



Journée tassements des sols, 7 octobre 2020

Académie d'Agriculture de France

Le tassement des sols agricoles : aspects mécaniques

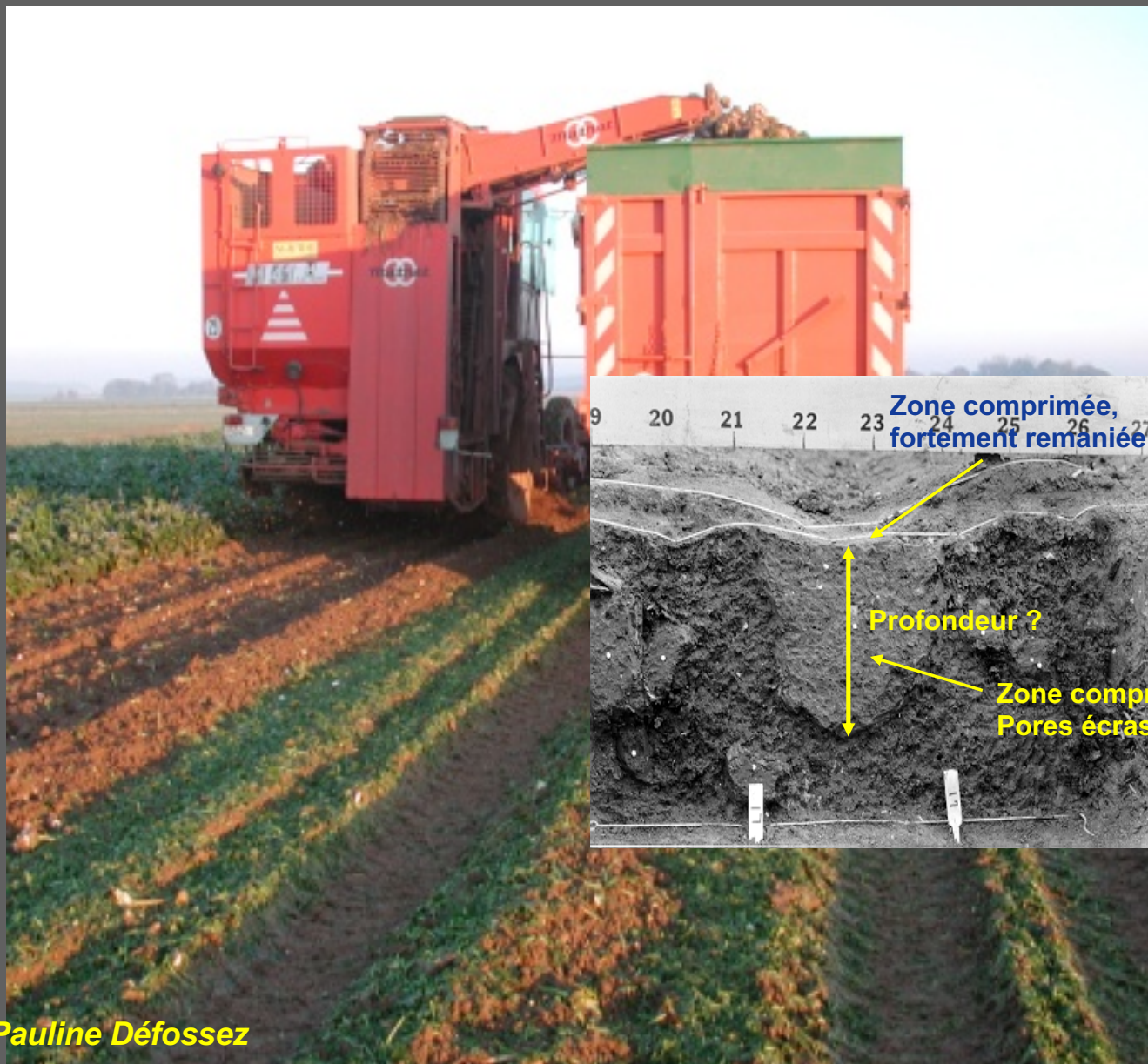
Pierre Delage

Ecole des Ponts ParisTech, Laboratoire Navier/CERMES, France





D'après Pauline Défossiez



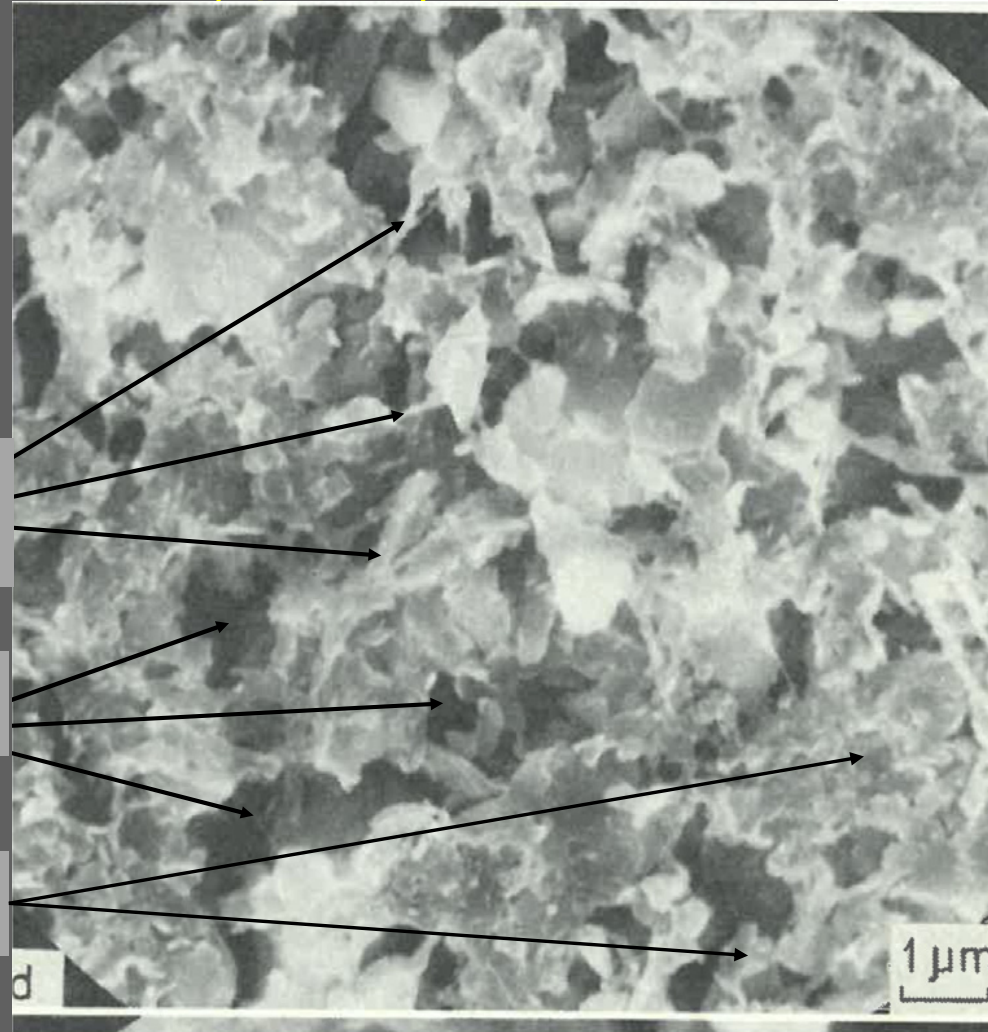
D'après Pauline Défossez

Observation microscopique : sol argileux lâche compressible (Québec)

Ponts argileux
Plaquettes $< 2\mu\text{m}$
(illite)

Pores ($1\mu\text{m}$)
écrasés par la compression

Agrégats de
plaquettes



Delage, Tessier, Audiguier 1982

Observation microscopique : sol argileux lâche compressible (Québec)

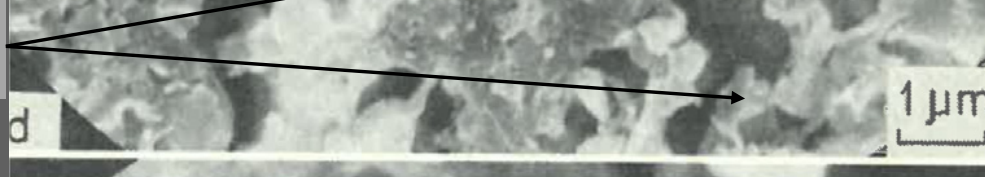


écrasés par la cor



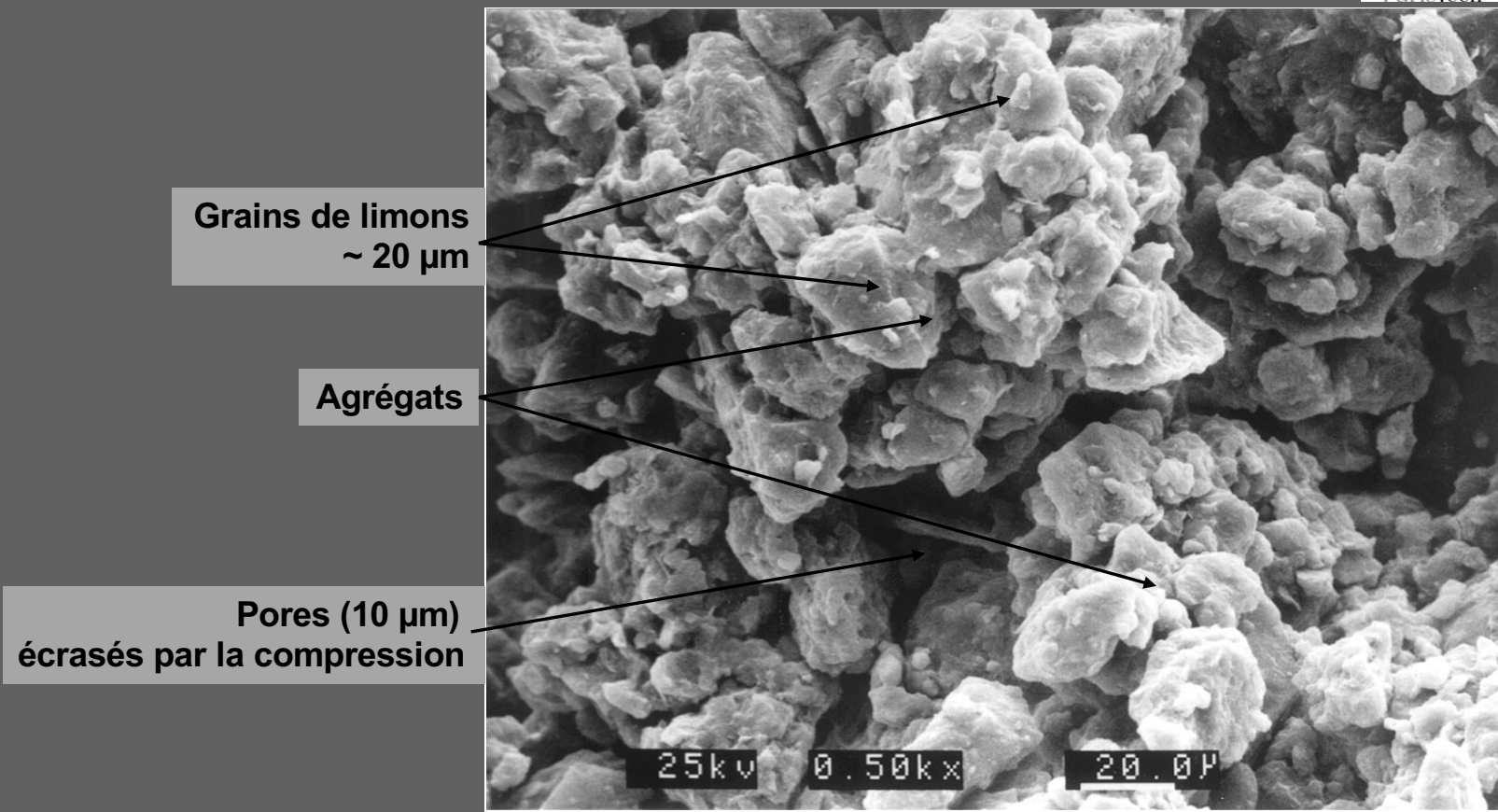
Glissement de St Jean-Vianney (Québec, 1971, 31 victimes)

Agrégats de
plaquettes



Delage, Tessier, Audiguier 1982

Observation microscopique : sol limoneux compacté (limon des plateaux, est de Paris)

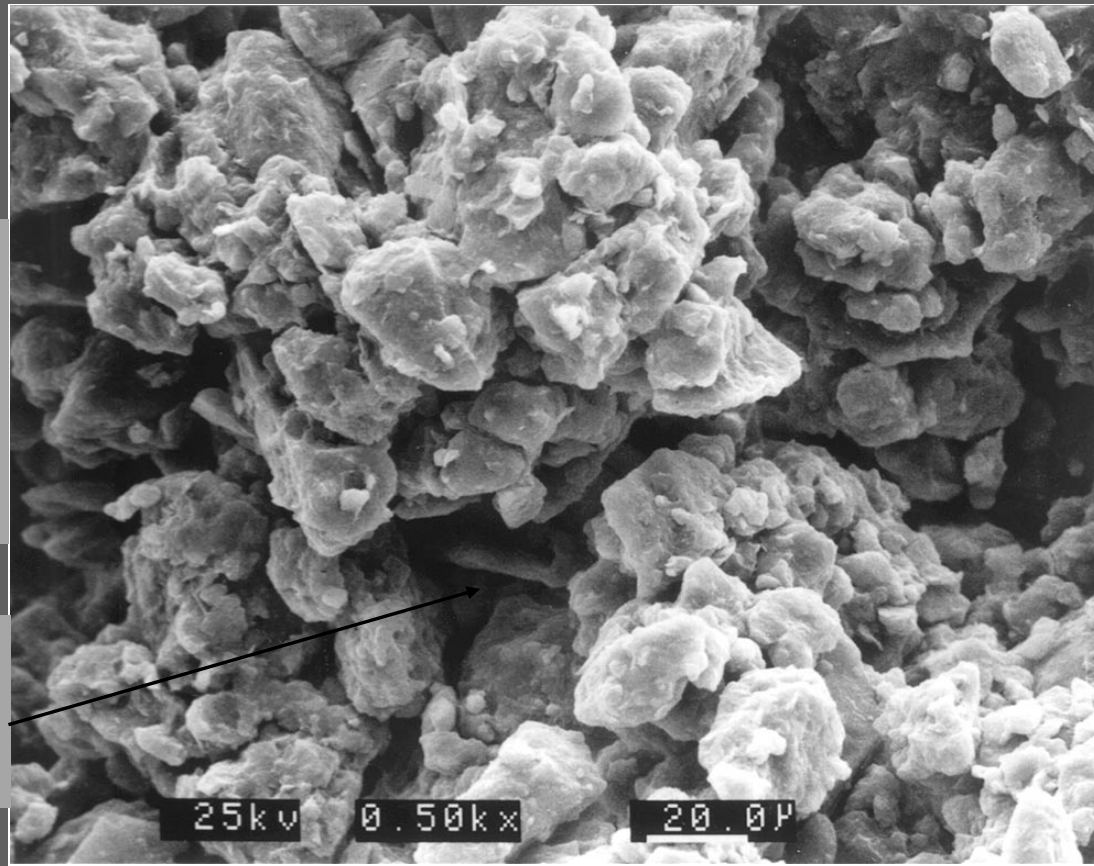


Delage et al. 1996

Observations microscopiques 2 : sol limoneux compacté (limon des plateaux)

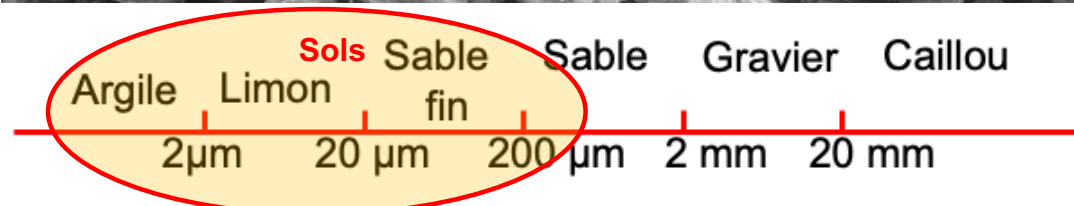
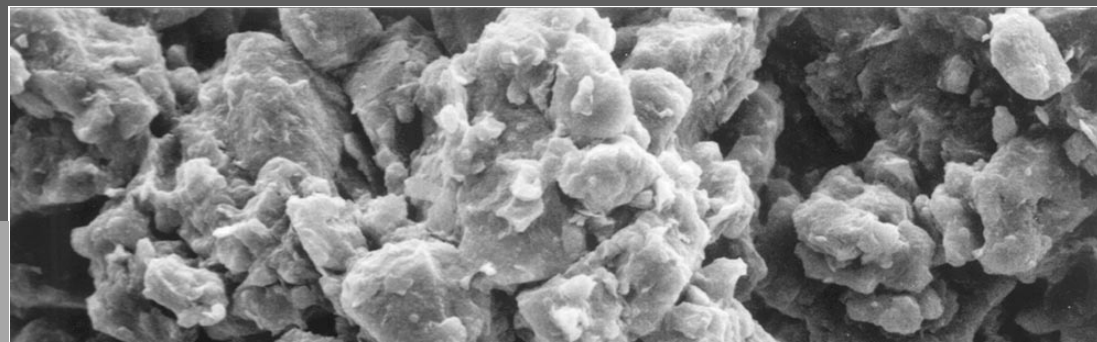
Minéralogie
Physico-chimie
Matière organique
Cations
pH
Oxydes
cf. D. Tessier

air/eau
Ressource en eau
Nutriments
Croissance racinaire

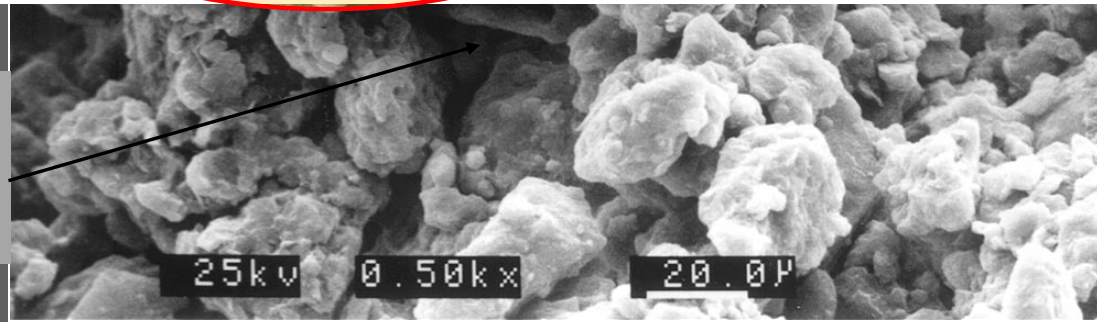


Observations microscopiques 2 : sol limoneux compacté (limon des plateaux)

Minéralogie
Physico-chimie
Matière organique
Cations
pH
Oxydes
cf. D. Tessier



air/eau
Ressource en eau
Nutriments
Croissance racinaire



Profils typiques de sols forestiers et agricoles



Prairie sur granite
(G. Bourrié)

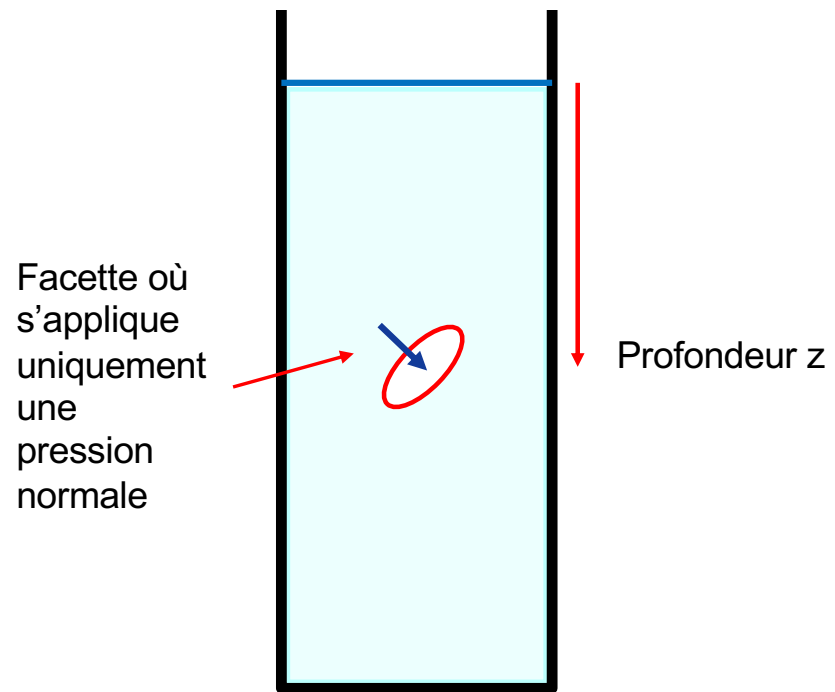


Prairie sur calcaire
(Référentiel pédologique
AFES 2008)



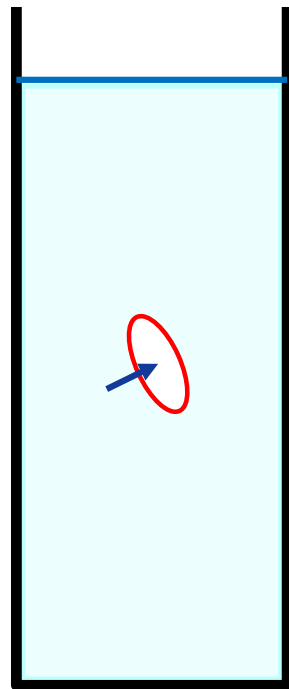
Brunisol, sol forestier
(Référentiel pédologique
AFES 2008)

Contraintes dans l'eau



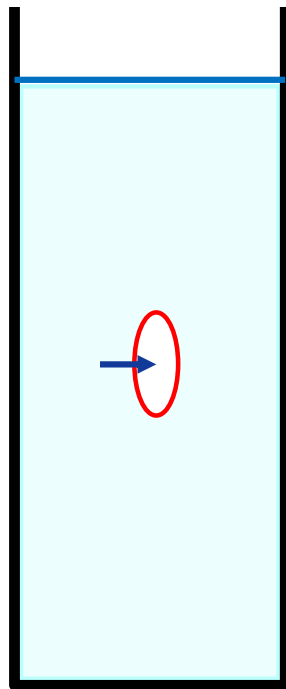
Contraintes dans l'eau

Facette où
s'applique
uniquement
une
pression
normale



Profondeur z

Contraintes dans l'eau



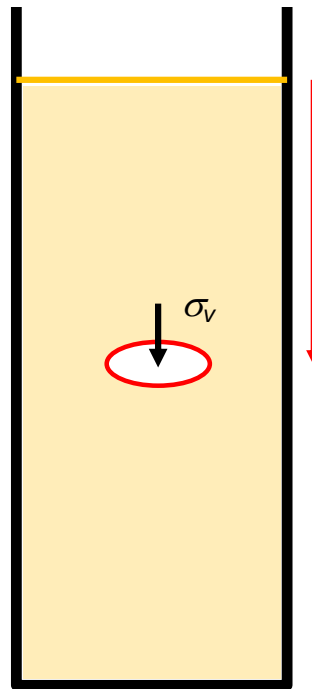
Profondeur z

Pression hydrostatique $p_w = \rho_w g z$: « poids » de la colonne d'eau
avec $\rho_w = 1 \text{ Mg/m}^3$

INDEPENDANT DE L'ORIENTATION

$p_w = 9,81 \text{ kPa à } 1 \text{ m}$

Contraintes dans les solides (sols)

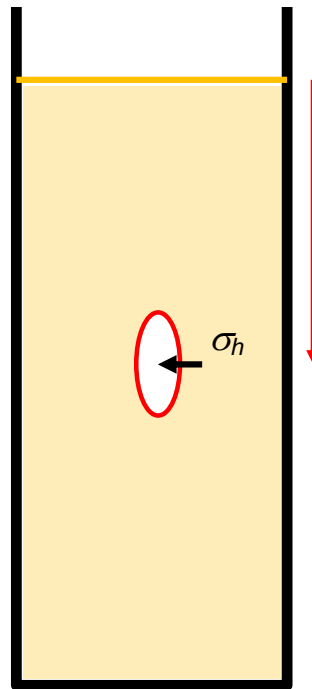


Profondeur z

Contrainte verticale $\sigma_v = \rho_s g z$: « poids » des terres
avec $\rho_s = 1,8 - 2 \text{ Mg/m}^3$

$\sigma_v = 19,62 \text{ kPa}$ à 1 m

Contraintes dans les solides (sols)

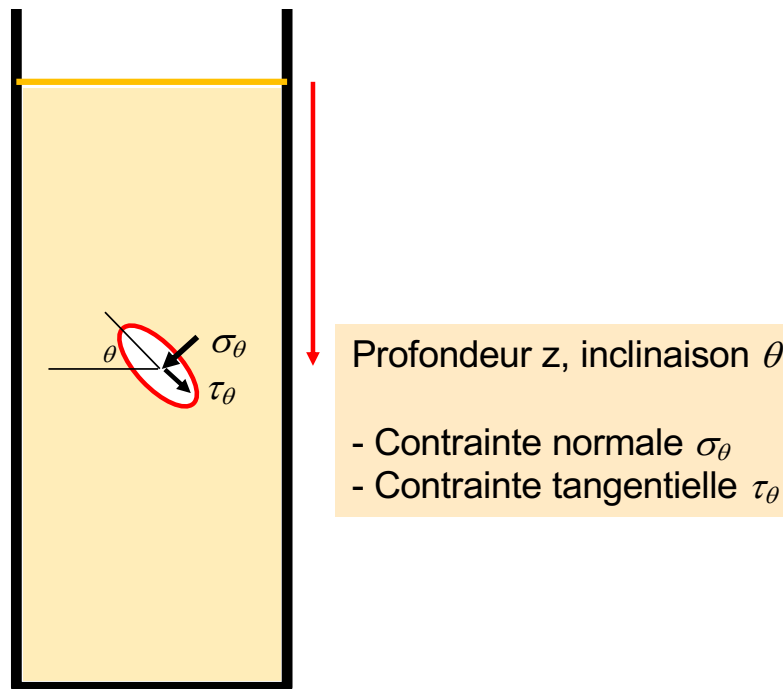


Profondeur z

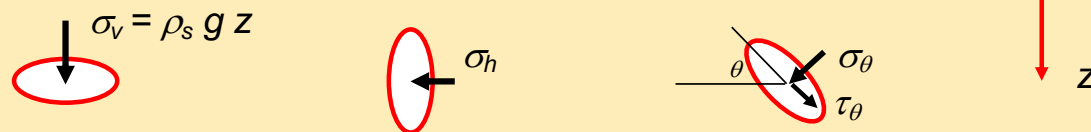
Contrainte horizontale : $\frac{1}{2} \sigma_v < \sigma_h < \sigma_v$

$9,81 \text{ kPa} < \sigma_h < 19,62 \text{ kPa}$ à 1 m

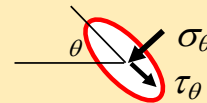
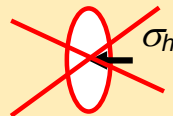
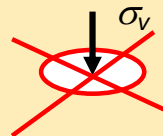
Contraintes dans les solides (sols)



Valable pour un massif semi-infini



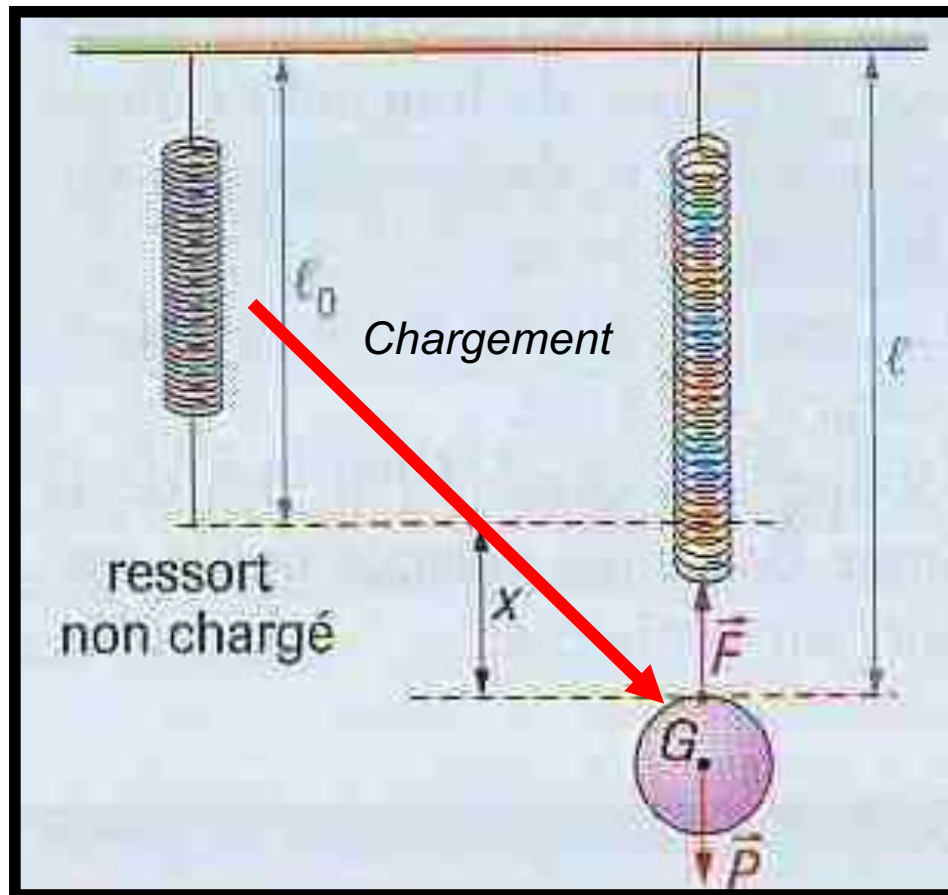
Pas valable avec une charge localisée



Nécessité d'un modèle de comportement :
relation entre
contraintes : tenseur $\sigma_{i,j}$
et déformations : tenseur $\varepsilon_{i,j}$

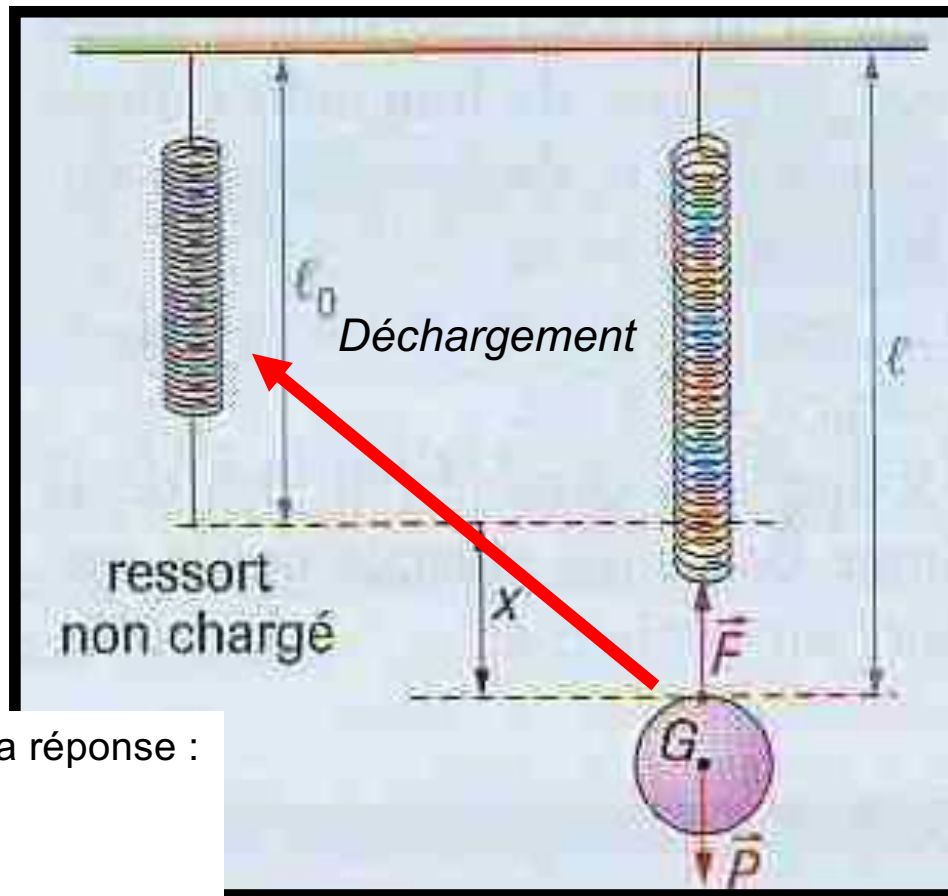
Modèle élastique: déformations réversibles

$$F = k (l - l_0)$$



Modèle élastique: déformations réversibles

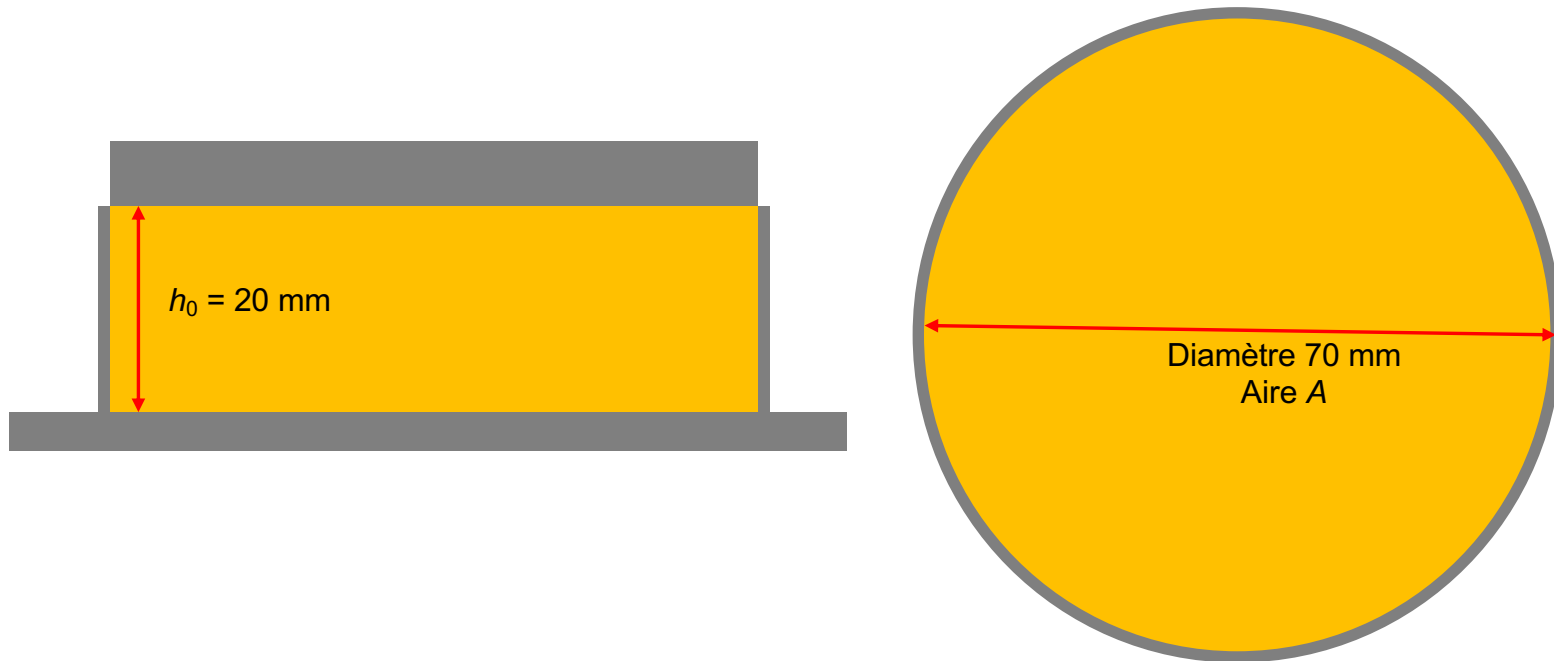
$$F = k (l - l_0)$$



Le coefficient k caractérise la réponse :

- k fort : raide
- k faible : déformable

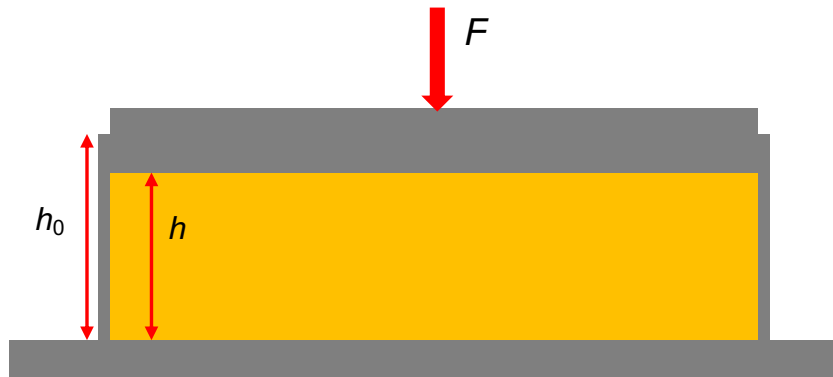
Œdomètre : compression unidimensionnelle



œdomètre

Force F sur aire A :

- contrainte verticale $\sigma_v = F/A$ (kN/m² ou kPa)
- déformation : $\varepsilon_v = (h - h_0)/h_0$ (sans dimension)



Comportement élastique (réversible)

ε_v proportionnel à $1/E \sigma_v$

E module d'Young (kPa)

Pour un chargement donné :

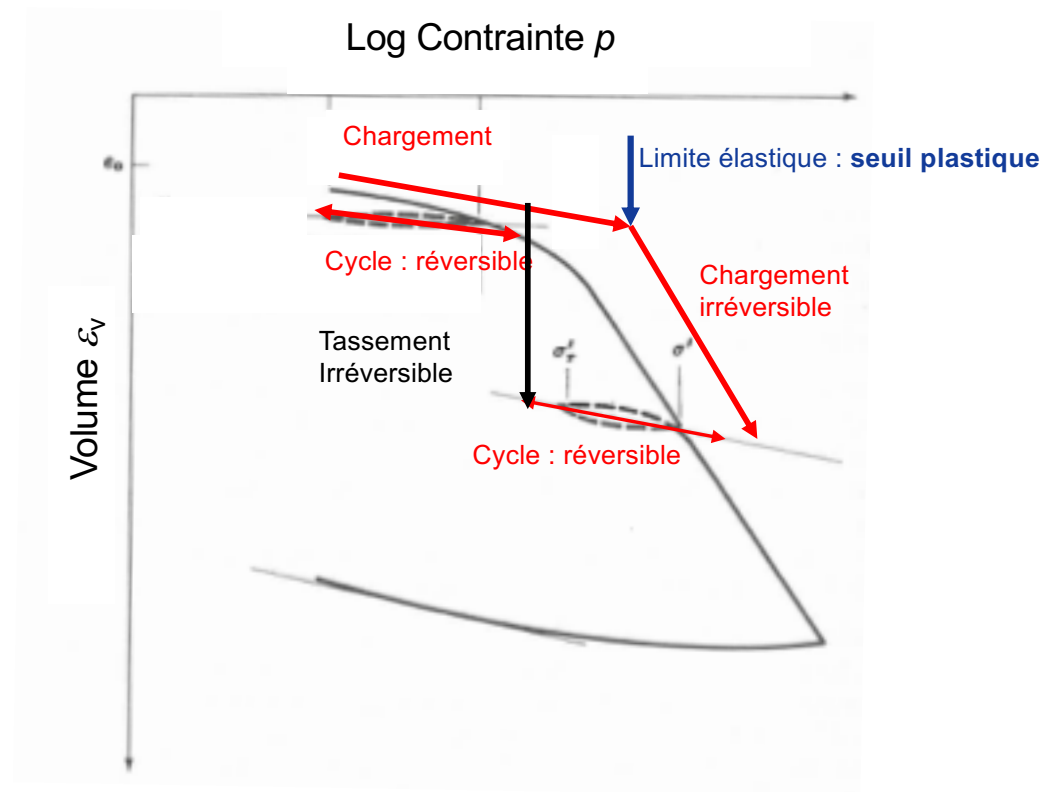
E fort : déformation faible

E faible : déformation forte
(comme k du ressort)

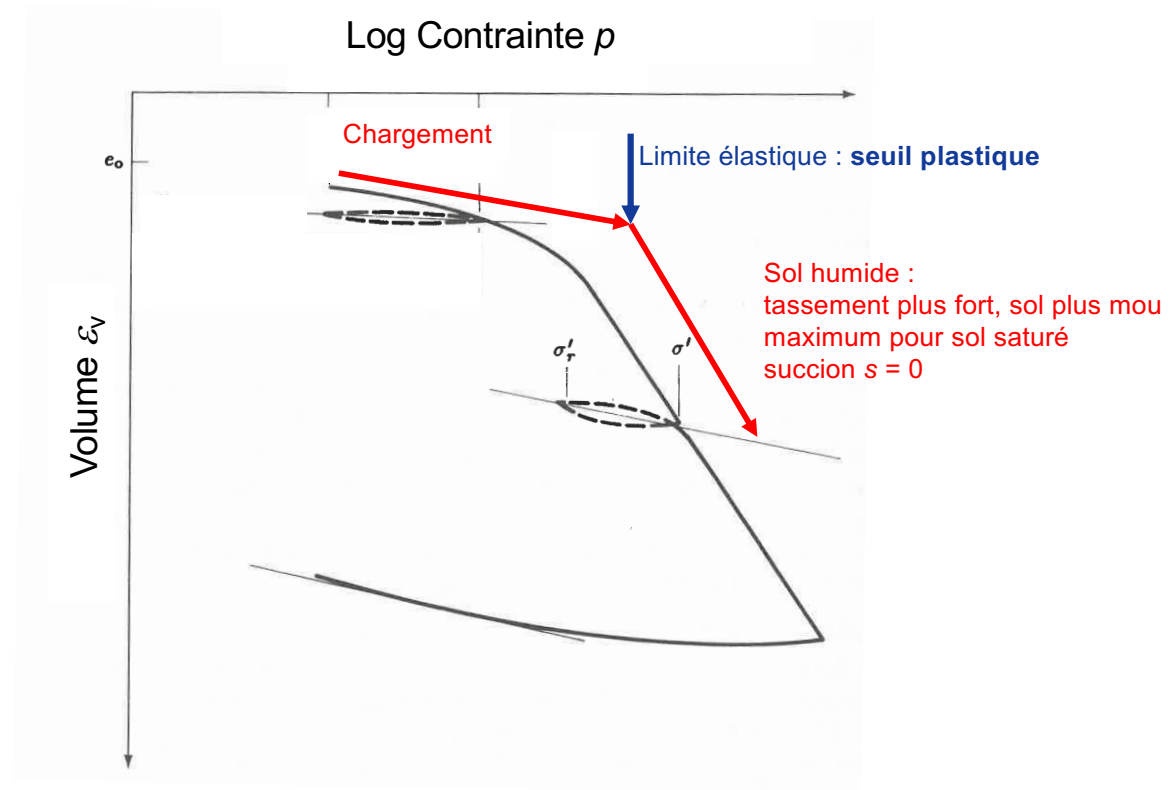
$$\varepsilon_v = \frac{1}{E} \left(1 - \frac{2\nu^2}{1-\nu} \right) \sigma_v$$

ν : coefficient de Poisson ($\nu = 0,3$)

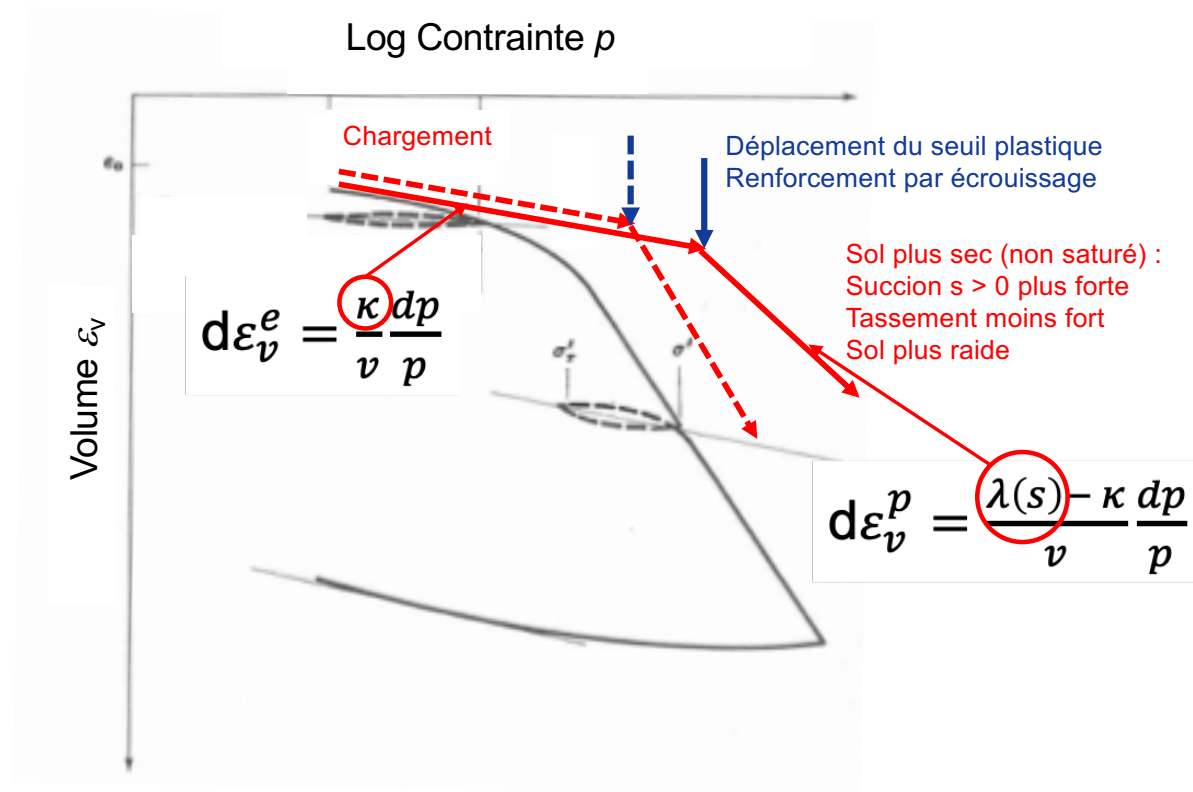
Comportement élasto-plastique des sols



Sols plus humides

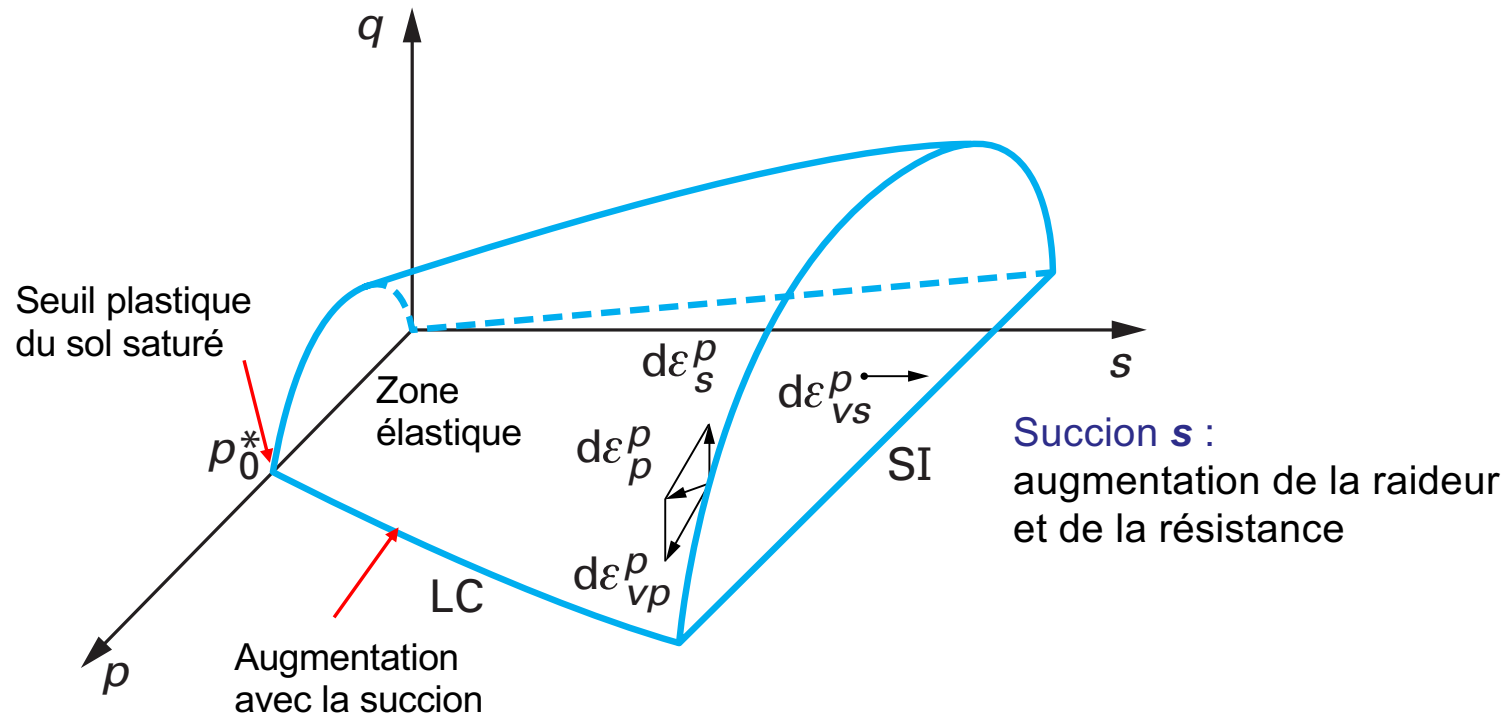


Sols plus secs (non saturés)



Barcelona Basic Model, Alonso et al. (1990)

Contrainte déviatorique $q = \sigma_1 - \sigma_3$ (avec $\sigma_3 = \sigma_2$)
déformations de distorsion, rupture par cisaillement



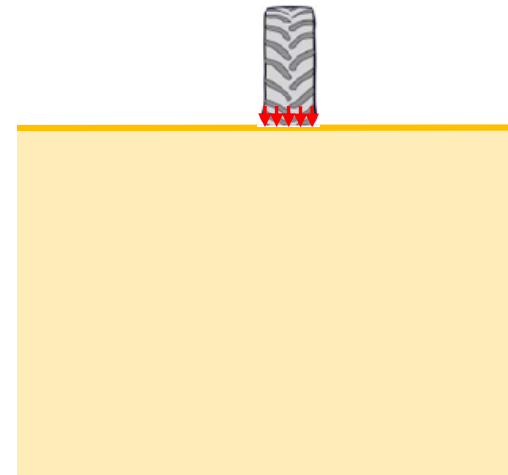
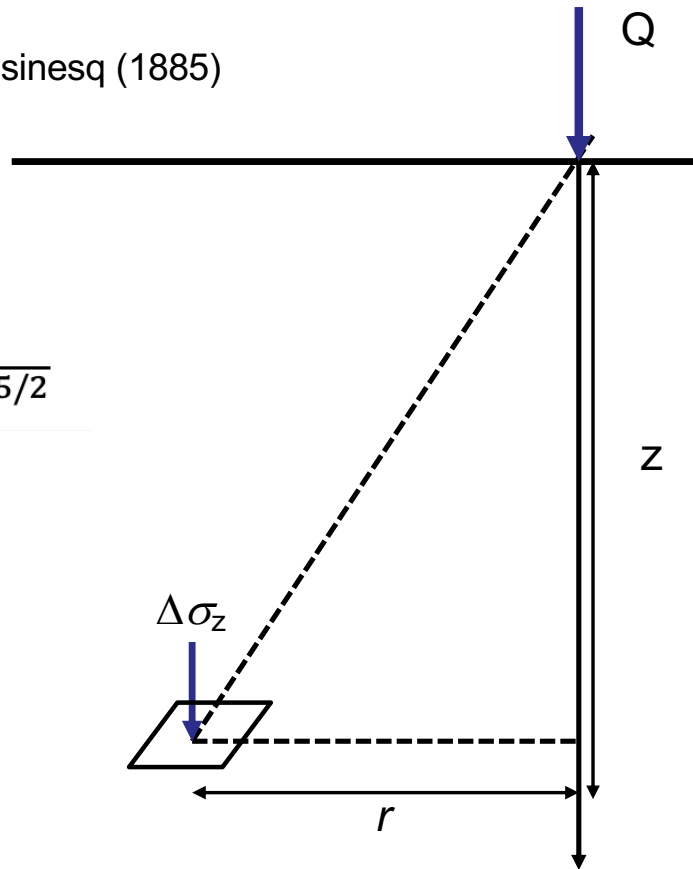
Contrainte moyenne $p = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/2$
déformations volumiques

Barcelona Basic Model, Alonso et al. (1990)

Calcul des contraintes, charge ponctuelle demi-espace élastique

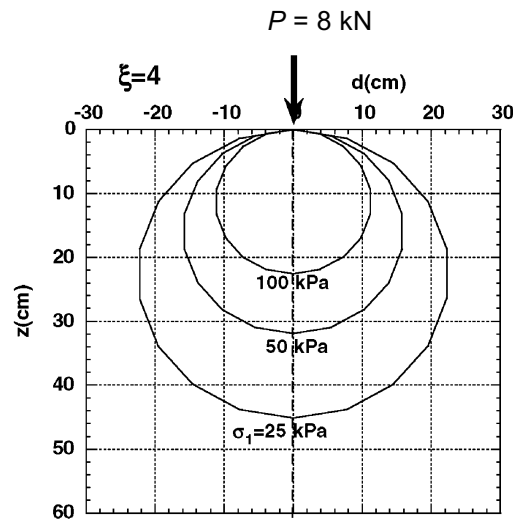
Solution analytique élastique de Boussinesq (1885)

$$\Delta\sigma_z = \frac{3Q}{2\pi} \frac{z^2 r}{(r^2 + z^2)^{5/2}}$$



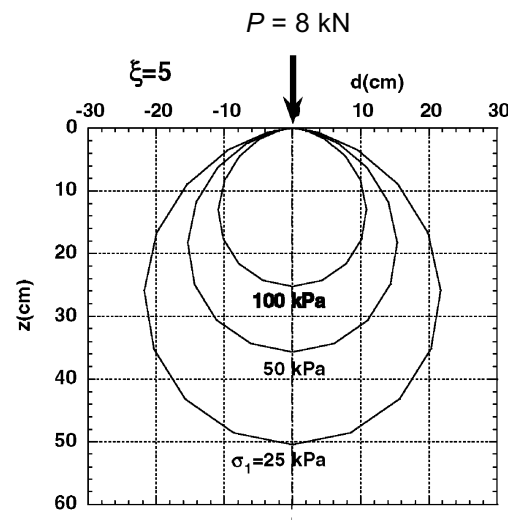
Calcul des contraintes, charge ponctuelle demi-espace élastique

Amélioration par Fröhlich (1934) : $\sigma_1 = \frac{\xi P}{2\pi r^2} \cos^{\xi-2} \theta$

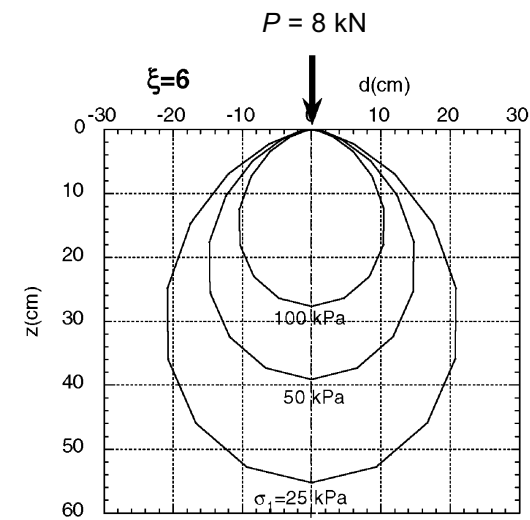


Söhne (1958) : $\xi = 4$: sol raide

Sol plus sec
suction élevée



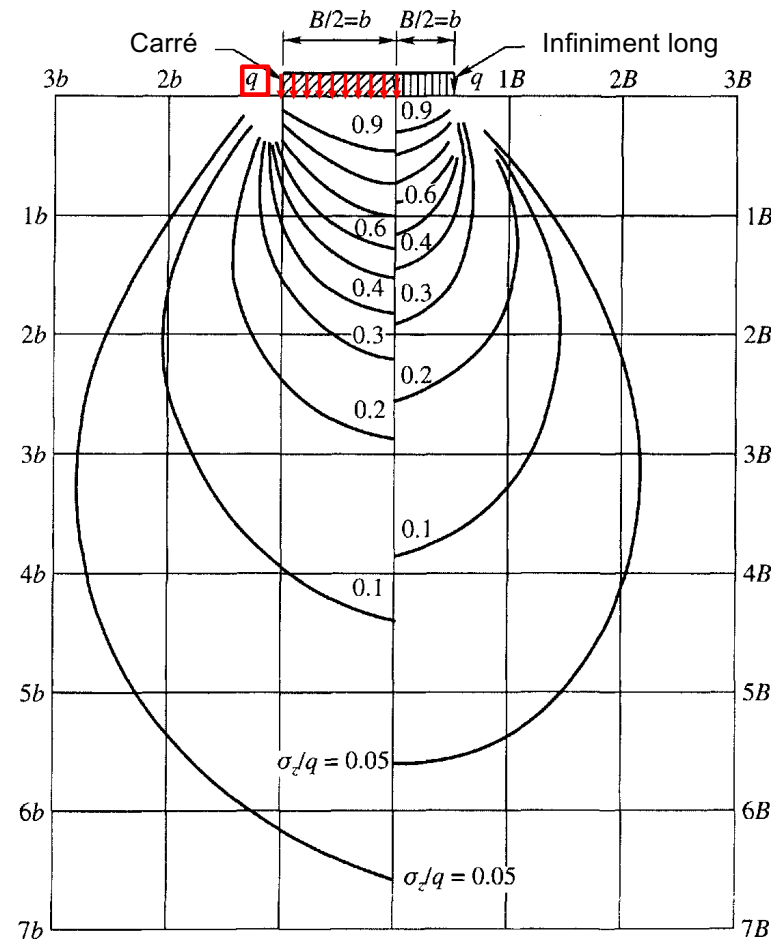
$\xi = 5$: sol moins raide



$\xi = 6$: sol mou

Sol plus humide
Suction faible, voire nulle

Diffusion des contraintes dans un massif élastique



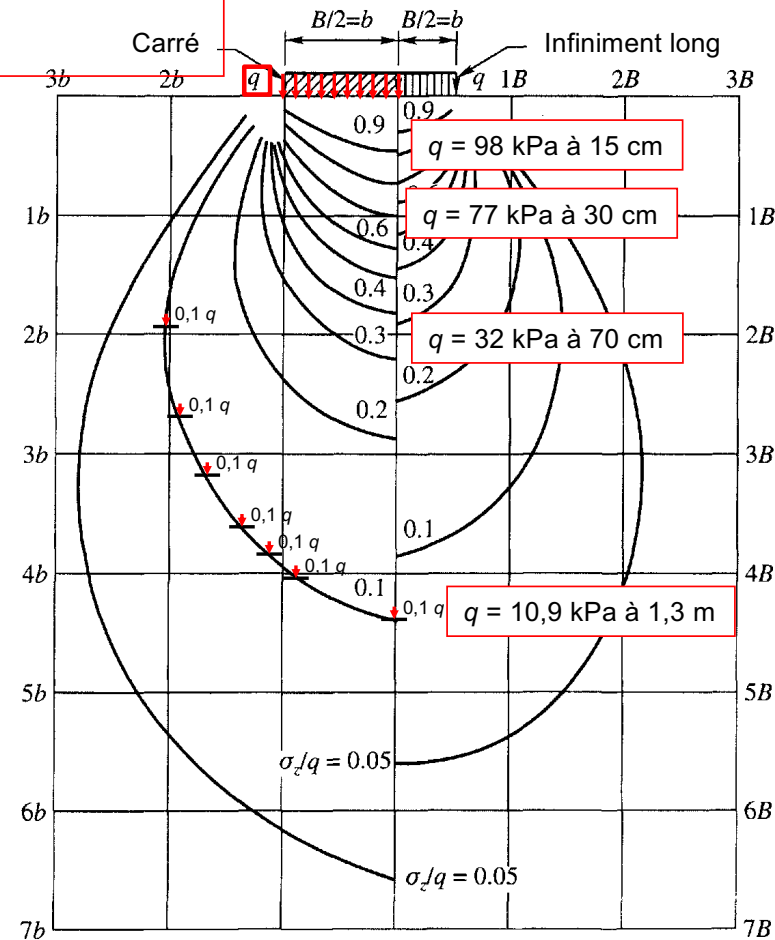
Intégration de Boussinesq

Milieu élastique, isotrope, linéaire, homogène (!)

Seulement contrainte verticale σ_v
(on peut calculer les autres composants)

Diffusion des contraintes dans un massif élastique

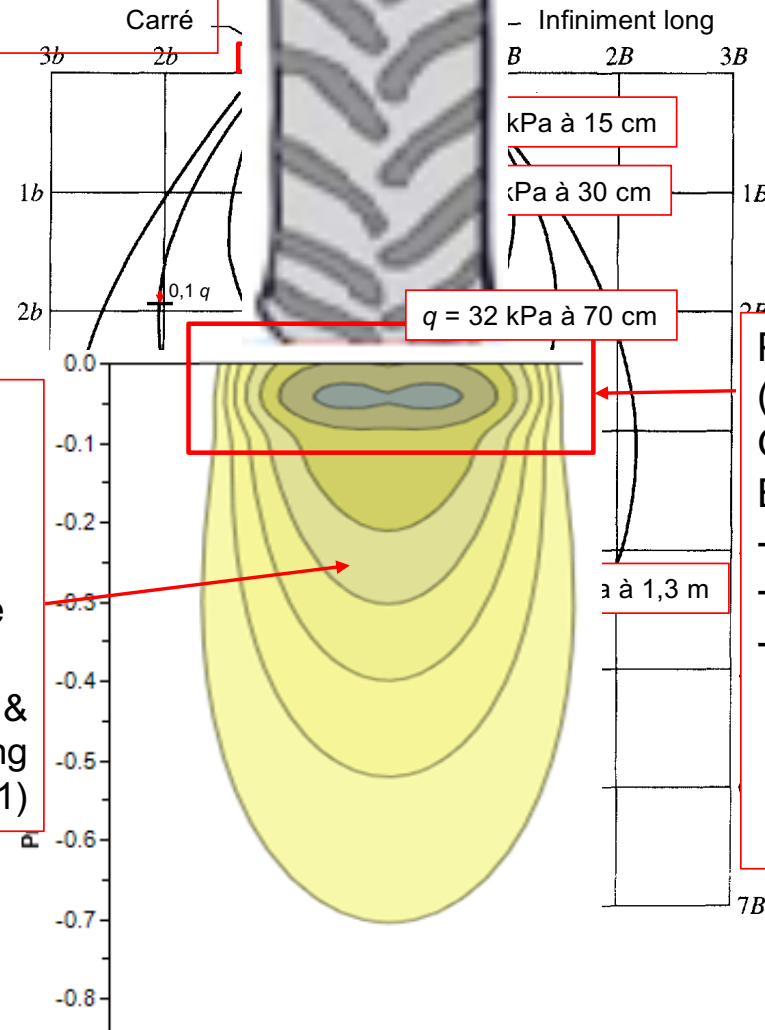
H. Boizard : pneu 600/65R34 avec 5 T
 $q = 107 \text{ kPa}$
 $b = 30 \text{ cm}$



Diffusion des contrain

un massif élastique

H. Boizard : pneu 600/65R34 avec 5 T
 $q = 107 \text{ kPa}$
 $b = 30 \text{ cm}$



Estimation
des
contraintes
raisonnable
selon Söhne

cf. Lamandé &
Schjønning
(2011)

Plastification

(labour – non labour)

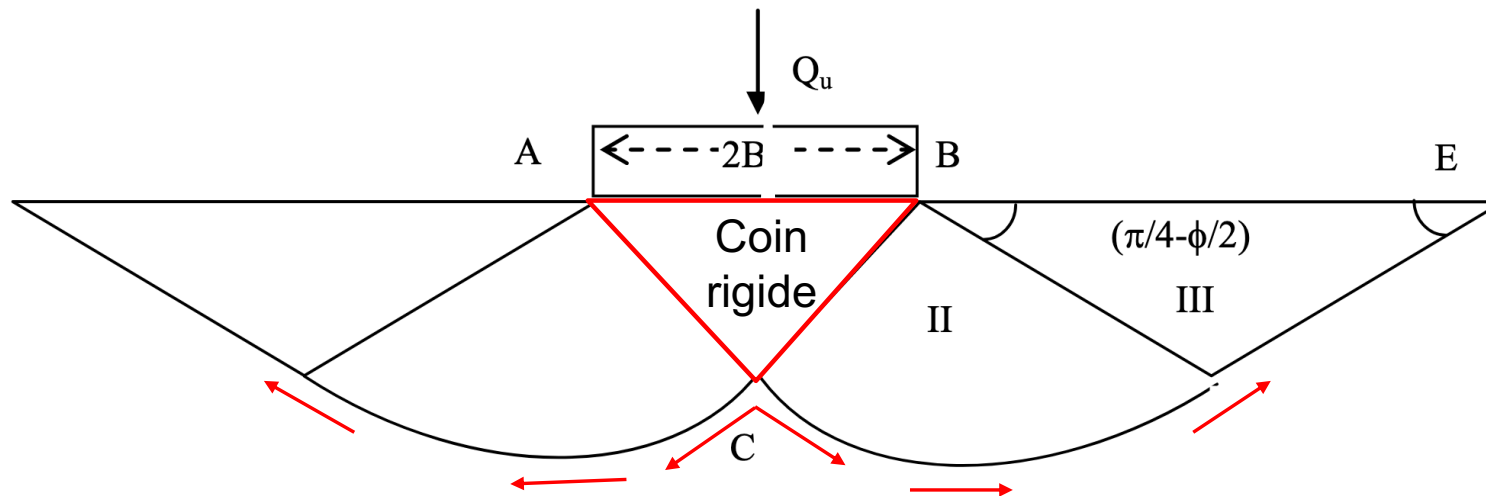
Grandes déformations

Effets de

- Pression du pneu
- Forme de l'interface
- Rigidité du sol
(humidité - succion)

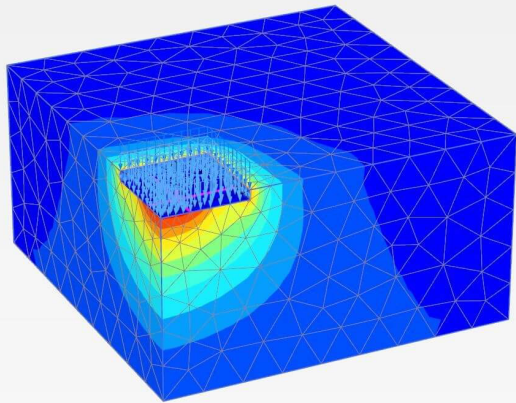
cf. Lamandé & Schjønning
(2011)

Rupture par poinçonnement possible



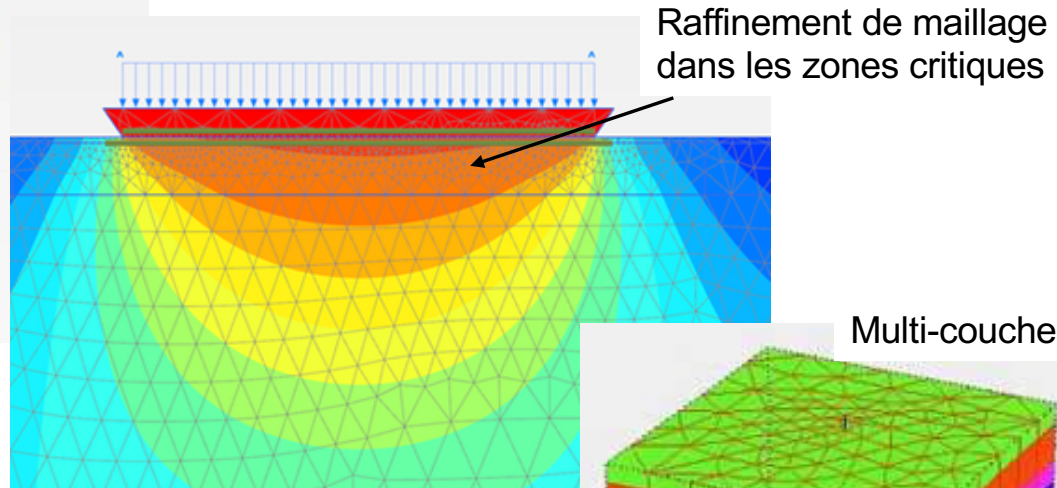
Calculs par éléments finis

Calculs 3D



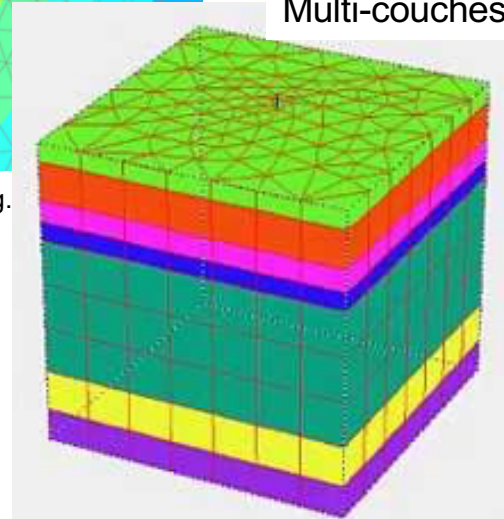
PLAXIS 3D Tutorial 01: Foundation in overconsolidated clay

Tenseur de contraintes complet (pas que σ_v)



<https://www.subsea-geotechnical-engineering-foundations.html>

Multi-couches, anisotropie



PLAXIS 3D Shallow Foundation

- Éléments finis : pertinence des lois de comportement ?
 - Valable en petites déformations
 - Grandes déformations (distorsion) pour l'interface comprimée pneu – sol : modélisation difficile
 - Validité des modèles élasto-plastiques utilisés :
Cam – Clay ?
 - Dépendance vis à vis des cycles de succion
- Forme de l'interface sol-pneu (ellipse)
- Anisotropie
- Hétérogénéités
- Utilisation satisfaisante et fréquente de Boussinesq – Söhne en profondeur