

# **Calculs**

## **Ecran / paroi de soutènement**

B. Lecampion



# ELU – paroi de soutènement

---

- ELU type 1
  - Sécurité vis à vis du Renard hydraulique (cf semaine 9)
  - Sécurité vis à vis du défaut de portance en fond de fouille (cf semaine 9)
- ELU type 2
  - Externe (sol)
  - Interne (Paroi, ancrages, buttons)
  - Les 2 étant liées
- ELU type 3
  - Rupture globale du sol (englobant les ancrages etc.): équivalent à un calcul de stabilité des pentes (incorporant l'ouvrage) – cf serie 10.

# Méthodes de calcul

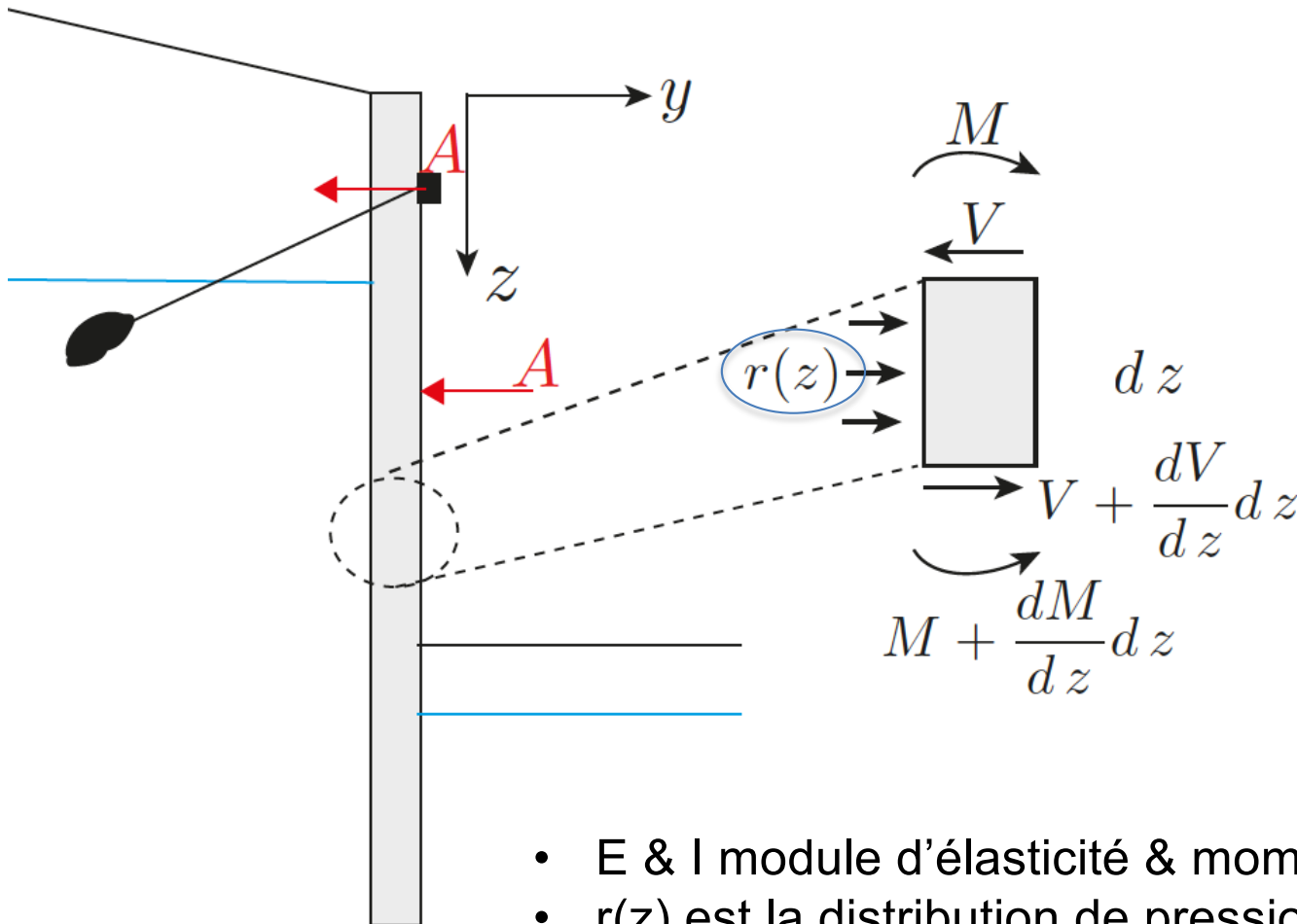
---

- Méthode d'analyse limite (Etats limites Ultimes)
  - Sol rigide-plastique à la rupture
  - Initialement comme on va le voir: on 'découple' l'interaction sol-structure (faisant l'hypothèse d'un sol à la rupture) + calcul 2D
  - Couplage complet entre sol et éléments de structure (parois, ancrage ...) peut être résolu numériquement par élément finis non-linéaire (e.g. OptumG2 / G3)
- Méthode aux modules de réactions
  - Sol modélisé comme des ressort elasto-plastiques... malheureusement encore utilisé dans la pratique ;(
  - ELU type 2 & ELS
- Méthode EF elasto-plastiques
  - Élément finis EP -> pour les ELS
- On se limite dans ce cours aux ELU et un découplage du problème d'interaction sol structure

# Ecran modélisé comme une poutre (par mètre linéaire)

---

Equilibre & comportement



$$\frac{dV}{dz} = r(z)$$
$$\frac{dM}{dz} = V(z)$$

$$M(z) = EI \frac{d^2 y}{dz^2}$$

- $E$  &  $I$  module d'élasticité & moment d'inertie de l'écran
- $r(z)$  est la distribution de pression sur la paroi, somme de la :
  - poussée des terres (à la rupture),
  - de la pression d'eau
  - des efforts de renforcement (ancrage  $A$ , buttons)

**POUSSÉE – BUTÉE : ETATS  
ACTIF & PASSIF  
CF SEMAINE 10 !**

# Recapitulatif – calcul long terme / drainée

---

**Cf. Semaine 10 pour les details !**

- Etat actif (pousée)

- Formule de coulomb pour obtenir  $K_a$
- Estimation de  $e_a$  (composantes verticale et horizontale)
- Attention certains abaques donnent parfois  $K_{ah}$  directement

- 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, solution de Lancellota (2002)
- Estimation de  $e_p$  (composantes verticale et horizontale)
- Attention certains abaques donnent parfois  $K_{ph}$  directement

# Court terme / Non-drainée

---

- Excavation dans les argiles...
- Calcul en contraintes totales:  $c_u$ ,  $\phi_u=0$
- La contrainte totale horizontale se réduit selon Rankine à
  - Actif  $\sigma_h = \sigma_v - 2c_u$
  - Passif  $\sigma_h = \sigma_v + 2c_u$
- La résultante (cas avec surcharge  $q$  pour un sol horizontal)

$$E_a = \left( \frac{1}{2} \gamma H^2 + qH \right) \times \underbrace{\left( 1 - m \frac{4c_u}{\gamma H} \right)}_K \quad m \approx 0.8 - 1$$

$$E_p = \left( \frac{1}{2} \gamma H^2 + qH \right) \times \left( 1 - \frac{4c_u}{\gamma H} \right)$$

**DETERMINATION DES ACTIONS  
SUR LA PAROI EN VUE DU  
DIMENSIONNEMENT**

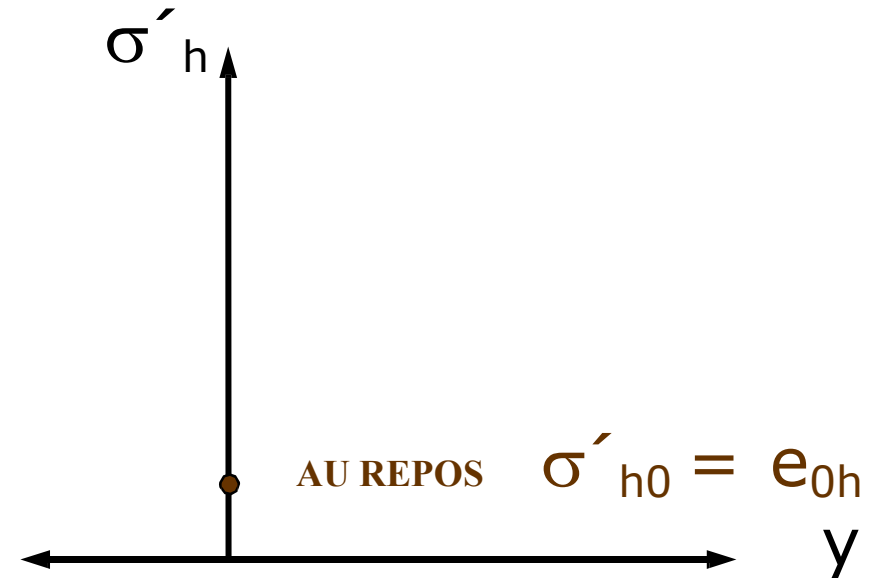
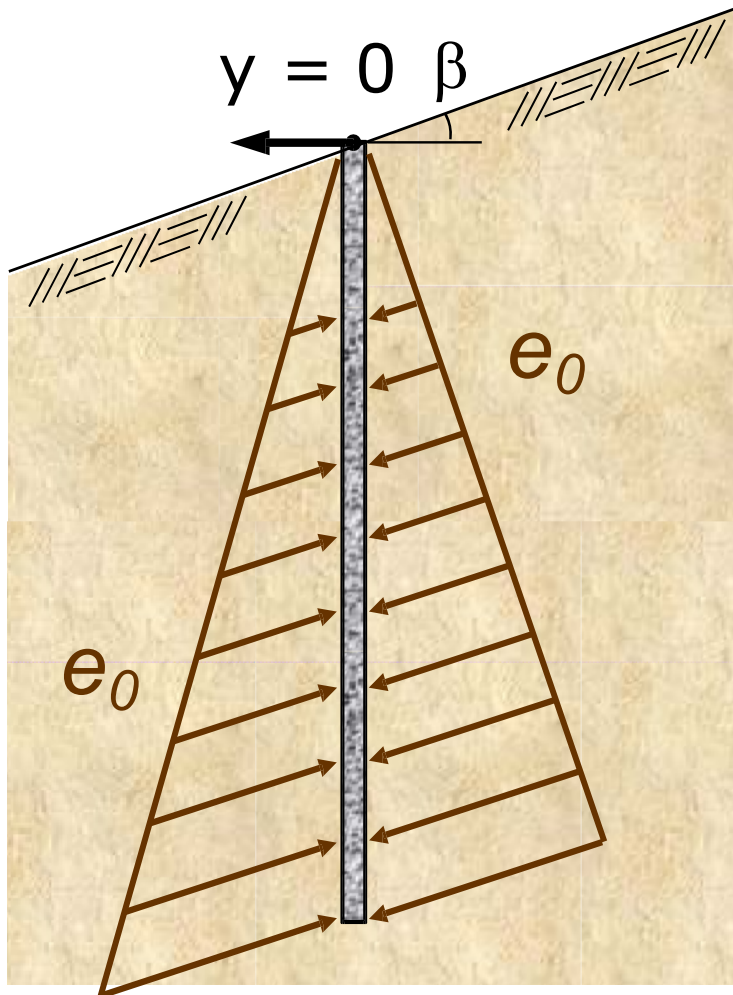
# Actions

---

- Poussée / butée des terres à la rupture
- Pression d'eau (cas long terme)
- Surcharges annexes
  
- Redistribution de la poussée des terres !
  - Lié à la sequence de construction et d'étayage

# Principes de détermination des actions

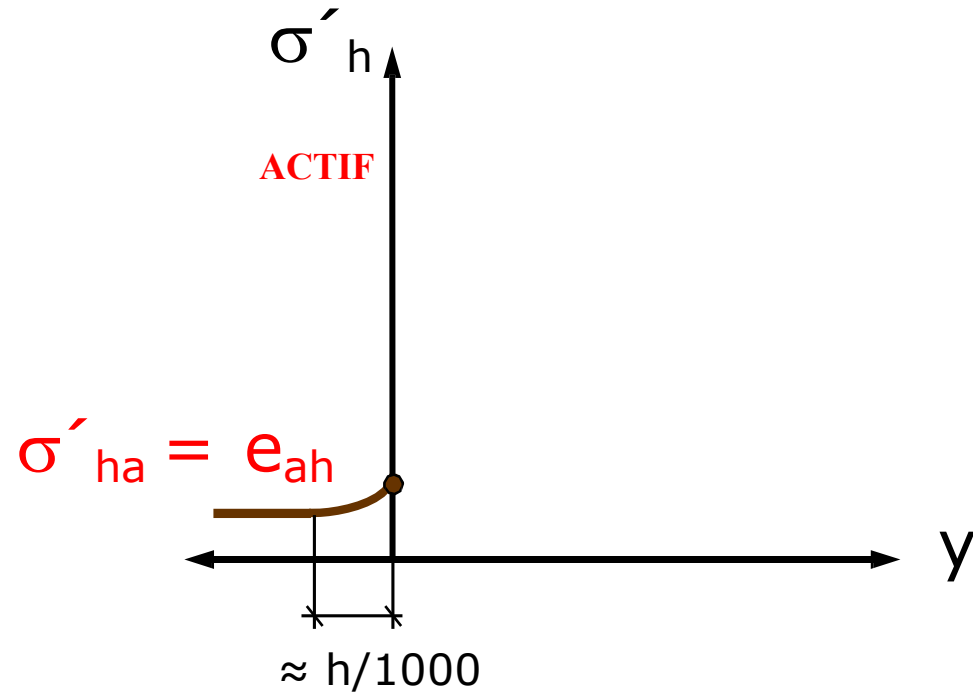
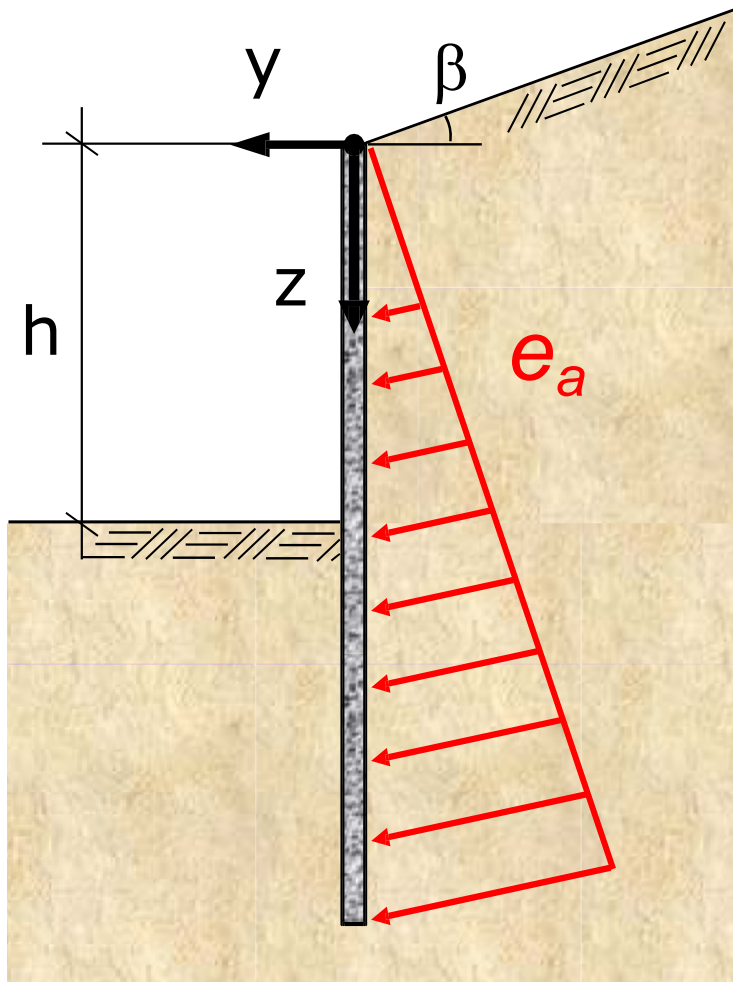
---



## Poussée au repos

- Poussée des terres sans déplacement de la structure porteuse
- $y \approx 0$

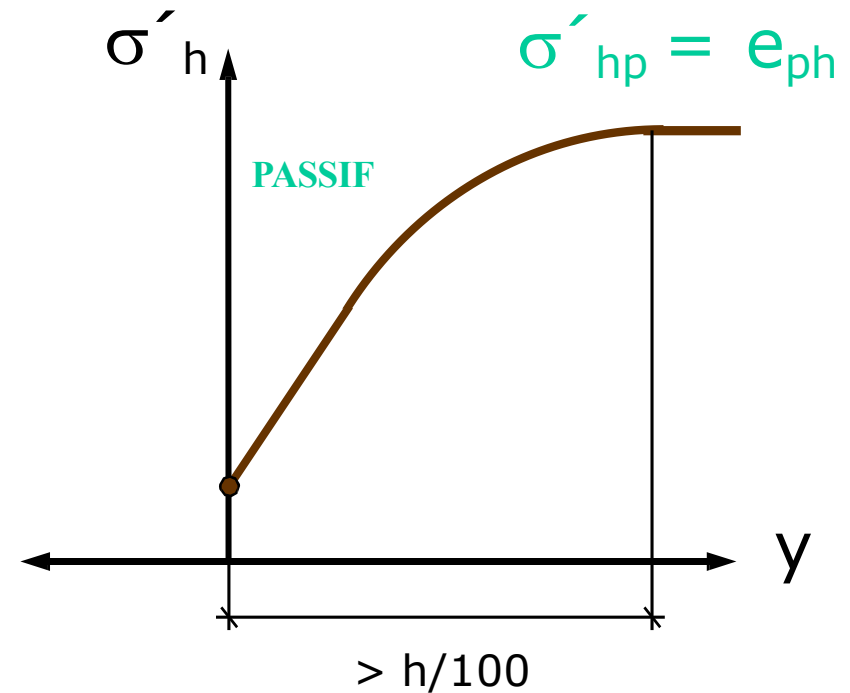
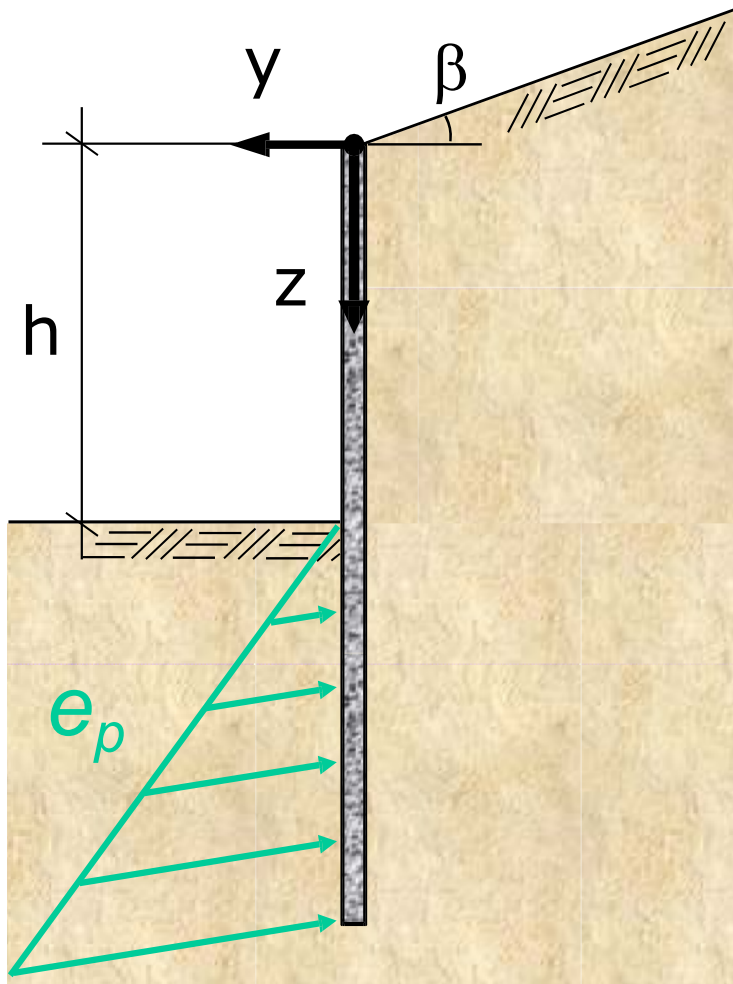
# Principes de détermination des actions



## Poussée limite active

- Poussée la plus petite possible derrière une paroi lors d'un déplacement de la structure vers le vide
- Rapidement mobilisée:  $y > h/1000$

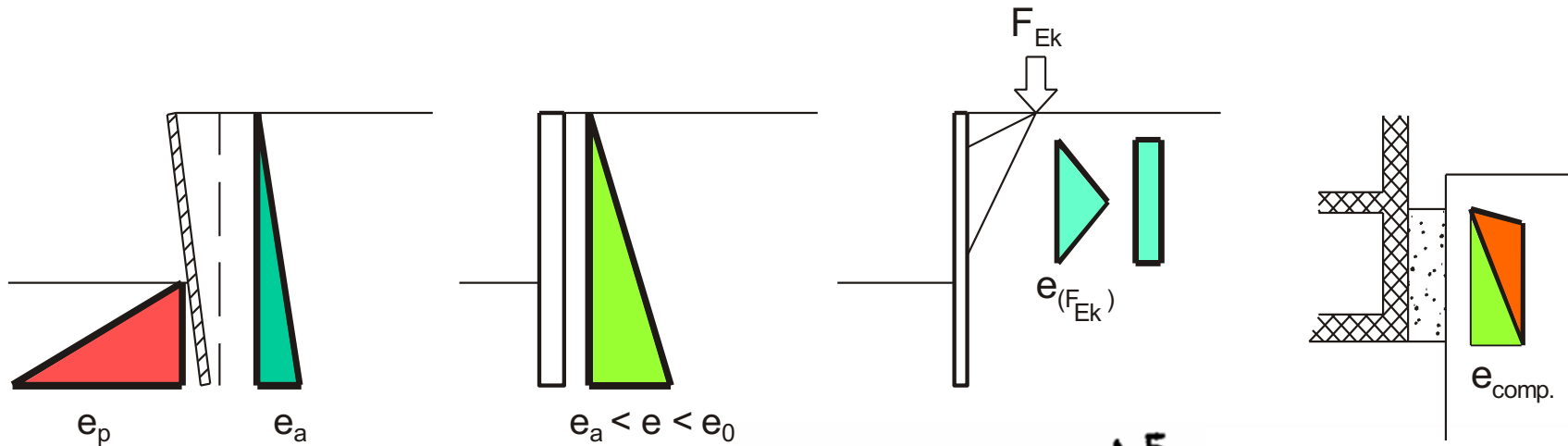
# Principes de détermination des actions



## Poussée limite passive

- Poussée la plus élevée possible devant une paroi lors d'un déplacement de la structure vers le sol
- Mobilisée pour des grands déplacements:  $y > h/100$

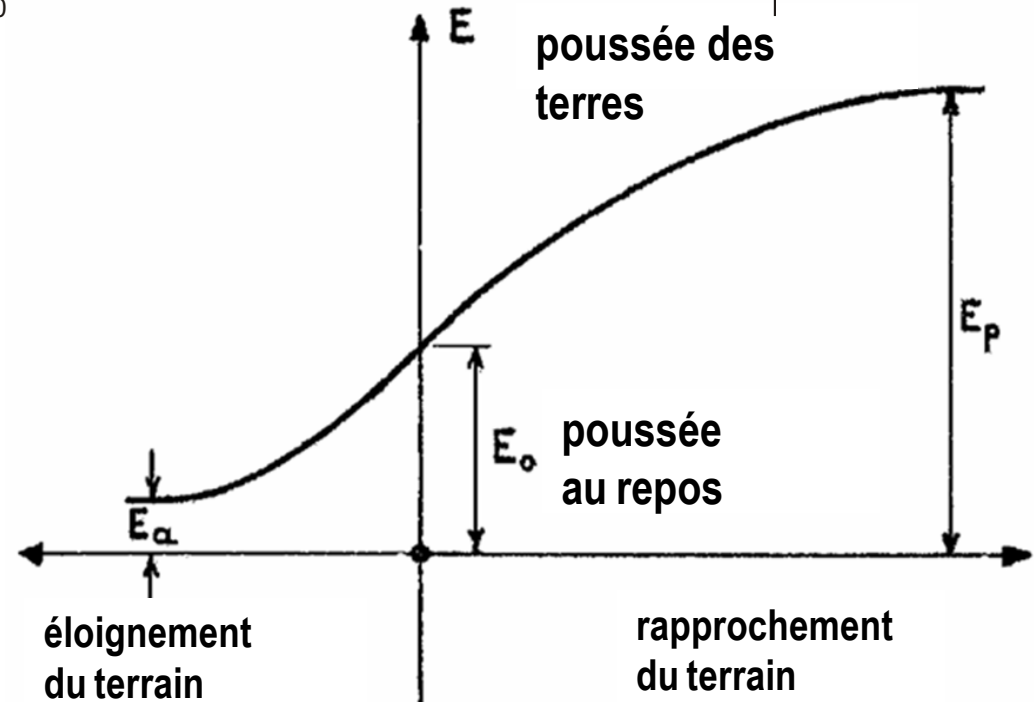
# Principes de détermination des actions



## Compatibilité des actions avec les déformations

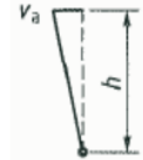
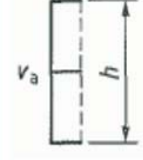
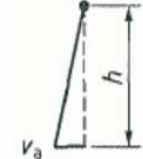
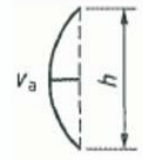
Le choix des actions est tel que celles-ci soient compatibles avec les déformations du terrain

(e.g. SIA 267, Article 2.5.3  
Eurocode etc.)



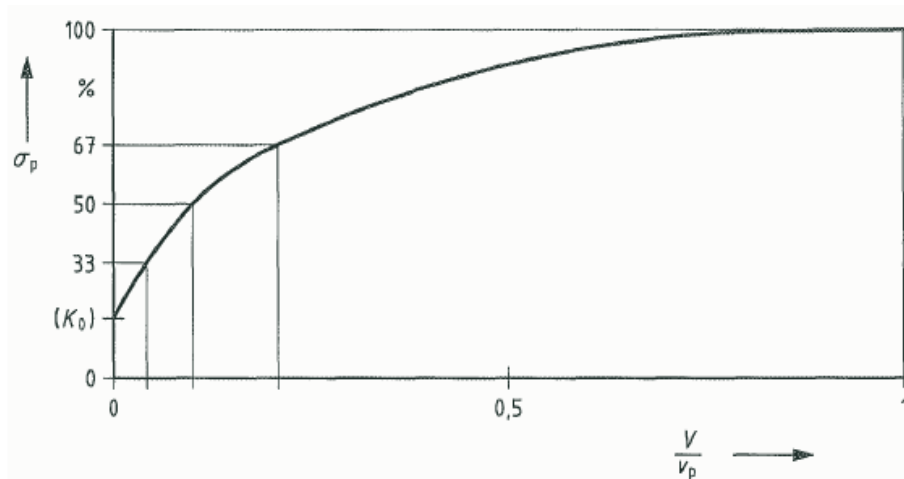
# Mouvement nécessaire à la mobilisation d'un état limite de poussée (état limite actif)

- Amplitude du mouvement fonction de:
  - type de mouvement de l'ouvrage (i.e. rotation, translation, flexion)
  - de la densité du sol
- Ordre de grandeur de  $v_a/h$ 
  - Annexe C (Tabl. C.1) de l'Eurocode 7
- Hypothèses
  - sol non cohérent
  - ouvrage à parement vertical
  - massif à surface horizontale

Type de Mouvement du mur		$v_a/h$ sol lâche %	$v_a/h$ sol dense %
a)		0,4 à 0,5	0,1 à 0,2
b)		0,2	0,05 à 0,1
c)		0,8 à 1,0	0,2 à 0,5
d)		0,4 à 0,5	0,1 à 0,2

# Mouvement nécessaire à la mobilisation d'un état limite de butée (état limite passif)

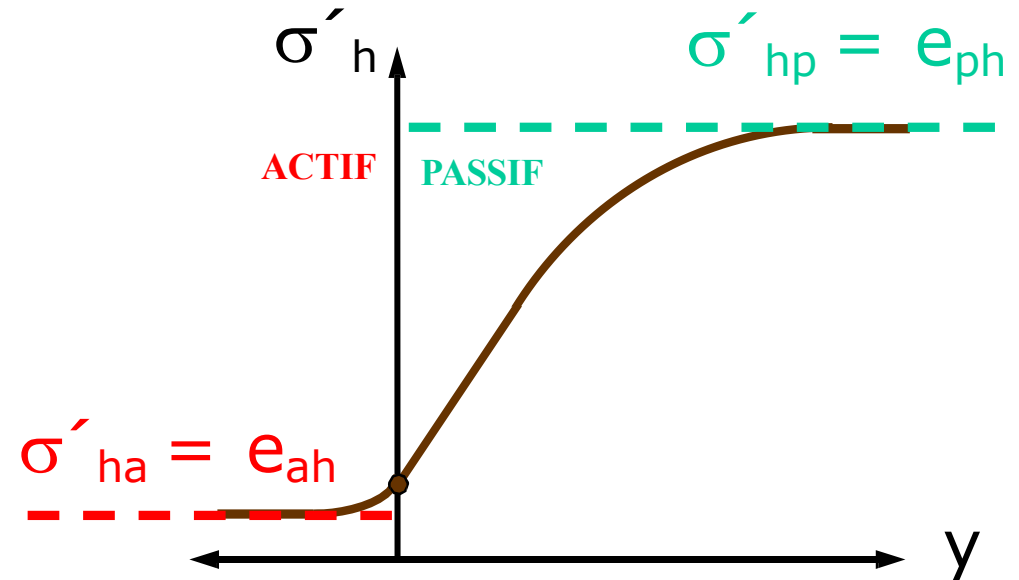
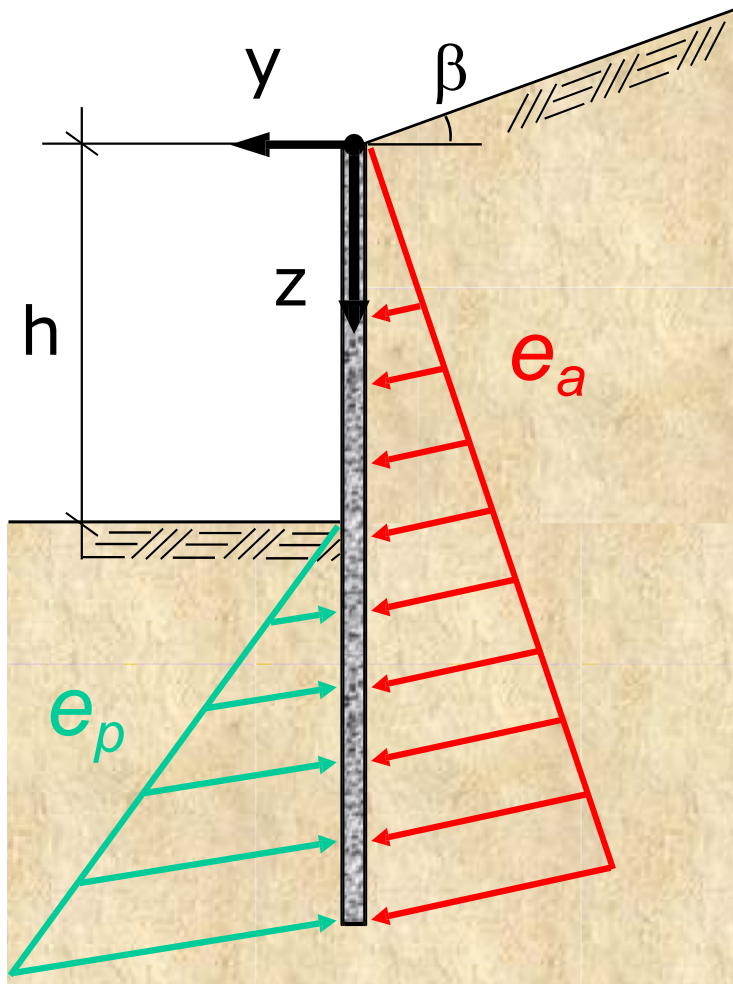
- Mouvement nécessaire **beaucoup plus grand** que celui qui produit la pression des terres à l'état limite de poussée
- Ordre de grandeur de  $v_p/h$ 
  - pour la pression de butée totale
  - pour la moitié de la valeur limite (entre parenthèses)



Type de mouvement du mur		$v_p/h$ sol lâche %	$v_p/h$ sol dense %
a)		7 (1,5) à 25 (4,0)	5 (1,1) à 10 (2,0)
b)		5 (0,9) à 10 (1,5)	3 (0,5) à 6 (1,0)
c)		6 (1,0) à 15 (1,5)	5 (0,5) à 6 (1,3)

Annexe C (Tabl. C.2) de l'Eurocode 7  
valeurs à multiplier par 1,5 à 2,0 si le sol  
se trouve sous le niveau de la nappe

# Principes de détermination des actions



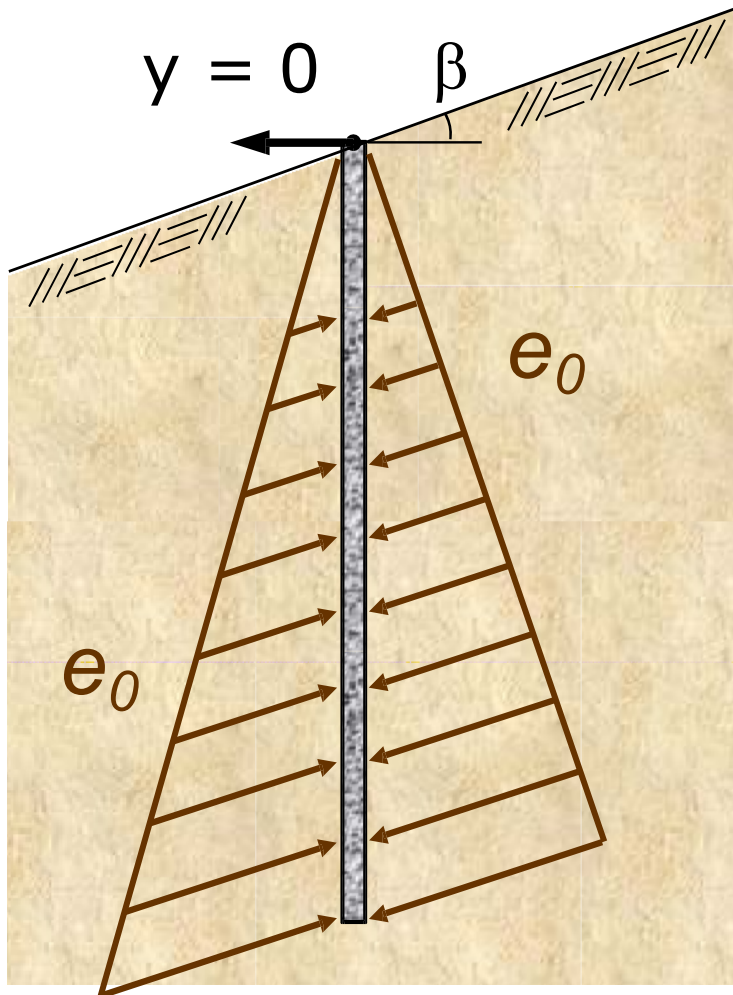
Méthode aux équilibres limites

- Poussée limite active
- Poussée limite passive

Idéalisation:

Comportement rigide-plastique  
du sol

# Poussée au repos



- Poussée des terres sans déplacement de la structure portante
- Terrain incliné (pente  $\beta$ ), normalement consolidé

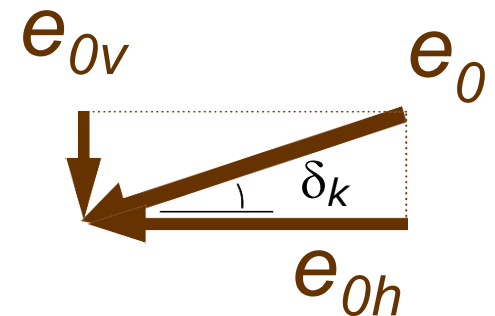
$$K_o = \{(1 - \sin \varphi'_k) (1 + \sin \beta)\} / \cos \beta$$

$$K_{oh} = (1 - \sin \varphi'_k) (1 + \sin \beta)$$

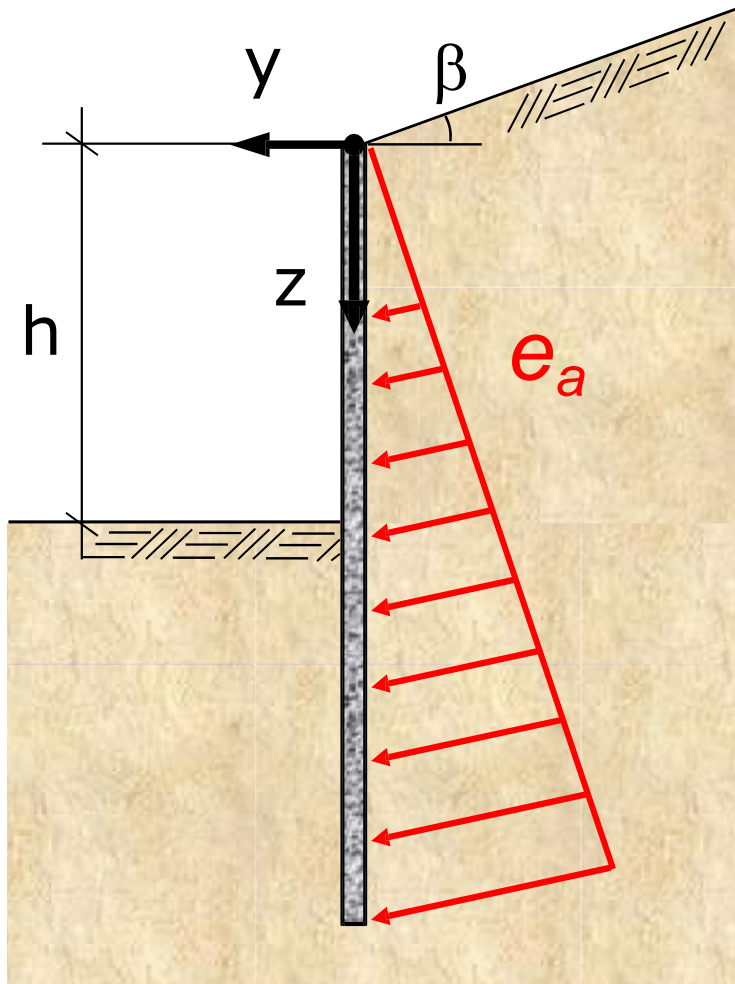
$$e_{oh,k} = K_{oh} \sigma'_v$$

$$e_{ov,k} = e_{oh,k} \tan \delta_k$$

$$\delta_k = \beta$$



# Poussée limite active



- Poussée la plus petite possible derrière une paroi lors d'un déplacement de la structure vers le vide

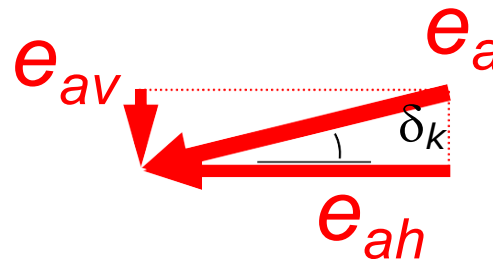
$$e_a = K_a(\phi', \delta, \beta) \sigma'_v - \underbrace{(1 - K_a(\phi', \delta, \beta)) c' \cot \phi'}_{2c\sqrt{K_a} \text{ cas } \beta = \delta = 0}$$

$$e_{a,h} = e_a \cos \delta$$

$$e_{a,v} = e_a \sin \delta$$

- Inclinaison de la poussée

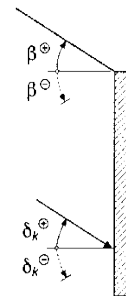
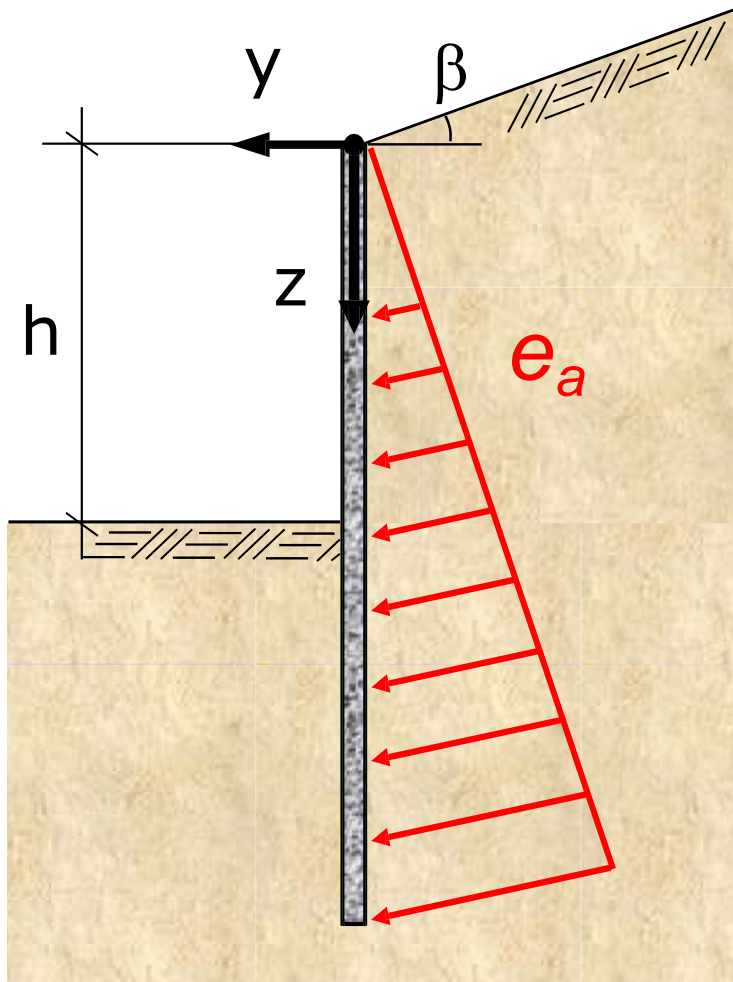
- $\delta_k = \frac{2}{3} \phi'_k$  paroi rugueuse et déplacement relatif suffisant entre le sol et l'ouvrage
- $\delta_k = 0$  paroi lisse ou peu de déplacement relatif entre le sol et l'ouvrage



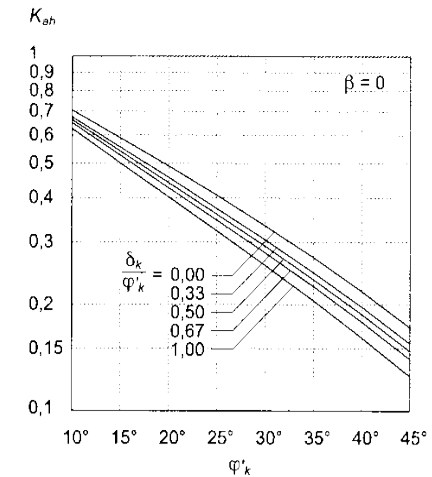
# Poussée limite active

Coefficient de poussée active estimé par **Coulomb**  $K_{ah} = f(\phi'; \delta; \beta)$

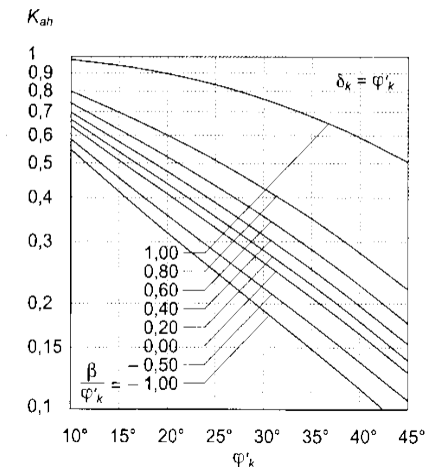
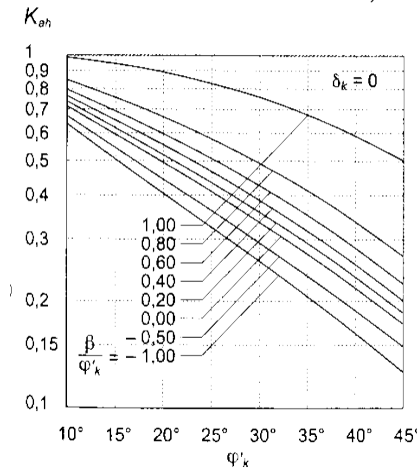
$$K_a = \frac{\cos(\phi' - \lambda)^2}{\cos^2 \lambda \cos(\lambda + \delta) \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\delta + \phi') \sin(\phi' - \beta)}{\cos(\lambda + \delta) \cos(\lambda - \beta)}} \right]^2}$$



Règle des signes



$$K_{a,h} = K_a \cos \delta$$



e.g. abaques à l'annexe B de la SIA 261

# Poussée limite passive

- Poussée la plus élevée possible devant une paroi lors d'un déplacement de la structure vers le sol

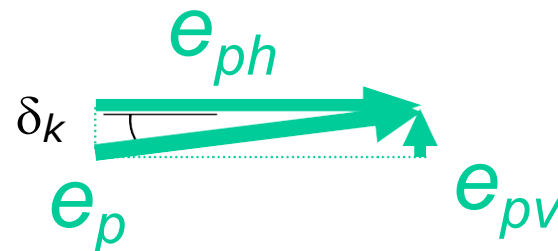
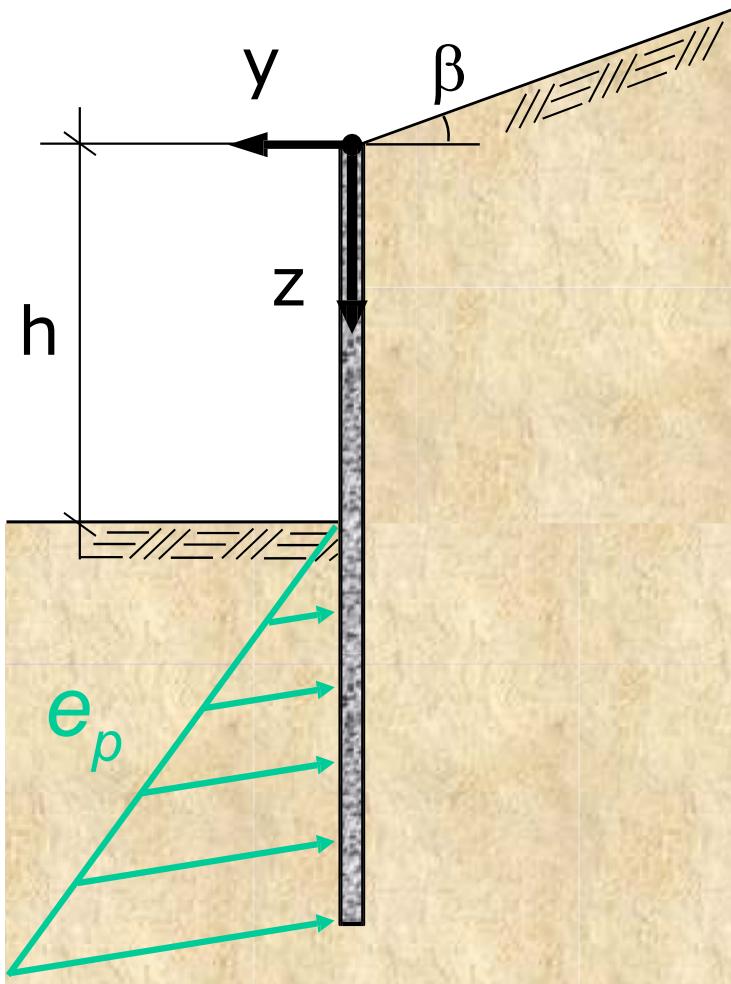
$$e_p = K_p(\phi', \delta, \beta) \sigma'_v + \underbrace{(K_p(\phi', \delta, \beta) - 1)c' \cot \phi'}_{2c' \sqrt{K_p} \text{ cas } \delta=\beta=0}$$

$$e_{p,h} = e_p \cos \delta$$

$$e_{p,v} = e_p \sin \delta$$

## Inclinaison de la poussée

- $\delta = -1/2 \phi'$  paroi rugueuse et déplacement relatif suffisant entre le sol et l'ouvrage
- $\delta = 0$  paroi lisse ou peu de déplacement relatif entre le sol et l'ouvrage

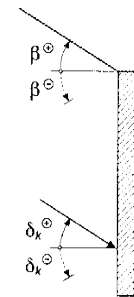
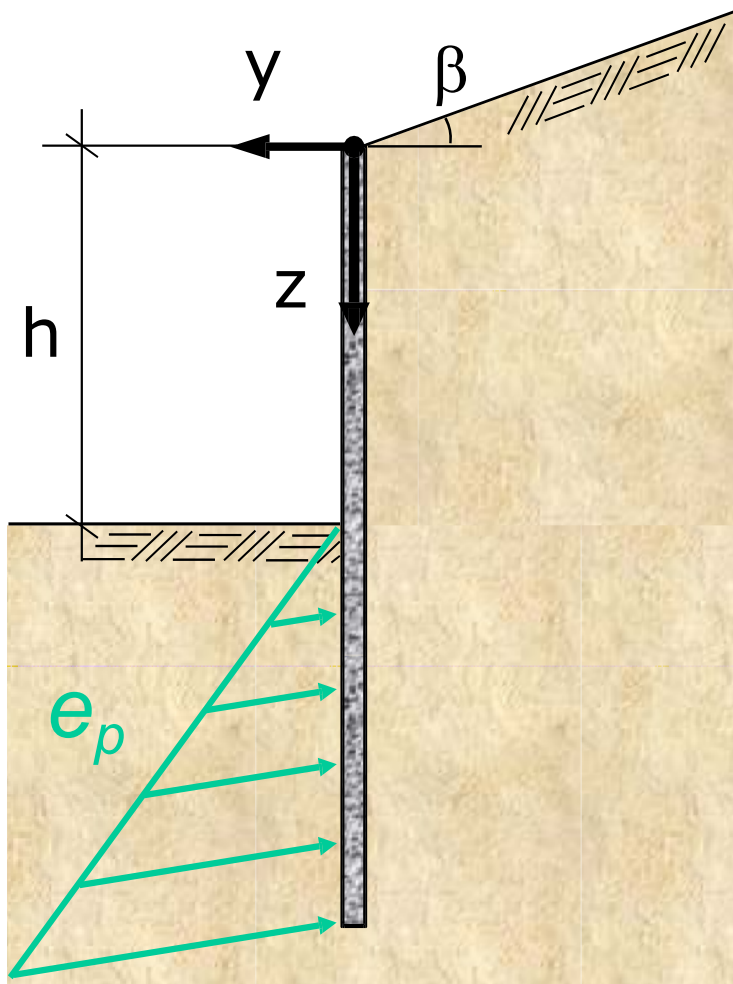


# Poussée limite passive

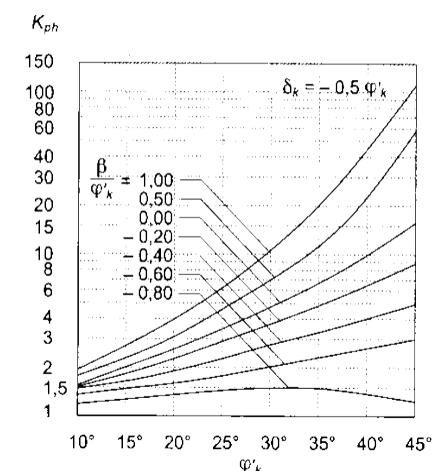
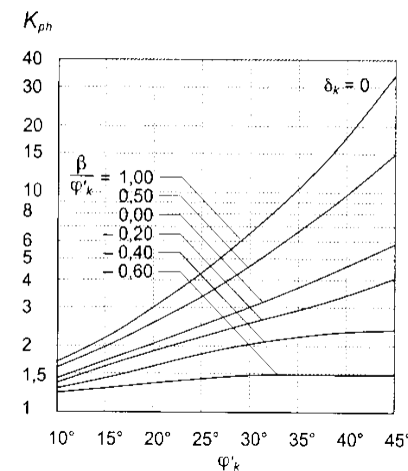
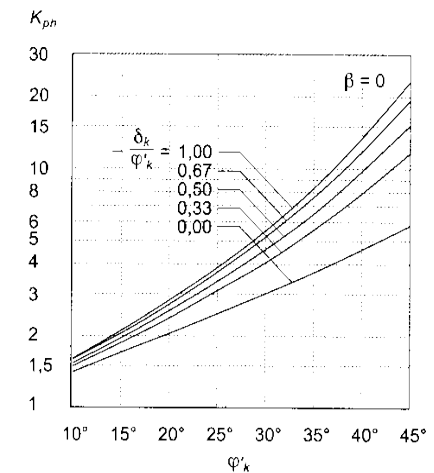
Coefficient de poussée passive par les abaques de Caquot - Kérisel :

$$K_{p,h} = K_p \cos \delta$$

$$K_{p,h} = f(\varphi'; \delta; \beta)$$



Règle des signes



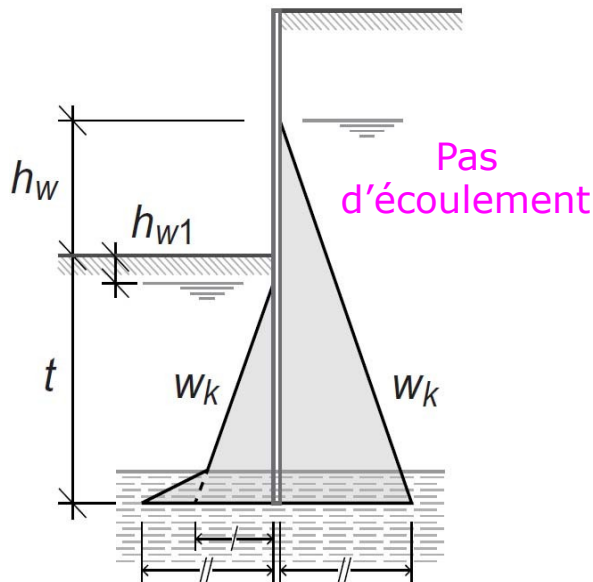
e.g. abaques à l'annexe B de la SIA 261

# Pression hydraulique simplifiées

Diverses répartitions simplifiées de la pression hydraulique considérées dans le tableau 3 de la SIA 261 (ou sinon on peut aussi utiliser la sol. de Mandel)

Terrain homogène et anisotrope

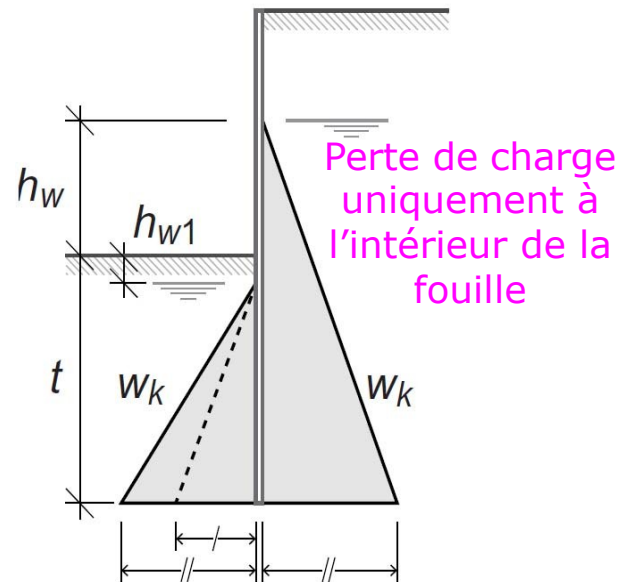
Paroi fichée dans une couche peu perméable



$$w_{k,/} = \gamma_{wk} \cdot (t - h_{w1})$$

$$w_{k,//} = \gamma_{wk} \cdot (h_w + t)$$

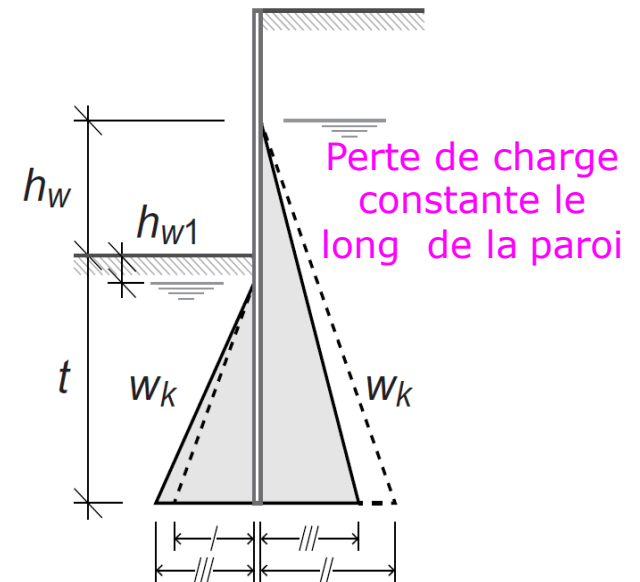
$(k_h \gg k_v)$  ou paroi fichée dans une couche perméable



$$i = \frac{h_w + h_{w1}}{t - h_{w1}}$$

$$w_{k,//} = \gamma_{wk} \cdot (h_w + t)$$

Terrain homogène et isotrope



$$i = \frac{h_w + h_{w1}}{h_w + 2 \cdot t - h_{w1}}$$

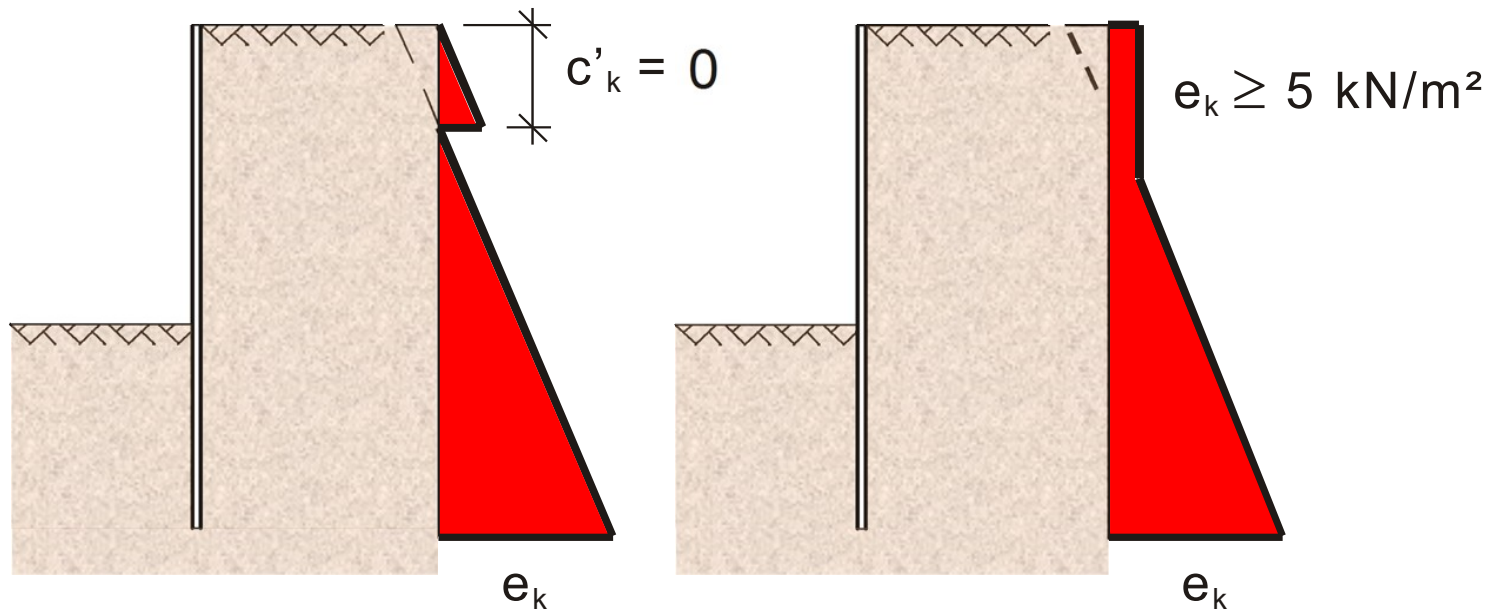
$$w_{k,///} = (1 + i) \cdot \gamma_{wk} \cdot (t - h_{w1})$$

# Indications particulières

---

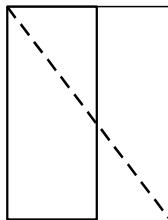
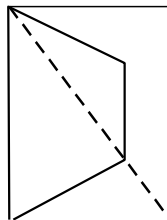
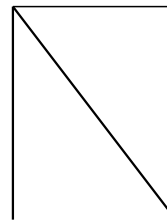
## Poussée minimale des terres dans les sols fins

(e.g. SIA 261, Art. 4.3.2.2)



# Indications particulières

## Redistribution simplifiée de la poussée des terres (SIA 261, Tab. 2)

	Cas 1	Cas 2	Cas 3
Sol de fondation	Moyennement à fortement compact	Moyennement à fortement compact	Consistance molle, compacité lâche
Conditions d'appui	1-2 niveaux	> 2 niveaux	quelconque
Redistribution de la poussée des terres	possible	possible	Possible partiellement ou impossible
Répartition de la poussée des terres sur l'écran	 rectangulaire	 trapézoïdale	 triangulaire

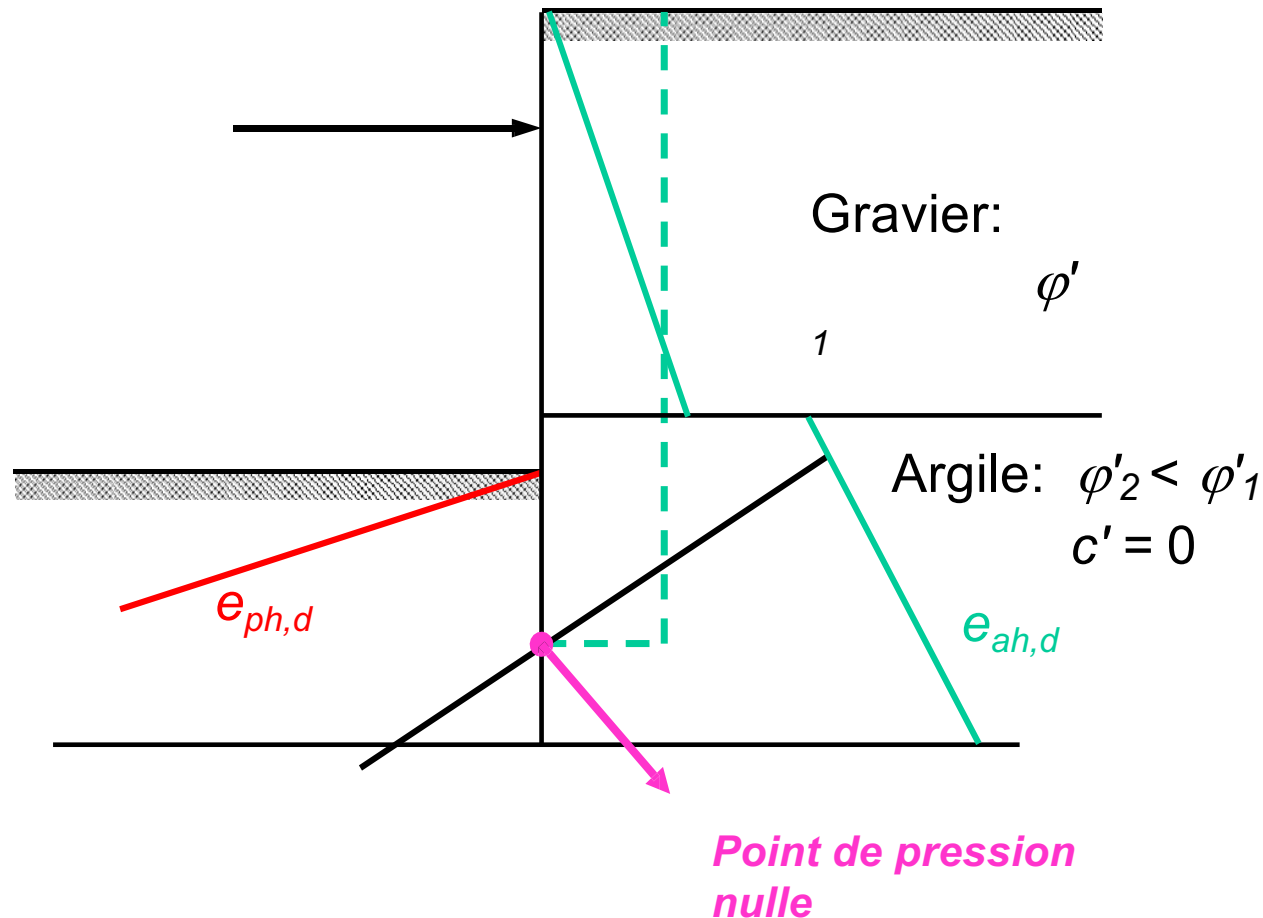
***La résultante des efforts agissant sur l'écran n'est pas modifiée dans le cas de qq niveaux (SIA)***

***Pour de nombreux niveaux augmentation de 30% par rapport à l'état actif***

# Indications particulières

Redistribution simplifiée de la poussée des terres en présence d'un sol très tendre sous le fond de fouille  
(SIA 261, Tab. 2)

*Pour mémoire: on ne l'utilisera pas*



# Indications particulières

---

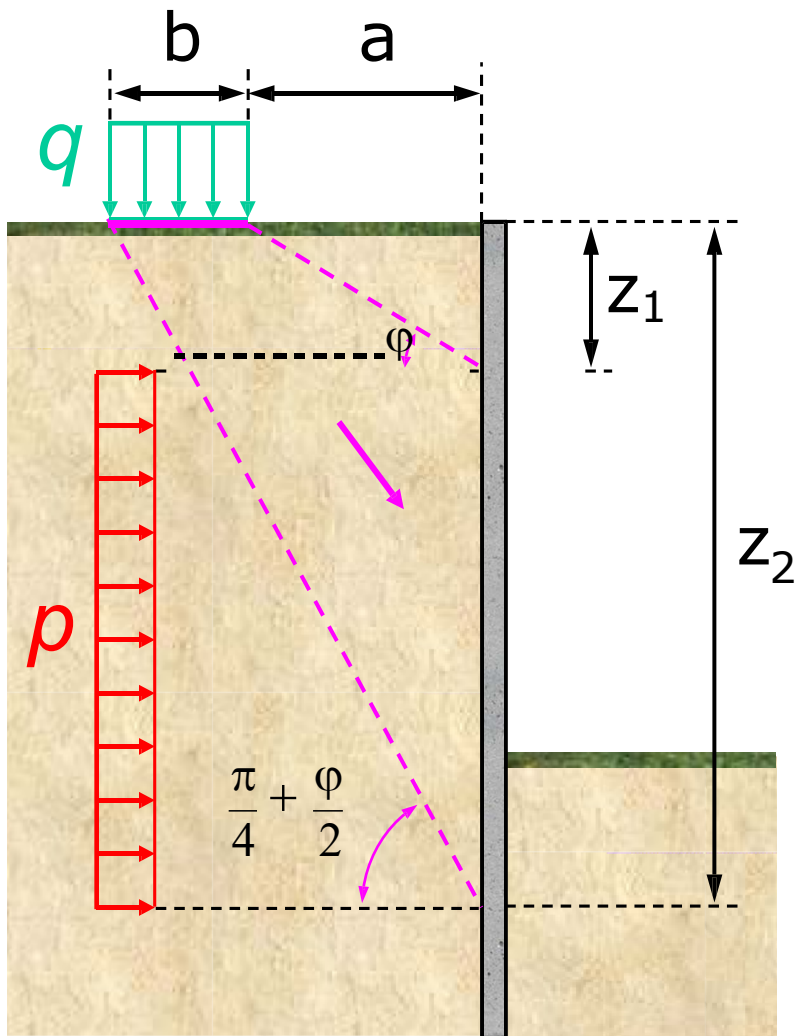
## **Actions dues à des surcharges**

- Méthodes semi-empiriques
  - Méthode de Grau
    - Surcharge uniforme sur une bande infiniment longue
  - Méthode de Krey
    - Surcharge uniforme sur une bande infiniment longue
    - Surcharge uniforme sur une surface rectangulaire
    - Charge ponctuelle
- Méthode élastique
  - Solutions de Boussinesq
    - Charge linéaire
    - Charge ponctuelle

# Méthode de Grau

---

Surcharge uniforme  $q$  en surface sur une bande de largeur  $b$



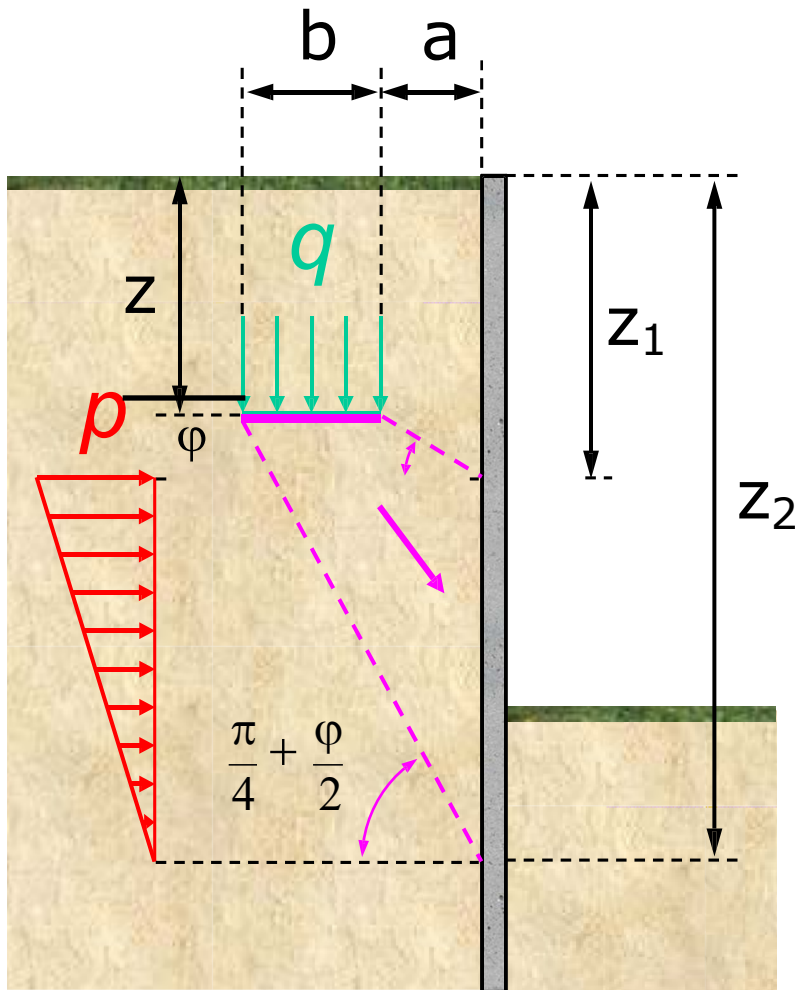
$$p = \frac{q \cdot b \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)}{(a + b) \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) - a \cdot \operatorname{tg} \varphi}$$

$$z_1 = a \cdot \operatorname{tg} \varphi$$

$$z_2 = (a + b) \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right)$$

# Méthode de Krey

Surcharge uniforme  $q$  à une profondeur  $z$  sur une bande de largeur  $b$



$$p = \frac{2 \cdot q \cdot b \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)}{(a + b) \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) - a \cdot \operatorname{tg} \varphi}$$

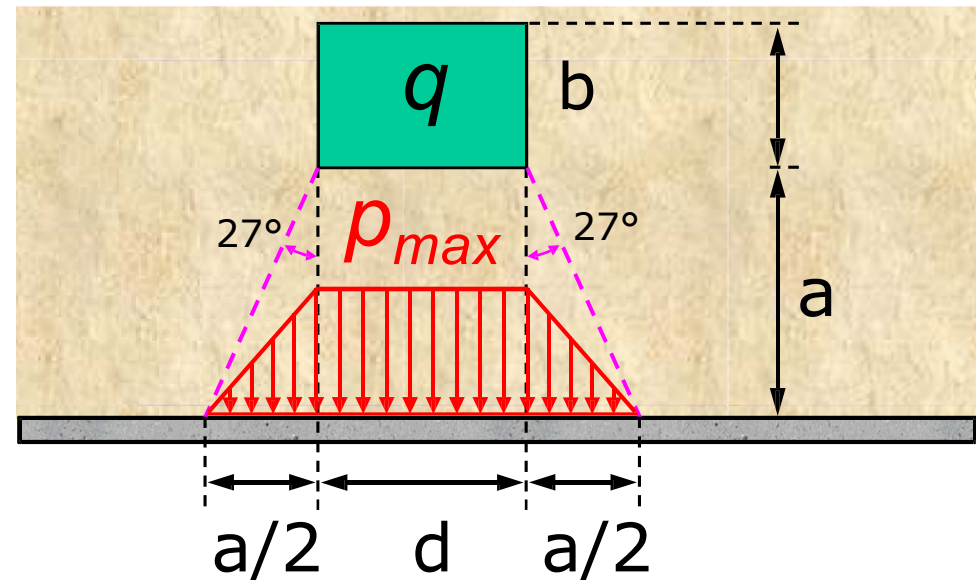
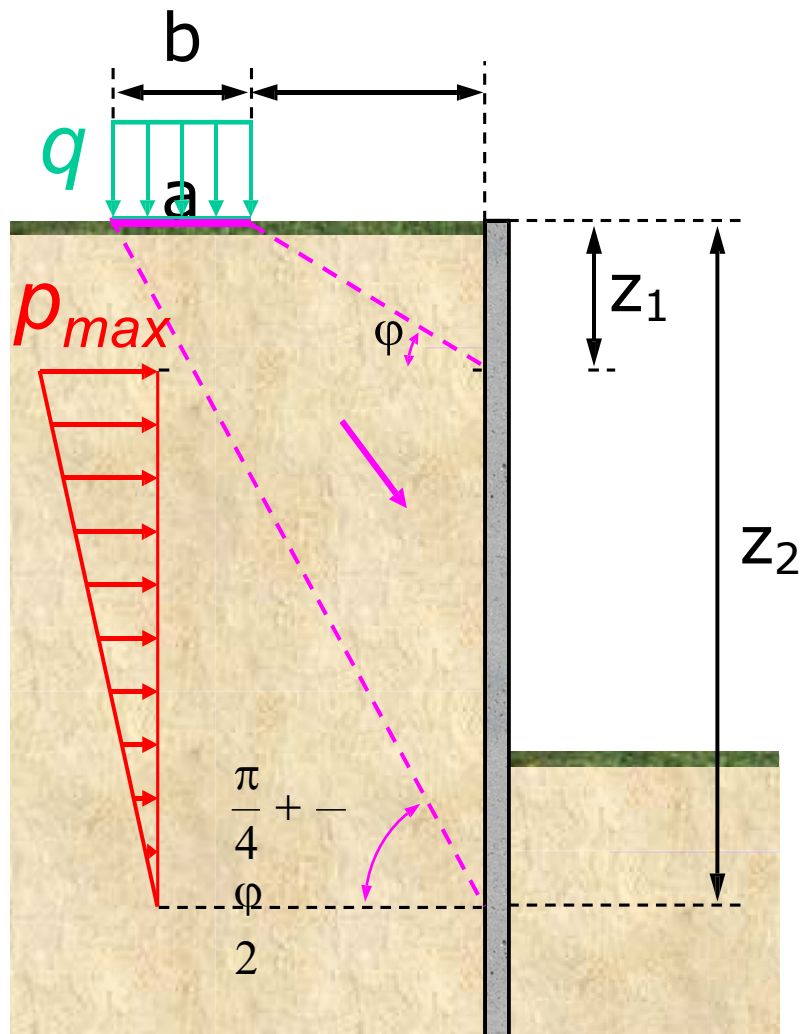
$$z_1 = z + a \cdot \operatorname{tg} \varphi$$

$$z_2 = z + (a + b) \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right)$$

# Méthode de Krey

Ouvrages de soutènement. Dossier MUR 73 du SETRA (Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements), 1988

Surcharge uniforme  $q$  en surface sur un rectangle d'impact  $b \times d$



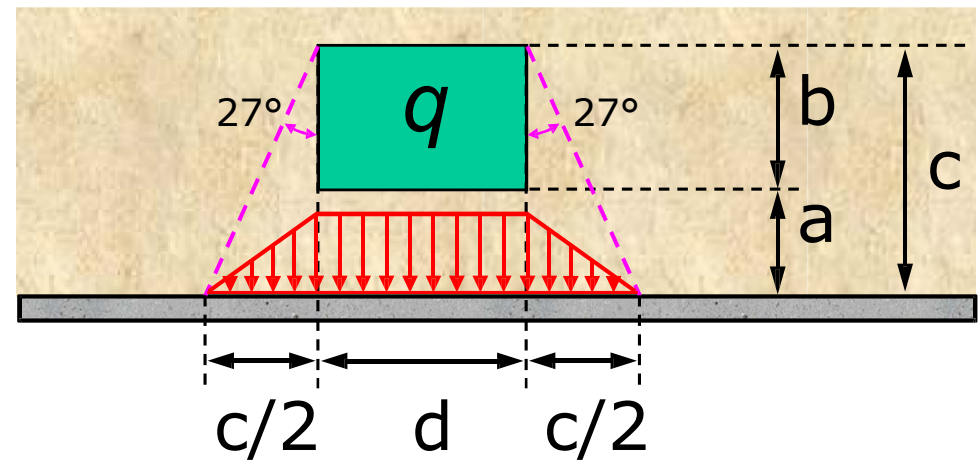
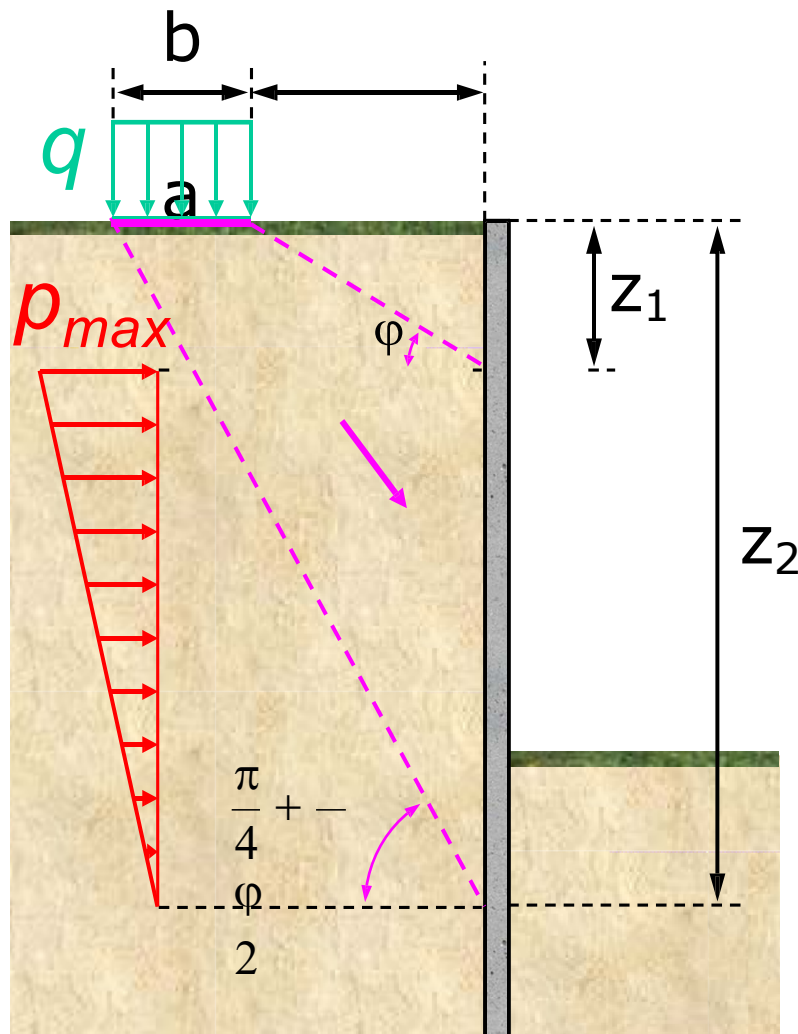
$$z_1 = a \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad z_2 = (a + b) \cdot \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right)$$

$$p_{max} = \frac{4 \cdot q \cdot b \cdot d \cdot \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)}{(2 \cdot d + a) \cdot (z_2 - z_1)}$$

# Méthode de Krey

Ouvrages de soutènement. Dossier MUR 73 du SETRA (Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements), 1988

Surcharge uniforme  $q$  en surface sur un rectangle d'impact  $b \times d$  proche de l'écran ( $a$  petit devant  $b$ )



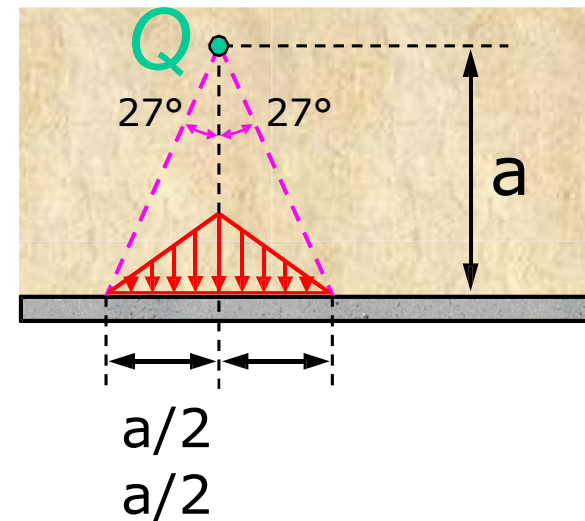
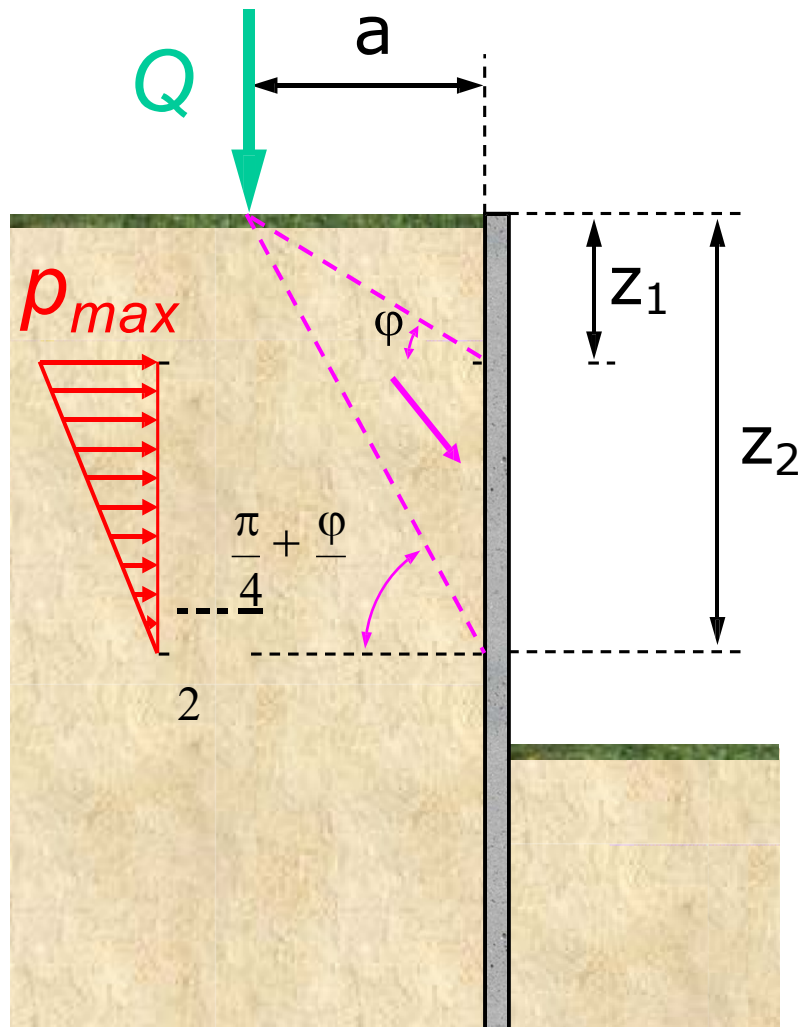
$$z_1 = a \cdot \operatorname{tg} \phi \quad z_2 = (a + b) \cdot \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right)$$

$$p_{\max} = \frac{4 \cdot q \cdot b \cdot d \cdot \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right)}{(2 \cdot d + c) \cdot (z_2 - z_1)}$$

# Méthode de Krey

Ouvrages de soutènement. Dossier MUR 73 du SETRA (Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements), 1988

Charge « ponctuelle »  $Q$  en surface (e.g. roue de véhicule)



$$z_1 = a \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad z_2 = a \cdot \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right)$$

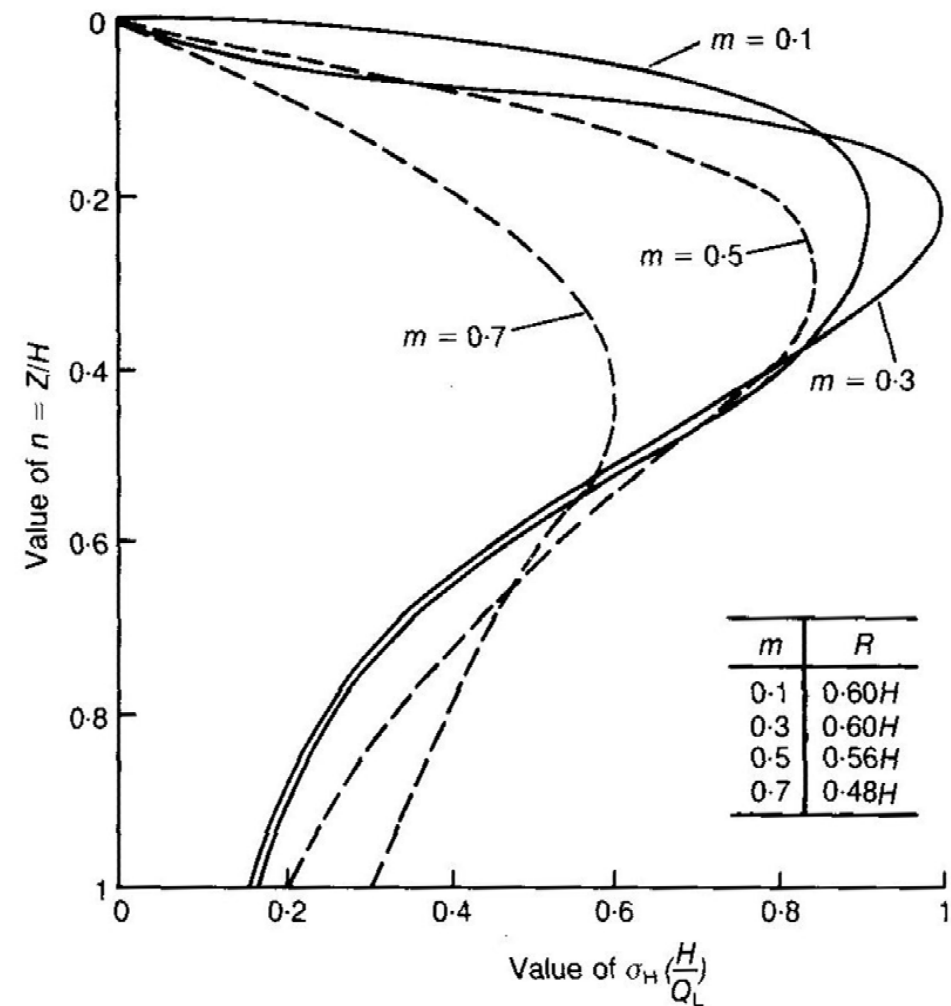
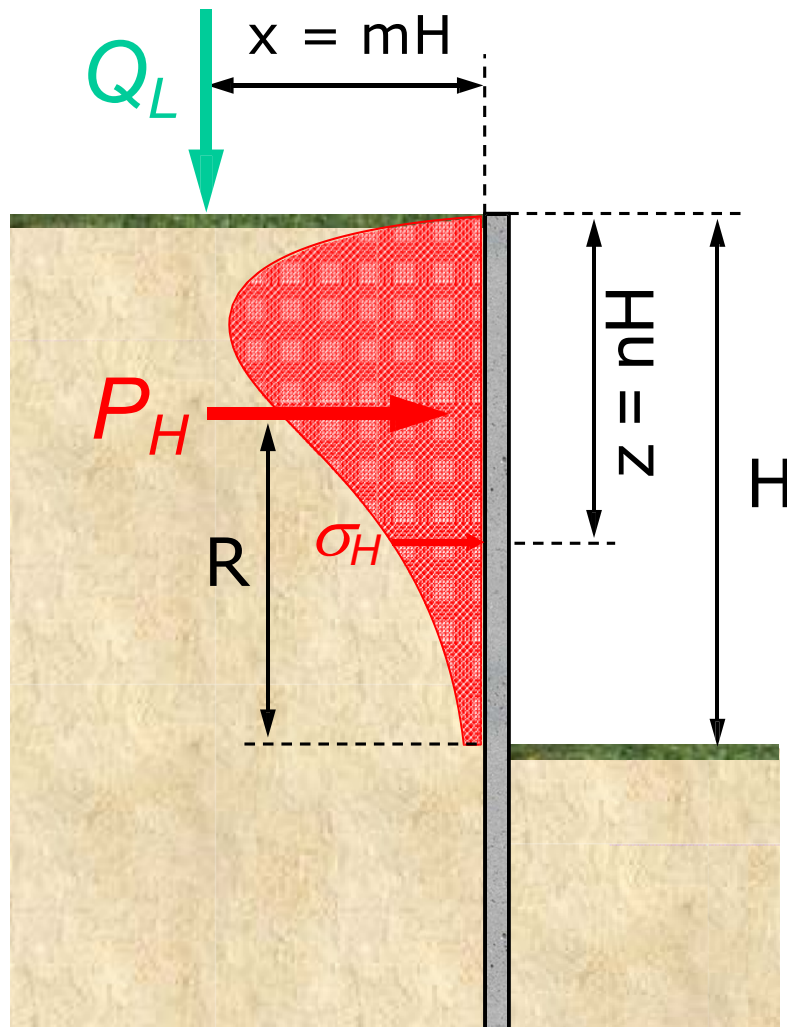
$$p_{\max} = \frac{4 \cdot Q \cdot \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)}{a^2 \cdot \left[ \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) - \operatorname{tg} \varphi \right]}$$

# Solutions de Boussinesq modifiées par des expérimentations

**Pour mémoire: on ne l'utilisera pas**

Design manual 7.2. Foundation and earth structures. US Navy, Washington, DC, 1982

Charge linéaire  $Q_L$  en surface

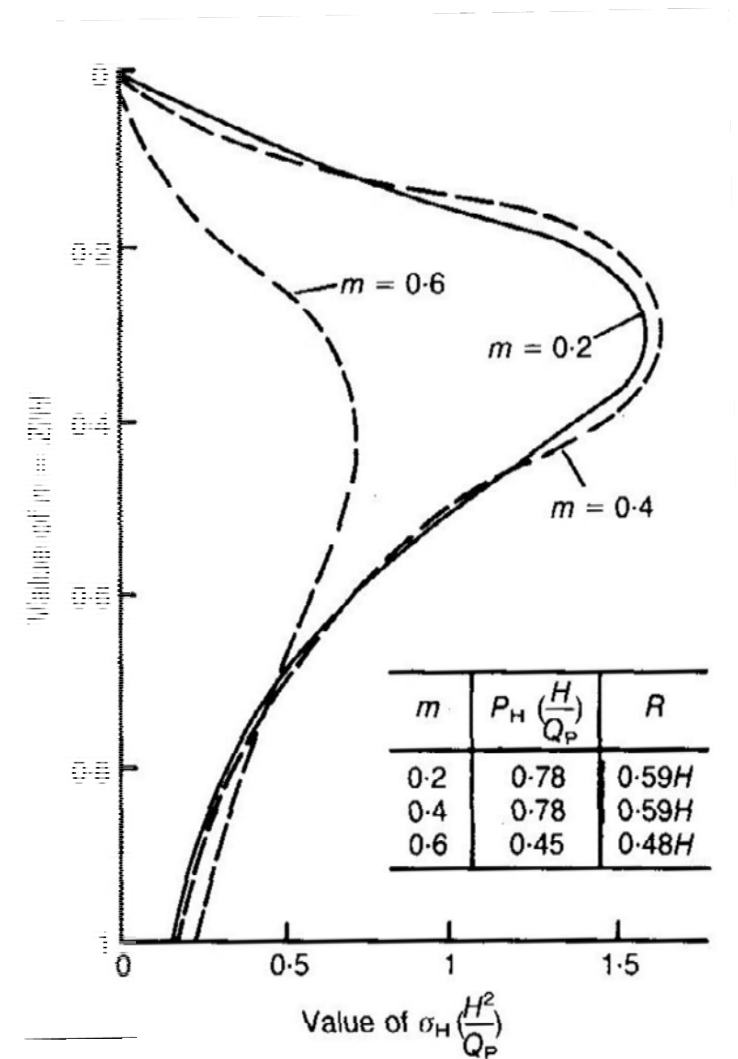
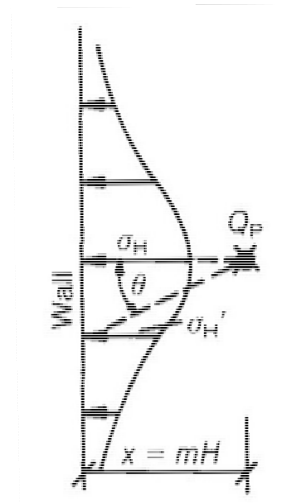
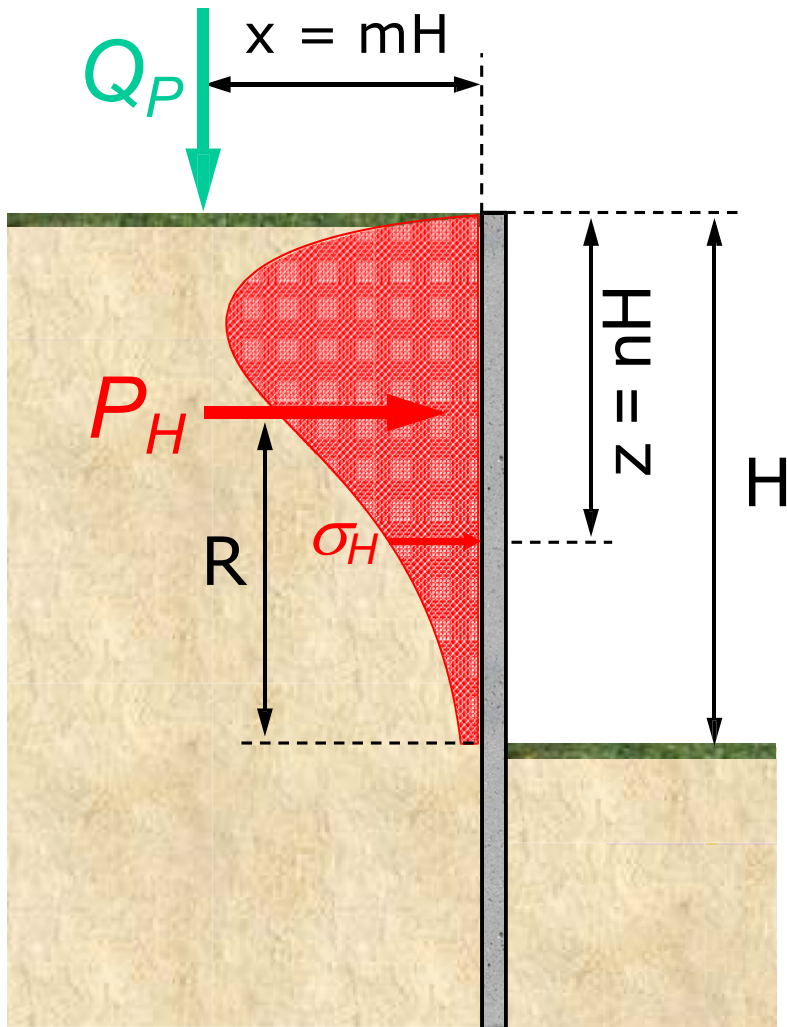


# Solutions de Boussinesq modifiées par des expérimentations

**Pour mémoire: on ne l'utilisera pas**

Design manual 7.2. Foundation and earth structures. US Navy, Washington, DC, 1982

Charge ponctuelle  $Q_P$  en surface

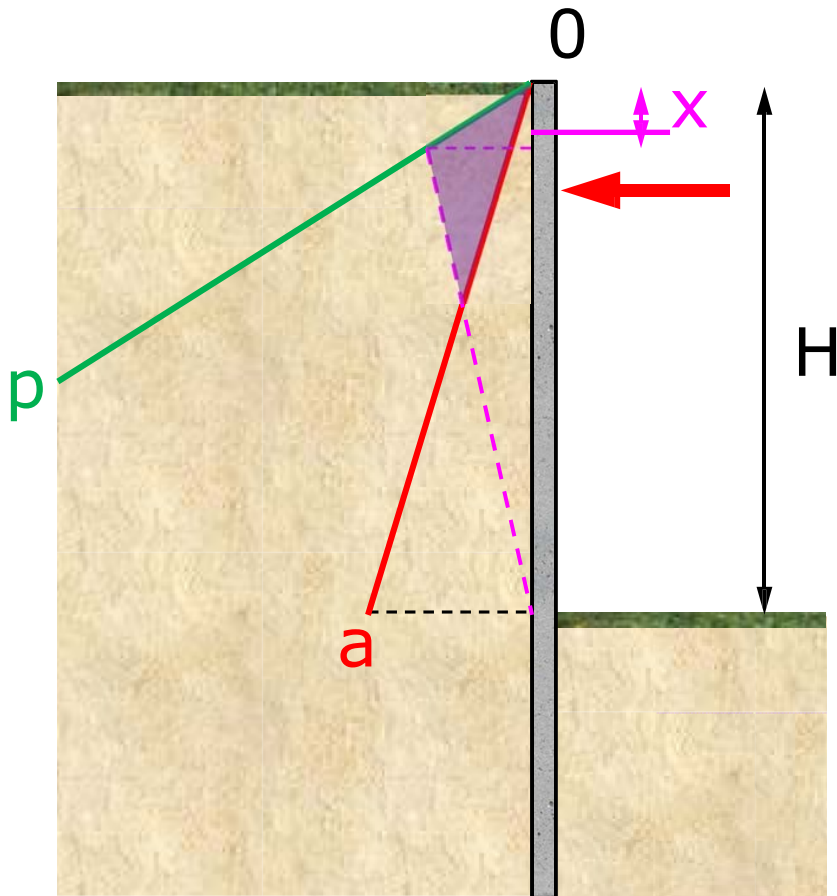


# Indications particulières

---

*Pour mémoire: on ne l'utilisera pas*

Influence d'un ancrage précontraint  
(Correction de Verdeyen)



Ligne 0-a: poussée active

Ligne 0-p: poussée passive

Redistribution de l'action du tirant:

$x = 0.05 H$  si ancrage en tête de paroi

$x = 0.075 H$  si ancrage à  $H/3$  de la tête de paroi

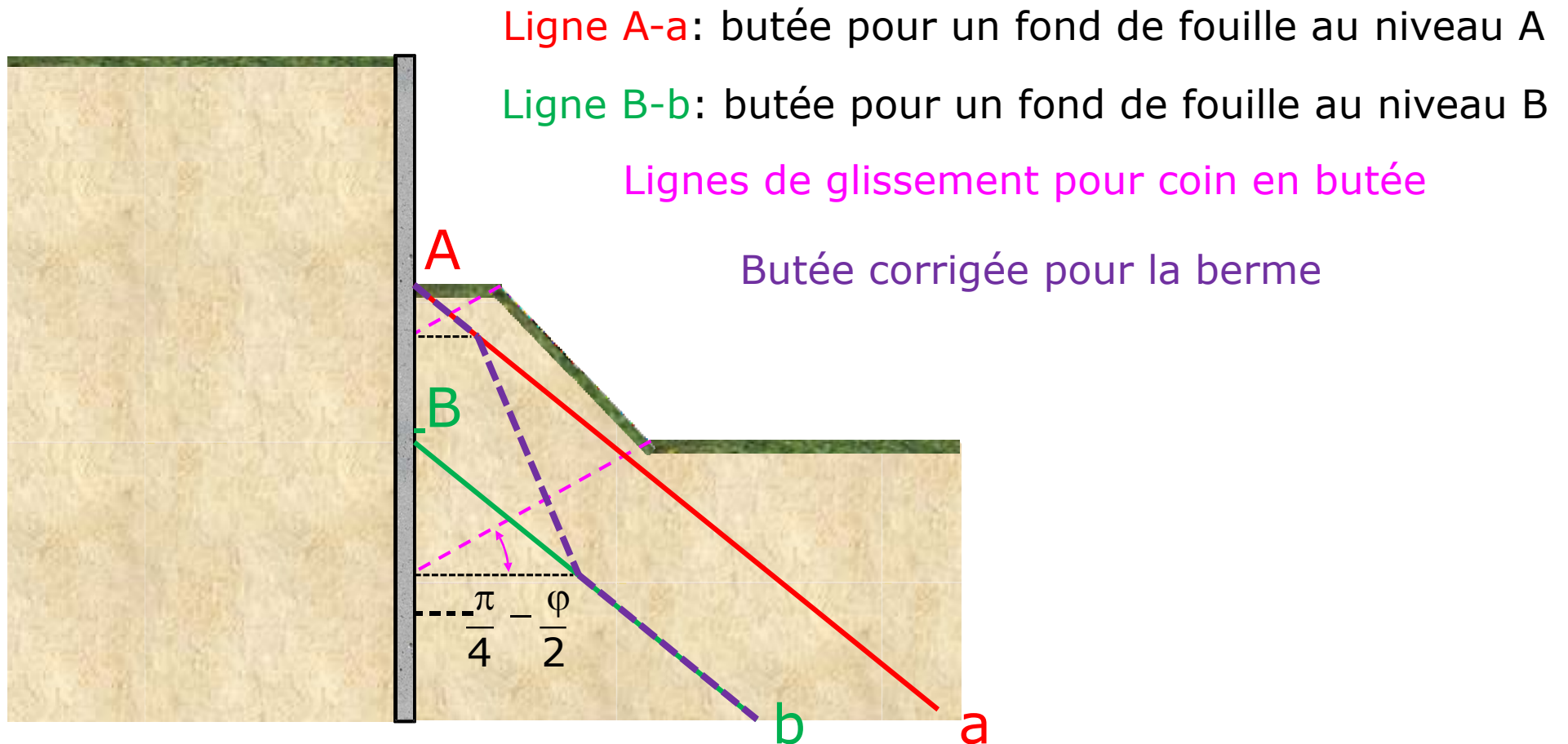
Poussée corrigée pour tenir compte du tirant précontraint

# Indications particulières

---

*Pour mémoire: on ne l'utilisera pas*

## Influence d'une berme (approximation de Schneebeili)



# **CONDITIONS AUX LIMITES SUR LA PAROI & DIMENSIONNEMENT**

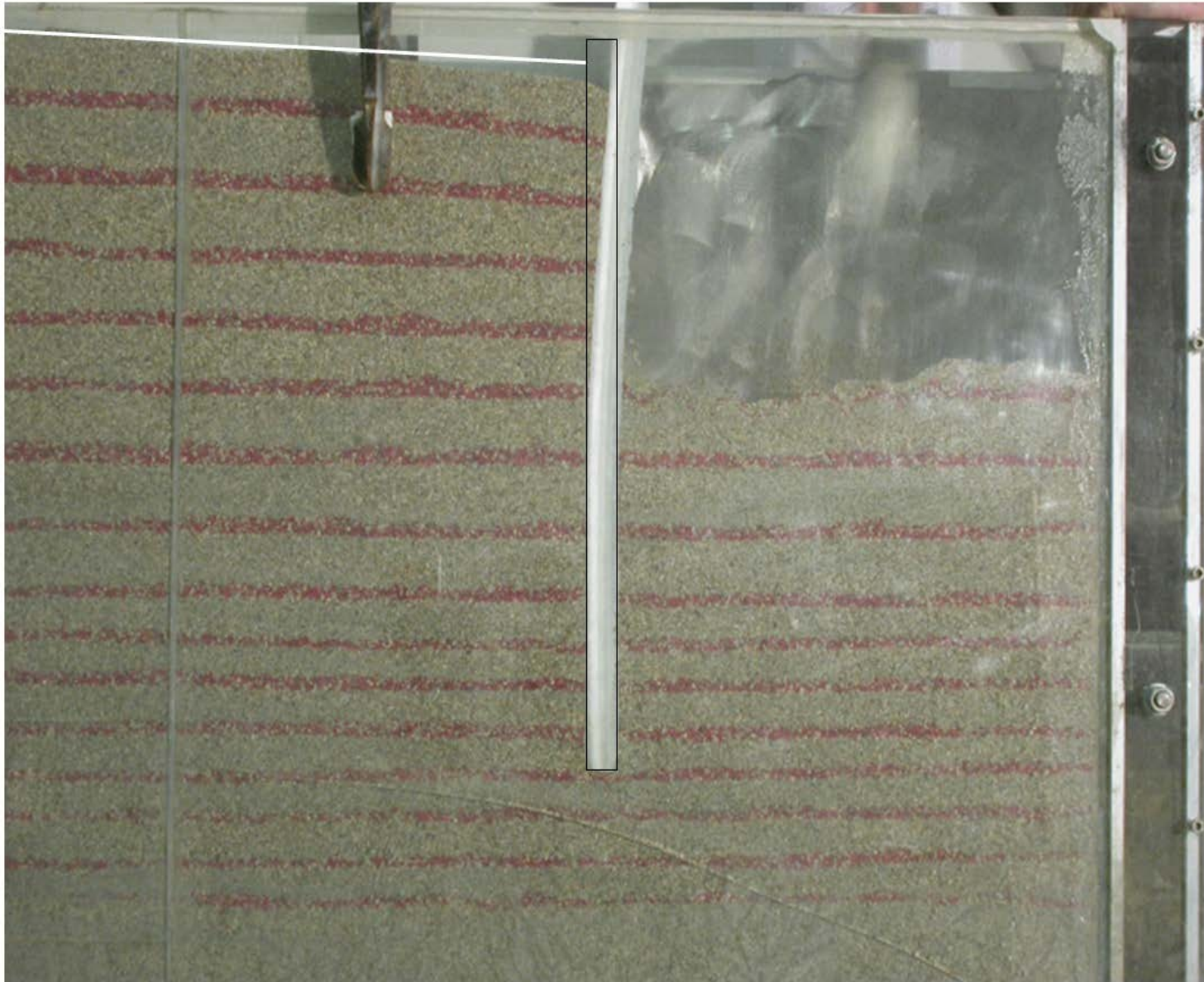
# Paroi simplement fiché

---

- Libre en tête, pas d'ancrages etc.
- stabilité assurée uniquement par la fiche:
  - Coin en butée
  - Encastrement en pied de paroi
    - Présence d'une contre-butée
- Rotation en pied de paroi
  
- Cas limite: fiche maximale, déformée max (poutre console)

# Mécanisme de rupture lors du terrassement d'une fouille soutenue par une paroi simplement fichée

---



*Laboratoire  
effectué par  
F. Fogarasi  
et S. Garin*

# Encastrement au pied d'une paroi

---



# Démarche de calcul – simplement fiché

---

1. Détermination des actions et du point de pression nulle
2. Détermination du moment fléchissant et effort tranchant selon  $z$
3. Détermination de  $z_w$  par l'équilibre de rotation  
 $M(z_w) = 0$
4. Equilibre de l'effort tranchant  
Détermination de l'effort de contre-butée
5. Calcul de la sur-longueur  $b$  afin de satisfaire l'équilibre horizontal  
(pour satisfaire ELU type 2 externe)
6. Effort max interne (ELU type 2 interne)

# Paroi ancrée et butée en pied

---

- Stabilité assurée par un niveau d'ancrage + butée
- Pas d'encastrement en pied
- Pivotement de la paroi au niveau du niveau d'appui et déplacement horizontal en pied
- Fiche minimale, effort d'ancrage max.

# Mécanisme de rupture lors du terrassement d'une fouille soutenue par une paroi ancrée et butée en pied



*Laboratoire  
effectué par  
F. Fogarasi  
et S. Garin*

# Défaut de butée au pied d'une paroi ancrée

---



<http://geomeca.ecp.fr/>

# Démarche de calcul – ancré & buté en pied

---

1. Détermination des actions et du point de pression nulle
2. Détermination du moment flechissant et effort tranchant selon  $z$
3. Equilibre horizontal et de rotation  
2 équations fonction de la longueur de la paroi et de l'effort d'ancrage  
(pas de contre-butée – pas de sur-longueur)
4. Détermination des efforts internes max.

# Paroi ancrée et encastrée en pied

---

- Stabilité assurée par un niveau d'ancrage et par la fiche
  - Coin en butée
  - Encastrement partiel en pied
- Pivotement autour du niveau d'appui et encastrement partiel en pied

# Butée et encastrement au pied d'une paroi

---



# Démarche de calcul – ancré & encastré en pied

1. Détermination des actions et du point de pression nulle
2. Détermination du moment fléchissant et effort tranchant selon  $z$
3. 3 inconnues (longueur, effort d'ancrage, sur-longueur pour assuré la contre-butée)
  1. On se fixe soit la longueur totale, soit l'effort d'ancrage
  2. L'équilibre permet de les déterminer
  3. Calcul de la sur-longueur
4. Détermination des efforts internes max

# Méthode de Blum

---

1. Détermination des actions et du point de pression nulle
2. On fixe un moment nul au point de pression nulle
  1. i.e. 2 poutres isostatiques (1 au dessus, 1 en-dessous du point de pression nulle)
  2. On détermine l'effort tranchant en ce point
3. Equilibre de la poutre inférieure
  1. Détermination de la longueur et de la sur-longueur de contre-butée
4. Détermination des efforts internes maximaux

Solution assez optimale en terme de flexion

# Notes

---

- Plusieurs niveaux d'ancrages ...
  - Redistribution des poussées des terres
  - Comme attendu, multiples solutions possibles
- En présence d'écoulement d'eau, le calcul est itératif...
- Pour une vérification normative (e.g. SIA, eurocode), différents facteurs partiels sont utilisés pour les actions sur l'écran:
  - Majoration de l'état actif au dessus du fond de fouille
  - Minoration de l'état passif (stabilisant) sous le fond de fouille
  - Majoration de l'effet de la pression d'eau