

Poussée / butée équilibre limite

Olivier Cuisinier
ENSG

Exemples

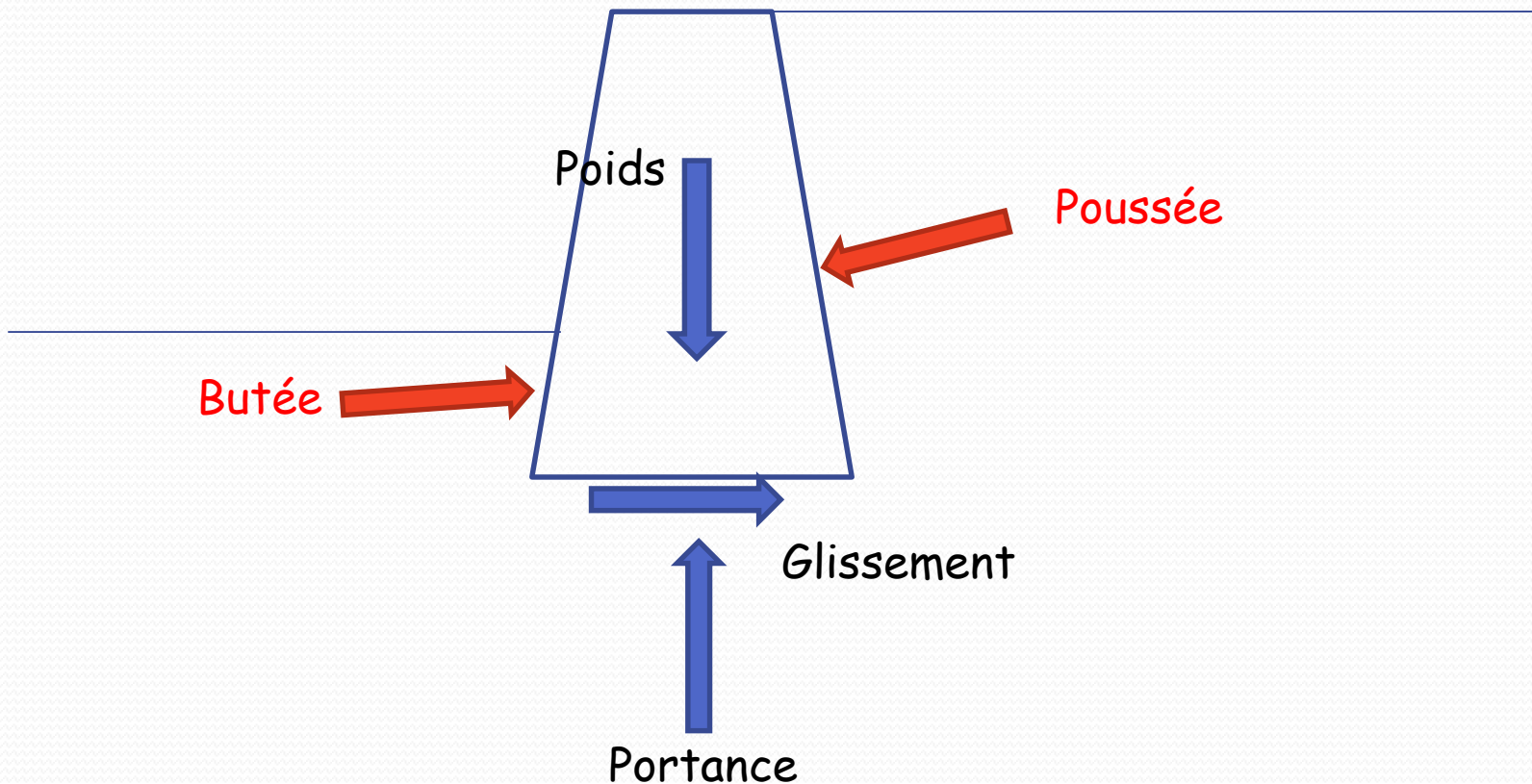


Organisation du cours

- État au repos
- États d'équilibre limite inférieur et supérieur
- Calculs des coefficients de poussée / butée pour un sol pesant
 - Méthode de Coulomb
 - Méthode de Rankine
- Surcharge (sol non pesant)
- Multicouches

Problématique

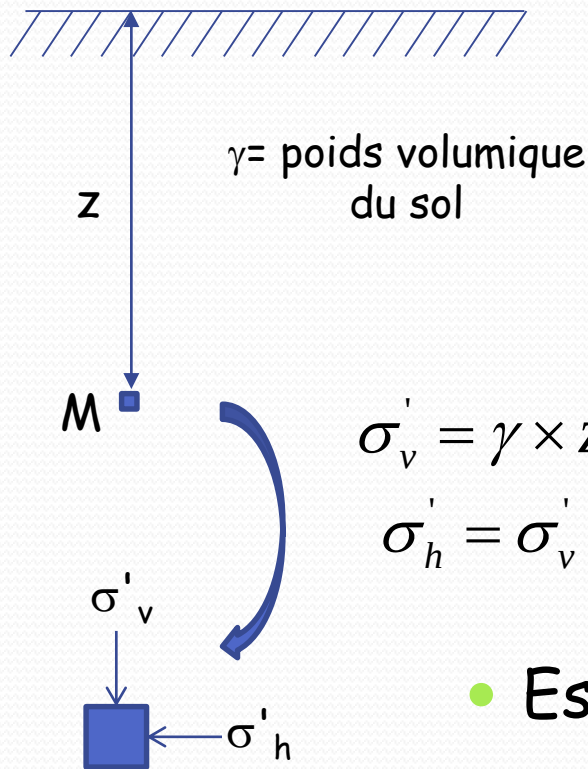
- Illustration avec le cas d'un mur poids



Comment déterminer les efforts de butée et de poussée ?

État au repos

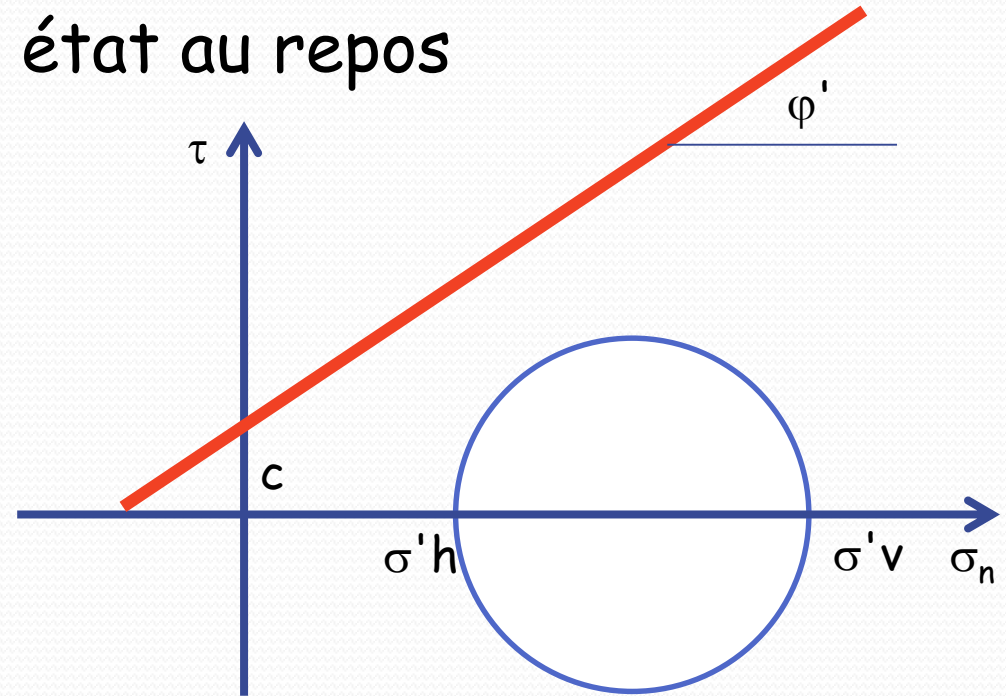
- État avant travaux : état au repos



γ = poids volumique
du sol

$$\sigma'_v = \gamma \times z - u$$

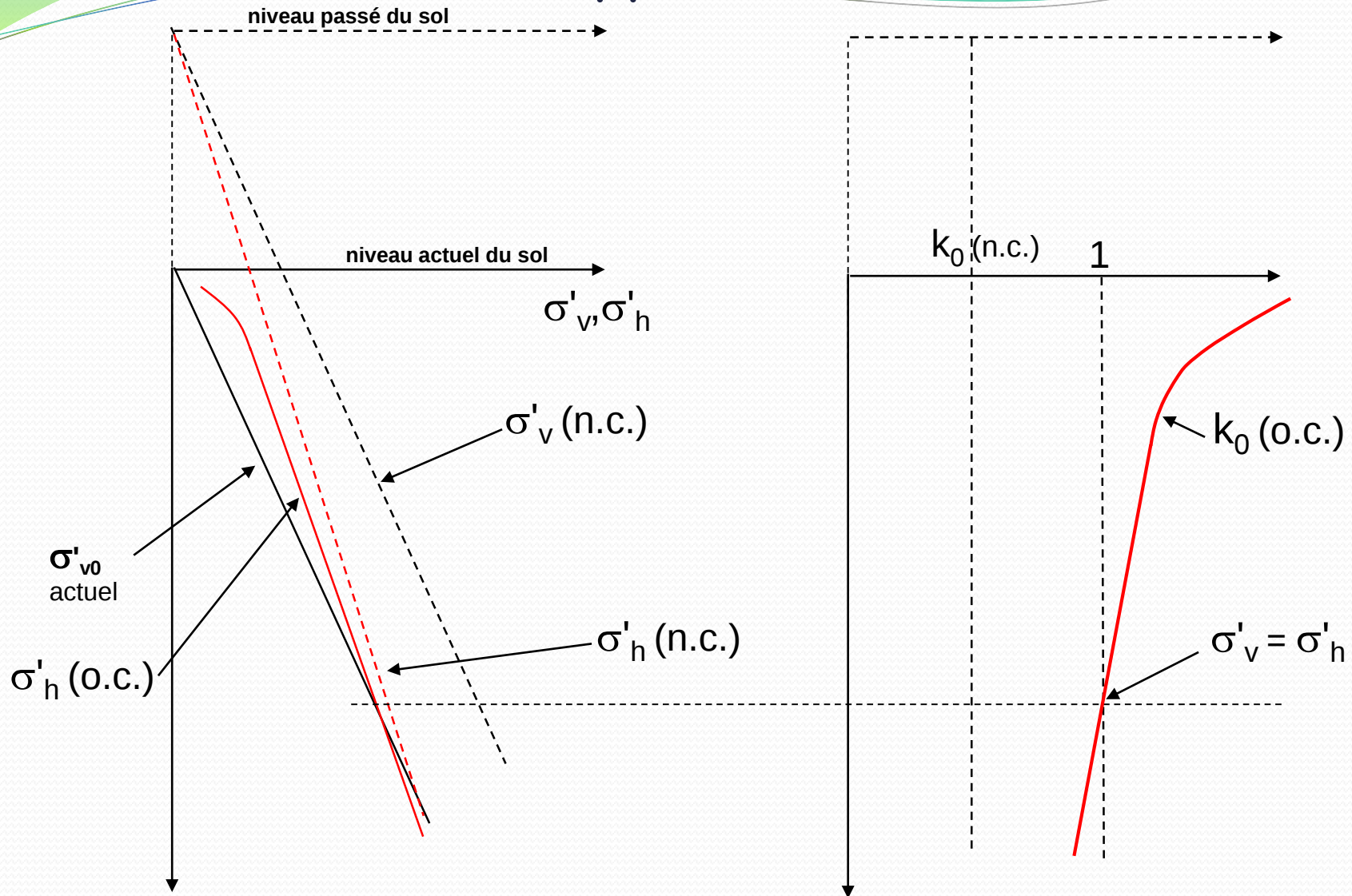
$$\sigma'_h = \sigma'_v \times K_0$$



- Estimation de K_0

- surface horizontale : $K_0 = 1 - \sin \varphi'$
- surface inclinée $K_{0,\beta} = (1 + \sin \beta) K_0$
- sol surconsolidé $K_0 = (1 - \sin \varphi') R_{OCR}^{1/2}$

Profil réel de sol (rappel)

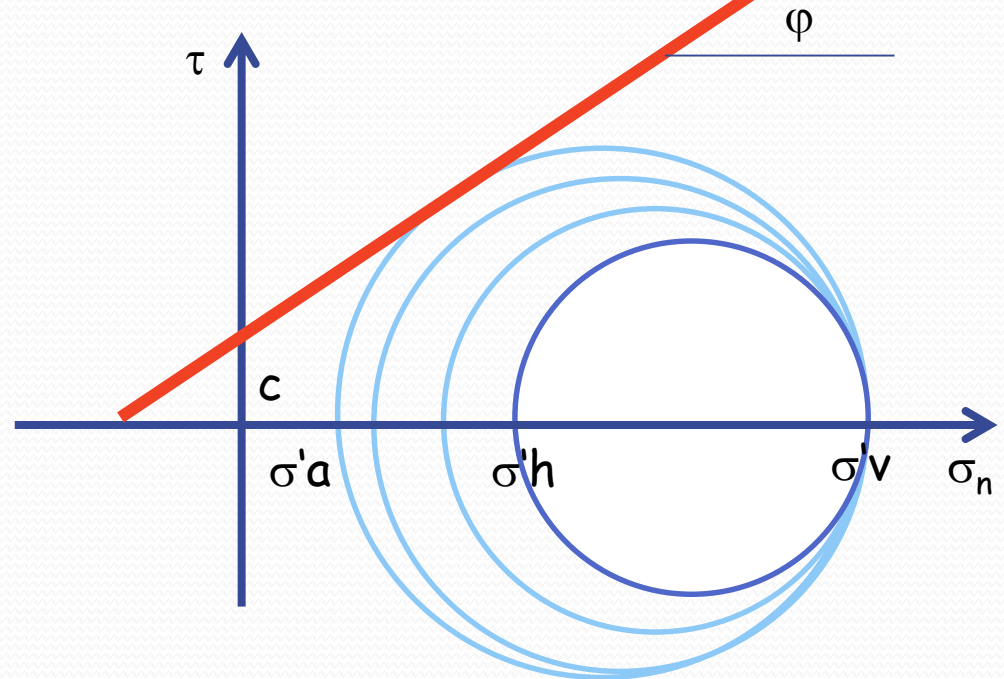
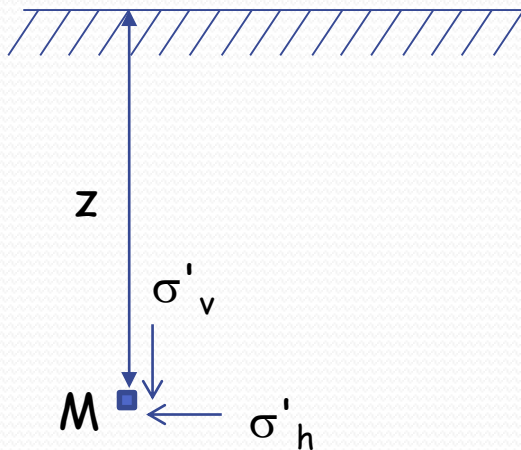


Contraintes effectives verticales et horizontales avant et après érosion.

Noter qu'à proximité de la surface après érosion $\sigma'_h > \sigma'_v$

État d'équilibre limite inférieur

Jusqu'à quelle limite σ'_h peut elle baisser ?

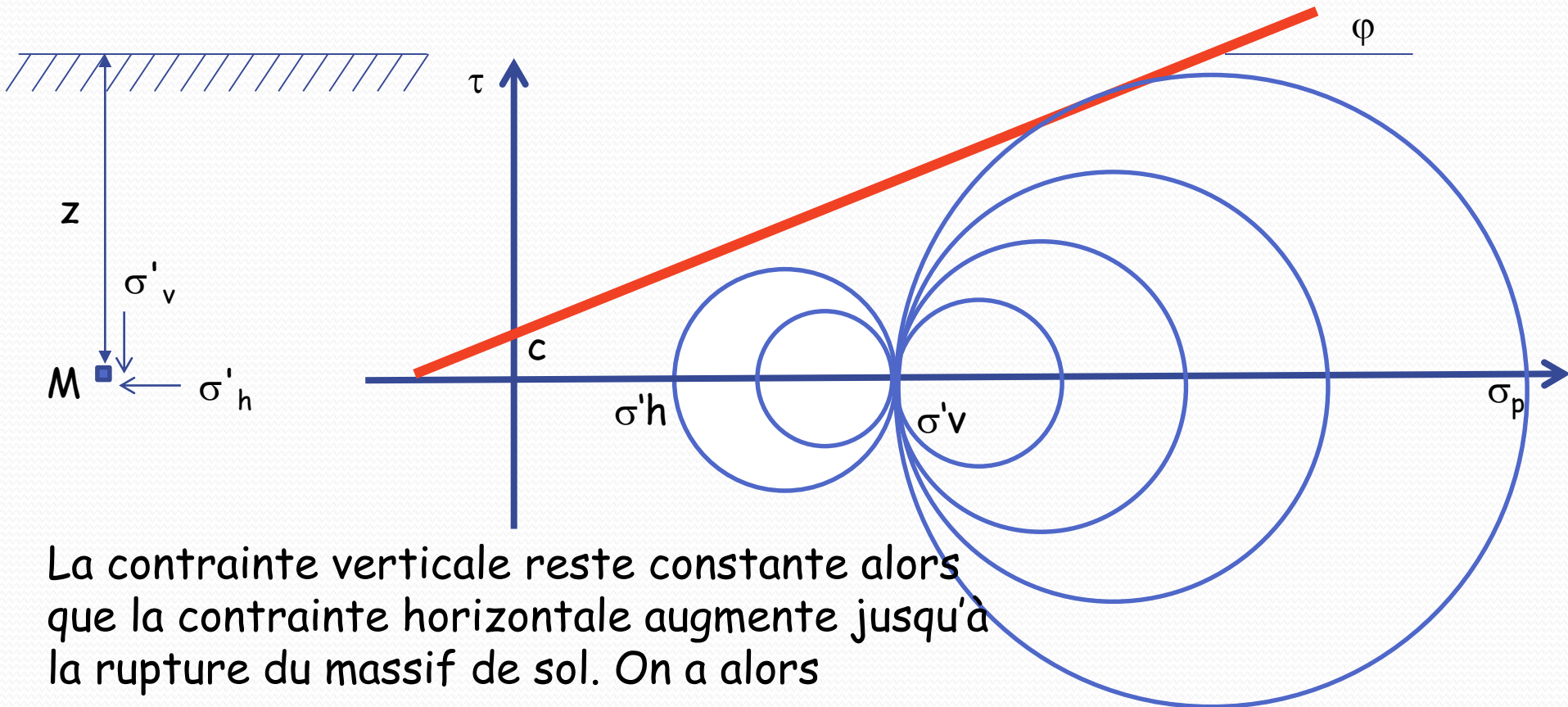


La contrainte verticale reste constante alors que la contrainte horizontale diminue jusqu'à la rupture du massif de sol. On a alors :

$$\sigma'_a = K_a \sigma'_v, \text{ avec } K_a \text{ le coefficient de poussée (état actif)}$$

État d'équilibre limite supérieur

Jusqu'à quelle limite σ'_h peut elle augmenter ?



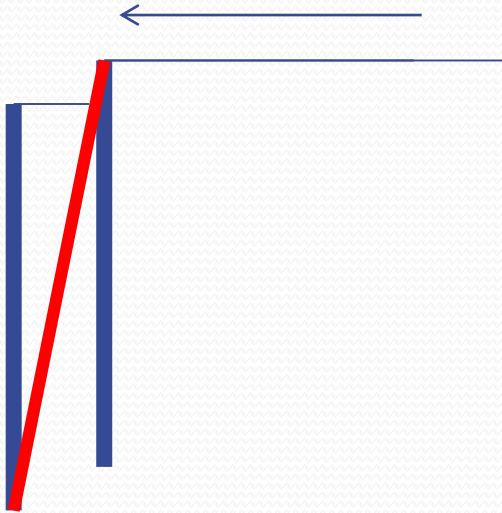
La contrainte verticale reste constante alors que la contrainte horizontale augmente jusqu'à la rupture du massif de sol. On a alors

$$\sigma'_p = K_p \sigma'_v, \text{ avec } K_p \text{ le coefficient de butée (état passif)}$$

Mobilisation poussée / butée

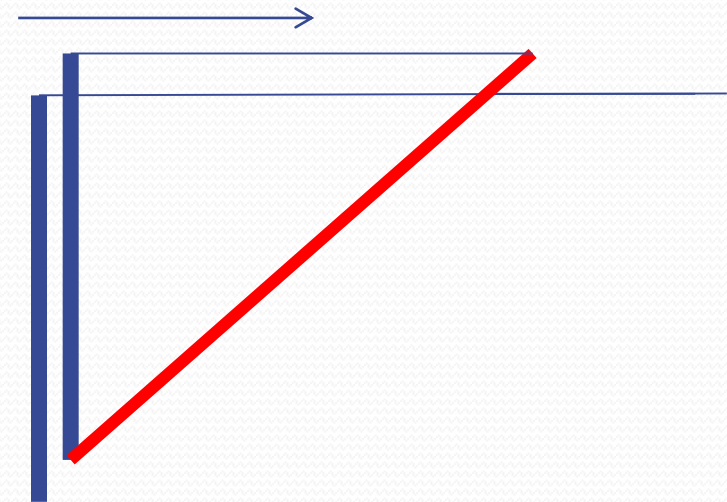
Poussée

- L'écran exerce une poussée sur l'écran qui se déplace, et induit une baisse de σ'_{h0} jusqu'à σ'_{ha}

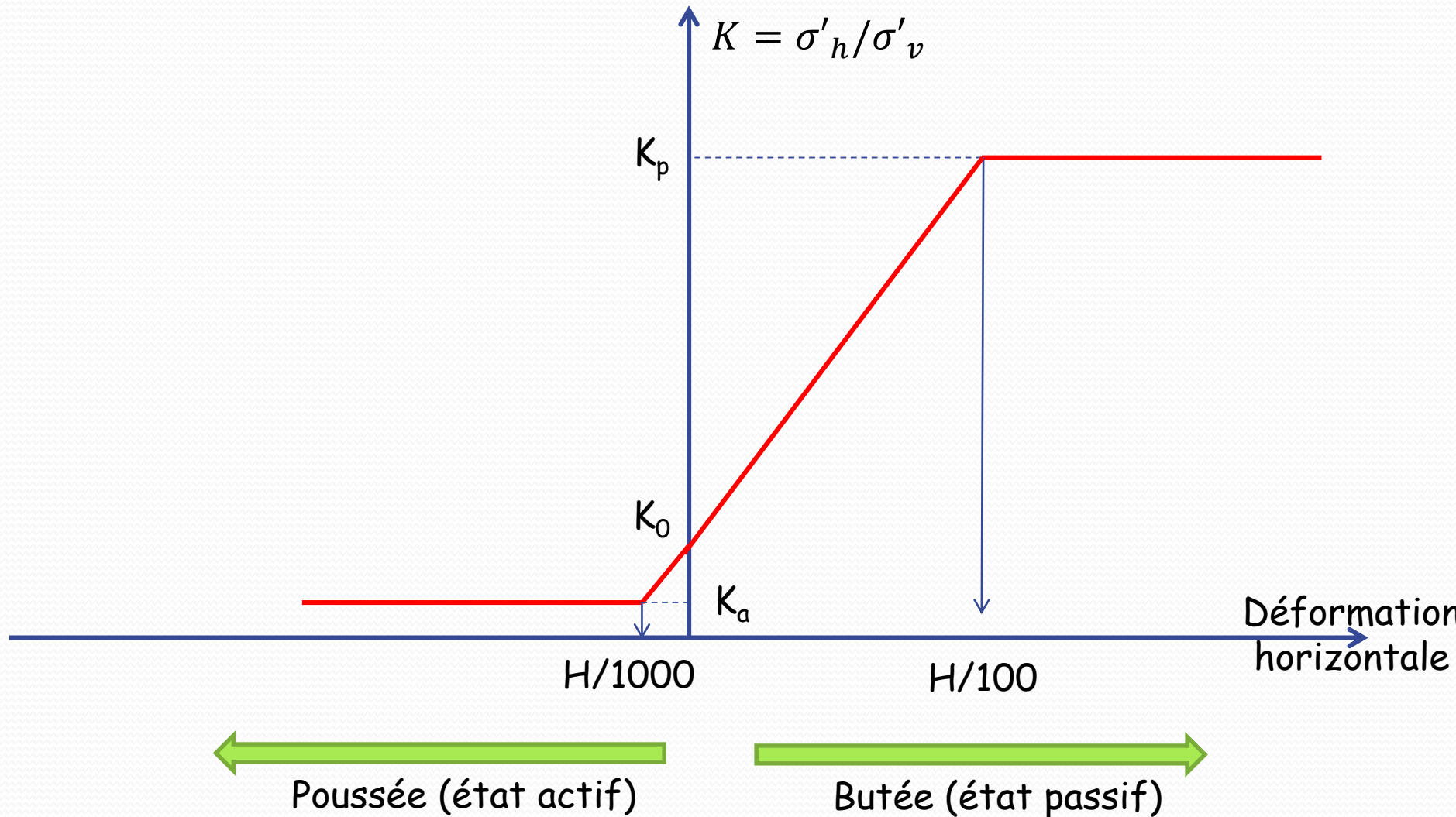


Butée

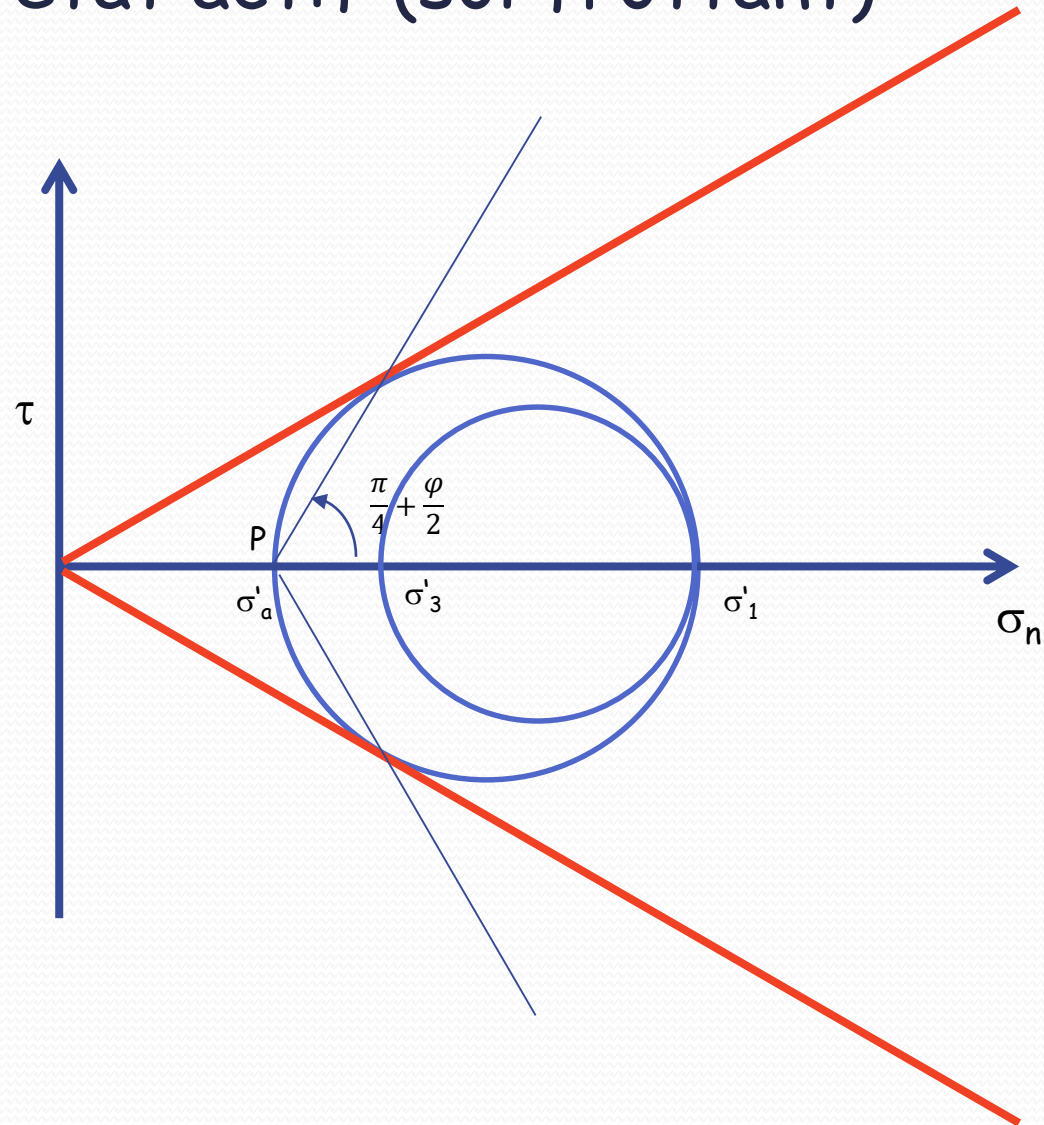
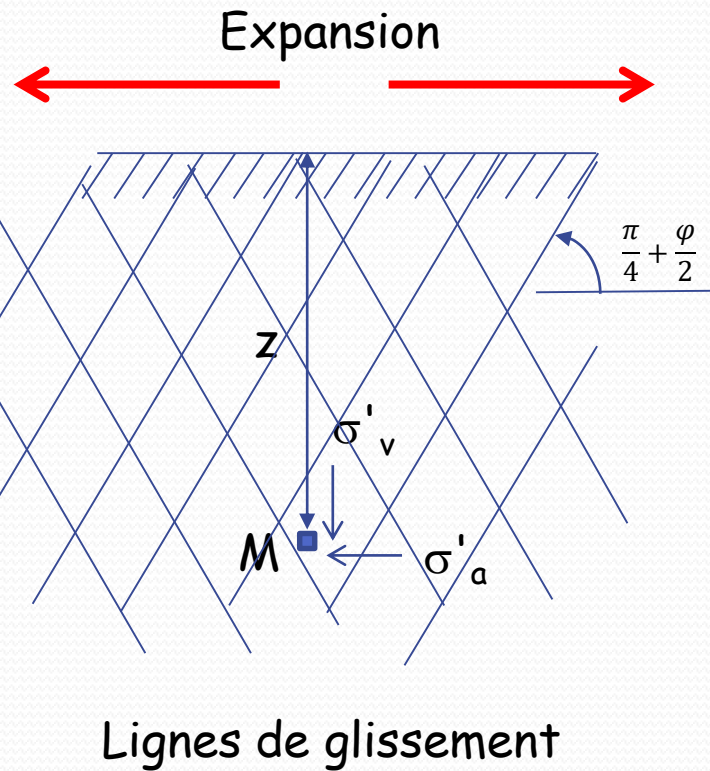
- Le sol exerce une poussée sur l'écran qui se déplace, et induit une augmentation de σ'_{h0} jusqu'à σ'_{hp}



Mobilisation poussée / butée



Surface horizontale, état actif (sol frottant)



Surface horizontale, état actif (sol frottant)

- Calcul de K_a

Par définition, $K_a = \frac{\sigma'_a}{\sigma'_v}$

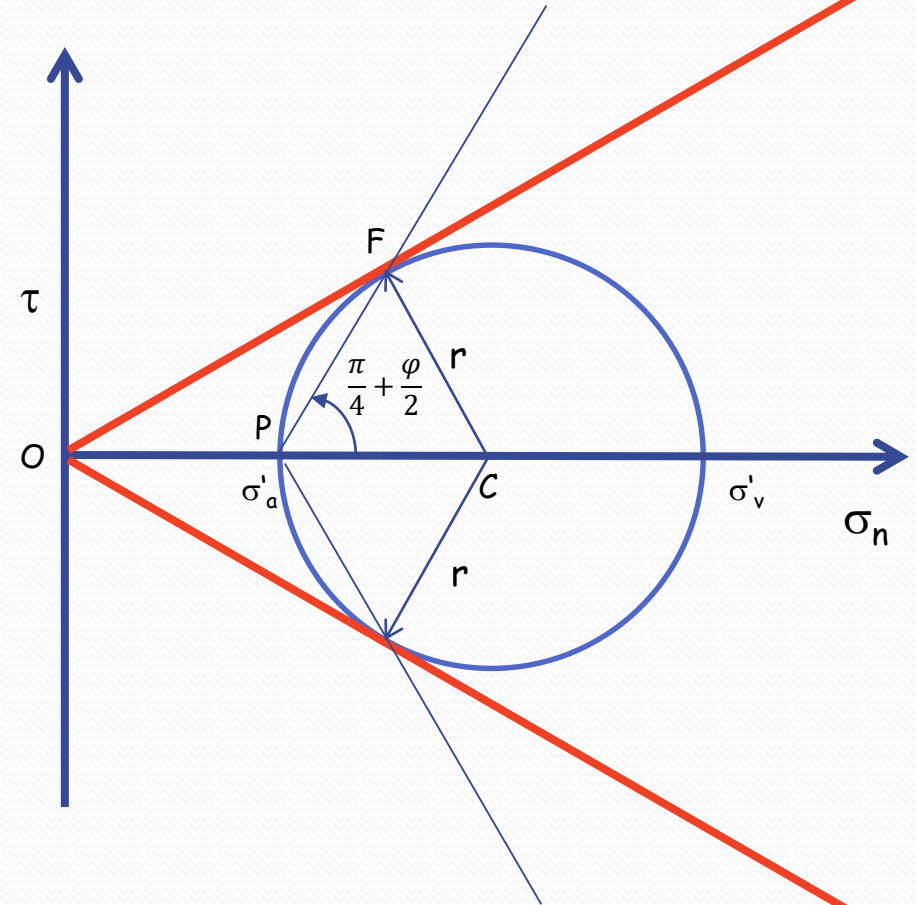
$$r = [OC] \sin \varphi$$

$$\frac{\sigma'_v - \sigma'_a}{2} = \frac{\sigma'_v + \sigma'_a}{2} \sin \varphi$$

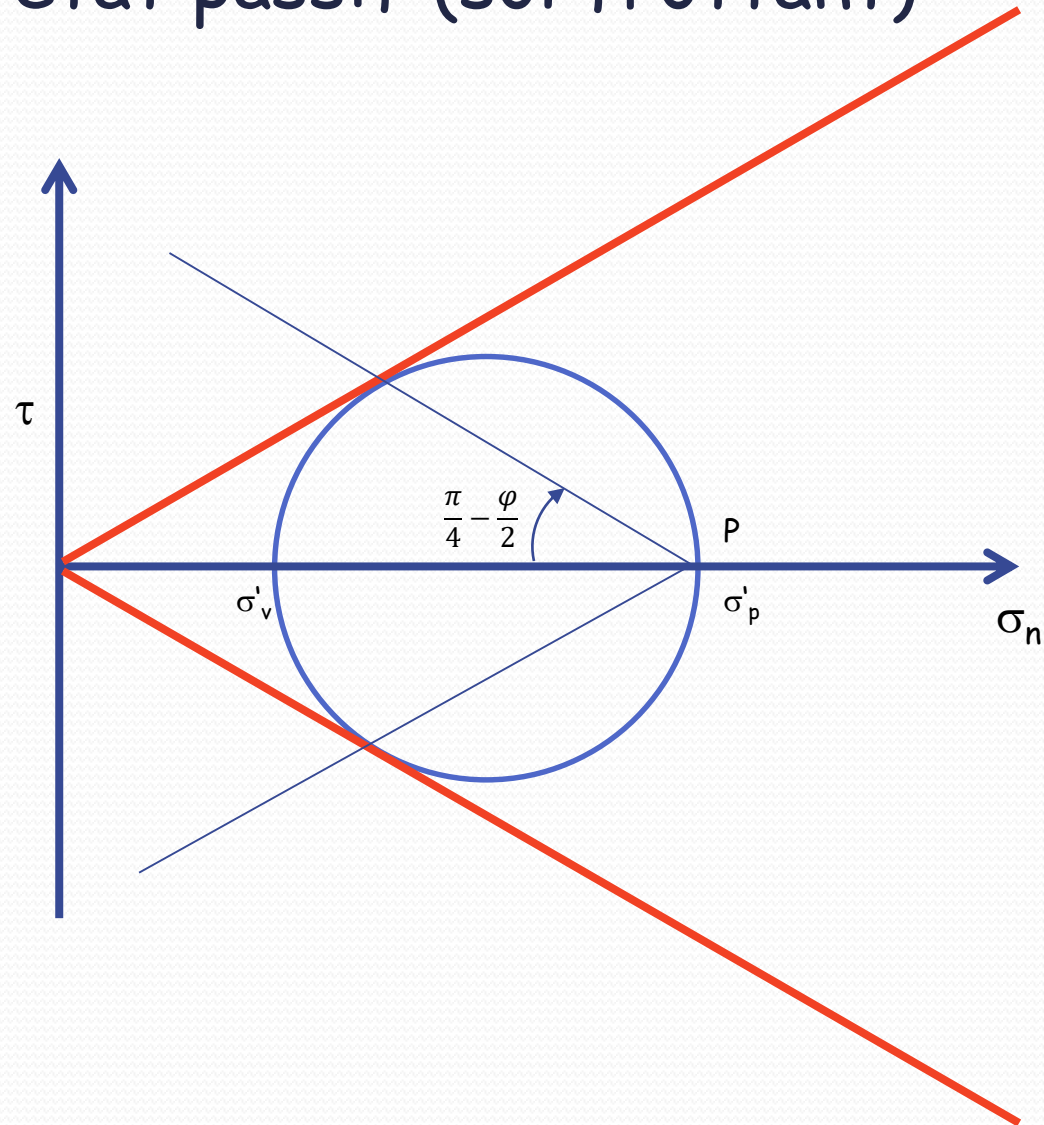
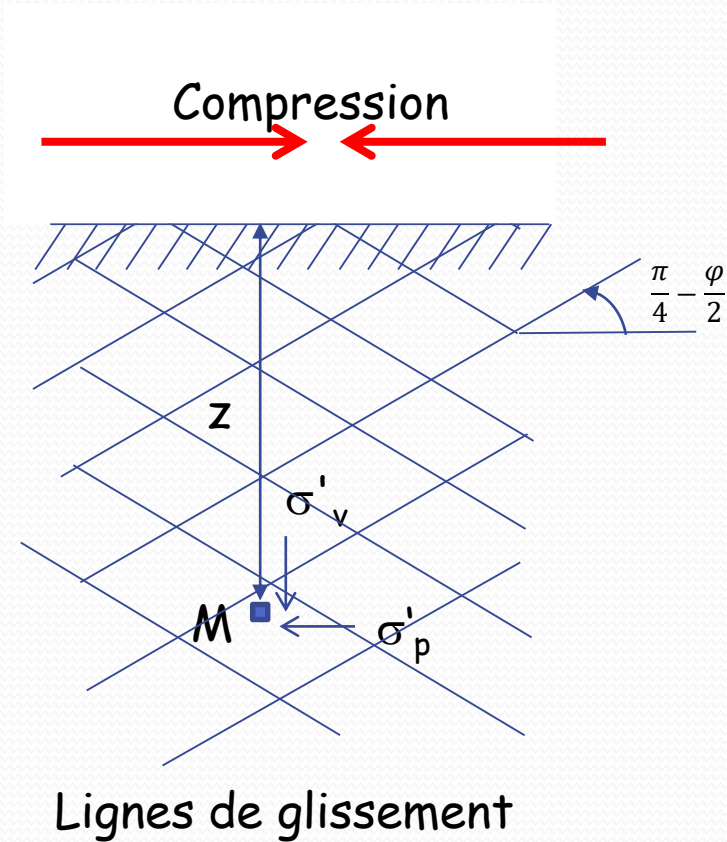
$$\sigma'_a = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \sigma'_v$$

$$\sigma'_a = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \sigma'_v$$

$$K_a = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)$$



Surface horizontale, état passif (sol frottant)



Surface horizontale, état passif (sol frottant)

- Calcul de K_p

Par définition, $K_p = \frac{\sigma'_a}{\sigma'_v}$

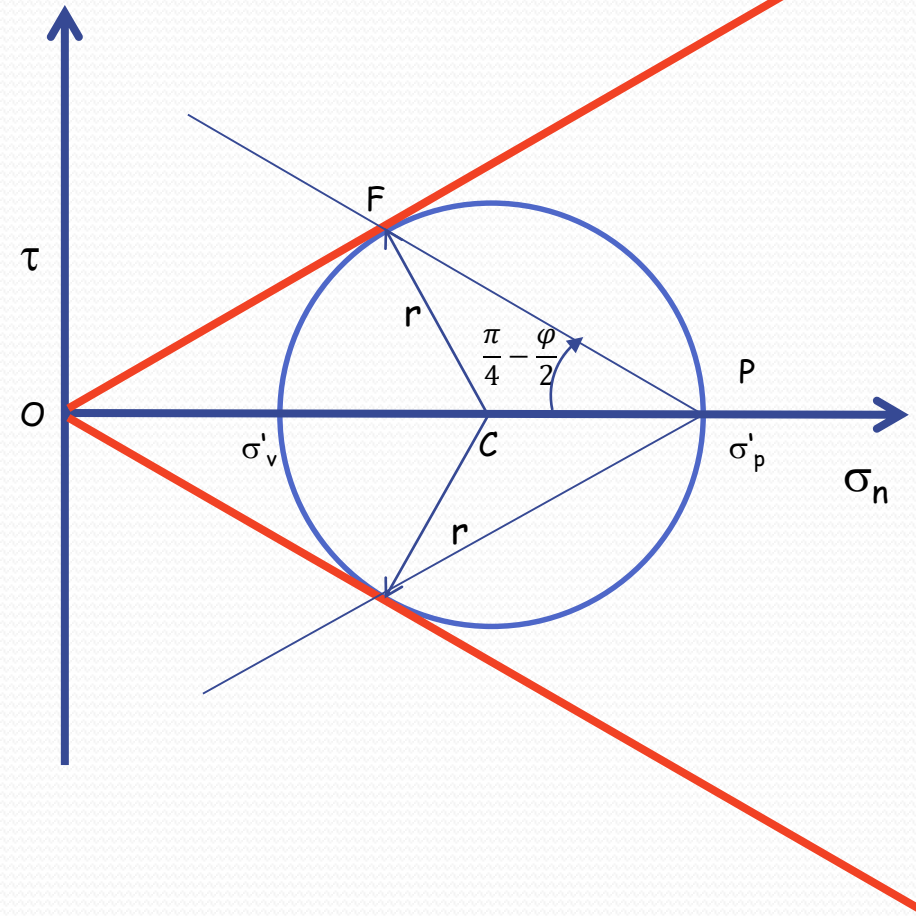
$$r = [OC] \sin \varphi$$

$$\frac{\sigma'_p - \sigma'_v}{2} = \frac{\sigma'_v + \sigma'_p}{2} \sin \varphi$$

$$\sigma'_p = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma'_v$$

$$\sigma'_p = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \sigma'_v$$

$$K_p = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right)$$



Sol avec cohésion, surface horizontale, état actif

- Théorème des états correspondants (Caquot)

Par définition, $K_a = \frac{\sigma'_a}{\sigma'_v}$

$$r = [O'C] \sin \varphi$$

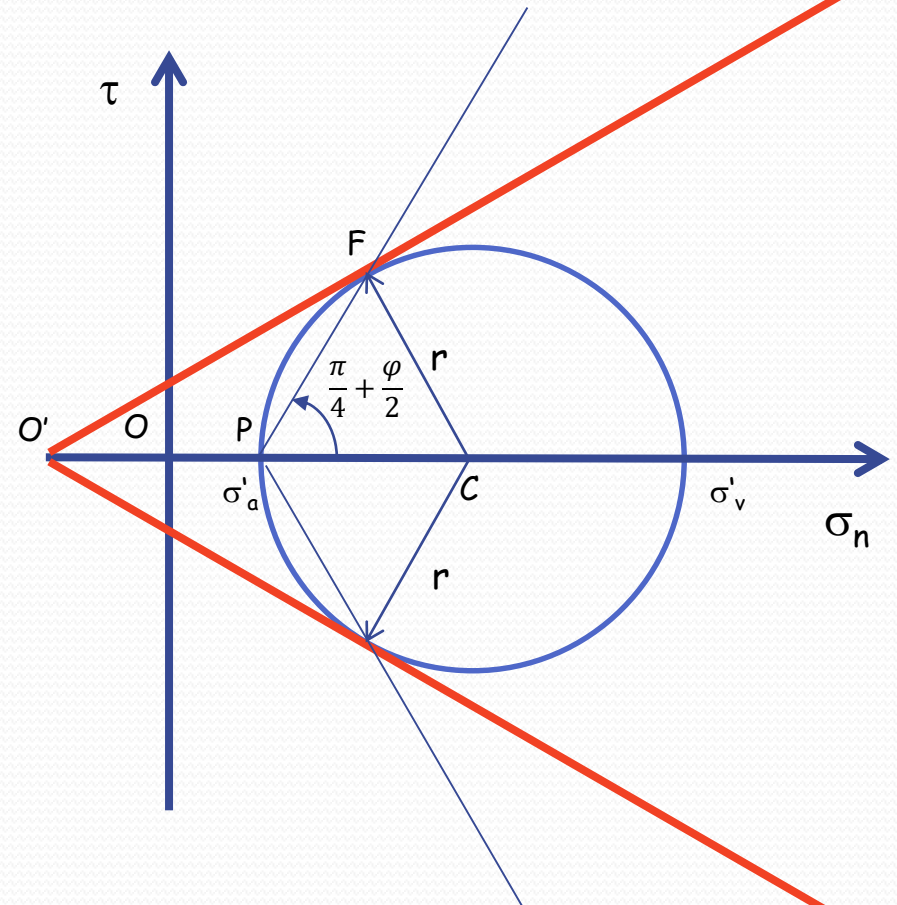
avec $[O'O] = \frac{c}{\tan \varphi}$

$$\frac{\sigma'_v - \sigma'_a}{2} = \left(\frac{c}{\tan \varphi} + \frac{\sigma'_v + \sigma'_a}{2} \right) \sin \varphi$$

$$\sigma'_a = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \sigma'_v - 2c \frac{\cos \varphi}{1 + \sin \varphi}$$

$$\sigma'_a = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \sigma'_v - 2c \tan \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)$$

$$K_a = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)$$



Sol avec cohésion, surface horizontale, état passif

- Théorème des états correspondants (Caquot)

Par définition, $K_p = \frac{\sigma'_p}{\sigma'_v}$

$$r = [O'C] \sin \varphi$$

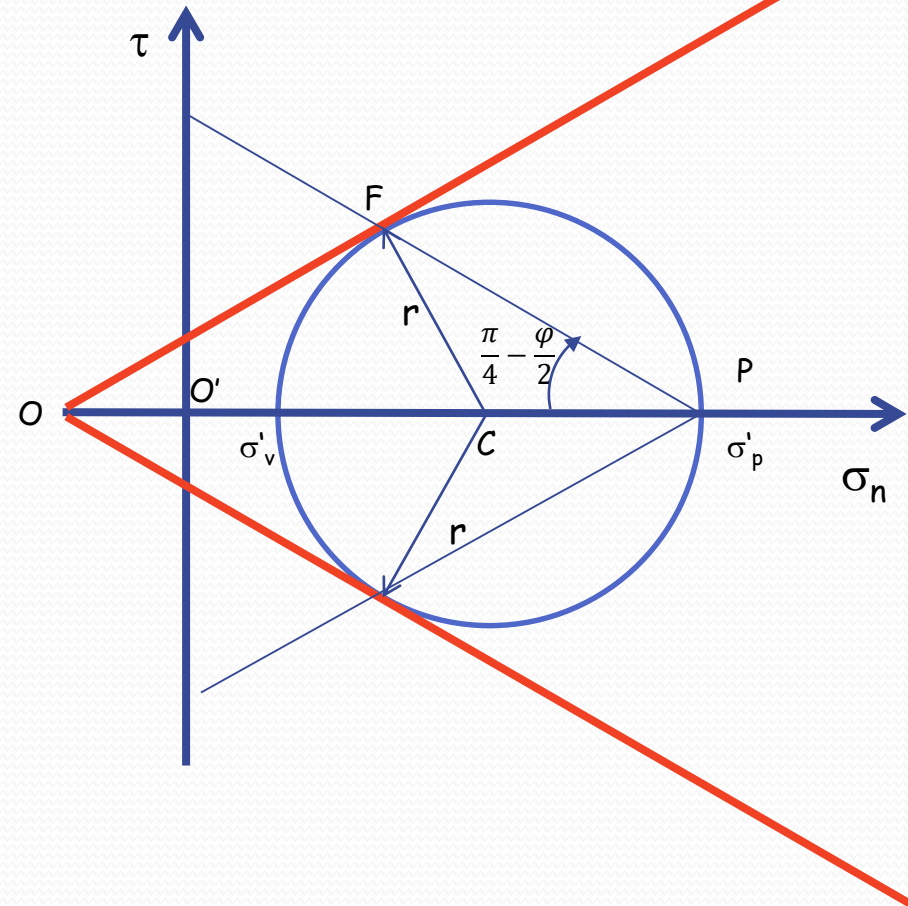
avec $[O'O] = \frac{c}{\tan \varphi}$

$$\frac{\sigma'_p - \sigma'_v}{2} = \left(\frac{c}{\tan \varphi} + \frac{\sigma'_v + \sigma'_a}{2} \right) \sin \varphi$$

$$\sigma'_p = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma'_v + 2c \frac{\cos \varphi}{1 + \sin \varphi}$$

$$\sigma'_p = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \sigma'_v + 2c \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right)$$

$$K_p = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right)$$

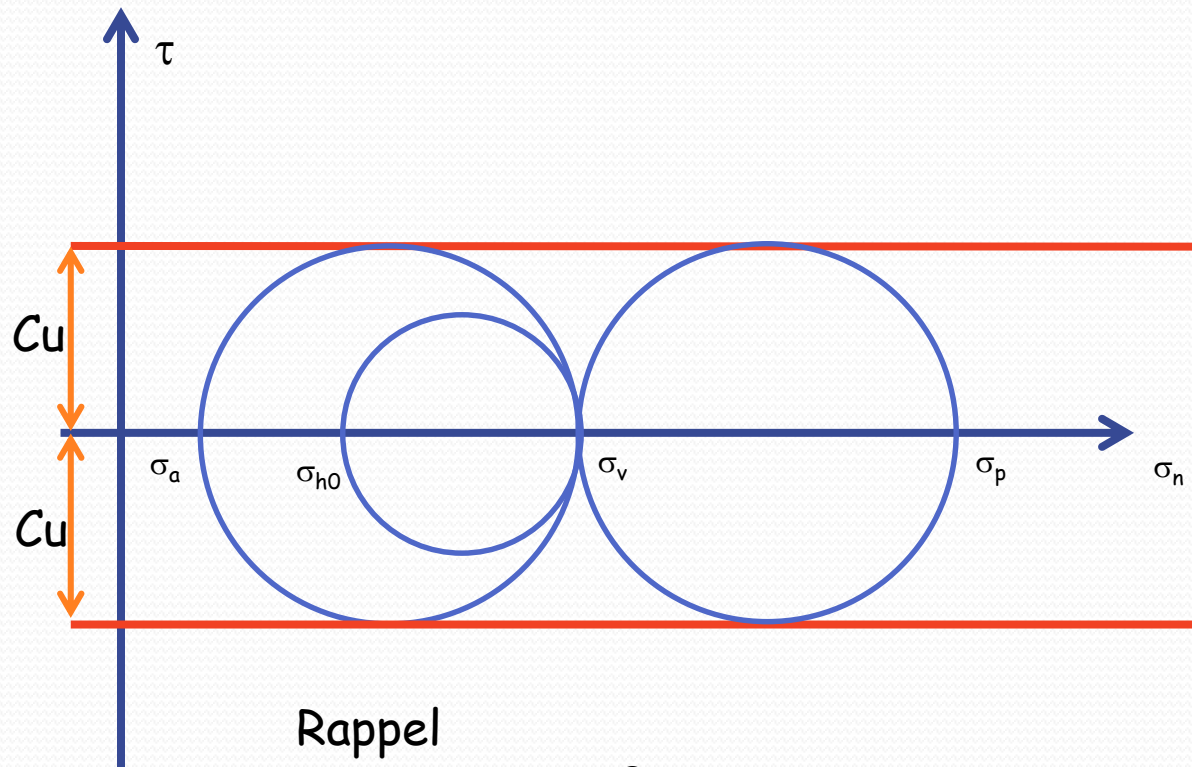


Cas d'un sol purement cohérent

- Argile ou limon en conditions non drainées

$$\sigma_a = \sigma_v - 2Cu$$

$$\sigma_p = \sigma_v + 2Cu$$



Rappel

$$\varphi_{UU} = 0$$

Cu : cohésion non drainée

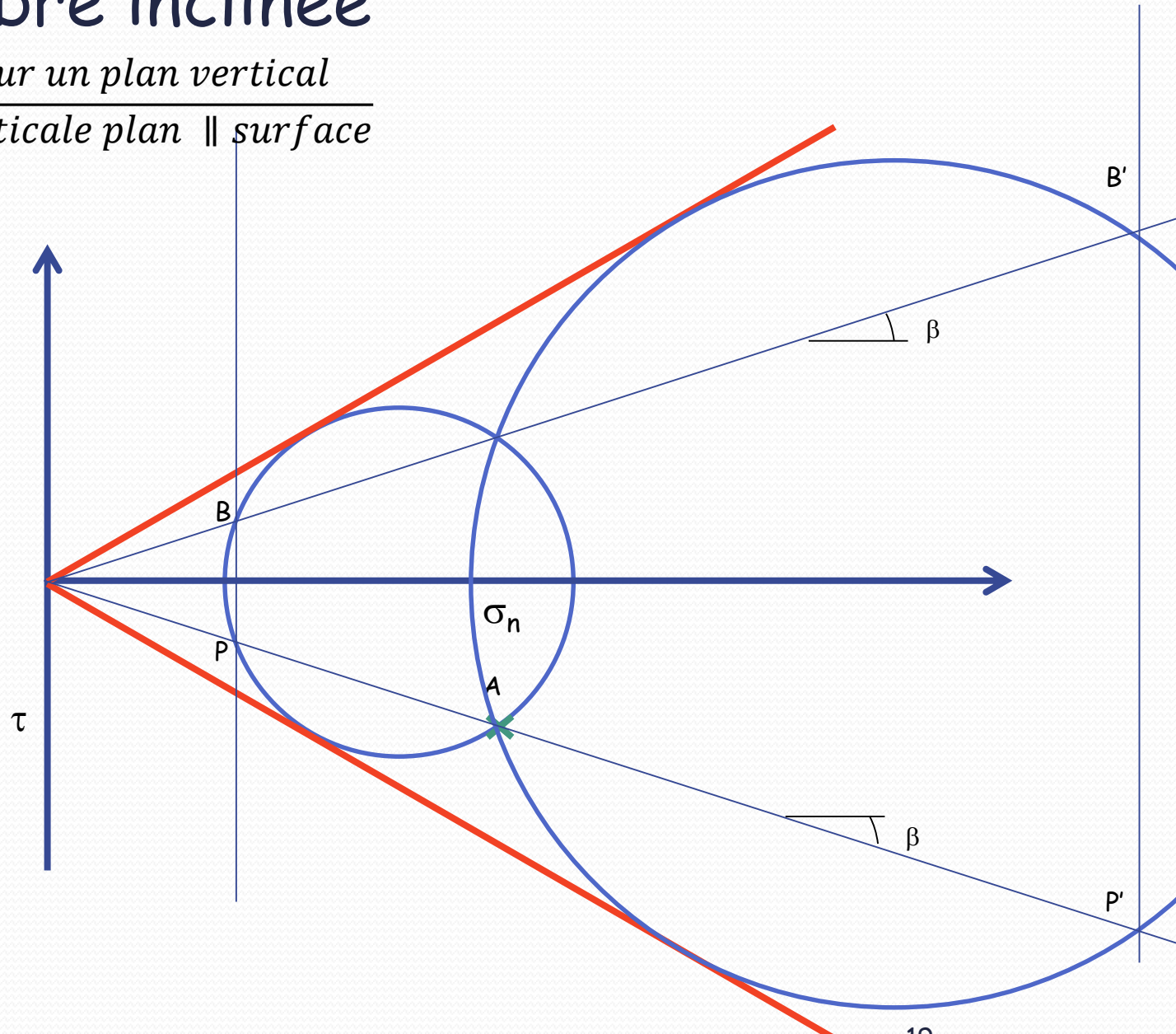
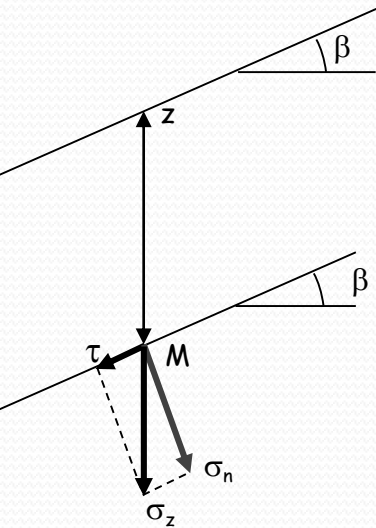
Synthèse

- Pente nulle, interface lisse

	Poussée (état actif)	Butée (état passif)
Sol purement frottant	$\sigma'_a = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \sigma'_v$	$\sigma'_p = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \sigma'_v$
Sol purement cohérent	$\sigma_a = \sigma_v - 2Cu$	$\sigma_p = \sigma_v + 2Cu$
Sol frottant et cohérent	$\sigma'_a = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \sigma'_v$ $- 2c \tan \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)$	$\sigma'_p = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \sigma'_v$ $+ 2c \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right)$

Surface libre inclinée

$$K_{a,\beta} = \frac{\text{contrainte sur un plan vertical}}{\text{contrainte verticale plan } \parallel \text{ surface}}$$



Calcul de K

- État actif

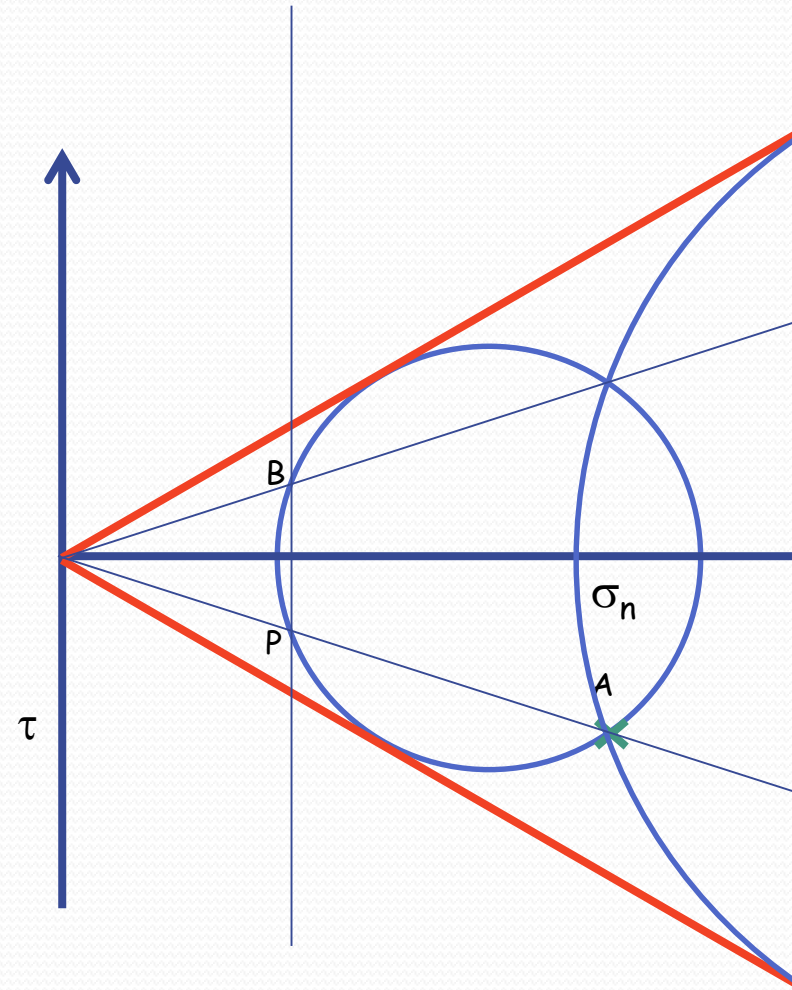
$$K_{a,\beta} = \frac{\text{contrainte sur un plan vertical}}{\text{contrainte verticale plan } \parallel \text{ surface}}$$

$$K_{a,\beta} = \frac{OB}{OA}$$

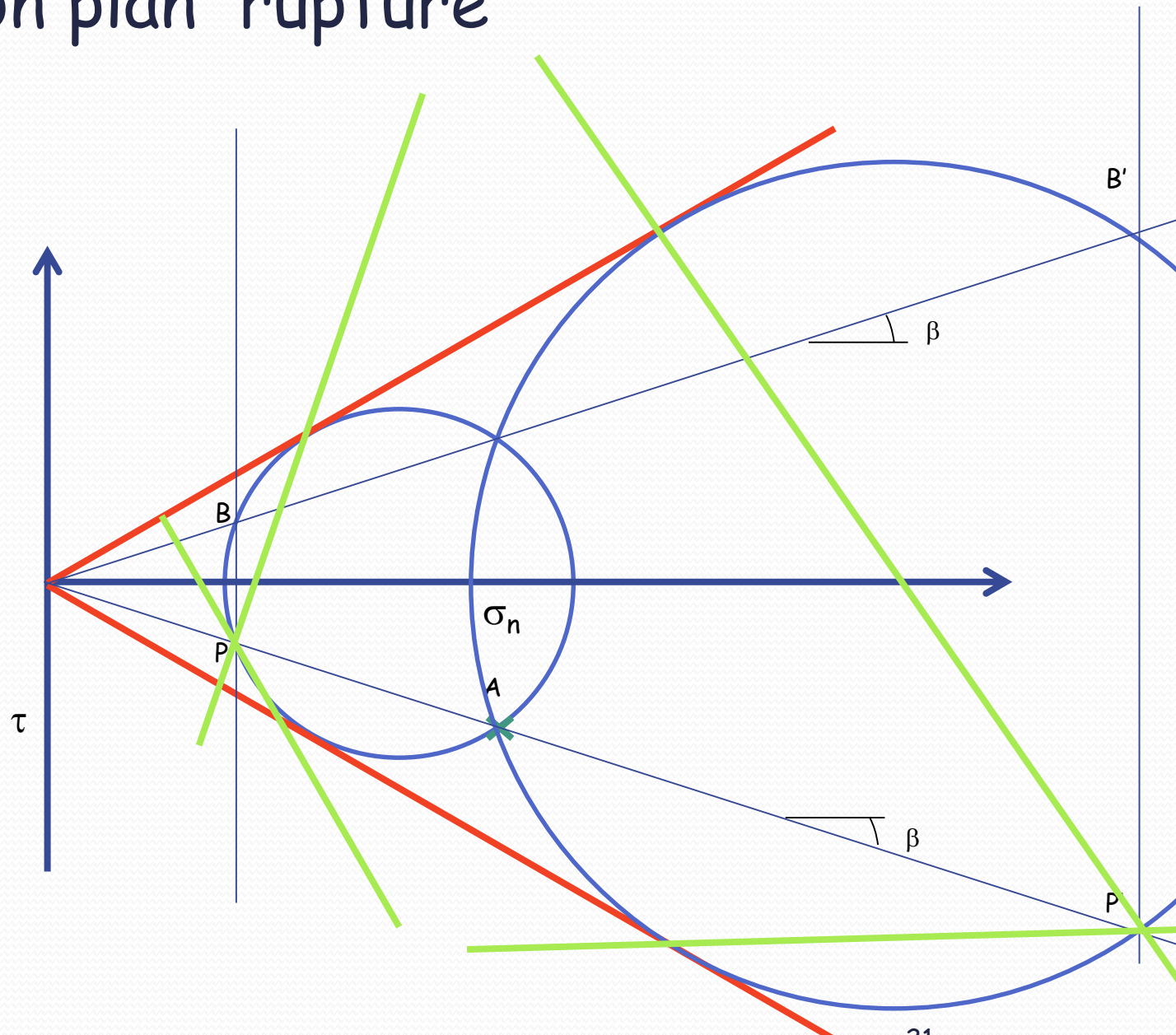
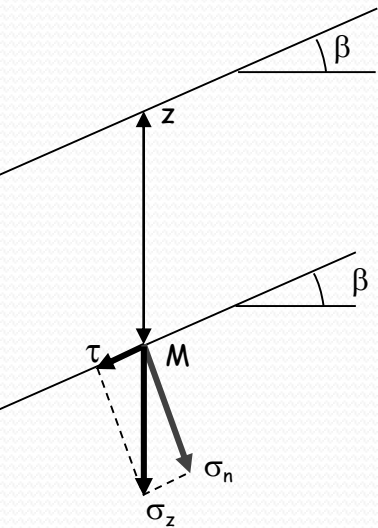
$$K_{a,\beta} = \cos\beta \frac{\cos\beta - \sqrt{\cos^2\beta - \cos^2\varphi}}{\cos\beta + \sqrt{\cos^2\beta - \cos^2\varphi}}$$

- État passif

$$1/K_{p,\beta} = \cos\beta \frac{\cos\beta - \sqrt{\cos^2\beta - \cos^2\varphi}}{\cos\beta + \sqrt{\cos^2\beta - \cos^2\varphi}}$$

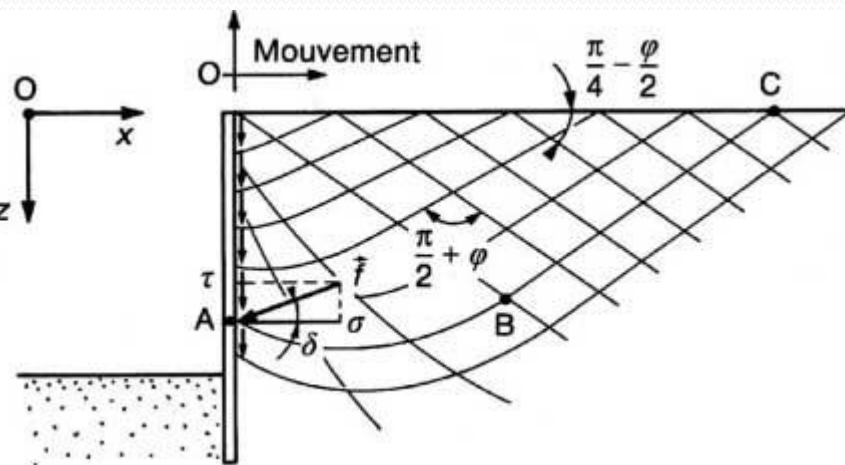


Orientation plan rupture

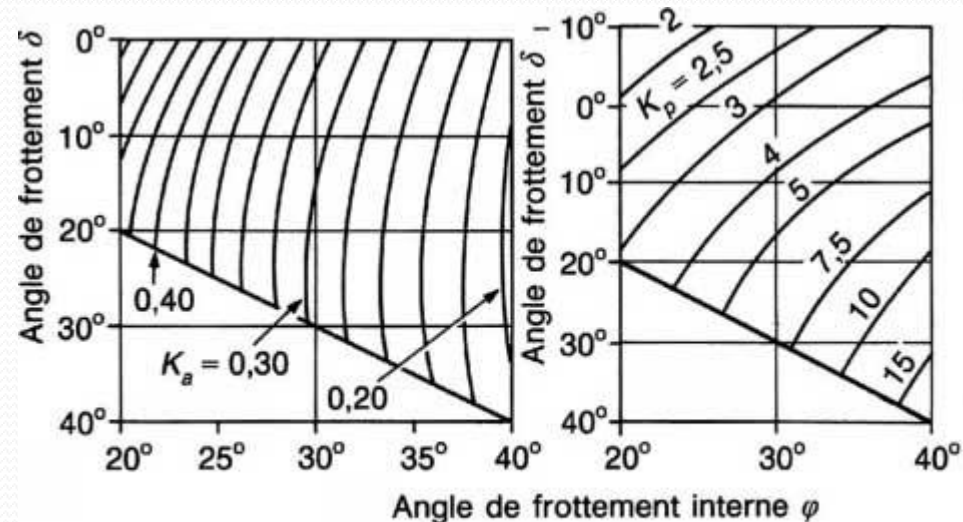


Influence de la rugosité de l'écran

- Limites approches précédentes
 - Les lignes de rupture ne sont pas planes
 - Non prise en compte de l'interaction sol / mur
 - Le frottement écran / sol modifie l'orientation de l'effort sur l'écran qui peut varier entre 0 et φ
- Équilibre de Boussinesq
 - Rupture représentée par spirale logarithmique
 - Méthode de l'équilibre limite



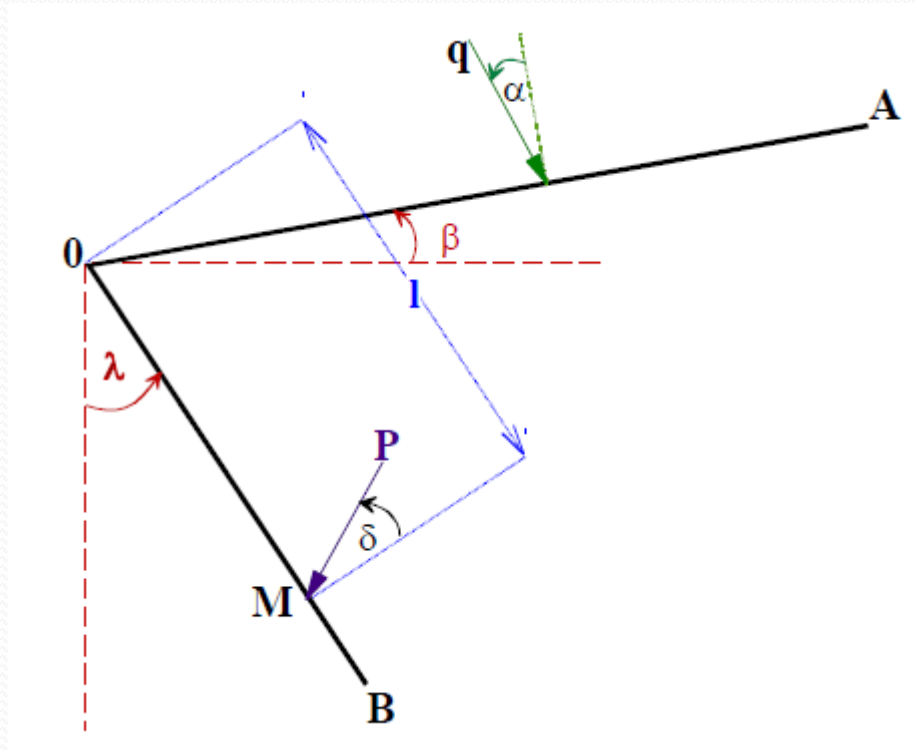
D'après Schlosser



(a) coefficients de poussée K_a
(d'après Sokolovski)

(b) coefficients de butée K_p
(d'après Caquot-Kérisel)

Tables de Caquot, Kérisel et Absi



Tables Caquot, Kérisel et Absi pour Ka

$$\beta = 0, \delta = 2/3\varphi$$

$$\beta = 0, \delta = 0$$

$\lambda \backslash \varphi$	10	15	20	25	30	35	40	45
40	0,644							
35	0,669	0,616	0,615					
30	0,687	0,619	0,598	0,513	0,473			
25	0,698	0,619	0,567	0,498	0,450	0,410	0,374	
20	0,702	0,614	0,540	0,478	0,425	0,379	0,340	0,305
15	0,700	0,602	0,519	0,454	0,396	0,347	0,304	0,267
10	0,691	0,585	0,499	0,427	0,366	0,314	0,269	0,230
5	0,676	0,563	0,471	0,396	0,333	0,280	0,235	0,196
0	0,656	0,537	0,442	0,364	0,300	0,247	0,202	0,163
-5	0,630	0,506	0,408	0,330	0,266	0,214	0,170	0,134
-10	0,600	0,472	0,373	0,295	0,233	0,182	0,141	0,107
-15	0,565	0,435	0,336	0,260	0,200	0,152	0,114	0,083
-20	0,525	0,396	0,299	0,225	0,168	0,124	0,089	0,062
-25	0,483	0,354	0,260	0,190	0,138	0,098	0,067	0,044
-30	0,437	0,312	0,222	0,157	0,110	0,074	0,048	0,030
-35	0,389	0,268	0,185	0,126	0,084	0,054	0,032	0,017
-40	0,339	0,225	0,149	0,097	0,061	0,036	0,019	0,008
-45	0,288	0,183	0,115	0,070	0,041	0,022	0,009	
-50	0,237	0,142	0,084	0,047	0,024	0,010		
-55	0,186	0,104	0,056	0,028	0,011			
-60	0,138	0,070	0,033	0,012				
-65	0,092	0,040	0,014					
-70	0,052	0,016						
-75	0,020							
-80								

$\lambda \backslash \varphi$	10	15	20	25	30	35	40	45
40	0,672							
35	0,701	0,645	0,592					
30	0,722	0,656	0,596	0,541	0,491			
25	0,736	0,660	0,592	0,530	0,473	0,422	0,375	
20	0,742	0,658	0,582	0,514	0,452	0,396	0,346	0,300
15	0,742	0,649	0,566	0,492	0,426	0,367	0,315	0,277
10	0,736	0,634	0,545	0,467	0,398	0,336	0,282	0,235
5	0,723	0,613	0,520	0,438	0,366	0,304	0,250	0,202
0	0,704	0,589	0,490	0,406	0,333	0,271	0,217	0,172
-5	0,680	0,558	0,458	0,372	0,299	0,238	0,186	0,143
-10	0,650	0,525	0,422	0,336	0,265	0,206	0,156	0,116
-15	0,616	0,488	0,384	0,300	0,231	0,174	0,128	0,091
-20	0,577	0,448	0,345	0,263	0,197	0,144	0,102	0,070
-25	0,534	0,406	0,305	0,226	0,164	0,116	0,079	0,060
-30	0,488	0,361	0,264	0,190	0,133	0,090	0,058	0,034
-35	0,440	0,316	0,224	0,155	0,104	0,066	0,040	0,021
-40	0,388	0,269	0,184	0,122	0,077	0,046	0,024	0,010
-45	0,335	0,223	0,145	0,091	0,053	0,028	0,012	
-50	0,281	0,178	0,109	0,063	0,033	0,014		
-55	0,226	0,134	0,075	0,038	0,016			
-60	0,172	0,093	0,046	0,018				
-65	0,120	0,056	0,021					
-70	0,072	0,024						
-75	0,030							
-80								

Tables Caquot, Kérisel et Absi

- Avec une pente (interface lisse) :

K_a

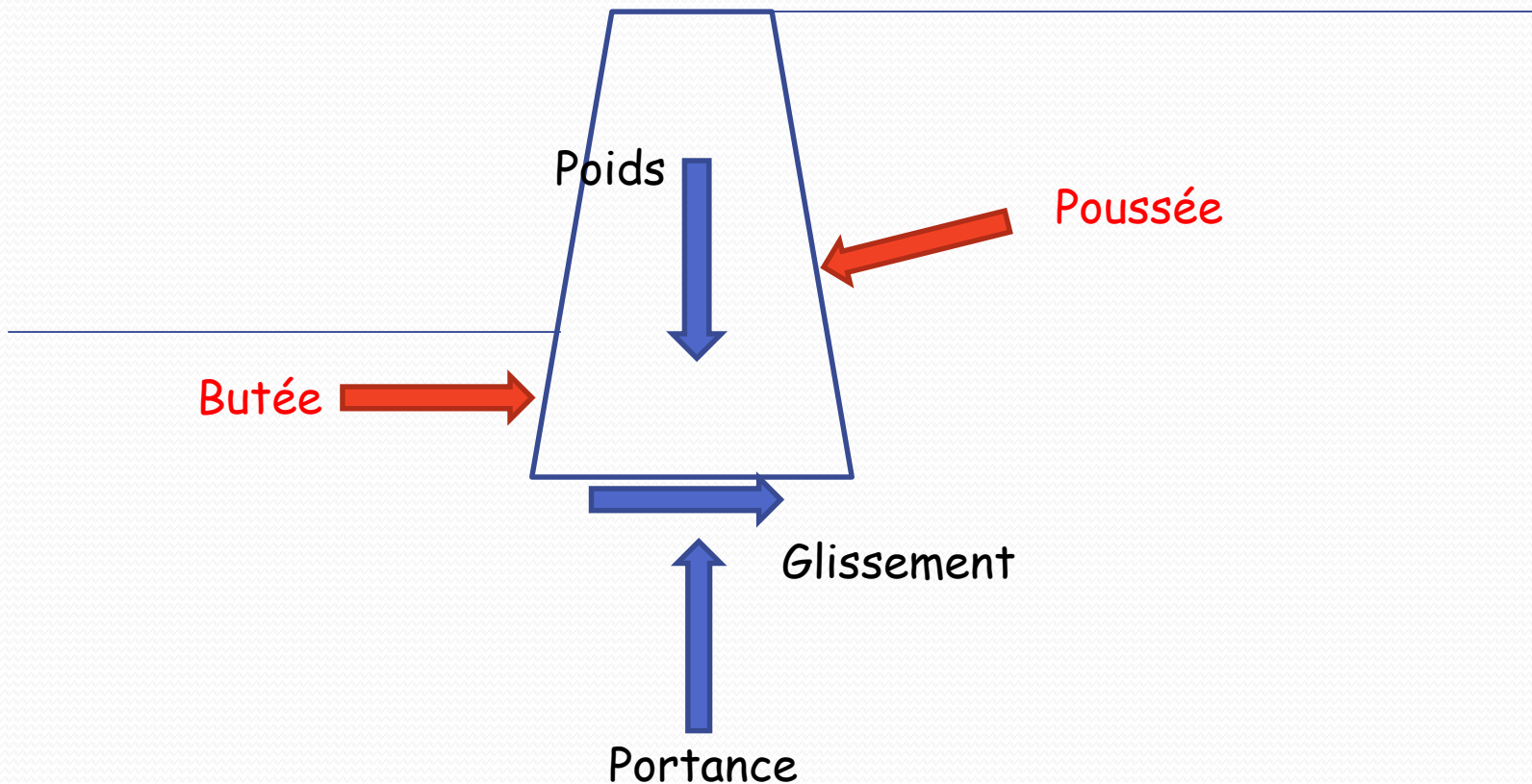
$\downarrow \beta$	$\phi' \text{ (deg)} \rightarrow$						
	28	30	32	34	36	38	40
0	0.361	0.333	0.307	0.283	0.260	0.238	0.217
5	0.366	0.337	0.311	0.286	0.262	0.240	0.219
10	0.380	0.350	0.321	0.294	0.270	0.246	0.225
15	0.409	0.373	0.341	0.311	0.283	0.258	0.235
20	0.461	0.414	0.374	0.338	0.306	0.277	0.250
25	0.573	0.494	0.434	0.385	0.343	0.307	0.275

K_p

$\downarrow \beta$	$\phi' \text{ (deg)} \rightarrow$						
	28	30	32	34	36	38	40
0	2.770	3.000	3.255	3.537	3.852	4.204	4.599
5	2.715	2.943	3.196	3.476	3.788	4.136	4.527
10	2.551	2.775	3.022	3.295	3.598	3.937	4.316
15	2.284	2.502	2.740	3.003	3.293	3.615	3.977
20	1.918	2.132	2.362	2.612	2.886	3.189	3.526
25	1.434	1.664	1.894	2.135	2.394	2.676	2.987

Problématique

- Illustration avec le cas d'un mur poids

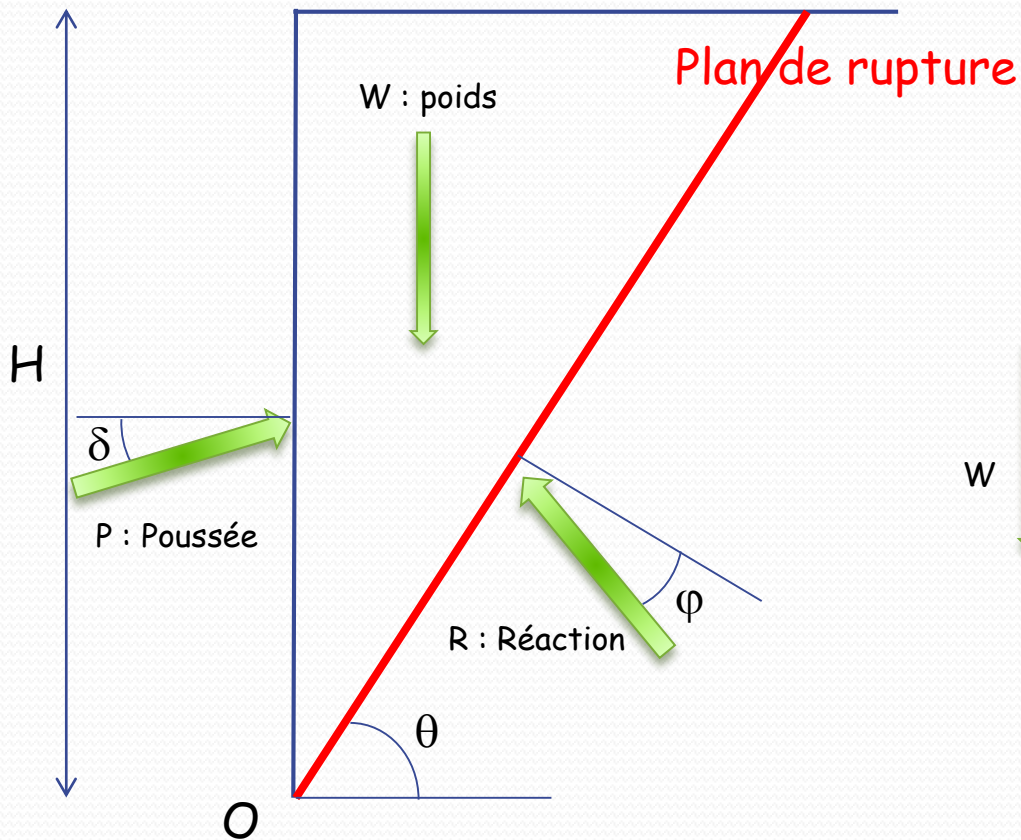


Comment déterminer les efforts de butée et de poussée ?

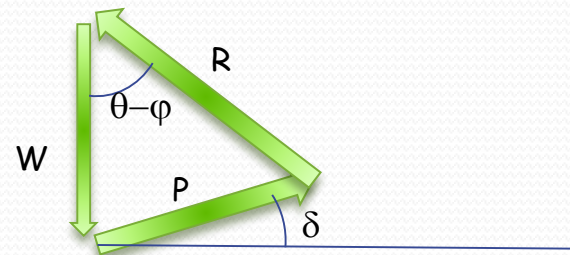
Détermination des efforts de poussée / butée

- Méthode de Coulomb
 - sol semi-infini, homogène, isotrope,
 - condition de déformation plane,
 - courbe intrinsèque de Mohr-Coulomb
 - sol pulvérulent
 - massif à surface libre plane
 - plan de rupture = plan passant par le pied du mur
 - effort de cisaillement complètement mobilisé le long de ce plan
 - Uniquement pour la poussée
 - La répartition des contraintes le long de l'écran est inconnue

Équilibre du coin de Coulomb



- H = hauteur de l'écran
- O = pied de l'écran
- θ = inclinaison plan de rupture



Équilibre du coin de Coulomb

- Méthode : on exprime P en fonction de θ soit, en prenant $\delta = 0$:

$$P = R \sin(\theta - \varphi) \text{ et } W = R \cos(\theta - \varphi), \text{ d'où}$$

$$P = W \frac{\sin(\theta - \varphi)}{\cos(\theta - \varphi)} = W \tan(\theta - \varphi)$$

- Poids du coin de Coulomb (1 mètre linéaire)

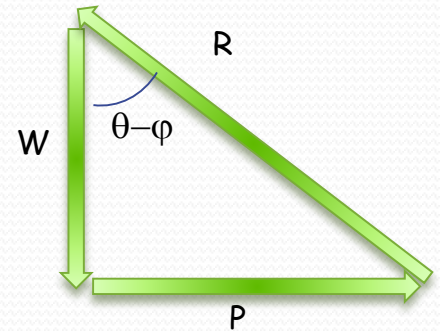
$$W = \frac{1}{2} H^2 \gamma \frac{1}{\tan \theta} \quad \text{d'où} \quad P = \frac{1}{2} H^2 \gamma \frac{\tan(\theta - \varphi)}{\tan \theta}$$

- On cherche le maximum de cette fonction, soit

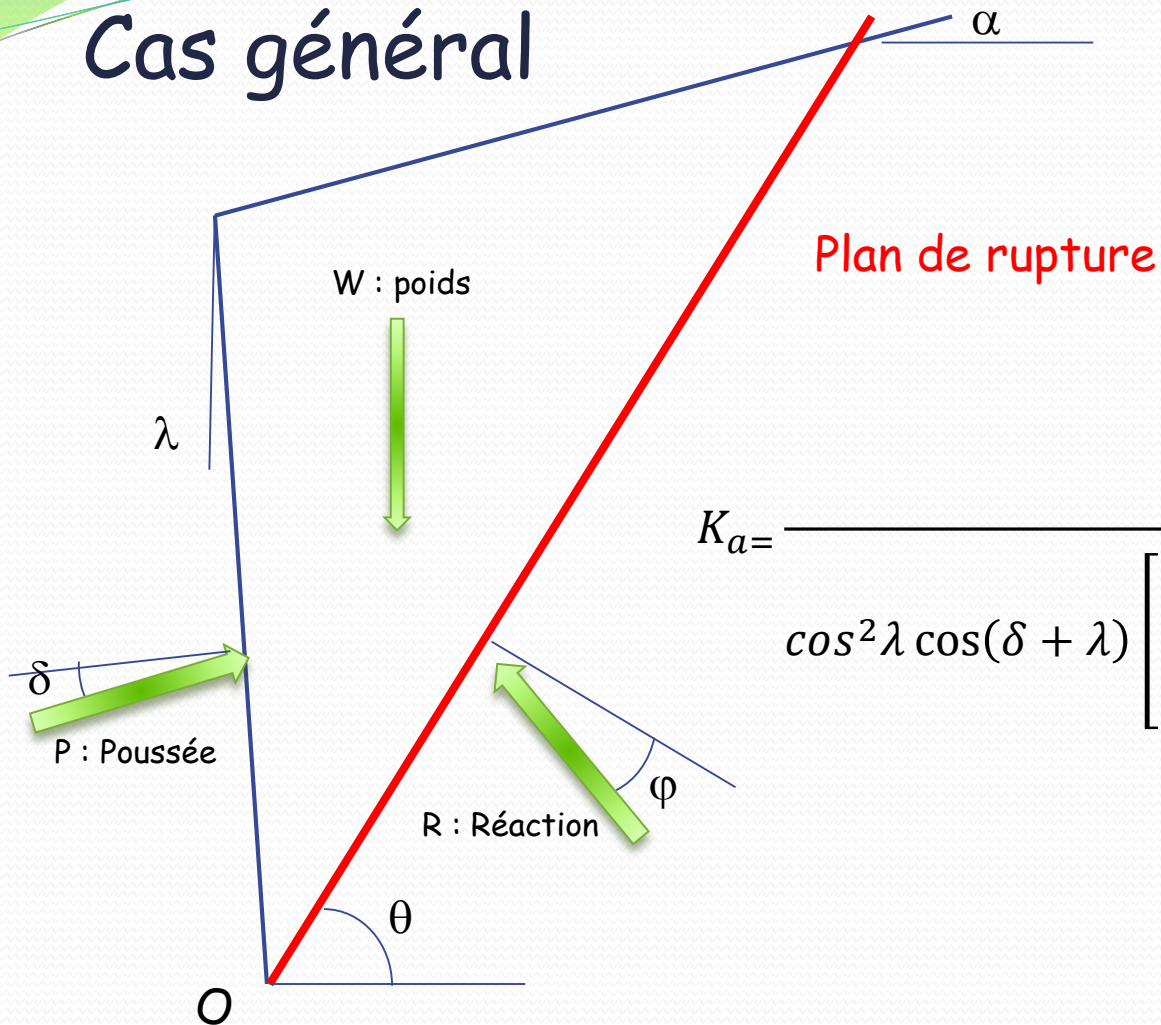
$$\frac{dP}{d\theta} = \frac{1}{4} \gamma H^2 \left[\frac{\sin 2\theta - \sin 2(\theta - \varphi)}{\sin^2 \theta \cos^2(\theta - \varphi)} \right] = 0 \text{ qui s'annule pour } \theta = \frac{\pi}{2} + \frac{\varphi}{2}$$

- D'où :

$$K_a = \frac{\tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)}{\tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right)} = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right), \text{ et } P = \frac{1}{2} H^2 \gamma \tan^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)$$



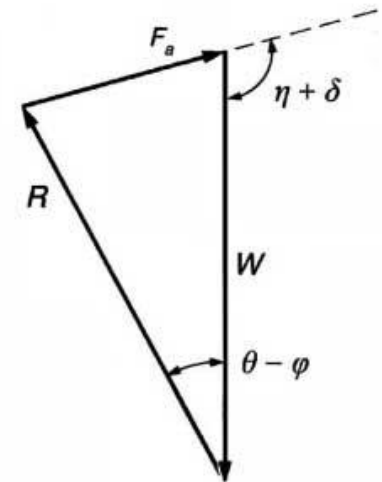
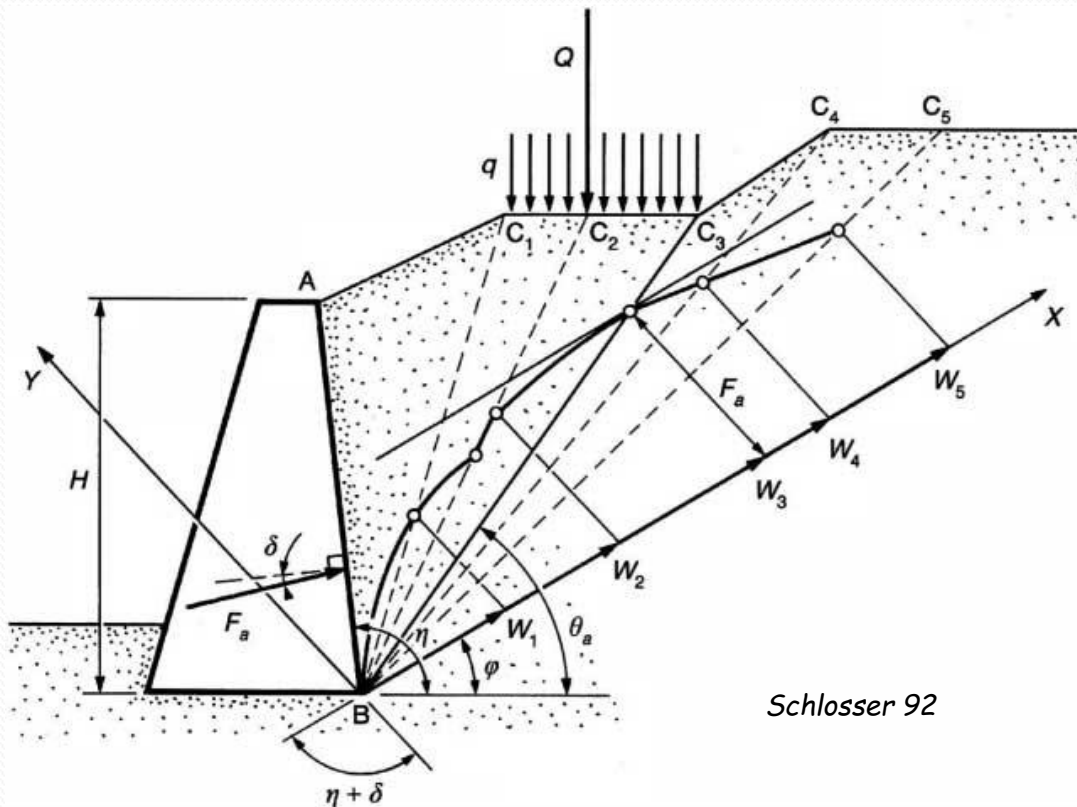
Cas général



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

Méthode graphique de Culmann

- Extension de la méthode de Coulomb



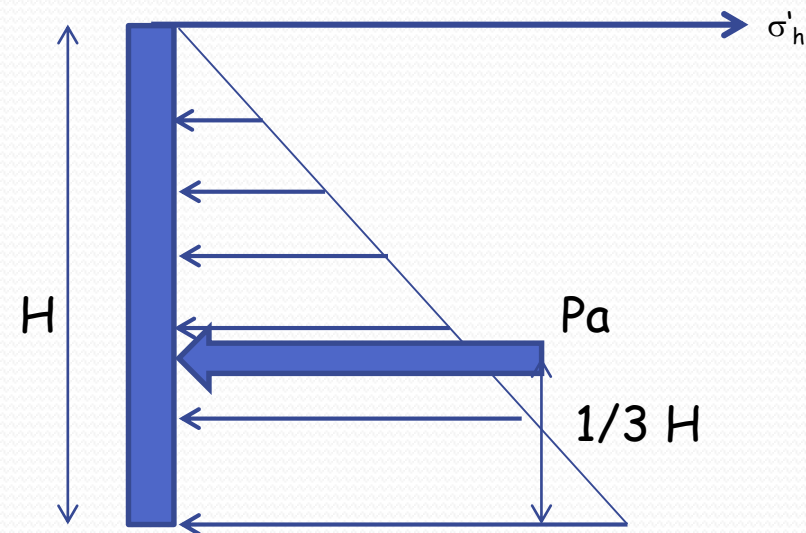
- Prise en compte des surcharges
- Géométrie quelconque

Détermination des efforts de poussée / butée

- Méthode de Rankine
- Hypothèses identiques à celles de Coulomb plus :
 - **La présence d'un écran ne modifie pas la répartition des contraintes dans le massif**
- Cas simple
 - Surface horizontale
 - Sol purement frottant
 - Pas d'interaction sol / mur

Calcul de l'effort de poussée

- La répartition des contraintes horizontales à l'arrière du mur est connue
 - En tout point à l'arrière du mur : $K_a = \sigma'_a / \sigma'_v$
 - Le massif de sol est à l'état actif
 - Diagramme triangulaire



- En un point : $dP_a = \sigma'_h dz \times 1$

- On intègre sur la hauteur du mur pour une « tranche » unité du mur :

$$P_a = \int_0^H \sigma'_h dz, \text{ avec } \sigma'_h = \gamma z K_a$$

$$P_a = \frac{1}{2} \gamma z^2 K_a$$

- Le point d'application de la poussée est à $1/3$ de la base

- Unités : kN / ml**

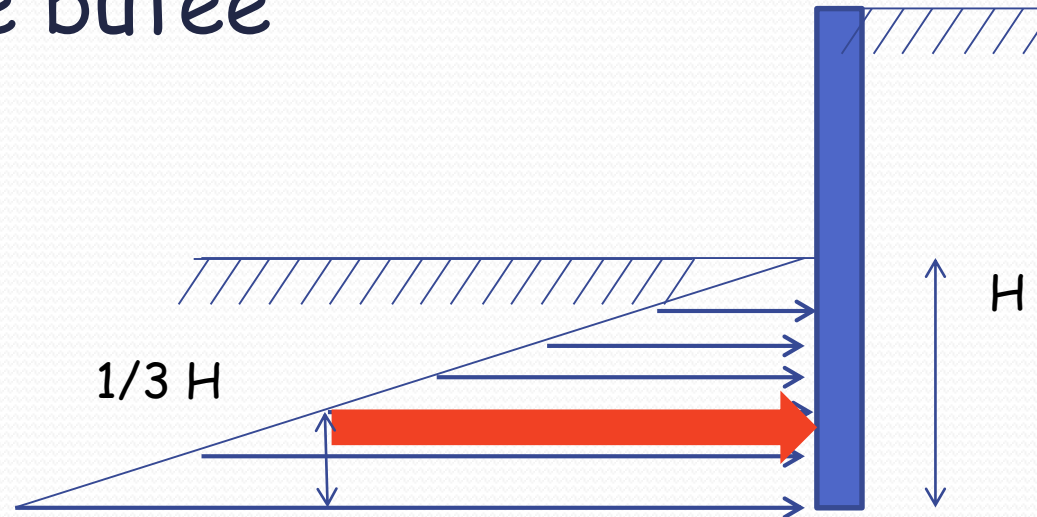
Calcul de l'effort de butée

- En un point : $dP_b = \sigma'_p dz \times 1$
- On intègre sur la hauteur du mur pour une « tranche » unité du mur :

$$P_b = \int_0^H \sigma'_p dz, \text{ avec } \sigma'_p = \gamma z K_p$$

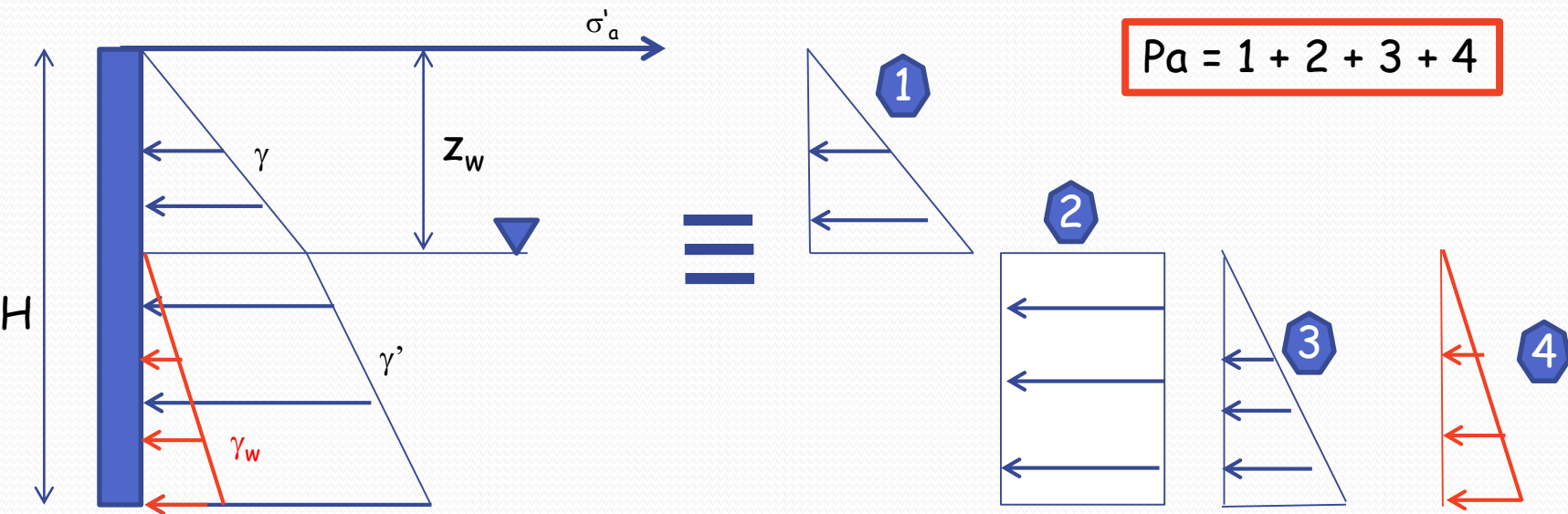
$$P_b = \frac{1}{2} \gamma z^2 K_p$$

- Le point d'application de la poussée est à $1/3$ de la base



Prise en compte de l'effet de l'eau

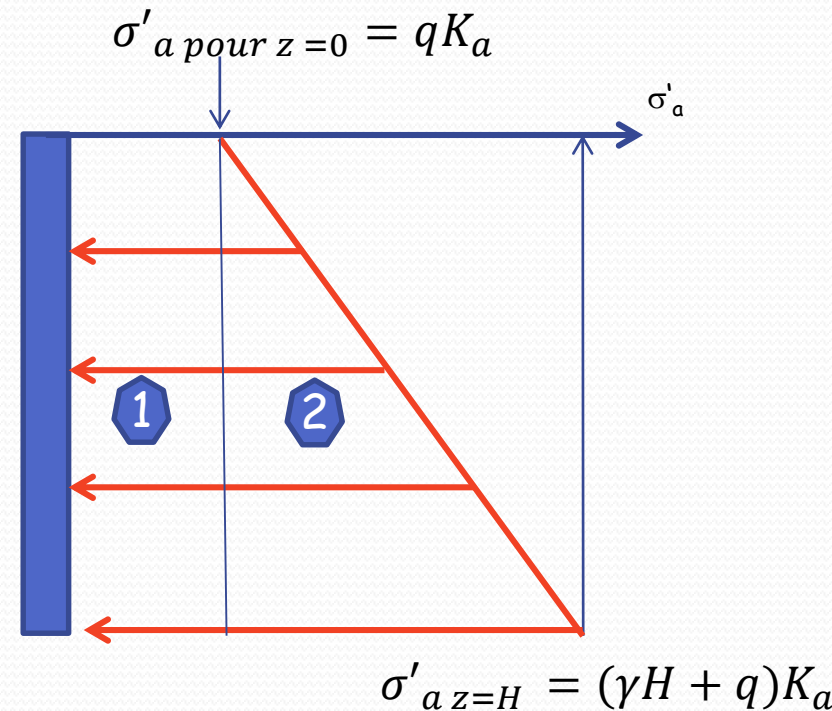
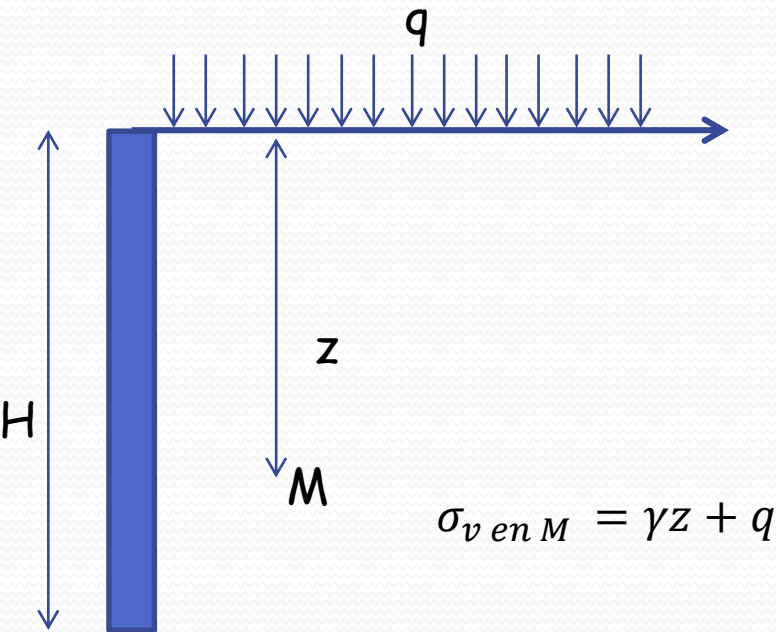
- Cas d'une nappe à l'arrière du mur



$$P_{a1} = \frac{1}{2} \gamma z_w^2 K_a \quad P_{a2} = \gamma z_w (H - z_w) K_a \quad P_{a3} = \frac{1}{2} \gamma' (H - z_w)^2 K_a \quad P_{a4} = \frac{1}{2} \gamma_w (H - z_w)^2$$

Surcharge uniformément répartie

- La méthode de Rankine est applicable



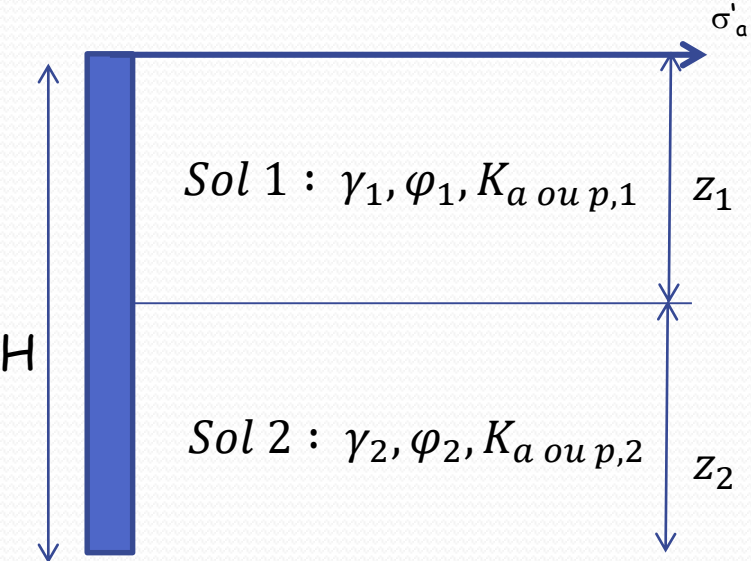
$$P_a = 1 + 2$$

$$P_{a1} = qHK_a$$

$$P_{a2} = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_a$$

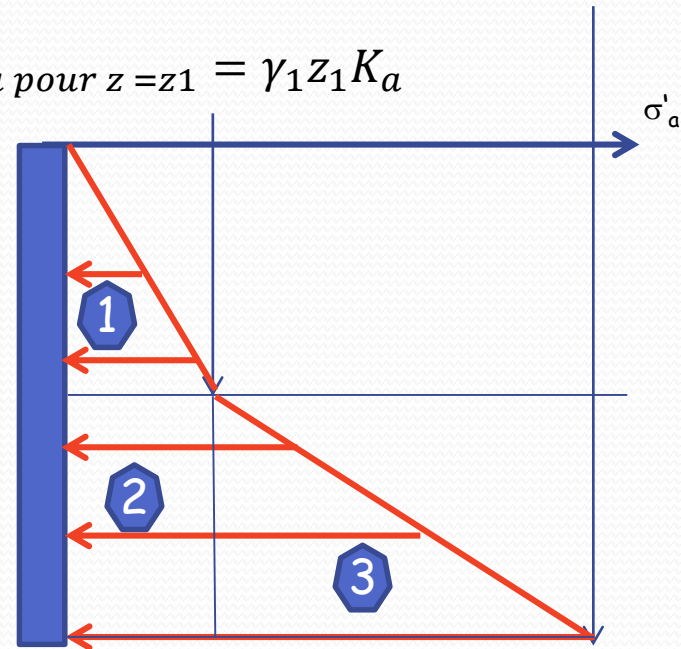
- Attention au point d'application:
 - 1: à $\frac{1}{2}$ du pied du mur
 - 2: à $1/3$ de la base du mur

Cas d'un multicouche



$$\sigma'_a \text{ pour } z=H = (\gamma_1 z_1 + \gamma_2 z_2) K_a$$

$$\sigma'_a \text{ pour } z=z_1 = \gamma_1 z_1 K_a$$



$$P_a = 1 + 2 + 3$$

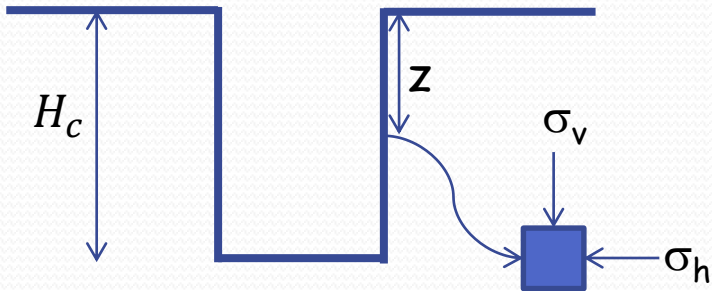
$$P_{a1} = \frac{1}{2} \gamma_1 z_1^2 K_a$$

$$P_{a2} = \gamma_1 z_1 z_2 K_a$$

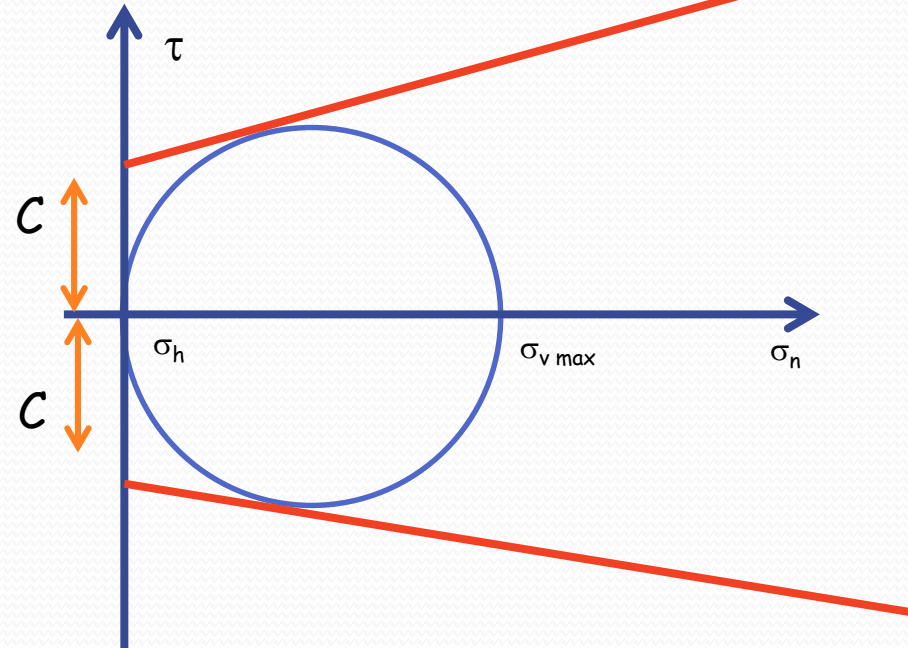
$$P_{a3} = \frac{1}{2} \gamma_2 z_2^2 K_a$$

Stabilité d'une tranchée

- Jusqu'à quelle profondeur une tranchée est-elle stable ?
 - Calcul de la hauteur critique



La contrainte horizontale est nulle le long de la paroi de la tranchée !



- Pour qu'aucun point de la paroi ne soit en rupture, il faut :

$$\sigma_a = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \sigma_v - 2c \tan \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \geq 0$$

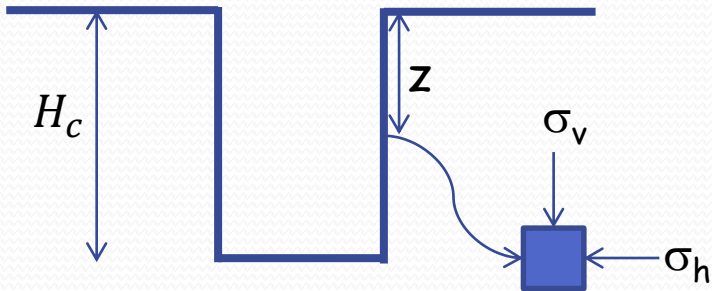


$$\tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \sigma_v = 2c \tan \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)$$

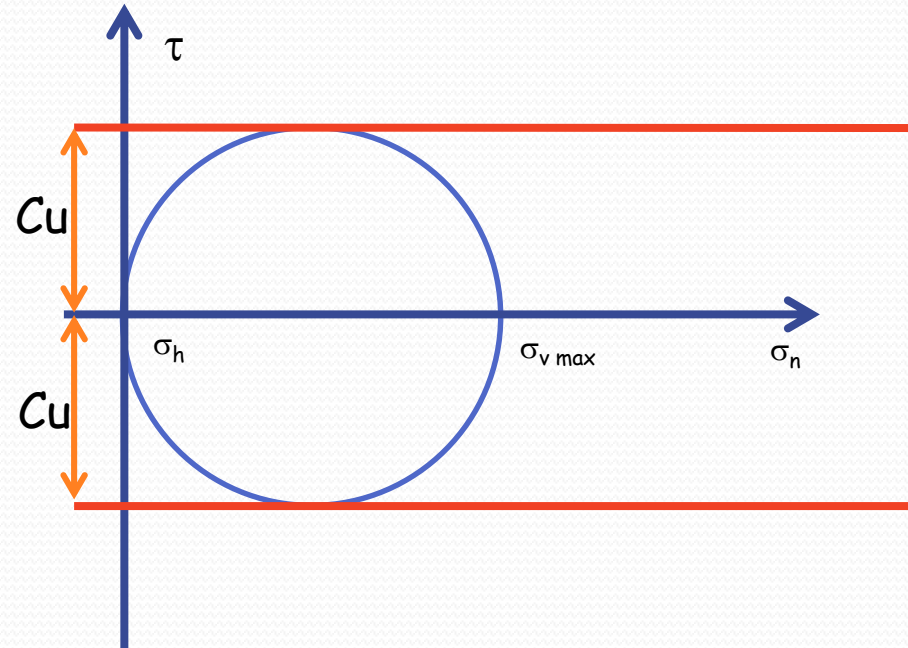
$$H_c = \frac{2c}{\gamma \tan \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)}$$

Stabilité d'une tranchée en conditions non drainées

- Jusqu'à quelle profondeur une tranchée est-elle stable en conditions non drainées ?
 - Calcul de la hauteur critique



La contrainte horizontale est nulle le long de la paroi de la tranchée !

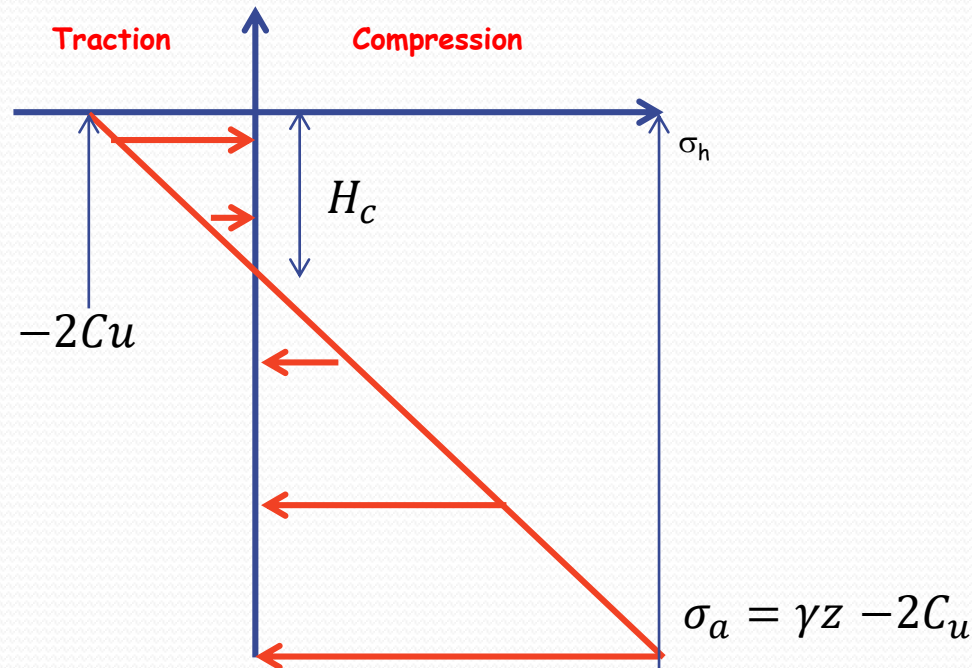
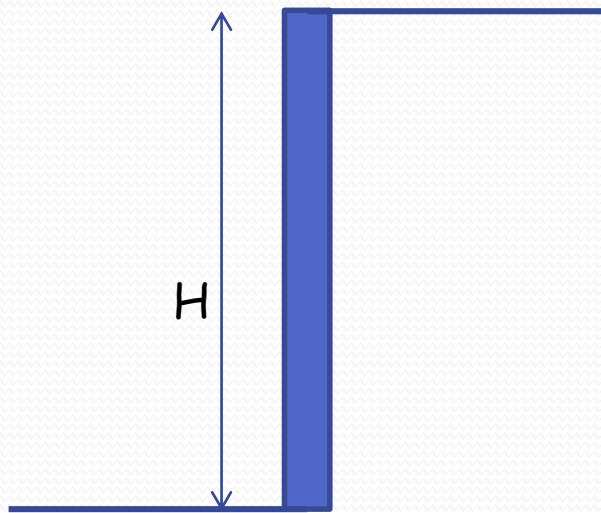


- Pour qu'aucun point de la paroi ne soit en rupture, il faut :

$$\sigma_v - \sigma_h \leq 2C_u \quad \longrightarrow \quad H_c = \frac{2C_u}{\gamma}$$

Poussée pour sol à cohésion non nulle, non drainé

- Diagramme des contraintes



$$\sigma_a = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \sigma_v - 2c \tan \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \geq 0$$

$$\varphi_{UU} = 0, C_u > 0$$

$$\sigma_a = \sigma_v - 2C_u$$

- Calcul de poussée

$$P_a = \frac{1}{2} \gamma z^2 K_a - 2C_u z$$

- Par sécurité, on néglige généralement la partie en traction

$$P_a = \int_{H_c}^H (\gamma z - 2C_u) dz$$

Exercices

1 - On considère un mur de 3m de hauteur dont le dos est lisse et vertical.

a) Dans un premier temps le sable situé à l'arrière du mur est sec, la surface du sable est horizontale. $\phi = 36^\circ$; $\gamma = 18,1 \text{ kN/m}^3$

α) calculer la poussée sur le mur si tout déplacement est impossible.

β) même question si les déformations du mur permettent d'atteindre l'état actif.

γ) même question si une surcharge uniformément répartie est appliquée à la surface extérieure du sable (intensité de la surcharge = 20 kPa)

b) La surface extérieure du sable fait maintenant un angle de 36° avec l'horizontale. Donner la valeur de la poussée dans l'état actif.

c) Le niveau de l'eau dans le sol s'élève jusqu'à 1,20 m de la crête du mur ($\gamma' = 10,6 \text{ kN/m}^3$). Dans l'état actif de Rankine, calculer la valeur de la poussée, déterminer son point d'application et tracer le diagramme des pressions des terres à l'arrière du mur.

d) On suppose maintenant que le dos du mur n'est pas lisse et que l'angle de frottement sol/mur est égale à $2/3\phi$. Refaire les calculs correspondants à α et β .

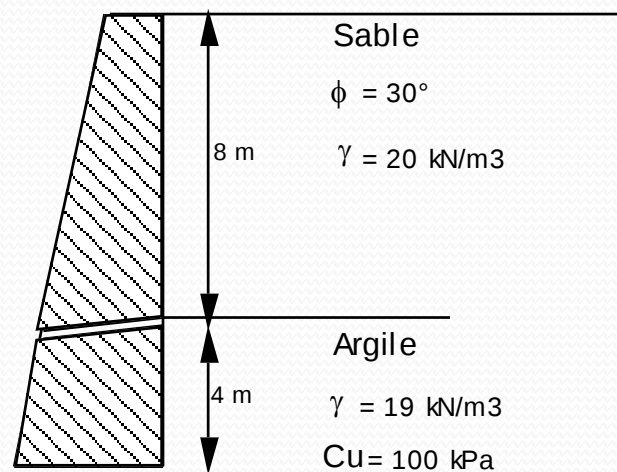
e) Par suite de modifications des conditions d'utilisation, on est amené à réaliser une surélévation de 1m du mur dans le cas a. Calculer la poussée supplémentaire dans le cas actif.

f) En supposant que devant le mur le sable a une hauteur de 1,50 m calculer la butée dans le cas a.

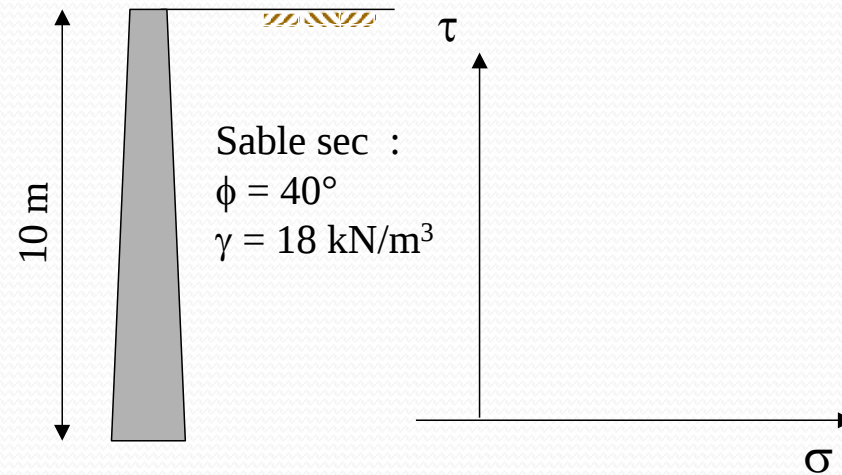
g) On considère le même mur qui soutient un sol à cohésion, calculer la poussée active à court terme ($C_u = 10 \text{ kPa}$; $\gamma_{\text{sat}} = 17,6 \text{ kN/m}^3$) et à long terme ($c' = 0$; $\phi' = 23^\circ$ et $\gamma_{\text{sat}} = 17,6 \text{ kN/m}^3$).

2 - On exécute une fouille dans une argile plastique ($\gamma = 19,2 \text{ kN/m}^3$) avec un talus vertical. Lorsque la fouille atteint la profondeur 5,5m, le talus s'affaisse. Si $\phi_u = 0$, calculer C_u .

3 -Tracer le diagramme des contraintes horizontales sur la face arrière du mur ci-dessous. Le sol ne peut supporter de contrainte de traction, celles-ci seront prises égales à zéro, il n'y a pas de frottement sol-mur. Calculer la poussée s'exerçant sur le mur ainsi que son point d'application.



4 - Compléter les schémas ci-dessous en supposant que le massif constitué du sable sec, est en état d'équilibre limite inférieur de Rankine, et que la loi de Mohr-Coulomb lui est applicable.



Définir le cercle de Mohr correspondant à l'état critique à 10 m de la surface libre.

Définir les directions des lignes de glissement (l'angle avec la verticale)

Quel sera le plan de glissement le plus probable ?

Quelle est l'influence d'une augmentation de la cohésion (cohésion apparente) de 20 kPa sur ce plan de glissement ?