Actions sur les éléments de soutènement (Long terme): Poussée/butée des terres Etats Actif-passif

Ouvrages Geotechniques – Civil-306

B. Lecampion

EPFL

GeoEnergyLab

Agenda

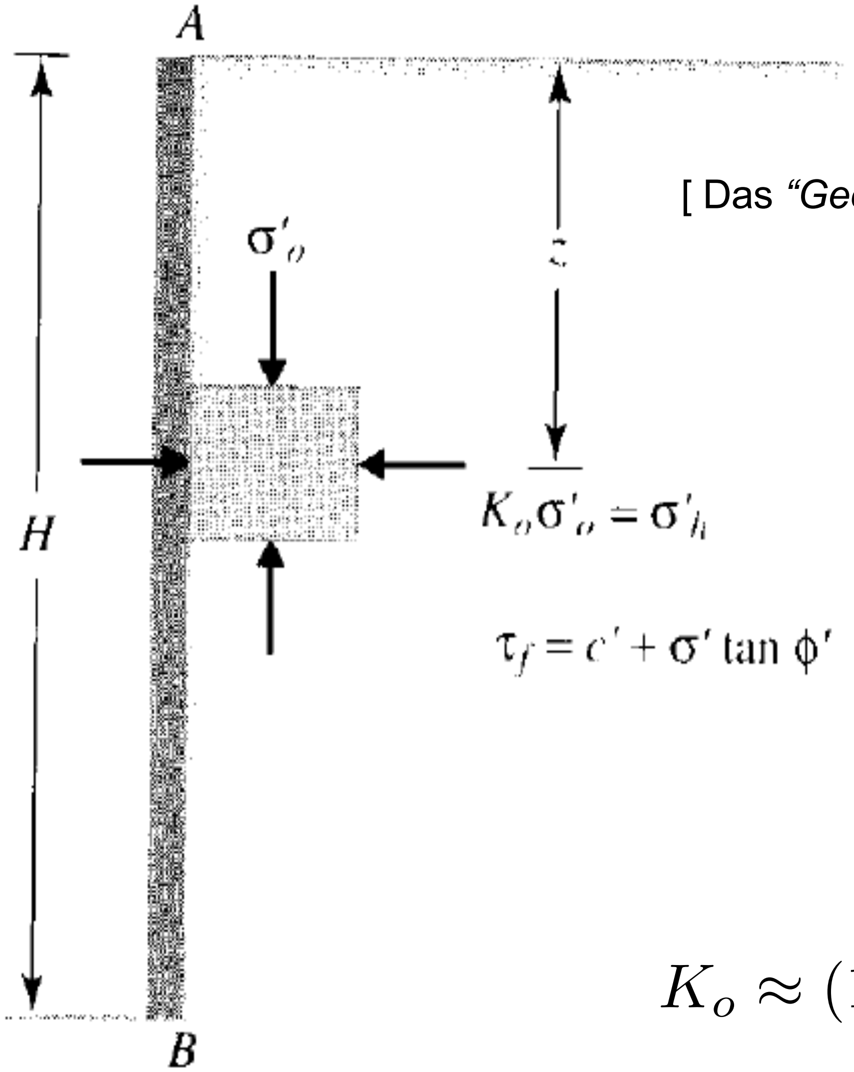
1. Rankine
2. Coulomb
3. Surface de rupture courbe
4. Choix en pratique & actions sur la paroi

On se focalise ici sur les calculs **long terme (conditions drainées)** en vue du calcul aux **ELU** des murs poids & des parois de soutènement pour les excavations profondes en terrain meubles

On verra le cas court terme (très important pour les excavations dans des argiles) dans les semaines à venir.

Au repos

$$\sigma'_h = K_o \sigma'_v$$



[Das *"Geotechnical Engineering"*]

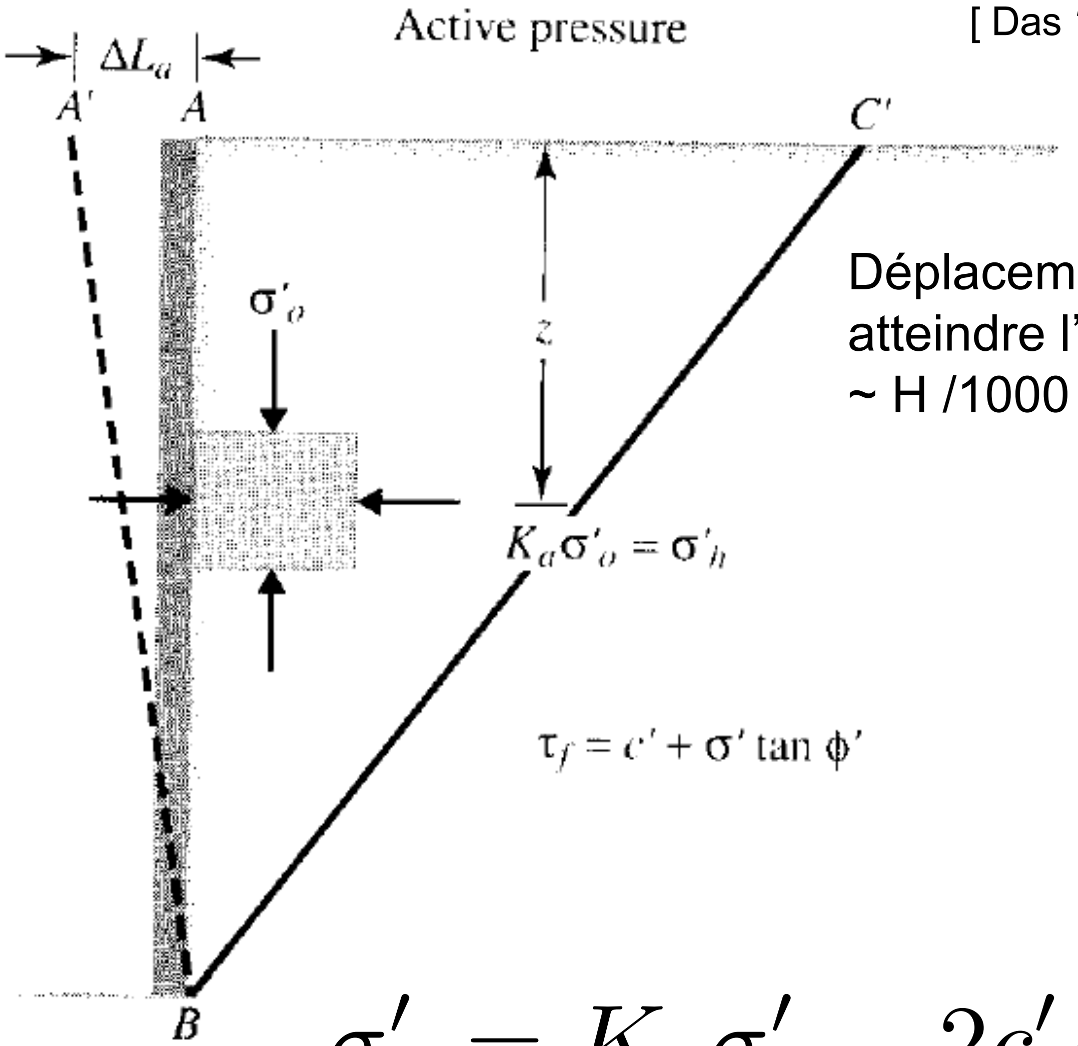
Jaky

$$K_o \approx (1 - \sin\phi')\, OCR^{\sin\phi'}$$

Actif

Le sol est actif (et pousse l'écran)

[Das *"Geotechnical Engineering"*]



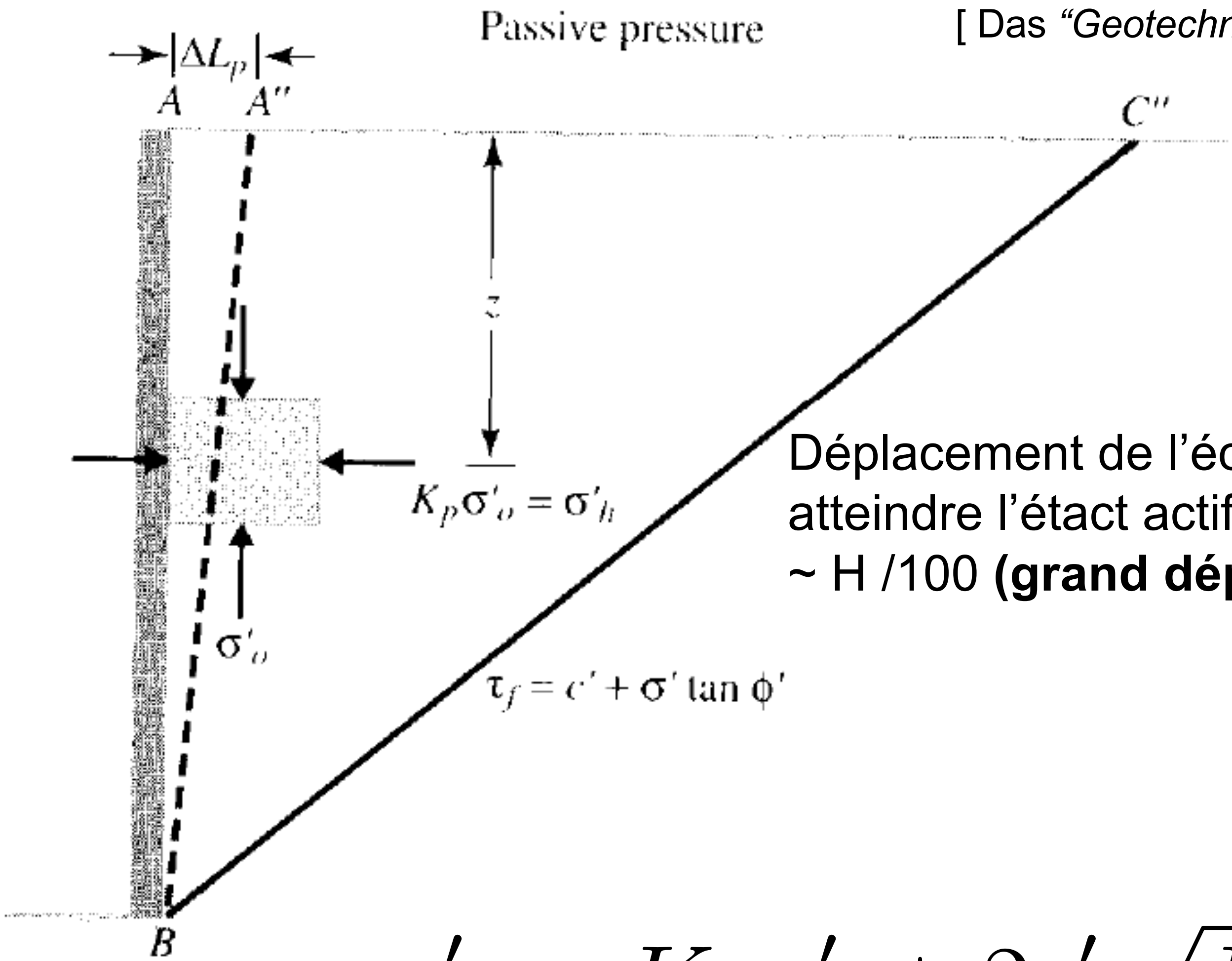
Déplacement de l'écran pour atteindre l'étact actif:
~ H /1000 (**petit déplacements**)

$$\sigma'_h = K_a \sigma'_v - 2c'\sqrt{K_a}$$

Passif

Le sol est passif (l'écran met en butée le sol)

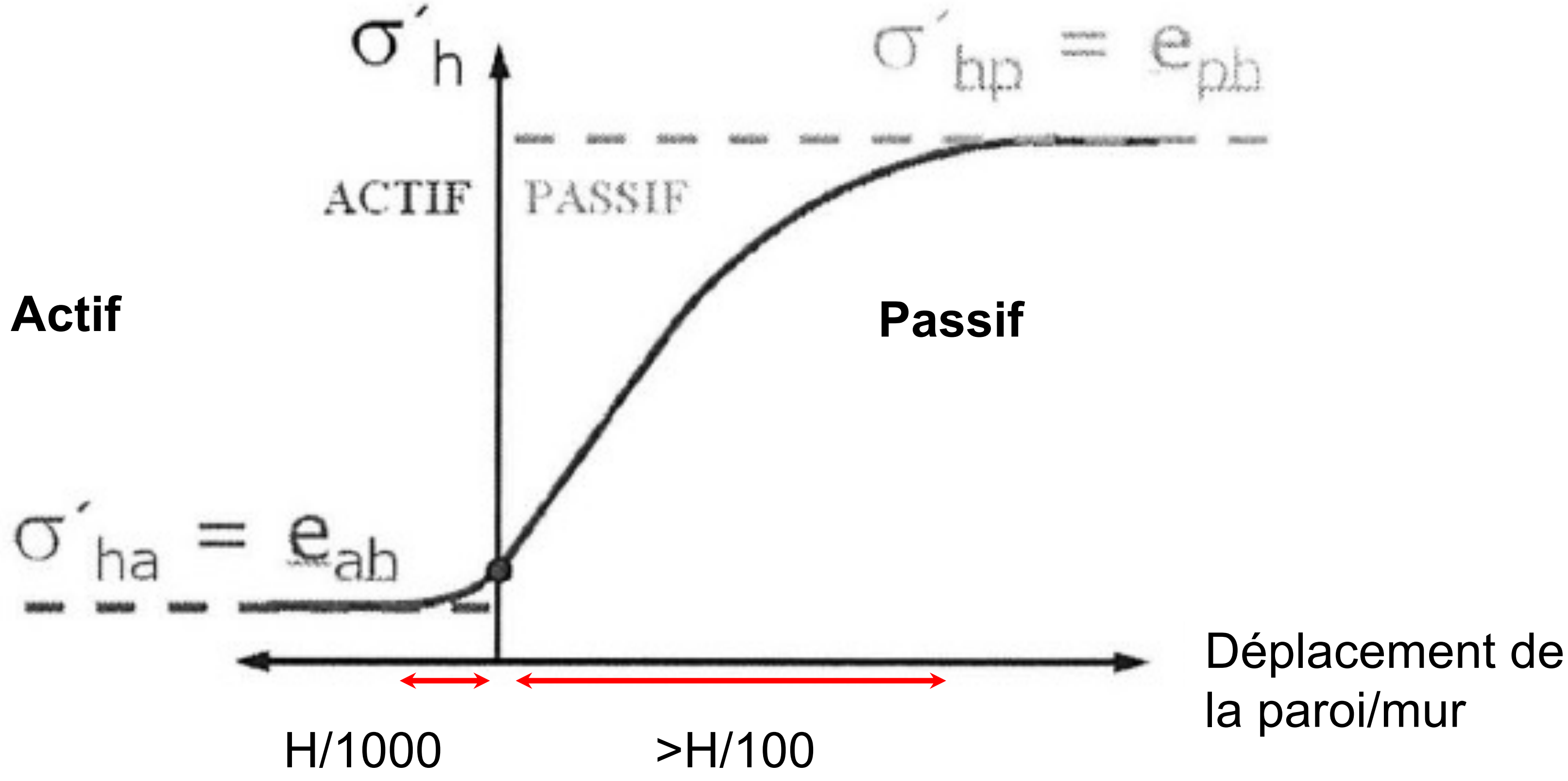
[Das *"Geotechnical Engineering"*]



Déplacement de l'écran pour atteindre l'étact actif:
~ H /100 **(grand déplacements)**

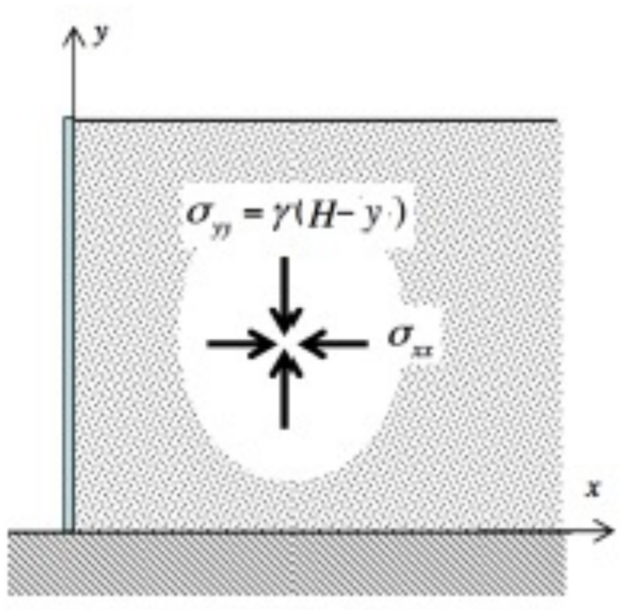
$$\sigma'_h = K_p \sigma'_v + 2c' \sqrt{K_p}$$

Actif - Passif

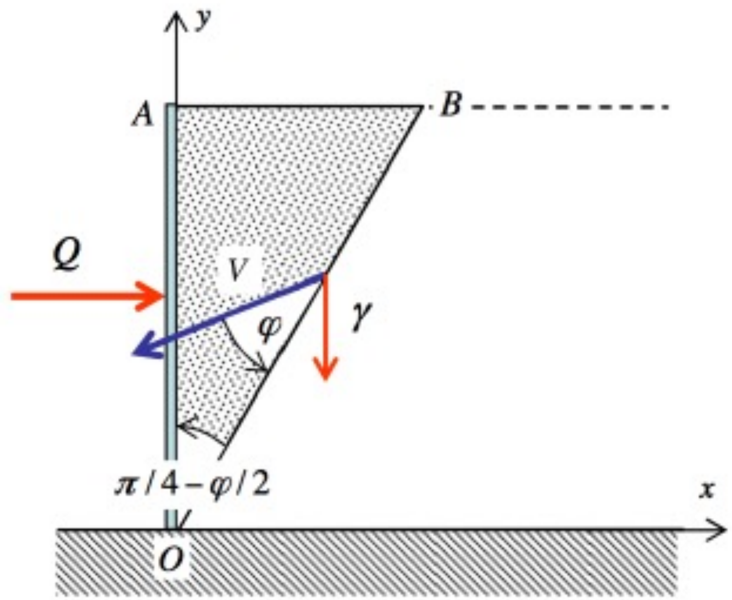


Rankine – Etat actif - cf série #3

Par l'intérieur / statique



Par l'extérieur / cinématique



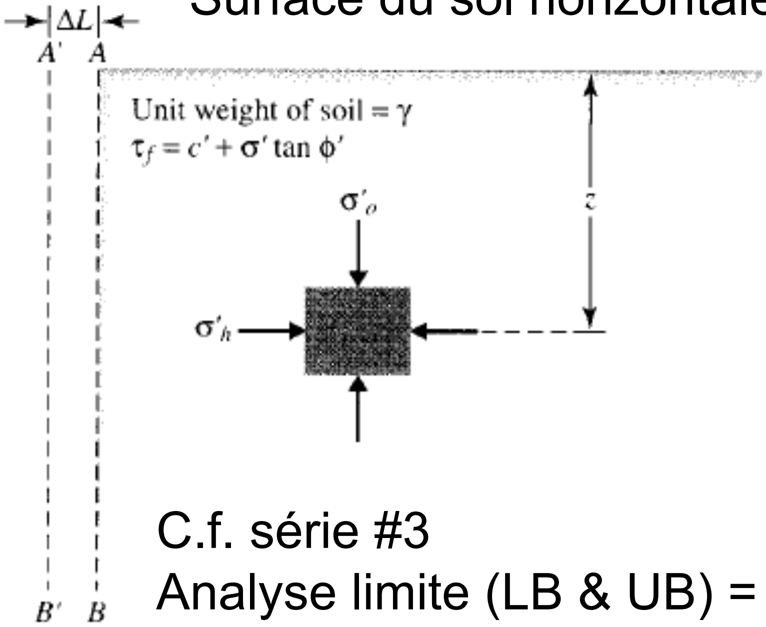
Les 2 bornes sont égales -> résultat exact

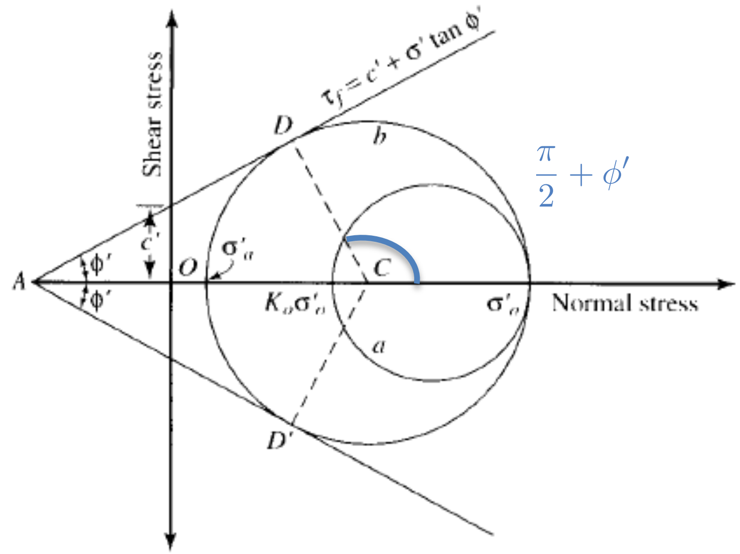
Notez que l'approche statique se résume à écrire le critère de rupture en contraintes dans ce cas très simple

Rankine – Etat actif

Surface du sol horizontale

[Das *"Geotechnical Engineering"*]



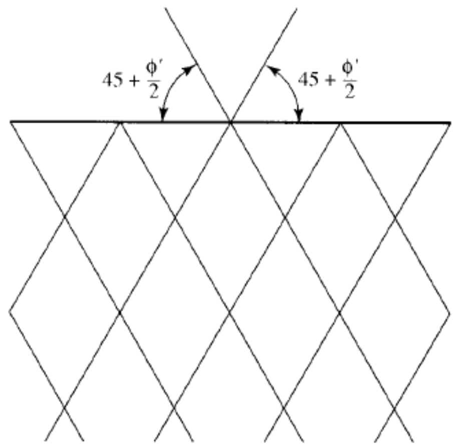


C.f. série #3

Analyse limite (LB & UB) = Rankine

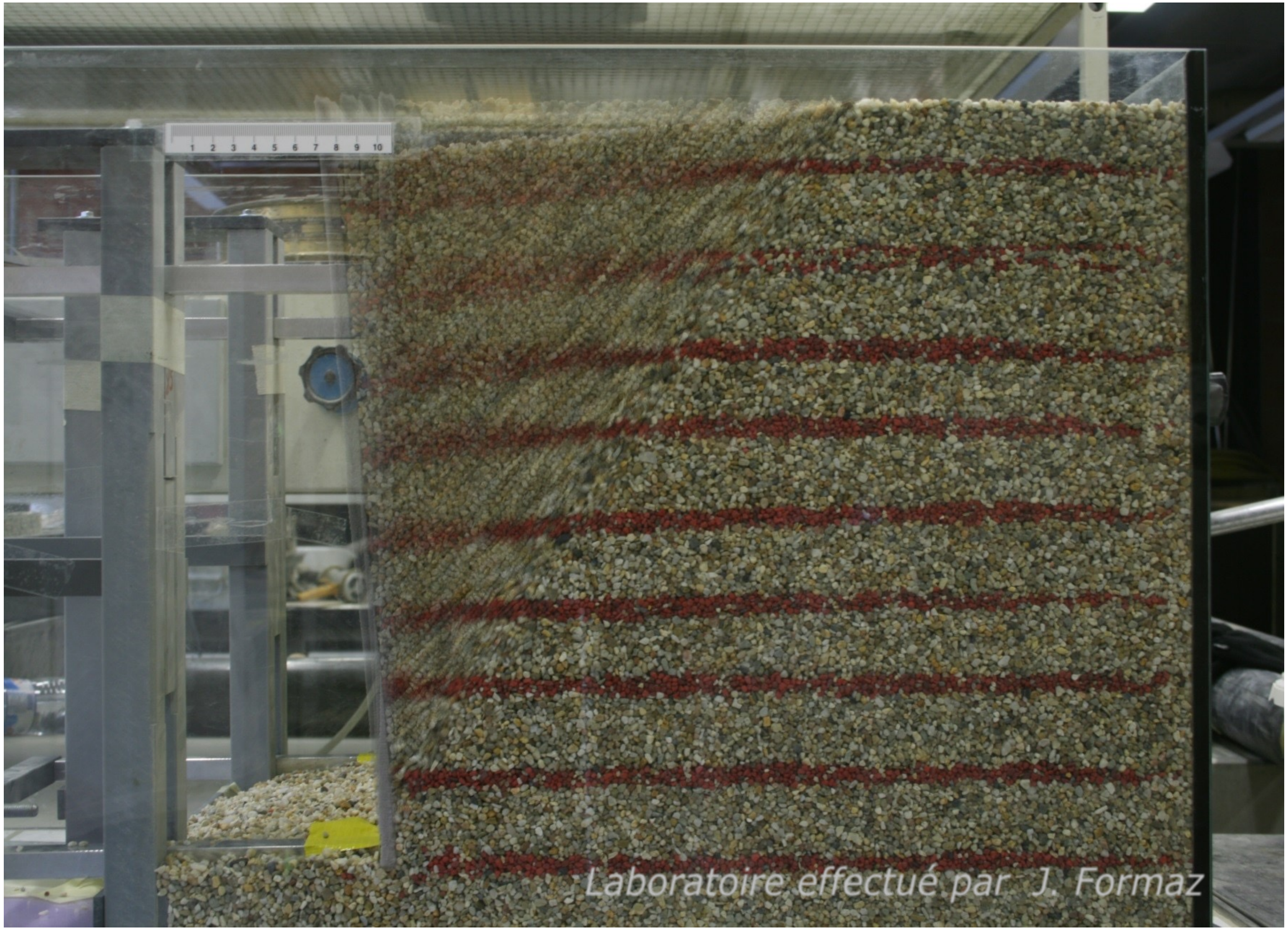
(surface de rupture droite)

$$\sigma'_h = K_a \sigma'_v - 2c'\sqrt{K_a}$$



$$K_a = \frac{1 - \sin\phi'}{1 + \sin\phi'} = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi'}{2}\right)$$

Mécanisme de rupture de Rankine
(pour une rotation d’une paroi lisse autour de son pied)



Mécanisme de rupture
(pour une translation horizontale d'une paroi rugueuse)

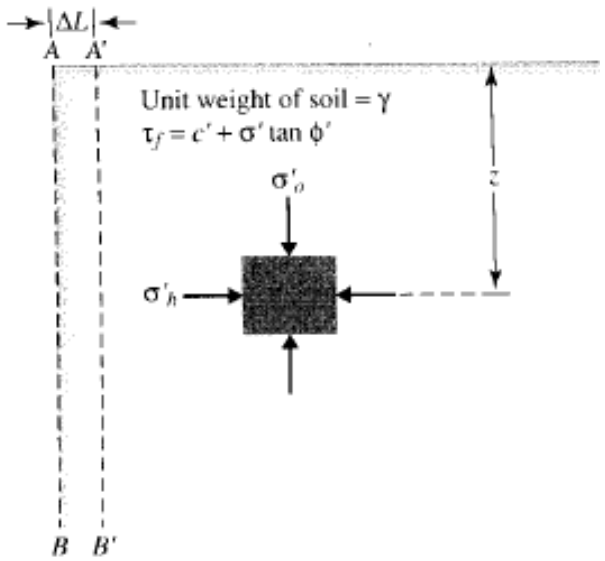
Mécanisme de rupture concave actif

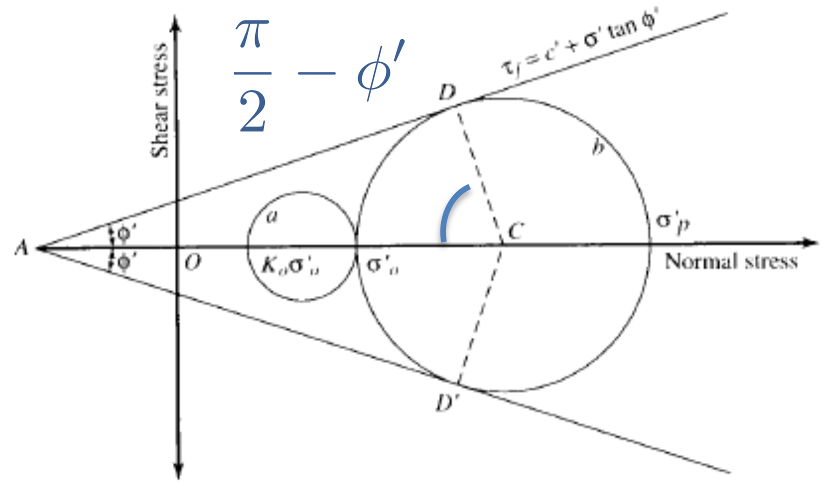
(pour une rotation d’une paroi rugueuse autour d’un appui)

Laboratoire effectué par J. Formaz

Rankine – Etat passif

Idem cf Série #3

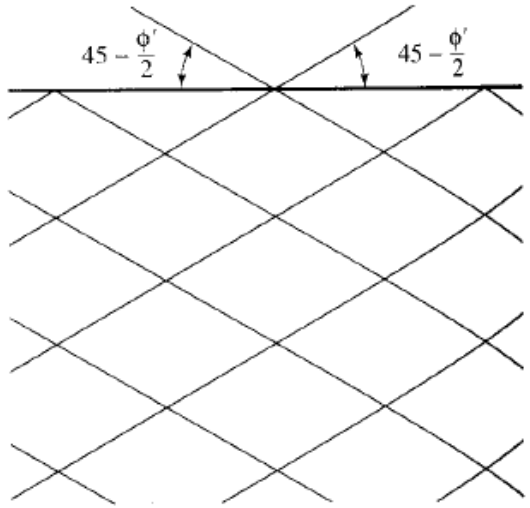




[Das *"Geotechnical Engineering"*]

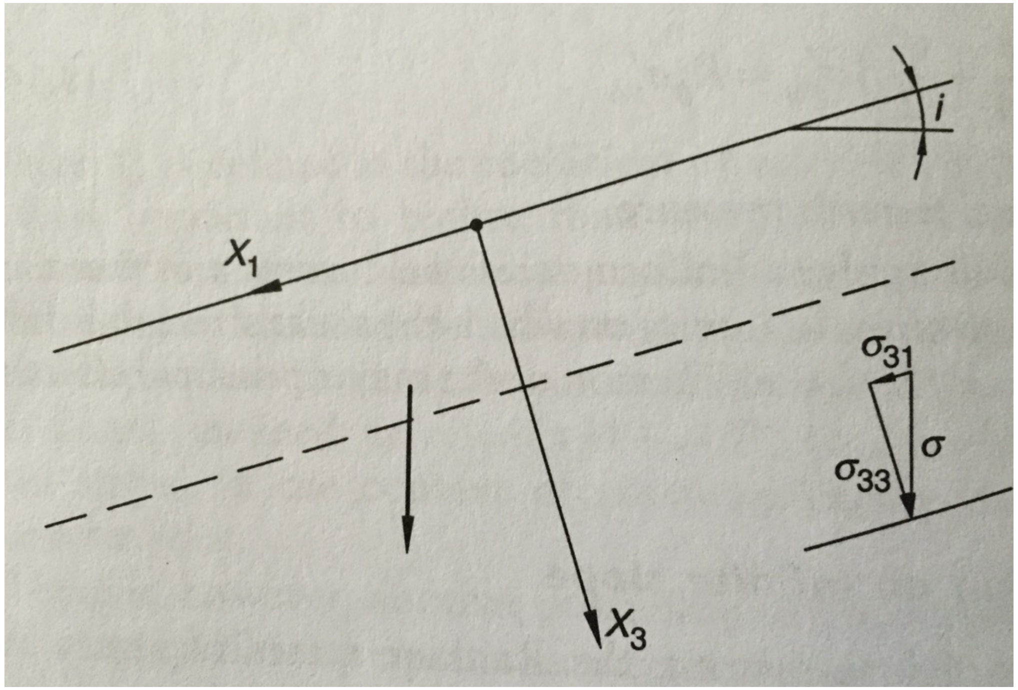
$$\sigma'_h = K_p \sigma'_v + 2c'\sqrt{K_p}$$

$$K_p = \frac{1+\sin\phi'}{1-\sin\phi'} = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi'}{2}\right)$$



Rankine – Surface inclinée

Cf derivation au tableau



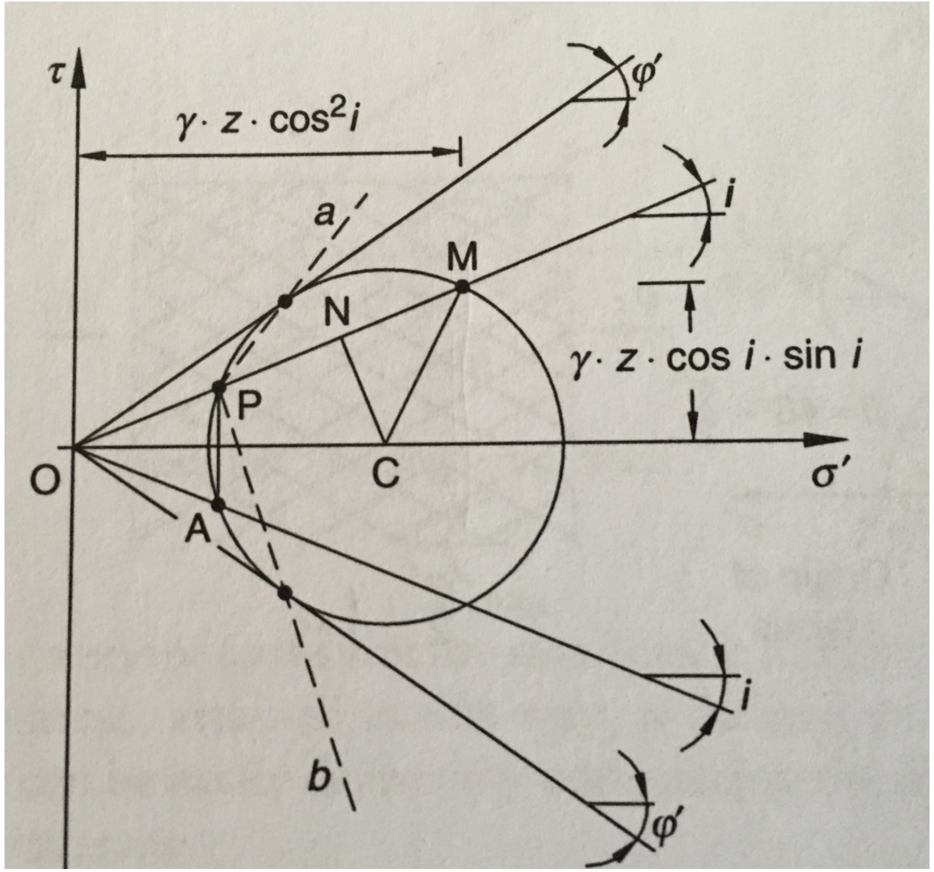
Z: direction verticale

$$\sigma_{33} = \gamma z \cos^2 i$$

$$\sigma_{13} = \gamma z \cos i \sin i$$

Rankine – Surface inclinée

Cercle de Mohr



$$\mathrm{OM} = \sigma'_v \qquad \mathrm{OA} = \sigma'_a$$

$$\mathrm{ON} = \mathrm{OC}\cos i$$

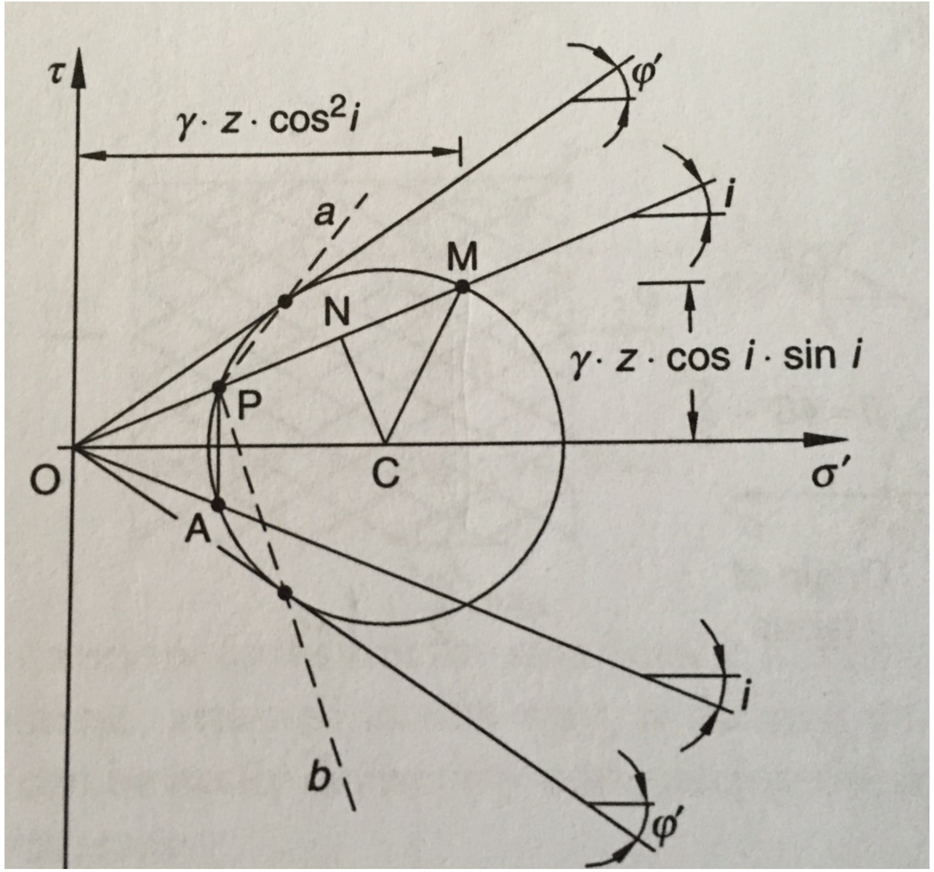
$$\mathrm{NC} = \mathrm{OC}\sin i$$

$$\mathrm{MC} = \mathrm{OC}\sin\phi'$$

$$\frac{\sigma'_a}{\sigma'_v} = K_a = \frac{\mathrm{ON}-\mathrm{MN}}{\mathrm{ON}+\mathrm{MN}}$$

Rankine – Surface inclinée

Cercle de Mohr



$$\mathrm{OM} = \sigma'_v \qquad \mathrm{OA} = \sigma'_a$$

$$\mathrm{ON} = \mathrm{OC}\cos i$$

$$\mathrm{NC} = \mathrm{OC}\sin i$$

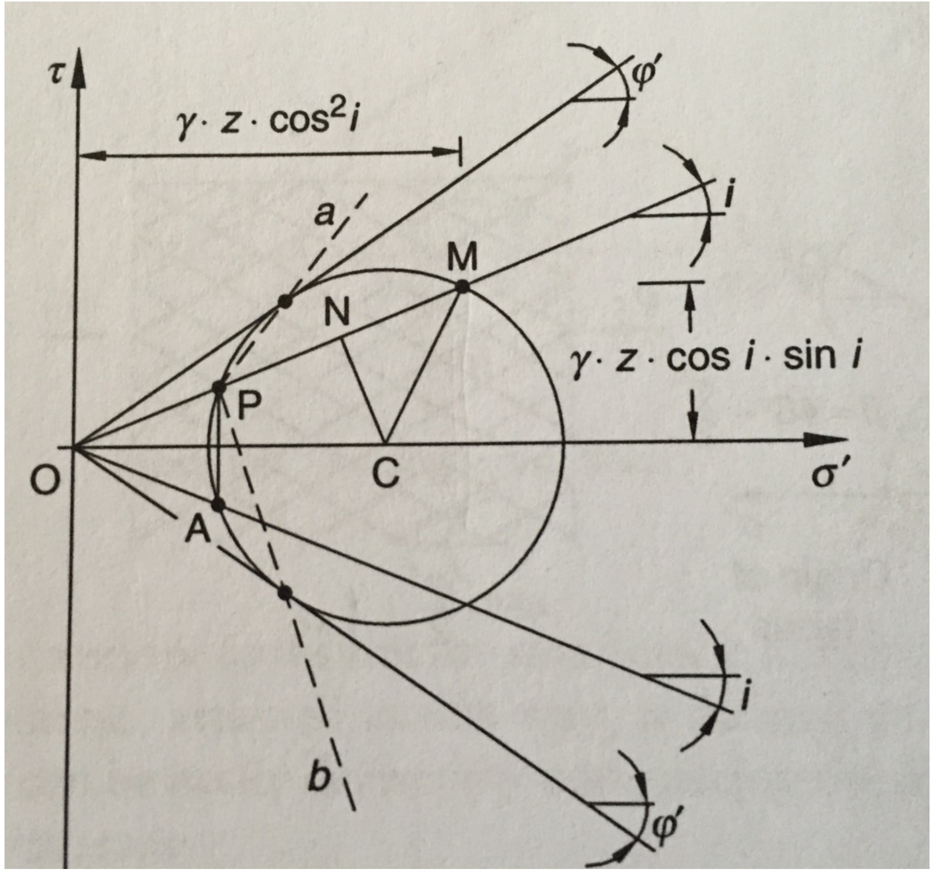
$$\mathrm{MC} = \mathrm{OC}\sin\phi'$$

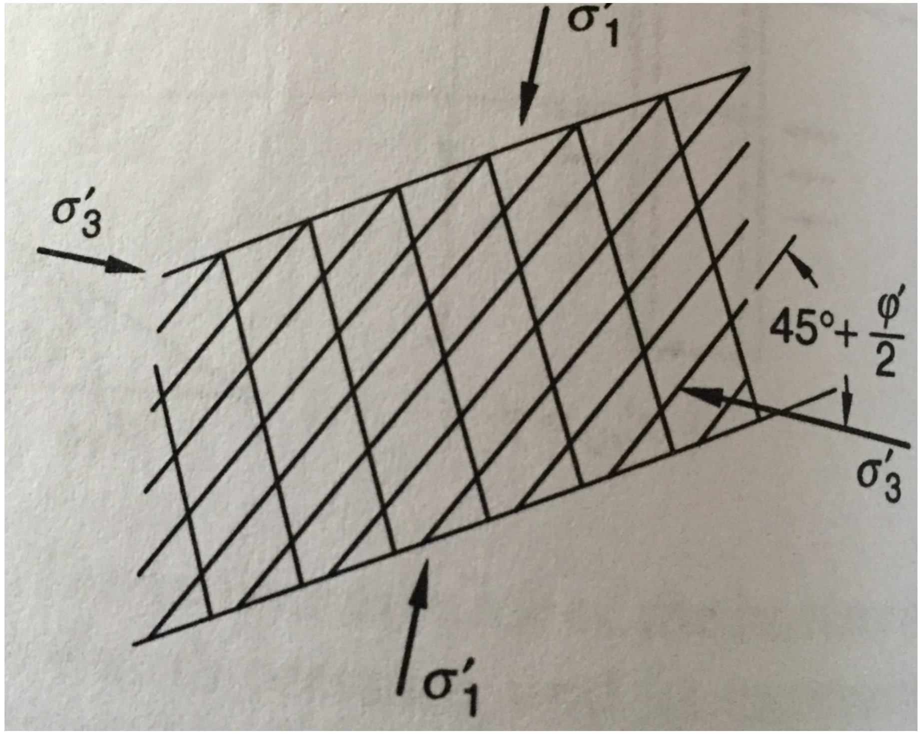
$$\frac{\sigma'_a}{\sigma'_v} = K_a = \frac{\mathrm{ON} - \mathrm{MN}}{\mathrm{ON} + \mathrm{MN}}$$

$$K_a = \frac{\cos i - \sqrt{\sin^2\phi' - \sin^2 i}}{\cos i + \sqrt{\sin^2\phi' - \sin^2 i}}$$

Rankine – Surface inclinée

Cercle de Mohr





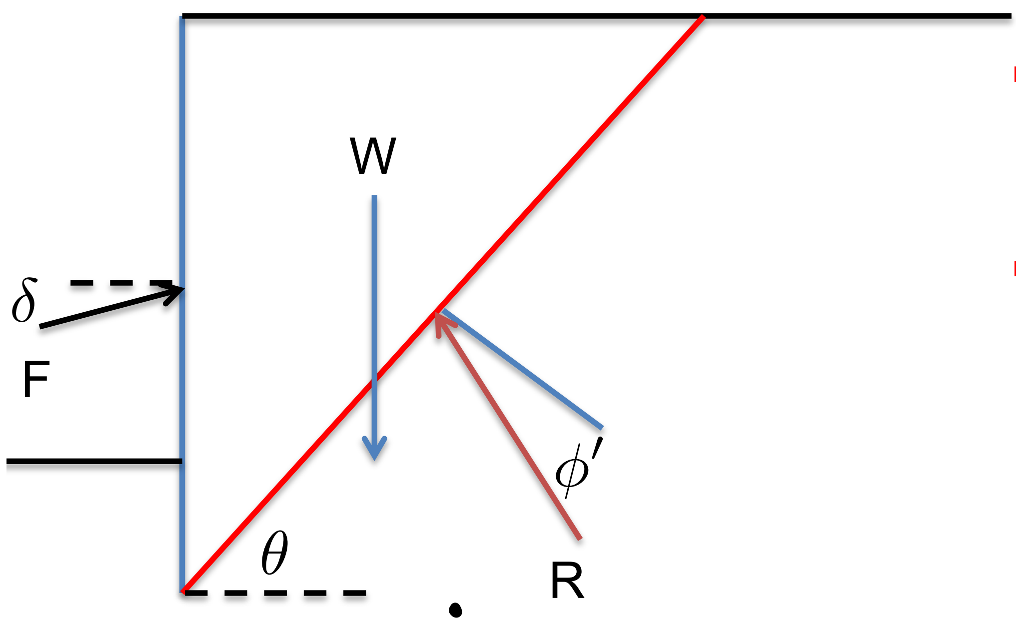
$$K_a = \frac{\cos i - \sqrt{\sin^2 \phi' - \sin^2 i}}{\cos i + \sqrt{\sin^2 \phi' - \sin^2 i}}$$

Rankine

- Implicitement cette théorie **fixe** l'angle de friction entre le mur et le sol
  - Surface horizontale:
    friction nulle entre le sol et le mur
  - Surface inclinée:
    angle de frottement mur/sol = inclinaison de la surface (plans conjugués)

- Comment prendre en compte un angle de frottement mur/sol quelconque ?
  - Approche de Coulomb (1773)
    - **Equilibre limite ≠ Analyse limite**

Coin de Coulomb

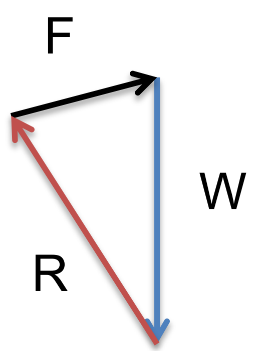


Approche d'équilibre limite

- Surface de rupture plane

$$\tau = \sigma_n \tan \phi'$$

- Angle de frottement δ mur-sol donné

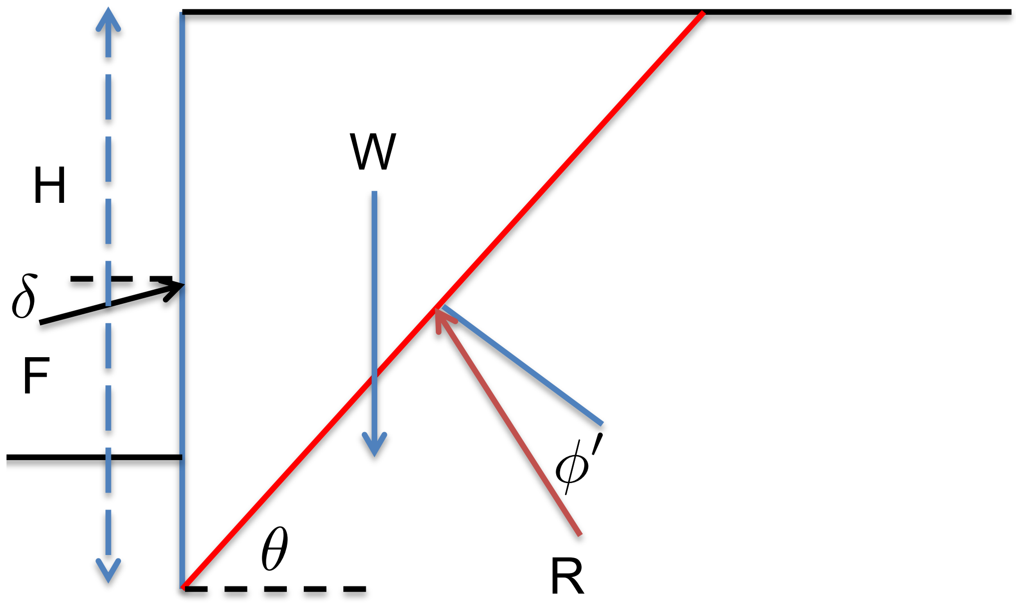


Loi des sinus

$$\frac{F}{\sin(\theta - \phi')} = \frac{W}{\sin(\pi/2 + \delta + \phi' - \theta)}$$

L'orientation du plan de rupture est obtenue en maximisant F (la force sur le mur)

Cas simple: surface horizontale, frottement mur-sol nul



$$W = \frac{1}{2}\gamma H^2 \tan\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)$$

$$F^+ = \frac{1}{2}\gamma H^2 \frac{\tan\left(\theta - \phi'\right)}{\tan(\theta)}$$

Maximum pour $\theta = \frac{\pi}{4} + \frac{\phi'}{2}$

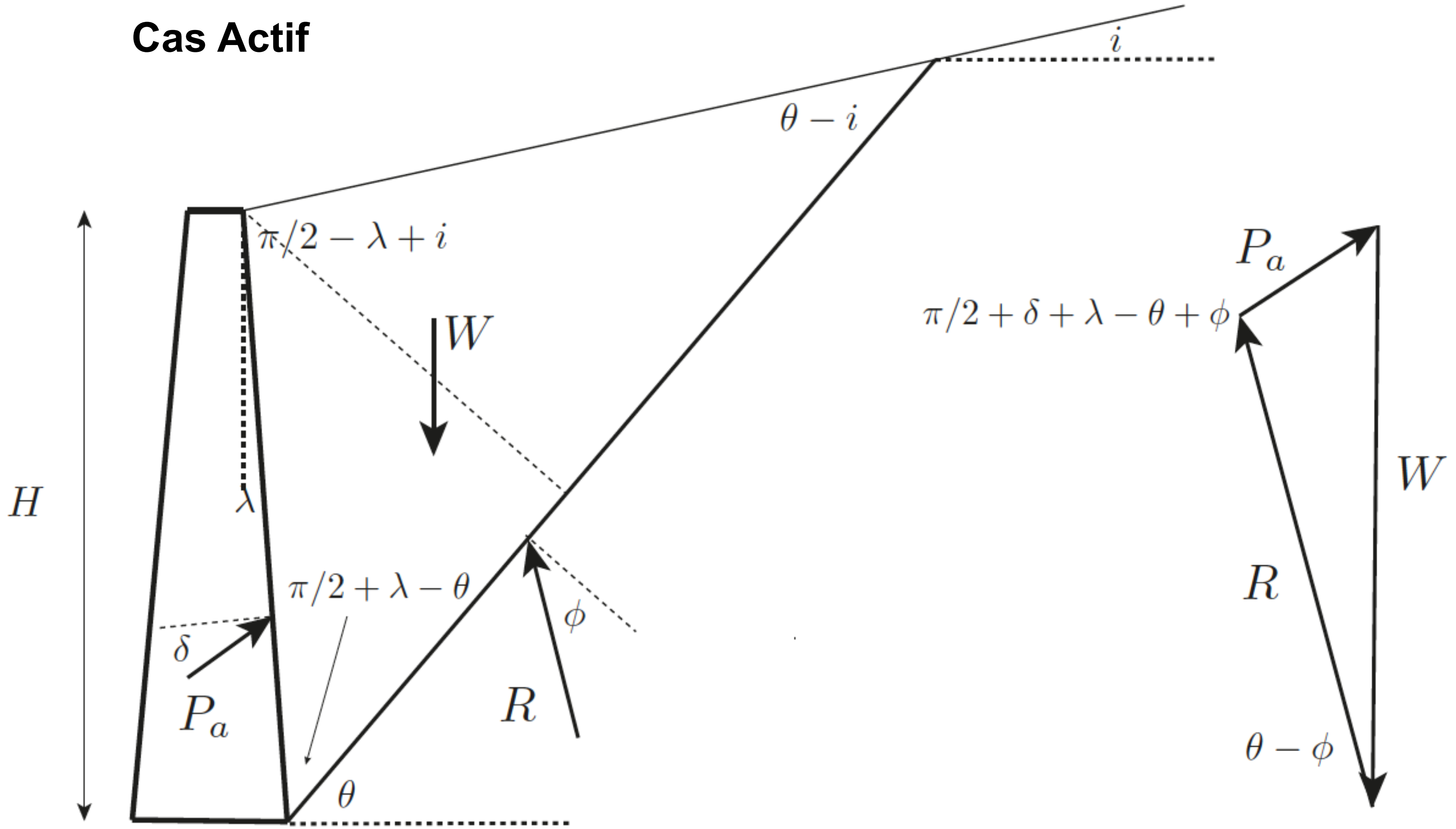
On retrouve le résultat de la théorie de Rankine!

$$F_a = \frac{1}{2}\gamma H^2 \tan^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi'}{2}\right)$$

- Facilement généralisable
  (surface non-horizontale, inclinaison du mur etc.)

Coulomb - cas général

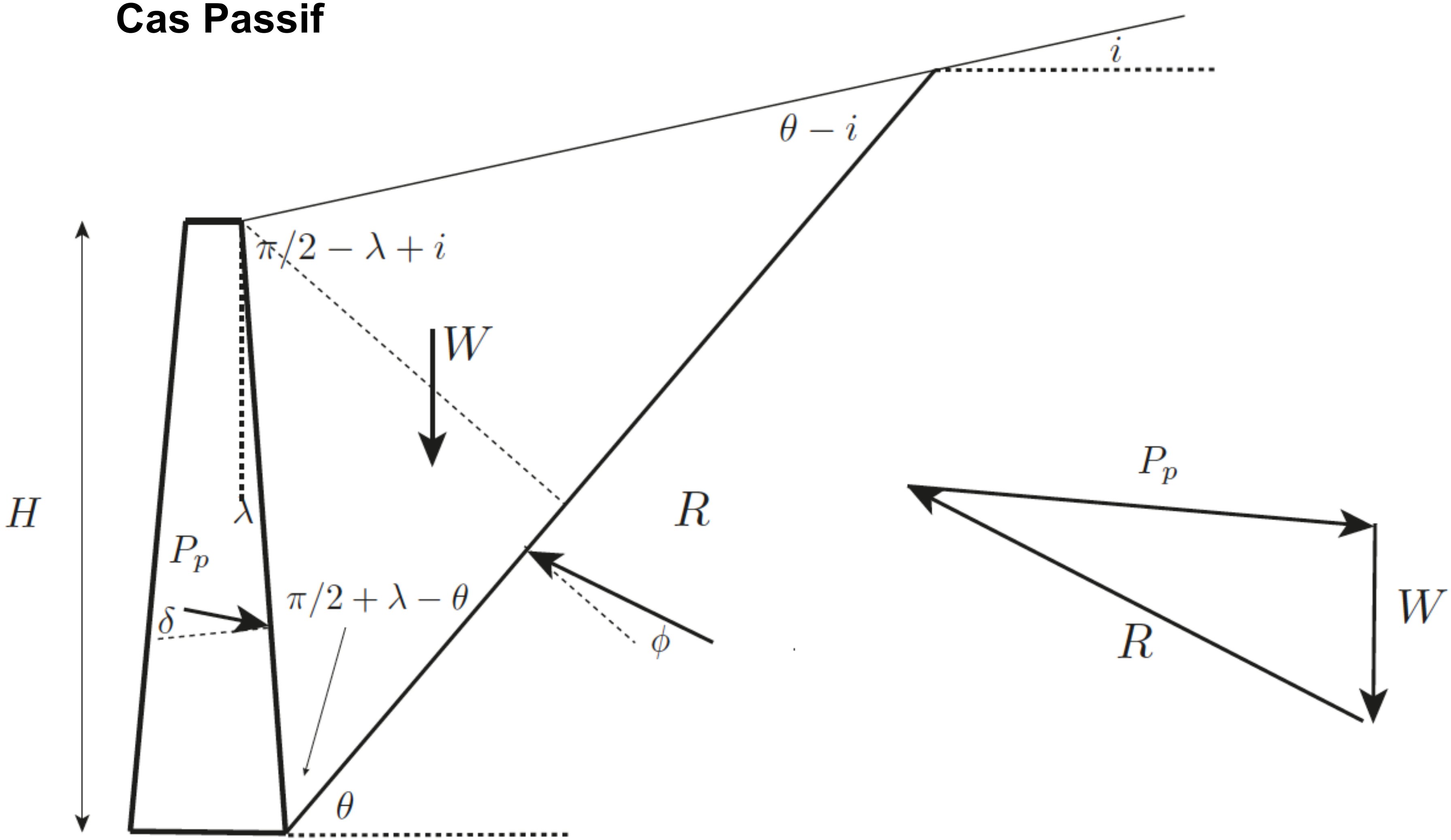
Cas Actif



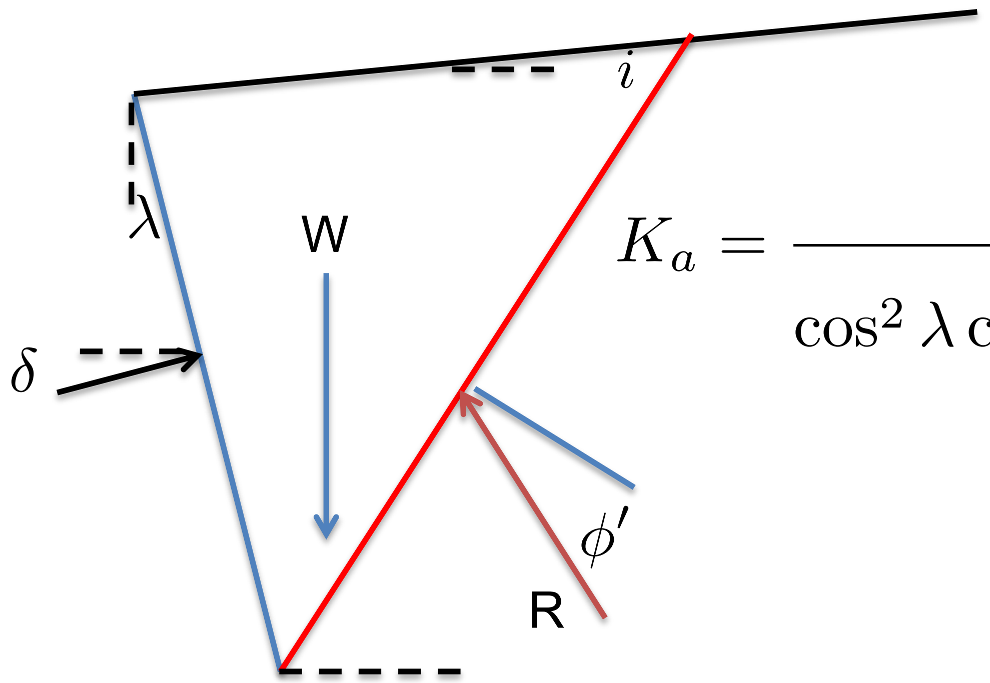
Attention – on obtient **seulement** la résultante
(pas la distribution.. et donc pas le point d'application)

Coulomb - cas général

Cas Passif



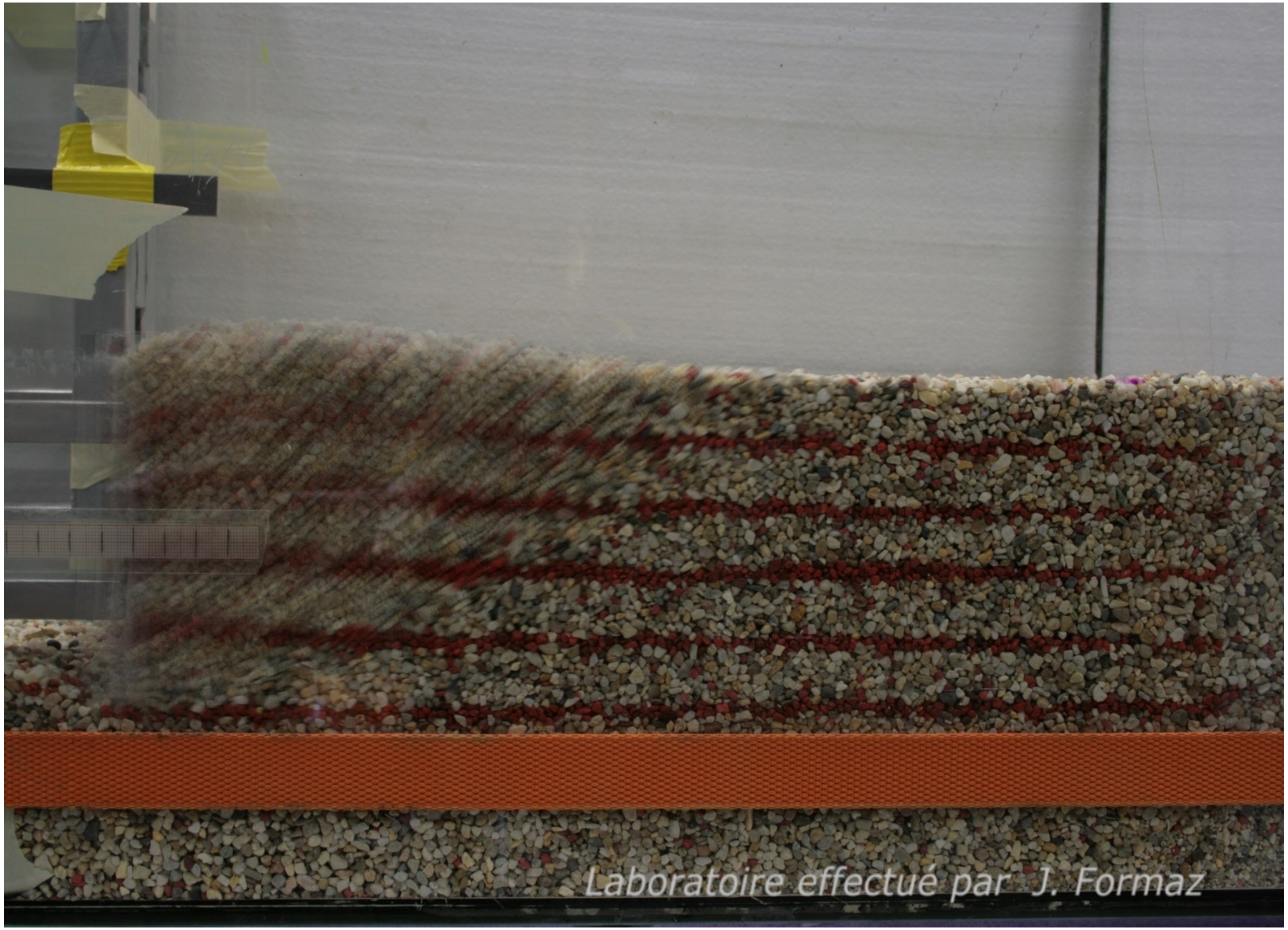
Coulomb – cas général



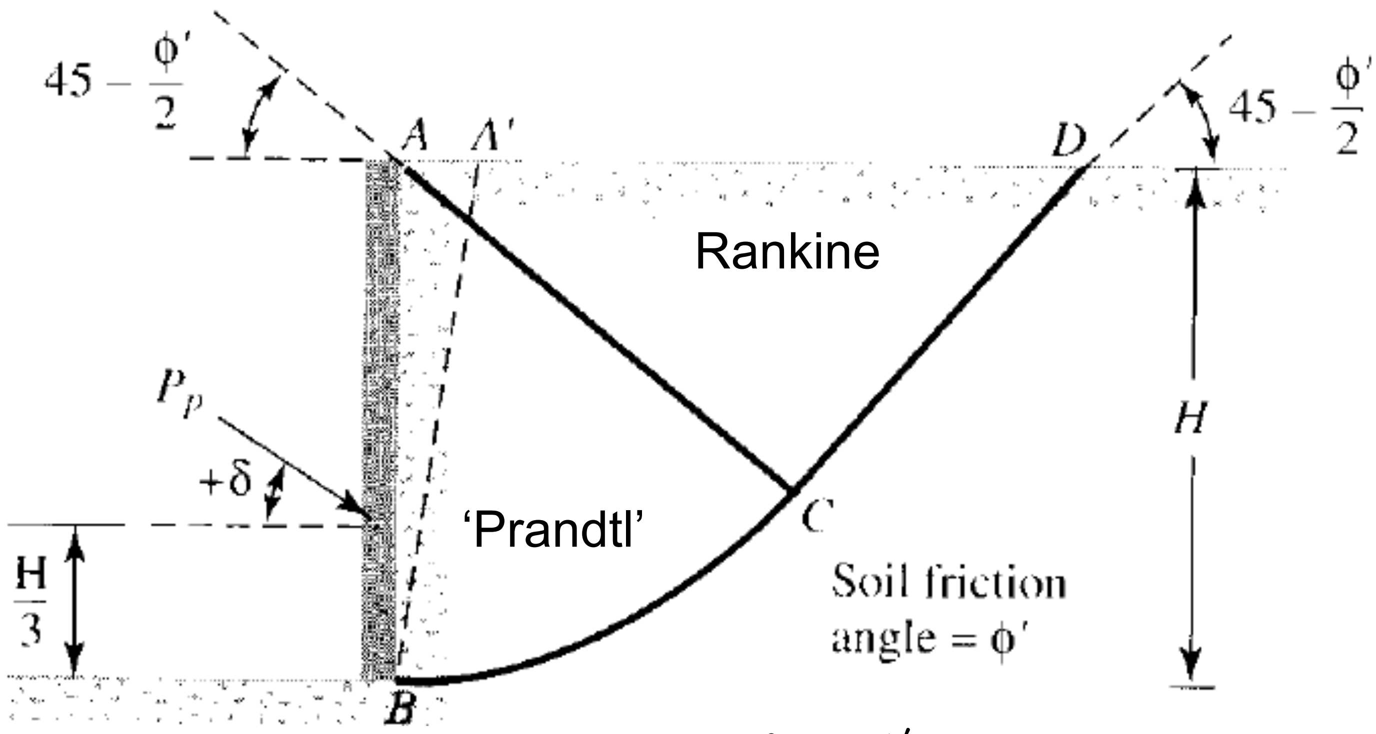
$$K_a = \frac{\cos(\phi' - \lambda)^2}{\cos^2\lambda\cos(\lambda+\delta)\left[1+\sqrt{\frac{\sin(\delta+\phi')\sin(\phi'-i)}{\cos(\lambda+\delta)\cos(\lambda-i)}}\right]^2}$$

Les résultats obtenus sont bon pour le cas actif …
Sous-estimé pour le cas passif :
la surface de rupture n'est pas plane dans le cas passif (frottement mur sol)

Mécanisme de rupture en butée
(pour une translation d'une paroi lisse en direction du sol)



Surface de rupture courbe - passif



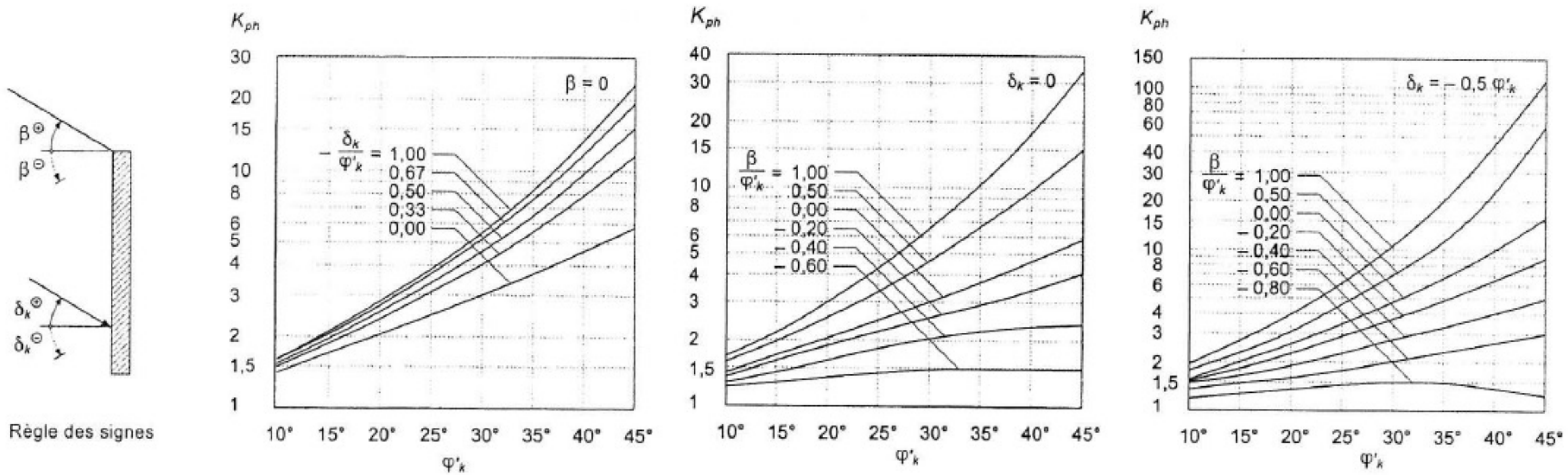
$$r = r_o e^{\theta \tan \phi'}$$

Prise en compte d'un angle de frottement mur-sol
Généralisation (mur incliné, etc.)
Approche statique (par l'intérieur)
-> Abaques de Caquot-Kerisel, Sokolowski etc.

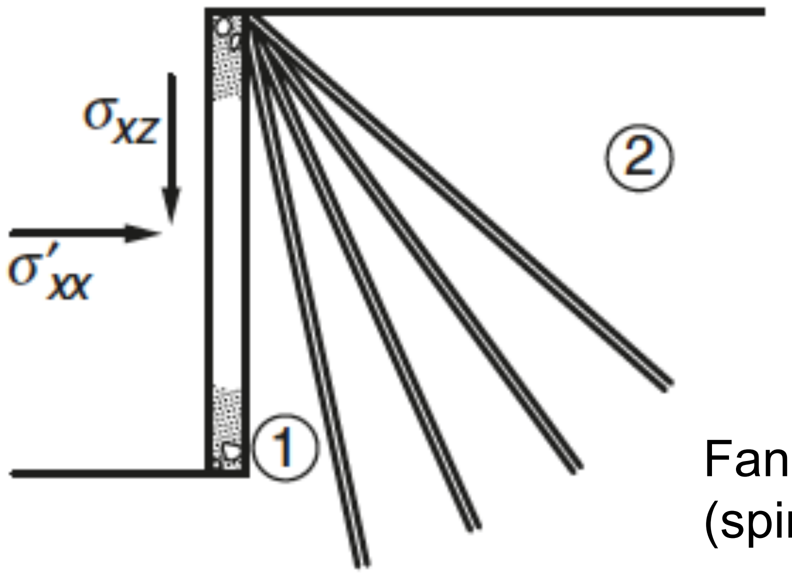
Borne inférieure

Abaques de Caquot-Kerisel

$$\beta = i$$



Solution de Lancellota (2002)



Fan de discontinuités de tractions (spirale log)

$$K_{p,a} = \left[\frac{\cos\delta}{1 \mp \sin\varphi'}\left(\cos\delta \pm \sqrt{\sin^2\varphi' - \sin^2\delta}\right)\right] e^{\pm 2\vartheta \tan\varphi'}$$

with:

$$2\vartheta = \sin^{-1}\left(\frac{\sin\delta}{\sin\varphi'}\right) \pm \delta,$$

$\pm$

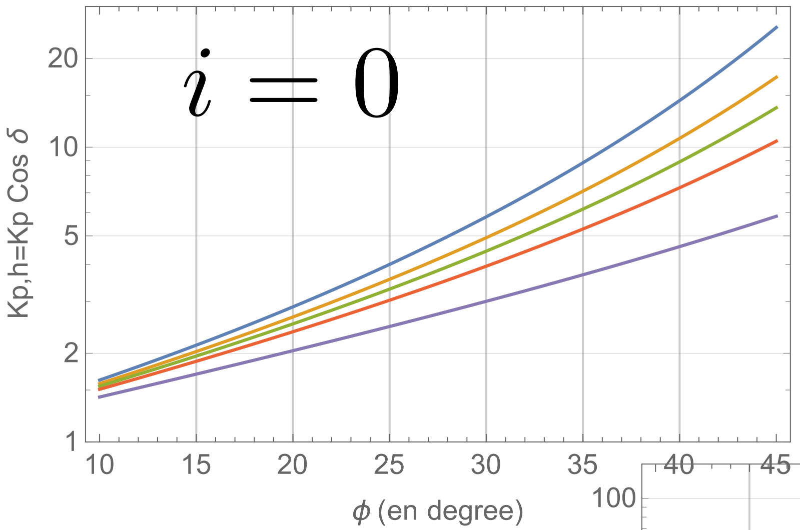
Passif

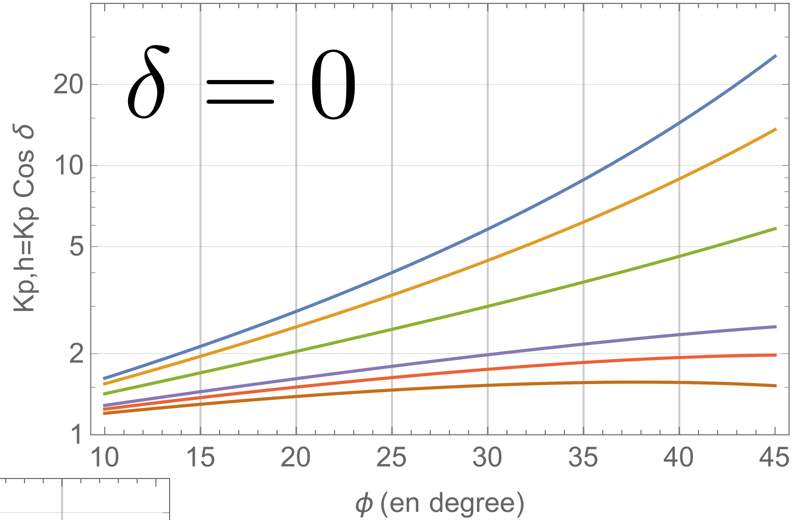
actif

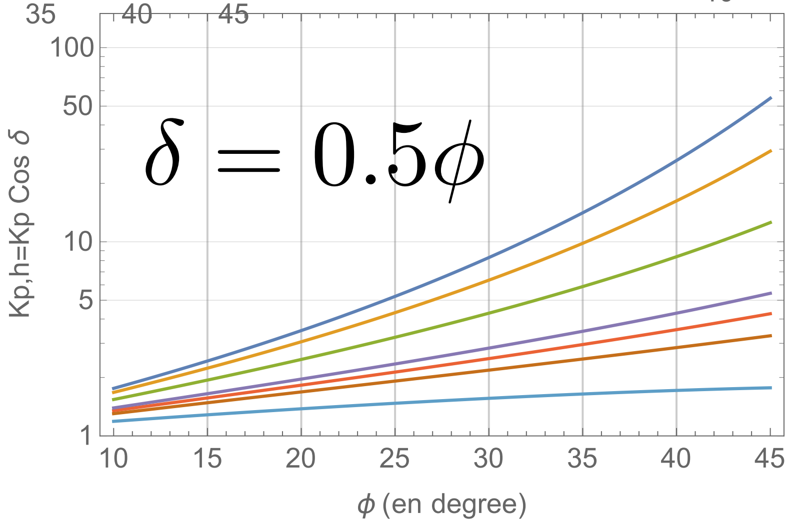
Lancellota Cas passif – sol incliné

$$K_p = \frac{\cos\delta}{\cos i - \sqrt{\sin\phi^2 - \sin i^2}}\left(\cos\delta + \sqrt{\sin\phi^2 - \sin\delta^2}\right) e^{2\mathcal{V}\tan\phi}$$

$$2\mathcal{V} = \arcsin\left(\frac{\sin\delta}{\sin\phi}\right) + \arcsin\left(\frac{\sin i}{\sin\phi}\right) + \delta + i$$







Conclusions

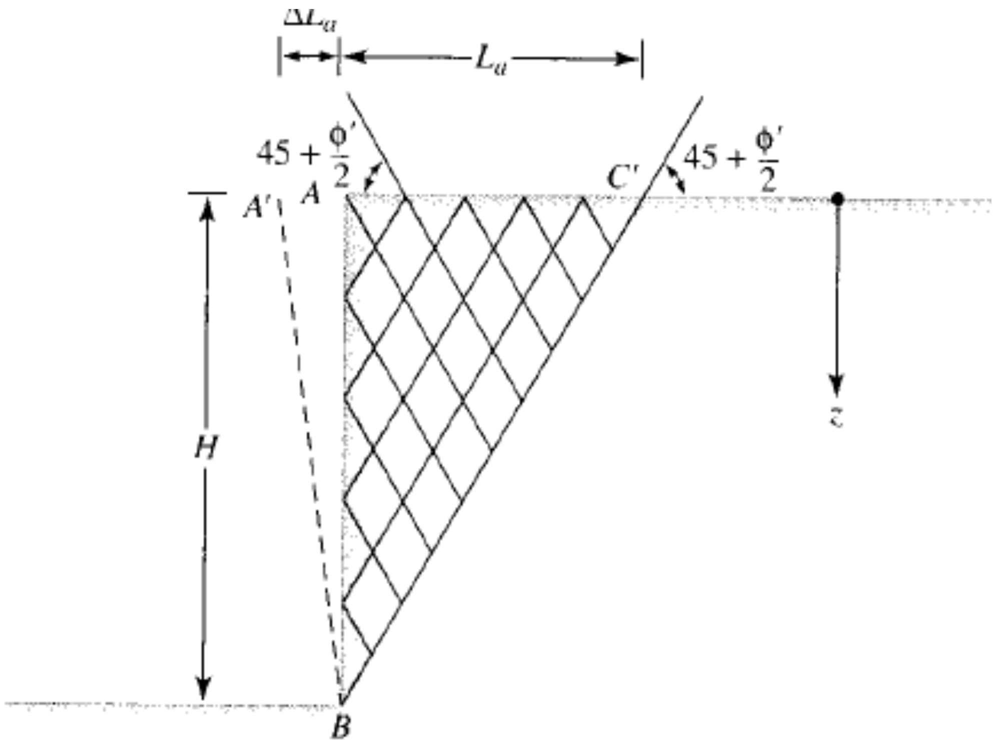
- Etat actif (pousée)
  - Coulomb donne de bons résultats
  - … se réduit à Rankine pour un frottement mur-sol nul & surface horizontale

- Etat passif (butée)
  - Ne pas utiliser Coulomb
    (sous-estimation de la force de butée)
  - La surface de rupture est courbe (spirale log)
    - Abaques de Caquot-Kerisel, Sokolowski, solution de Lancellota (2002) etc.

Actions sur l'écran

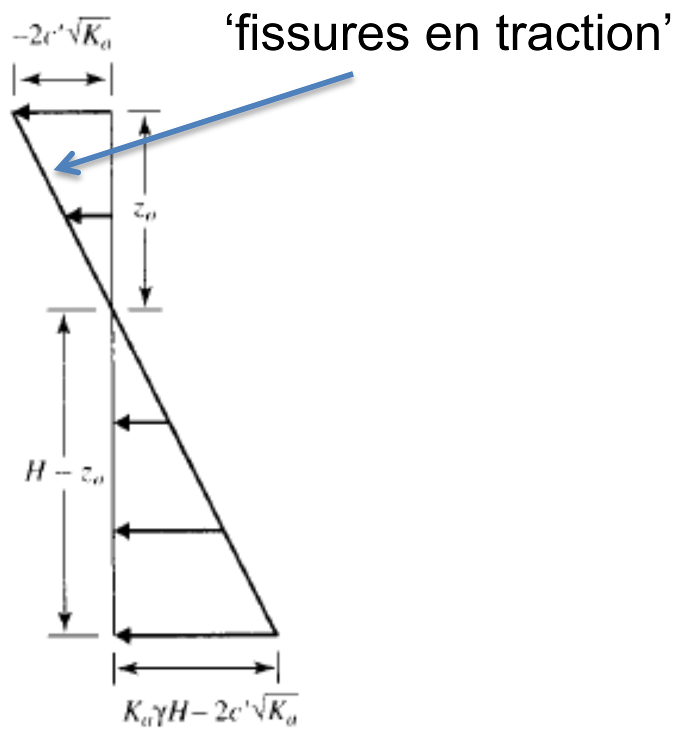
- Actif & Passif sans eau
- Actif & Passif avec eau
- Avec surcharge uniforme
  - On verra le cas de charges ponctuelles la semaine prochaine

Etat actif - Sur l’écran



[Das *“Geotechnical Engineering”*]

Cas avec cohésion

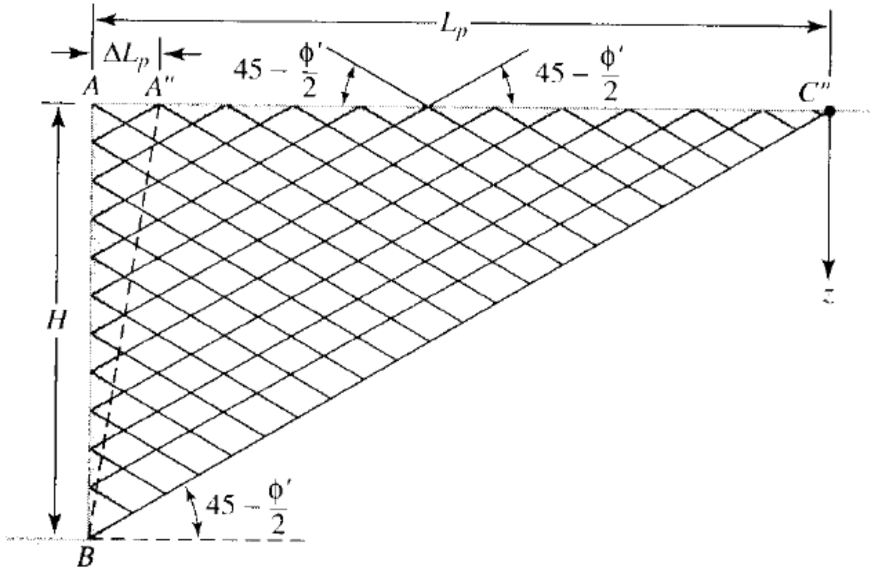


Note: à court terme (c_u, ϕ=0)
Profondeur “auto-stable”
c.f. Talus vertical (plutot 3.73)

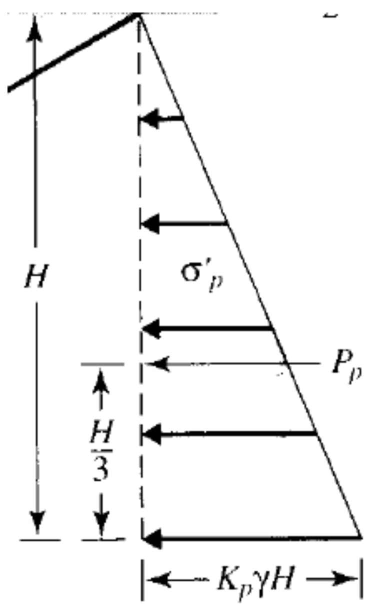
$$z_o = \frac{2c_u}{\gamma}$$

Etat passif - Sur l’écran

Cas sans cohésion



[Das *“Geotechnical Engineering”*]



Résultante à H/3 depuis le bas de l’écran

En présence d'eau

- Cf tableau