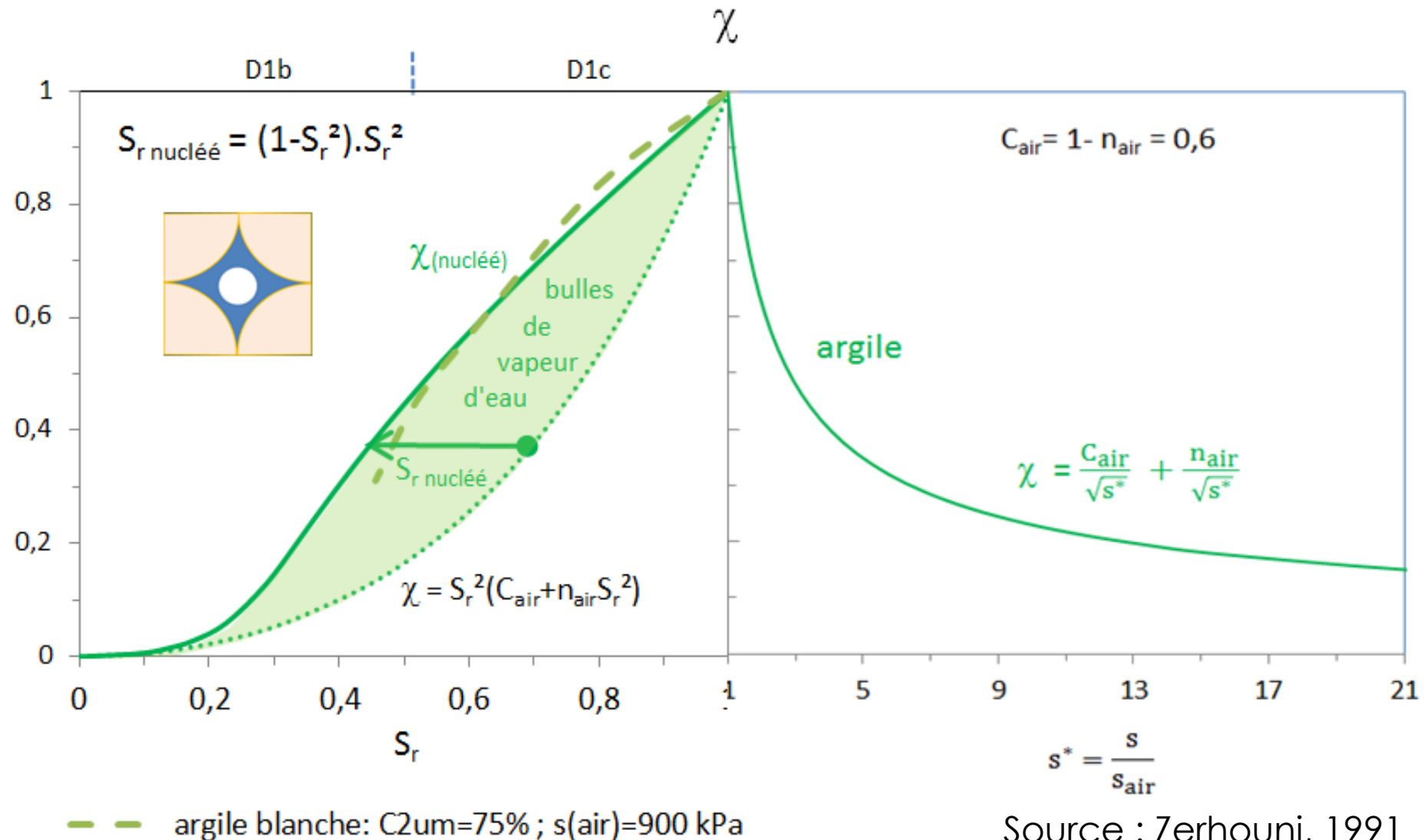
CONCEPTION ET CONSTRUCTION des ouvrages en sols fins



χ théoriques et expérimentaux en fonction du degré de saturation S_r sur un chemin de drainage

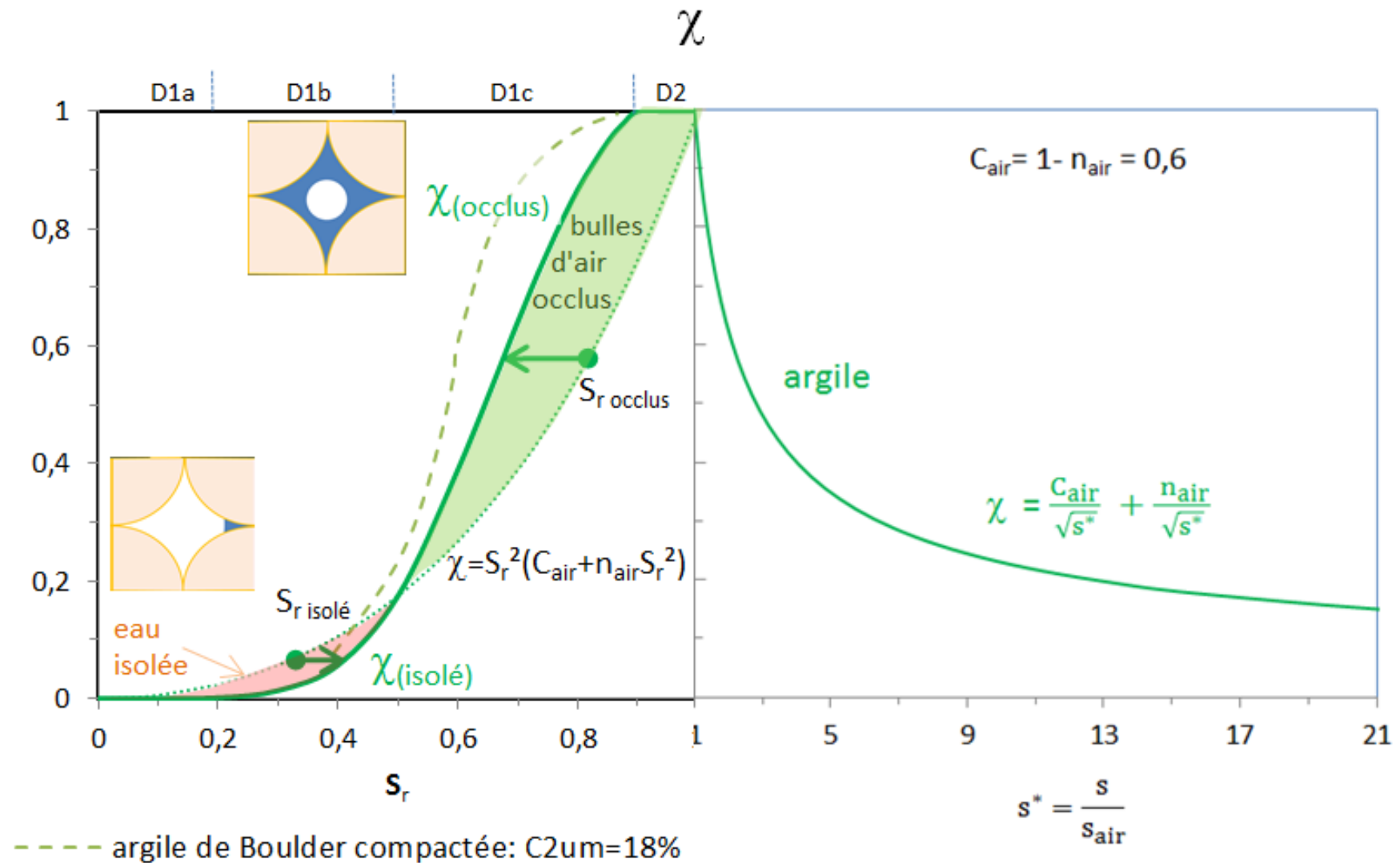


Interférence entre percolation de l'atmosphère et nucléation de vaporisation au drainage

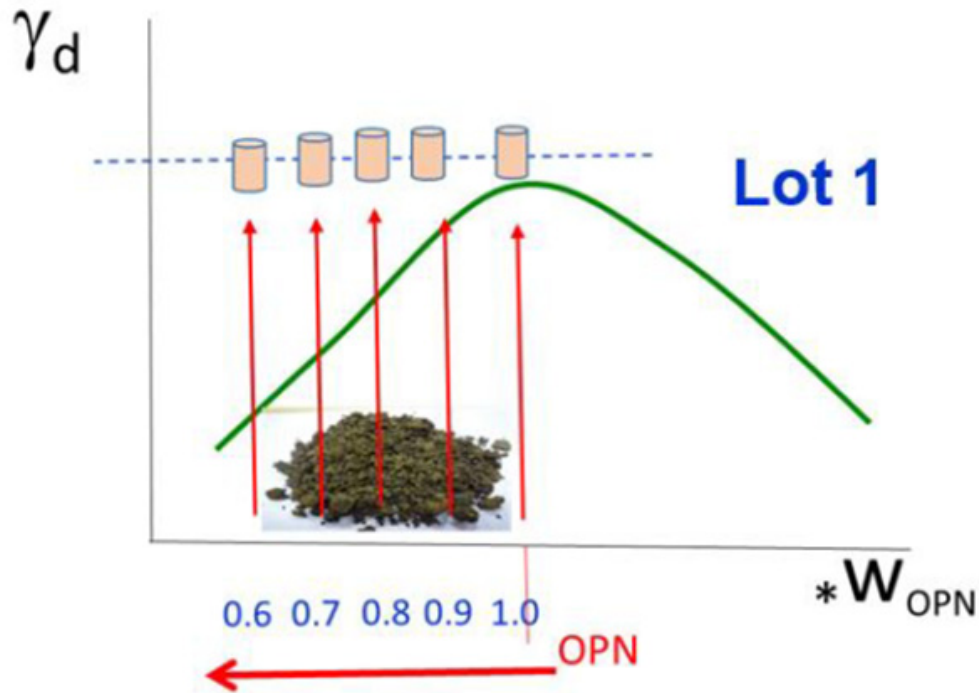


Source : Zerhouni, 1991

Incidence de l'air occlus et/ou de l'eau isolée



Source : Bishop, 1960



$$\gamma_{dopn} = 14,8 \text{ kN/m}^3$$

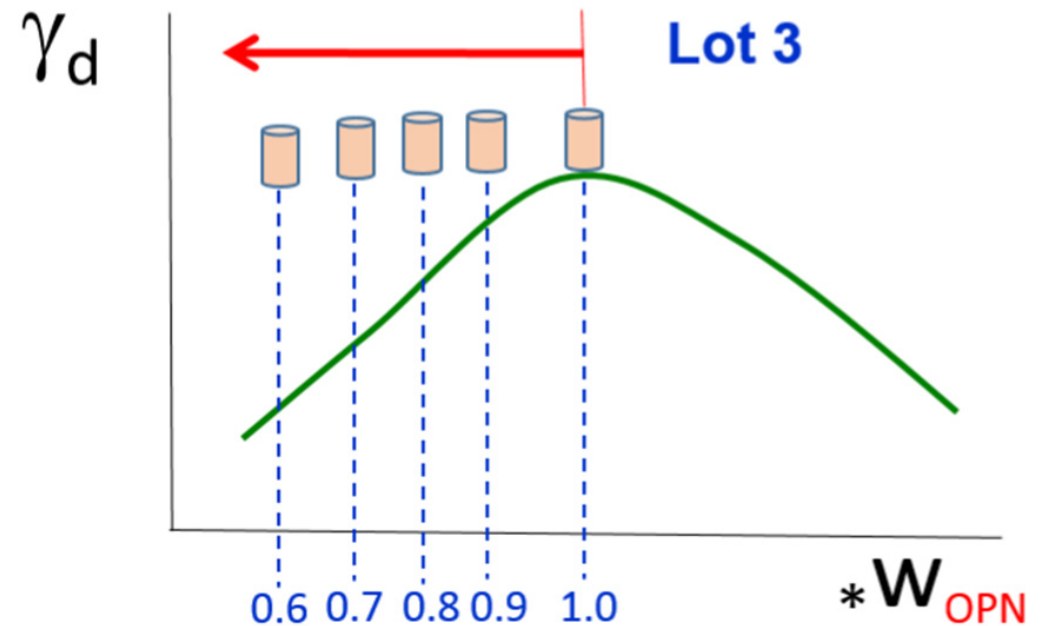
$$w_{OPN} = 24\%$$

$$S_{r\text{air}} = 0,79$$

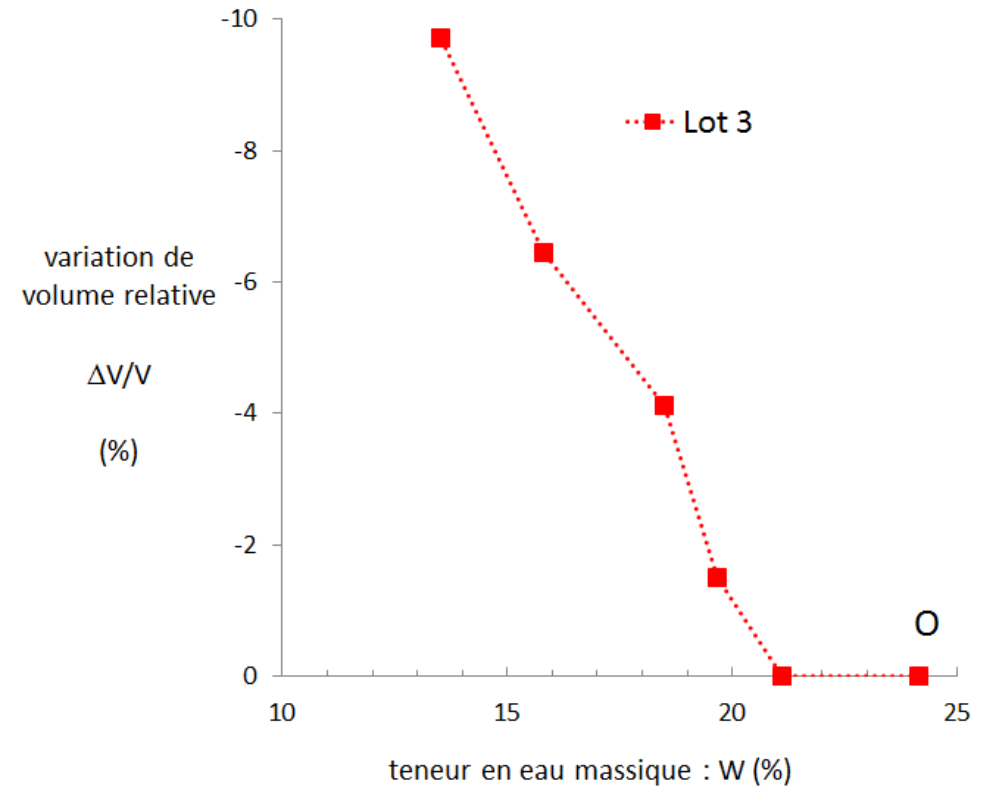
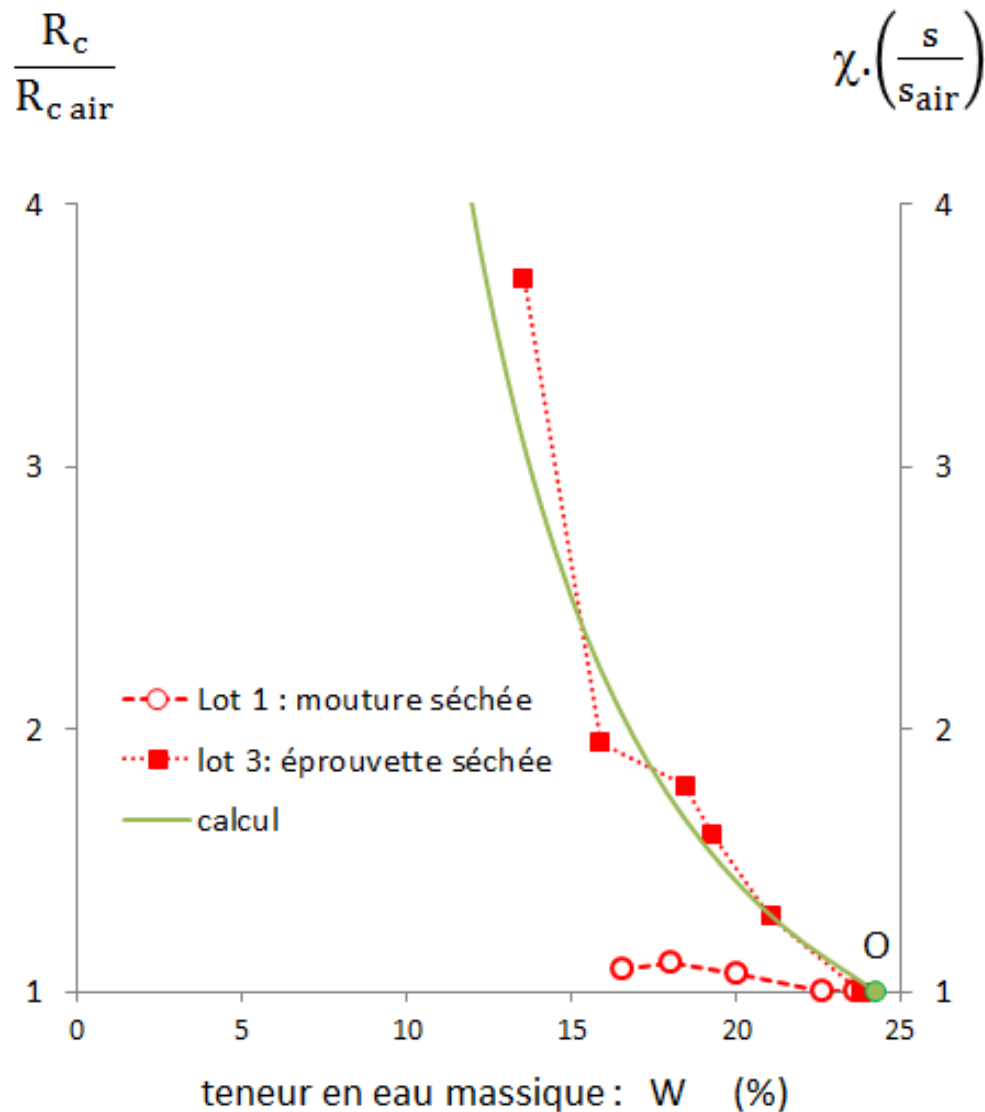
GTR A3 A4

Source : Adrianatrehina, 2016

R_c d'une marne
argileuse compactée

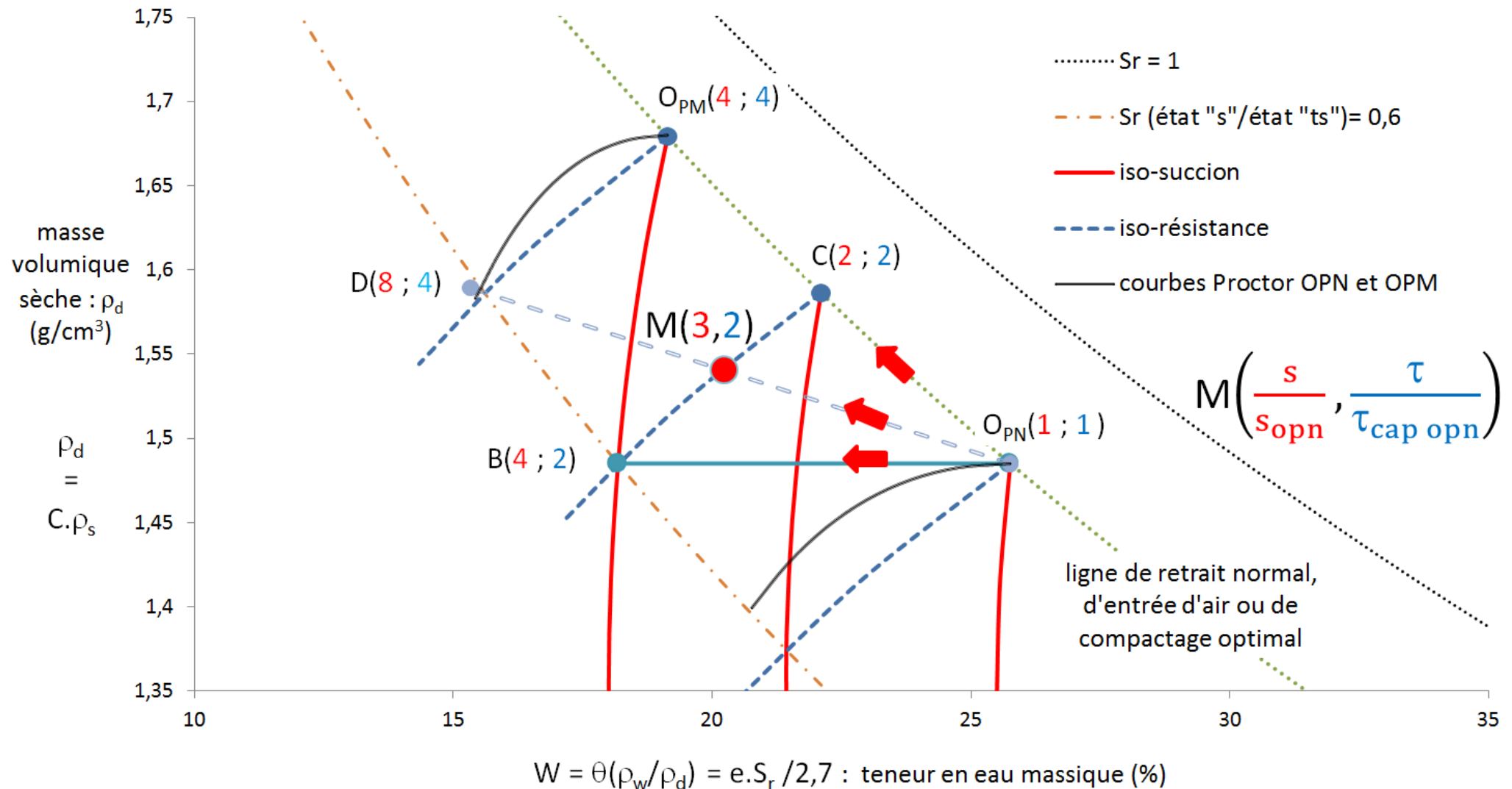


R_c d'une marne argileuse compactée



Source : Adrianatrehina, 2016

Iso-succion et iso-résistance dans le diagramme Proctor sur des éprouvettes de sols argileux

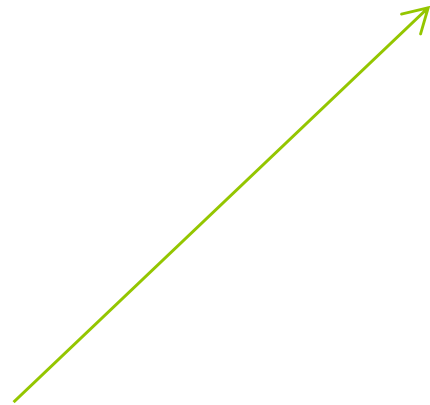


Merci de votre attention...



○ Annexes

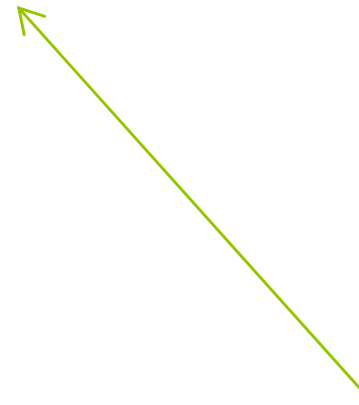
$$\theta_{\text{eff}} = n \cdot \chi$$



teneur en eau volumique
effective



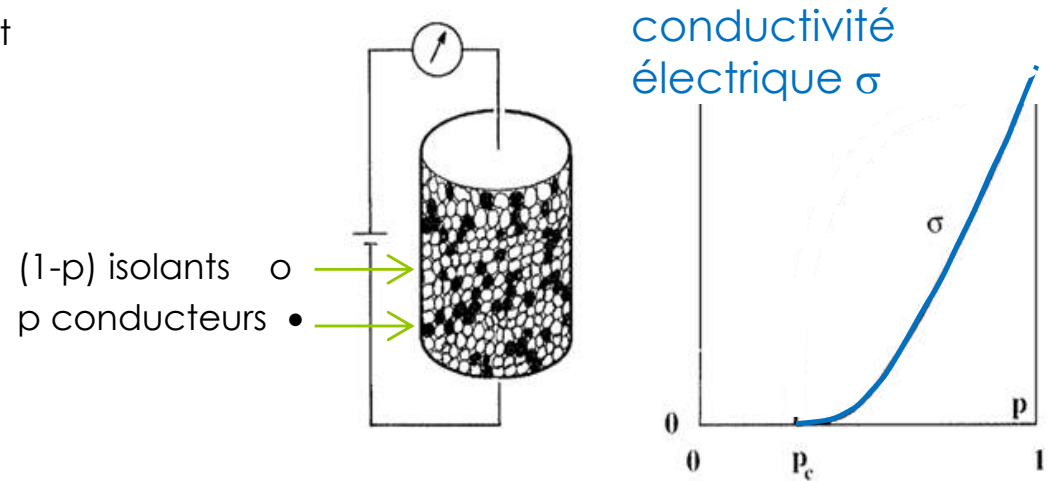
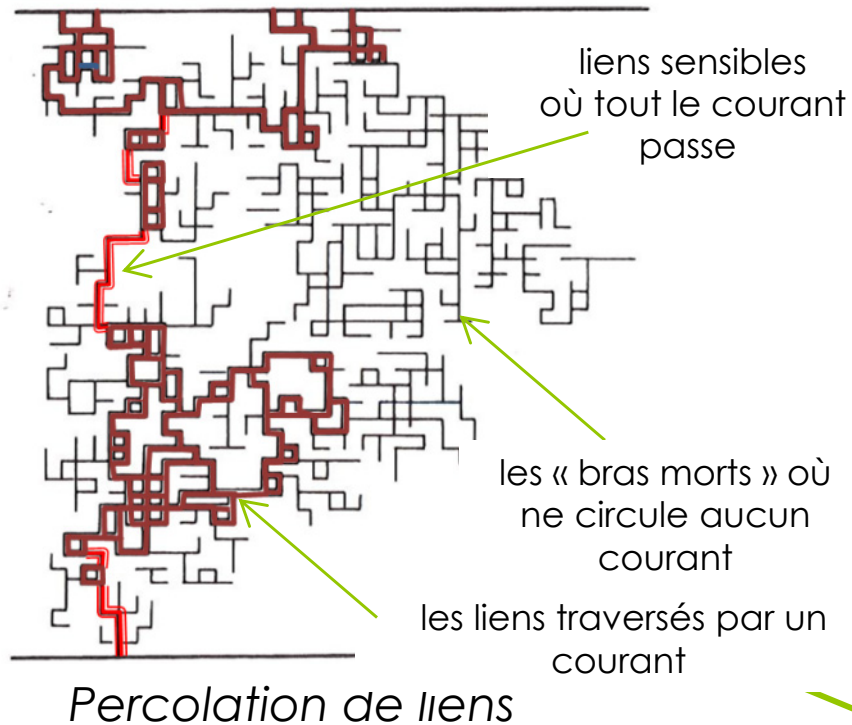
porosité



coefficient de Bishop

L'eau effective dans une argile une analogie avec la percolation électrique

Source : Guyon et Troadec, 1994



Percolation de sites

En cas de retrait du sol

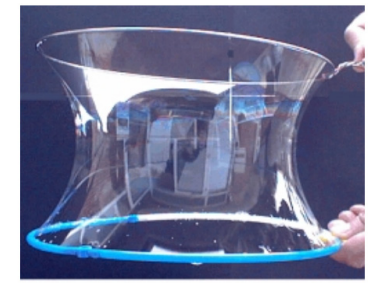
Teneur en eau volumique $\theta = n \cdot S_r$:

$$\frac{\text{volume d'eau}}{\text{volume total}} = \frac{\text{volume des vides}}{\text{volume total}} \times \frac{\text{volume d'eau}}{\text{volume des vides}}$$

L'Eau effective $\theta_{\text{eff}} = n_{\text{eff}} S_{r \text{ eff}}$:

$$\frac{\theta_{\text{effective}}}{\theta_{\text{saturée}}} = \left(\frac{\theta}{\theta_{\text{entrée d'air}}} \right)^{\alpha}$$

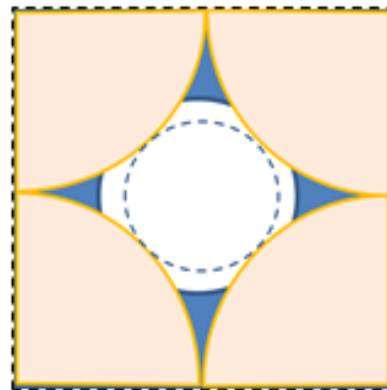
L'eau effective dans un sol une approche énergétique



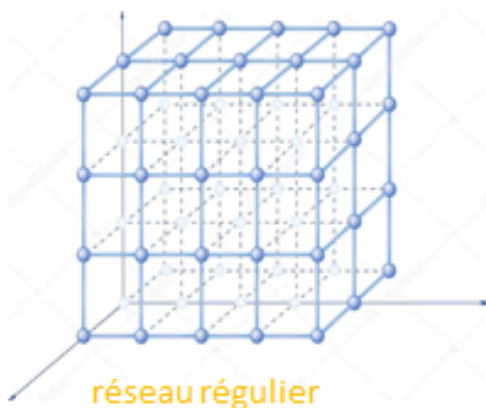
La caténoïde

La teneur en eau effective θ_{eff} en fonction
de la teneur en eau volumique (θ), de la succion (s) et de la surface des interfaces eau-air (s_w) :

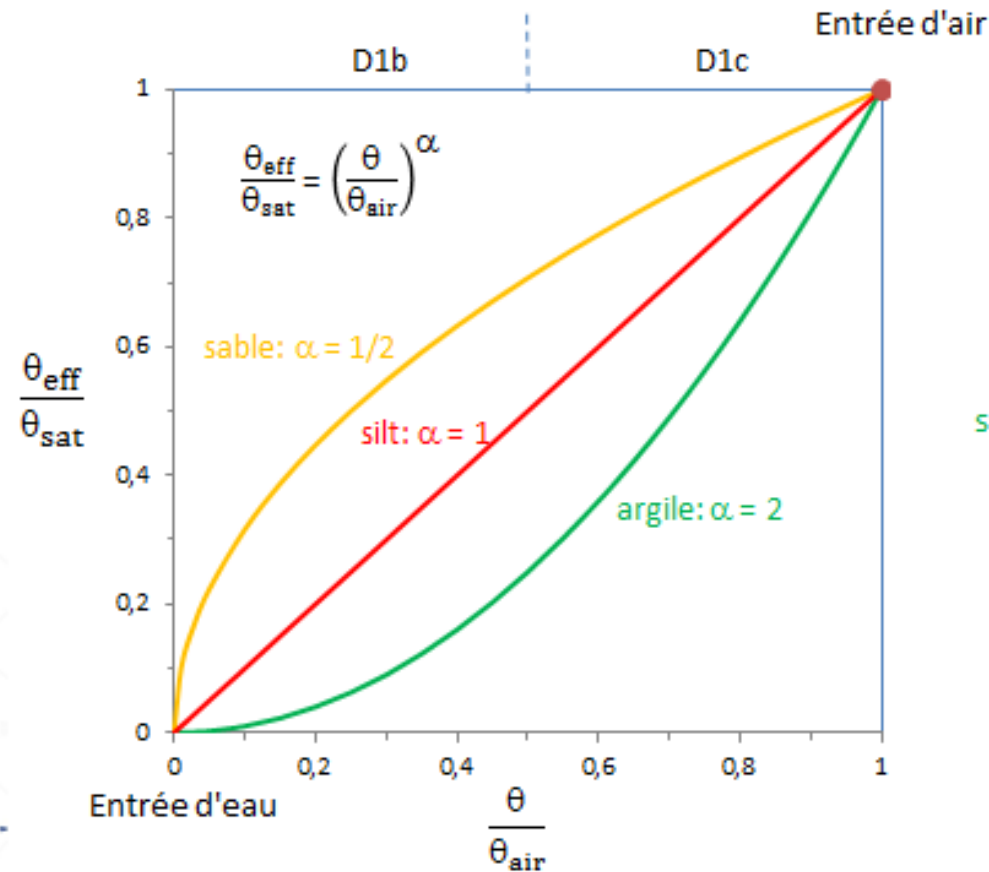
$$dG_w = -s.d\theta + A.ds_w = -s.d\theta_{eff}$$



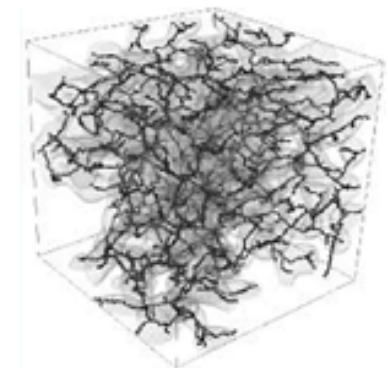
arrangement cubique
de cylindres



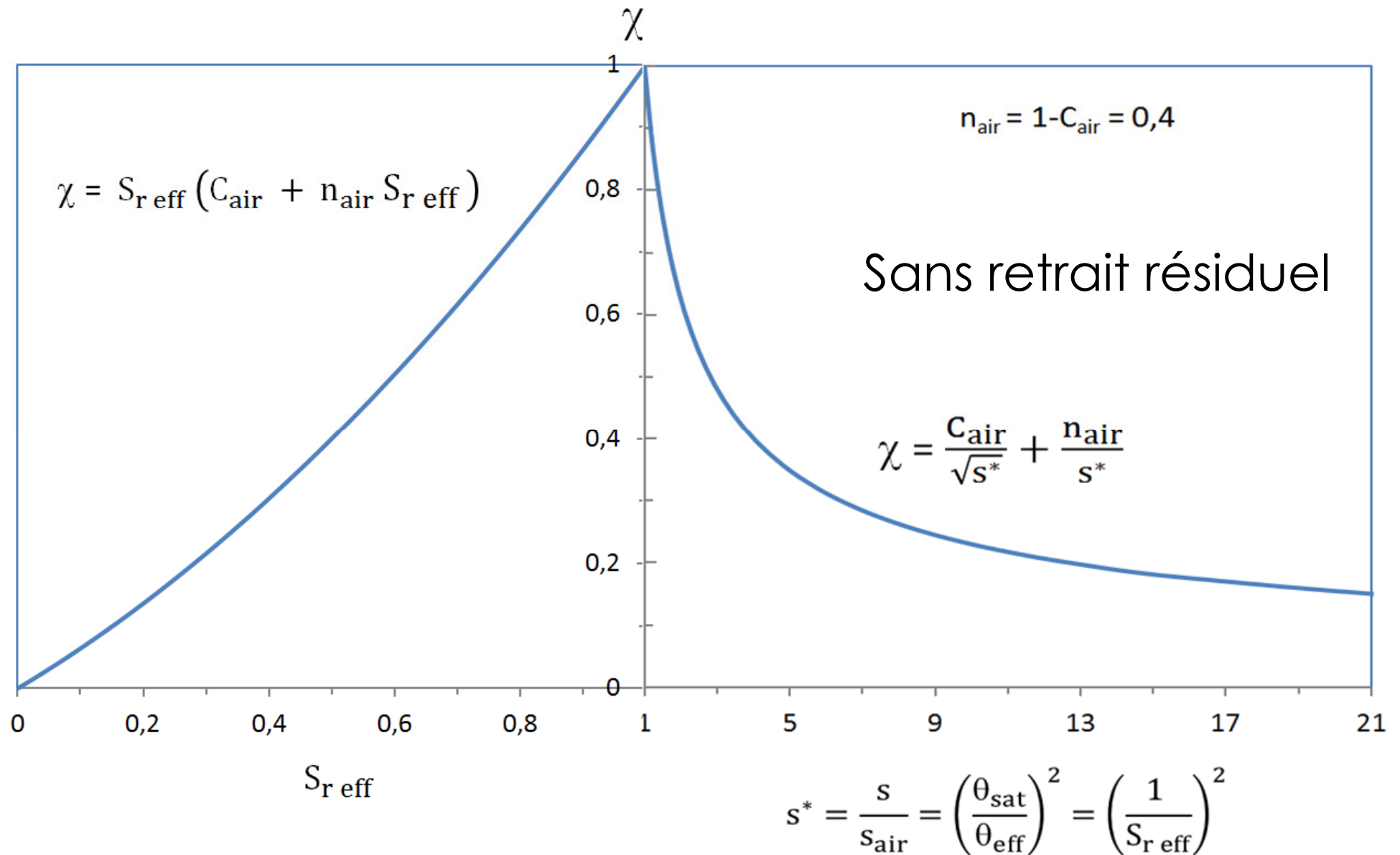
réseau régulier



salle anéchoïque : surface chiffonnée

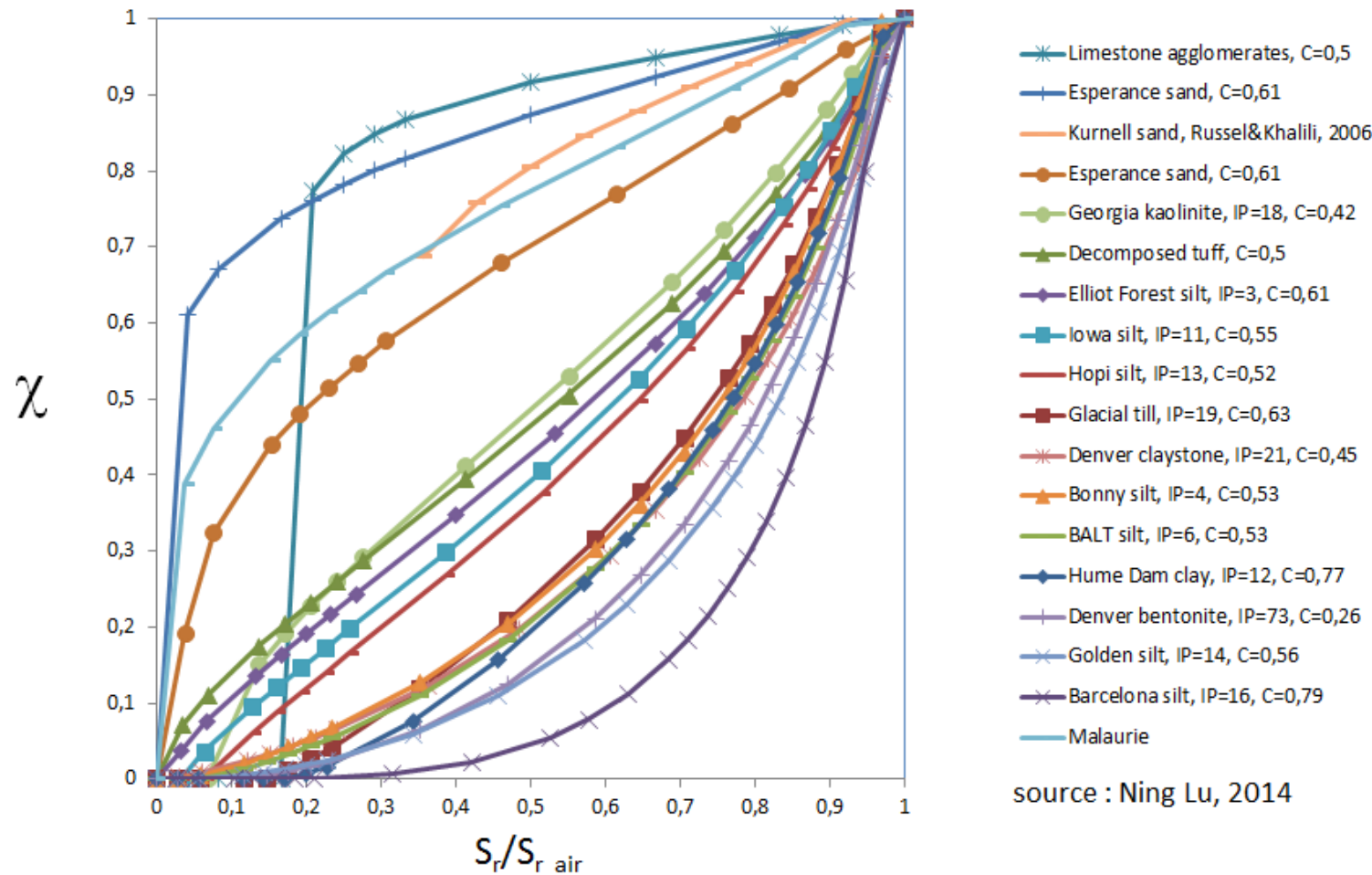


réseau percolé



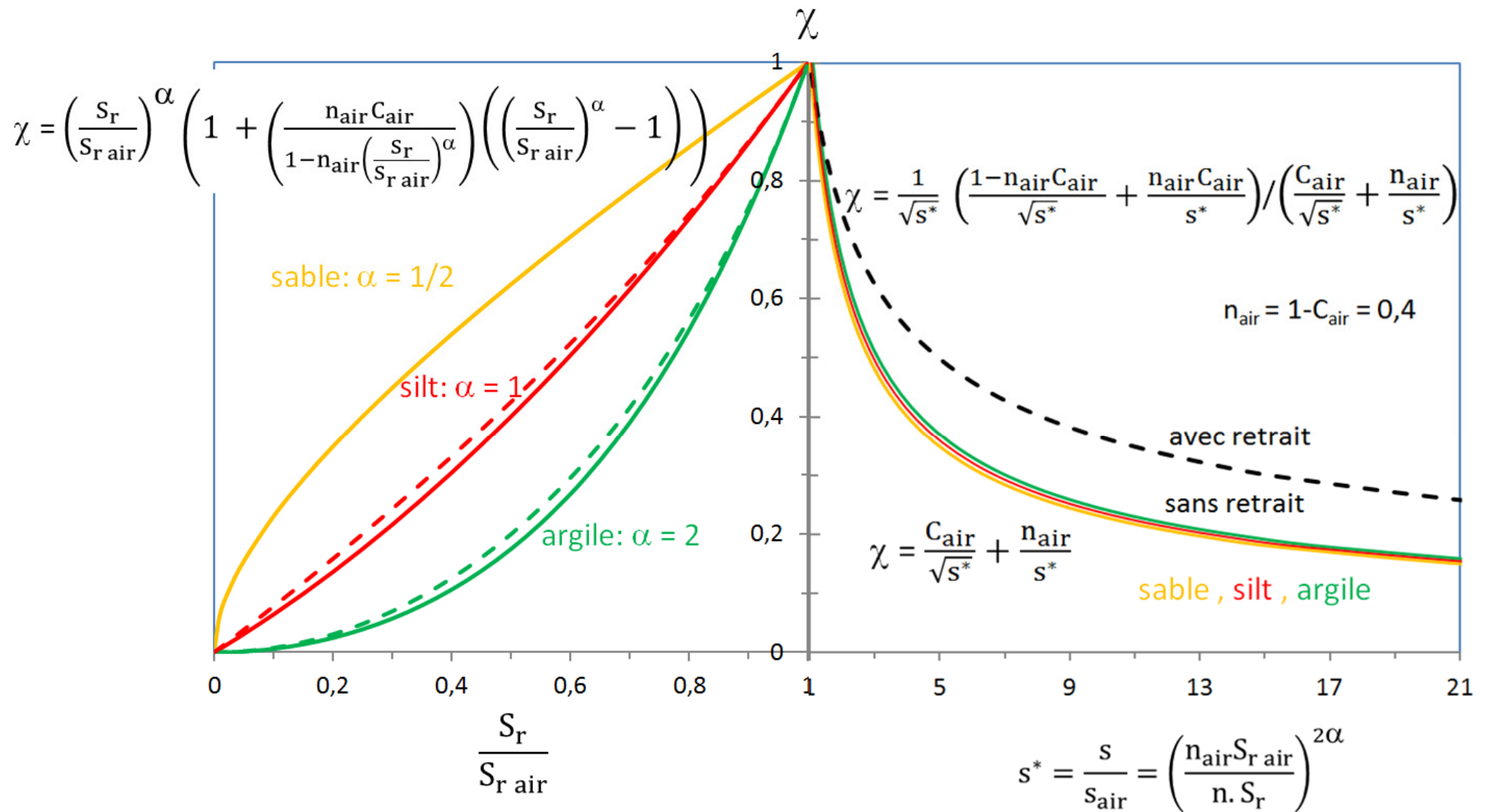
Le cisaillement en variables effectives : $\chi s - s_{\text{air}} = C_{\text{air}} \int_{S_{r \text{ eff}}}^1 s. dS_{r \text{ eff}}$

Un lien direct entre courbe de rétention et résistance en

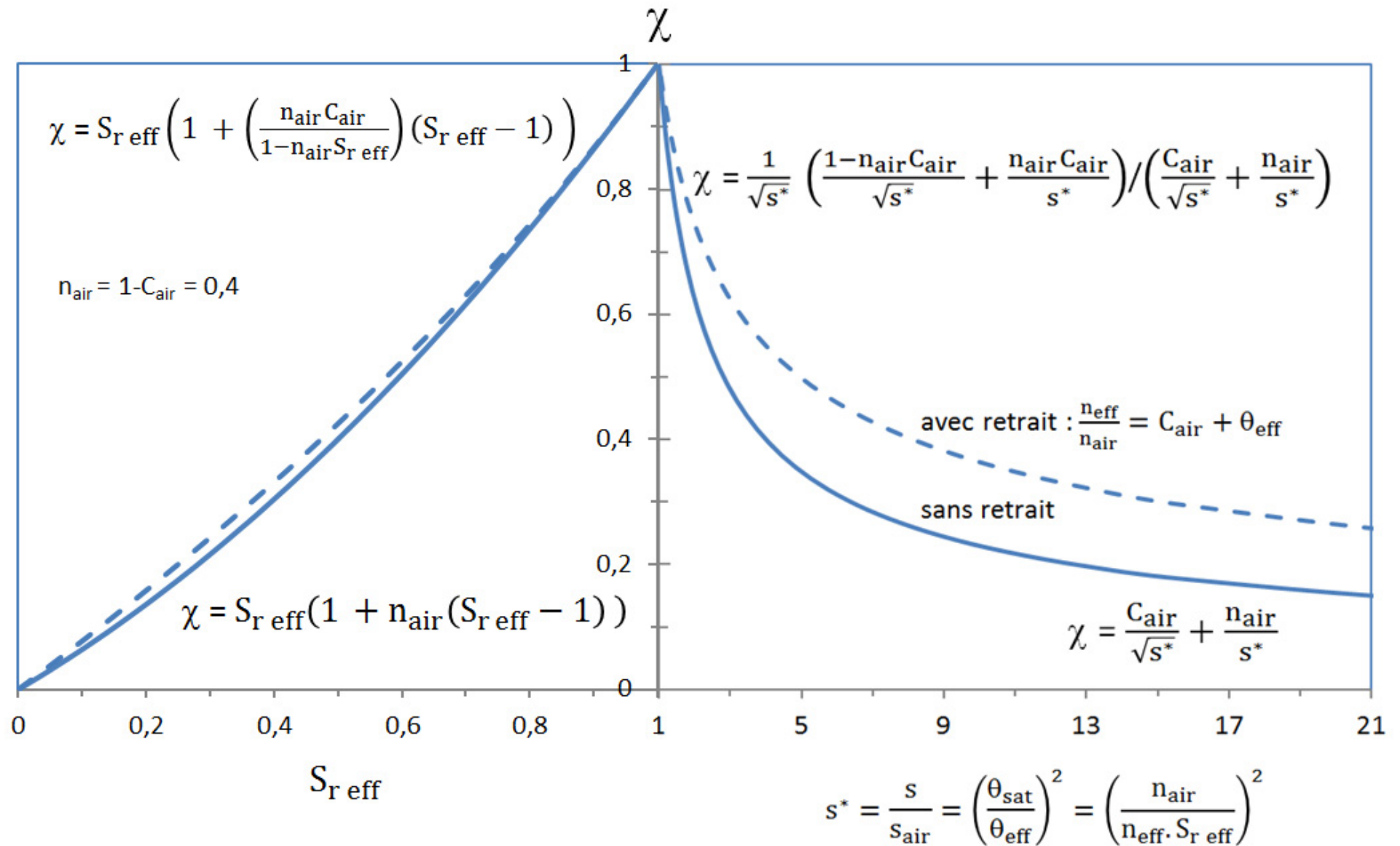


$$\text{Genuchten: } \frac{s}{s_{\text{air}}} = \left(\left(\frac{S_r - S_{r \text{ rés.}}}{1 - S_{r \text{ rés.}}} \right)^{\left(\frac{n}{1-n} \right)} - 1 \right)^{\frac{1}{n}} \quad \text{Terredurable: } \frac{s}{s_{\text{air}}} = \left(\frac{1}{S_{r \text{ eff}}} \right)^2 \quad \text{et } \chi = S_{r \text{ eff}} (C_{\text{air}} + n_{\text{air}} S_{r \text{ eff}})$$

où n est le paramètre de Van Genuchten, 1980



Le cisaillement en variables absolues



Le cisaillement en variables effectives

Arrangements périodiques de Taibi, 1994

