

Calculs Ecran / paroi de soutènement

B. Lecampion

EPFL



Lausanne Gare – Mai 2025



ELU – paroi de soutènement

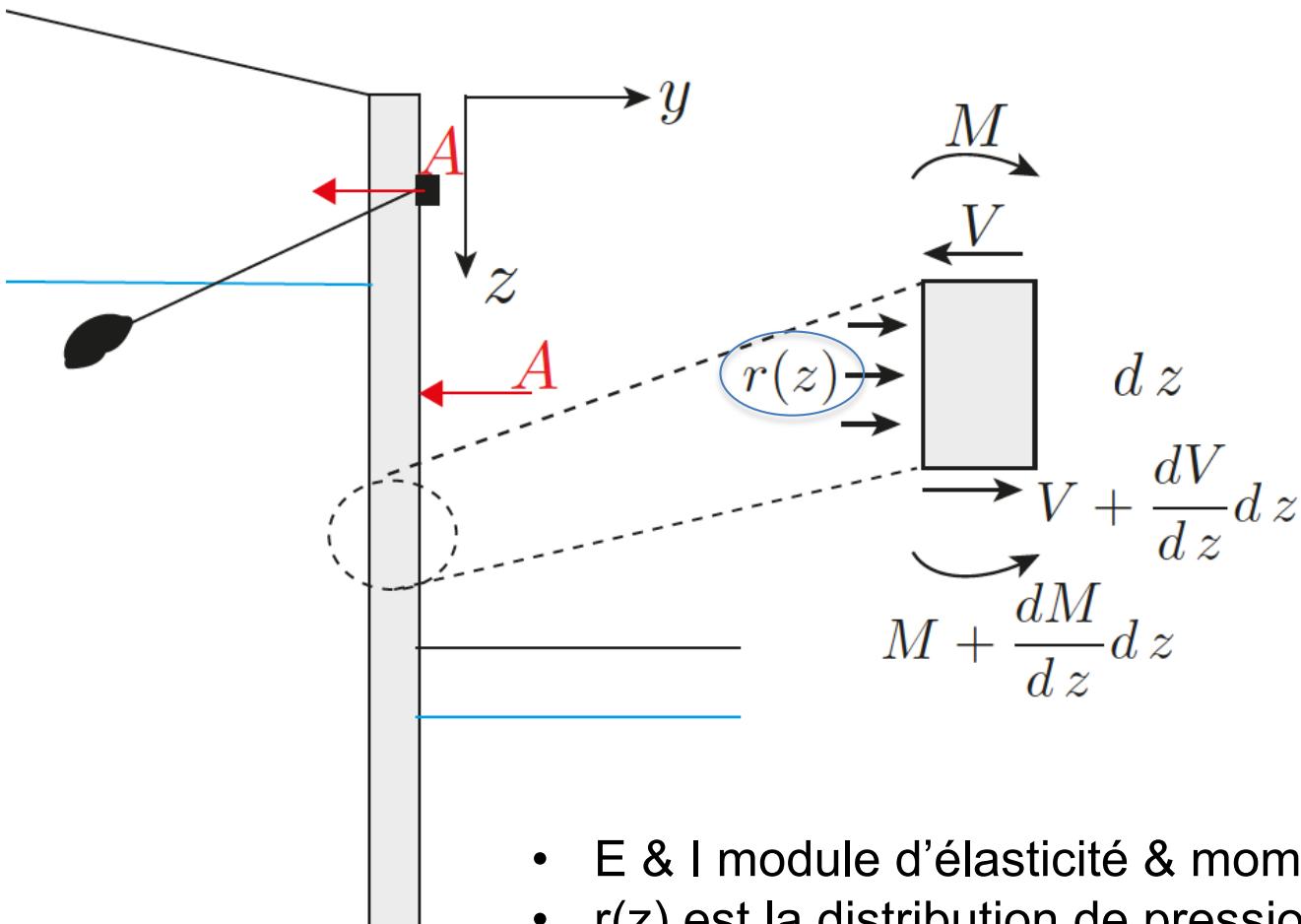
- ELU type 1
 - Sécurité vis à vis du Renard hydraulique (cf semaine 9)
 - Sécurité vis à vis du défaut de portance en fond de fouille (cf semaine 9 & 12)
- ELU type 2
 - Externe (sol)
 - Interne (Paroi, ancrages, buttons)
 - Les 2 étant liées
- ELU type 3
 - Rupture globale du sol (englobant les ancrages 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... encore utilisé dans la pratique ;(
 - ELU type 2 & ELS
- Méthode Elément Finis elasto-plastiques (EP)
 - Elément finis EP -> pour les ELS (&ELU)
- 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



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

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

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

- 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 11 !**

Recapitulatif – calcul long terme / drainée

Cf. Semaine 11 pour les détails !

- 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)
 - ABAQUS de Caquot-Kerisel, solution de Lancellotta (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)

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

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

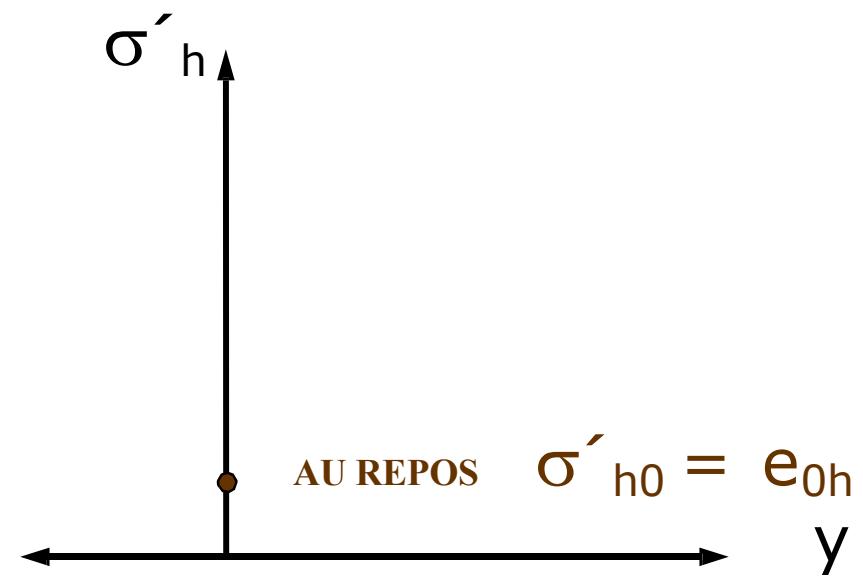
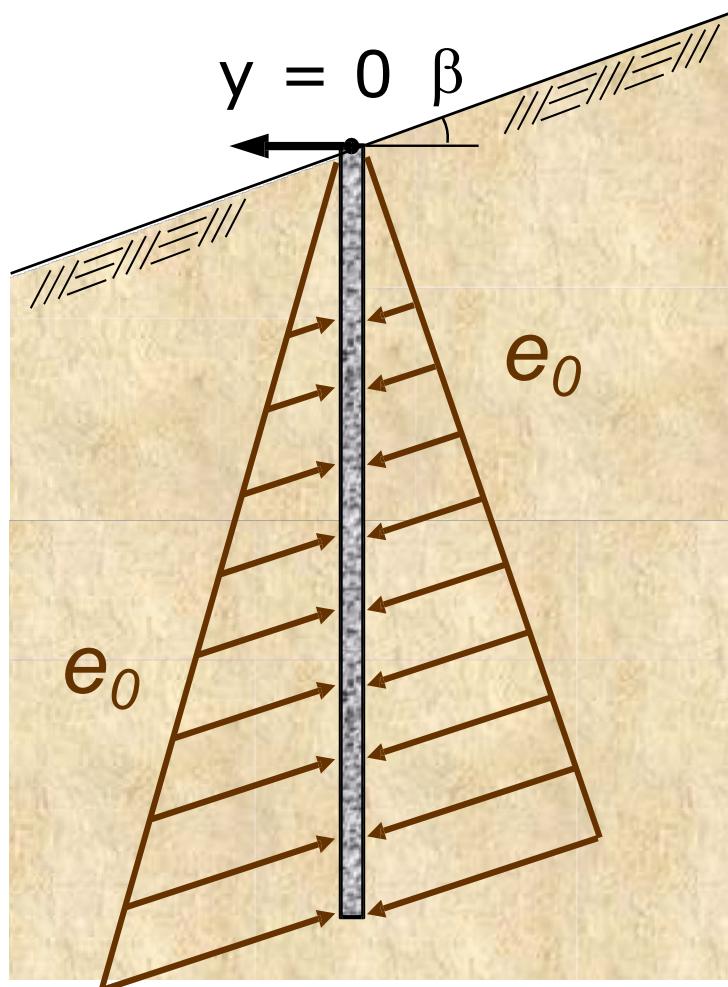
1+4cu/g H pour le cas passif

DÉTERMINATION 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'étaillage

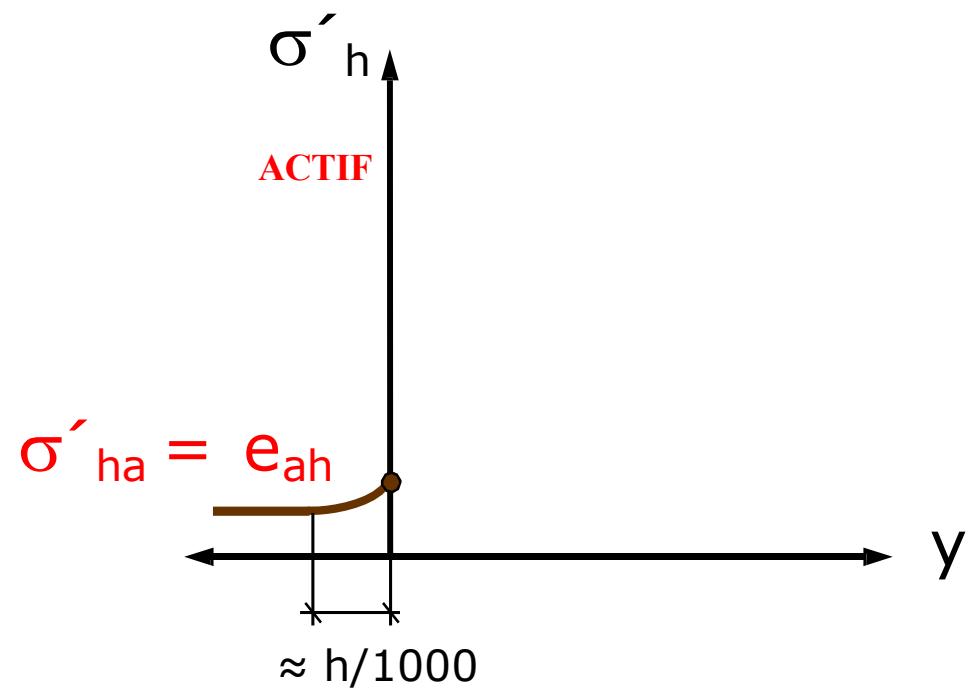
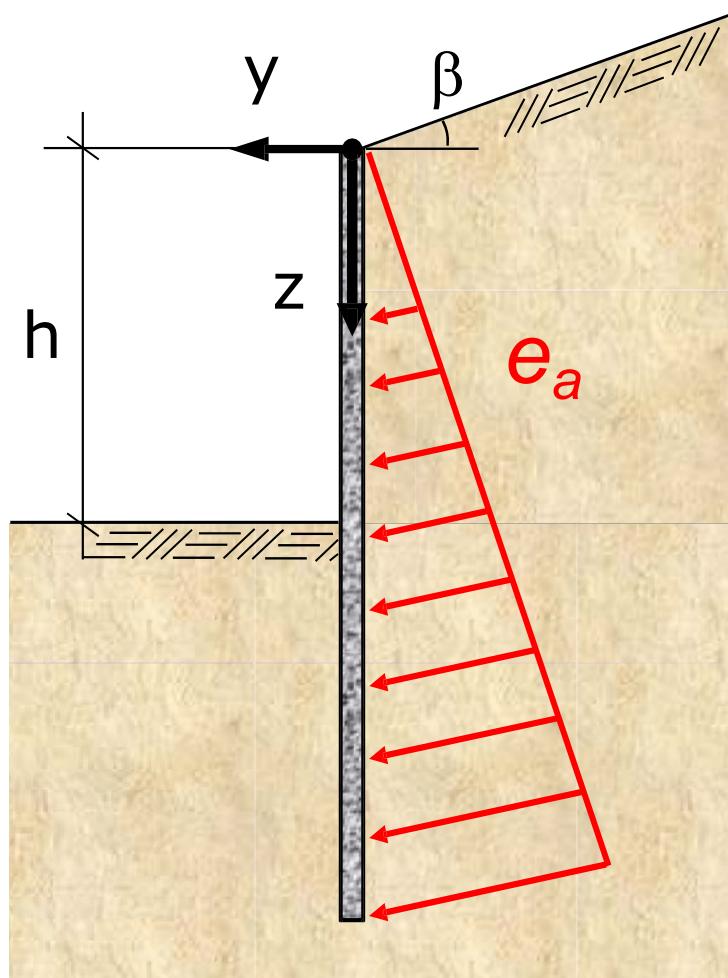
Principes de détermination des actions



Poussée au repos

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

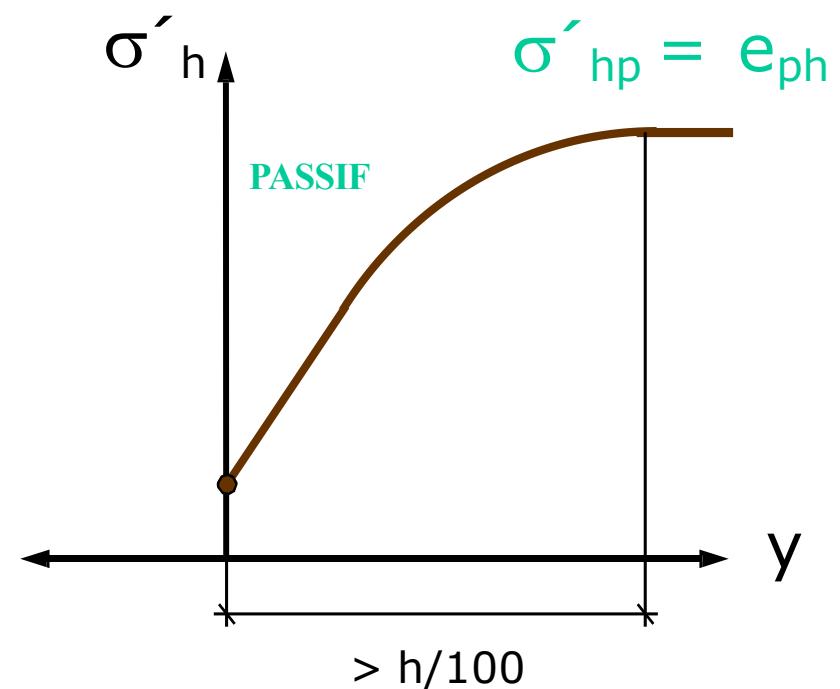
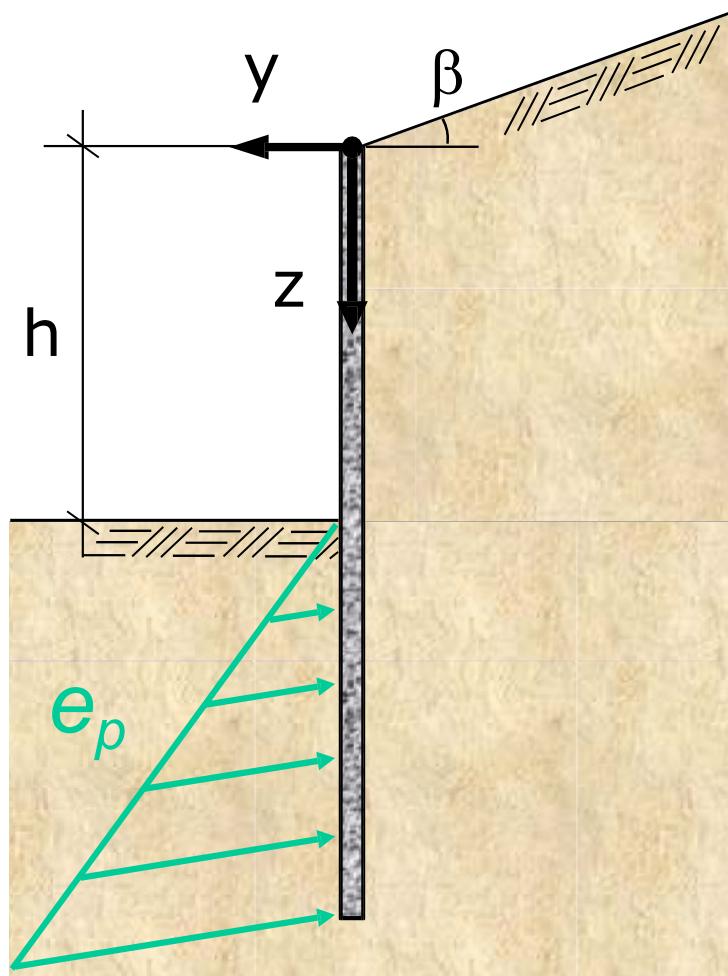
Principes de détermination des actions



Poussée limite active

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

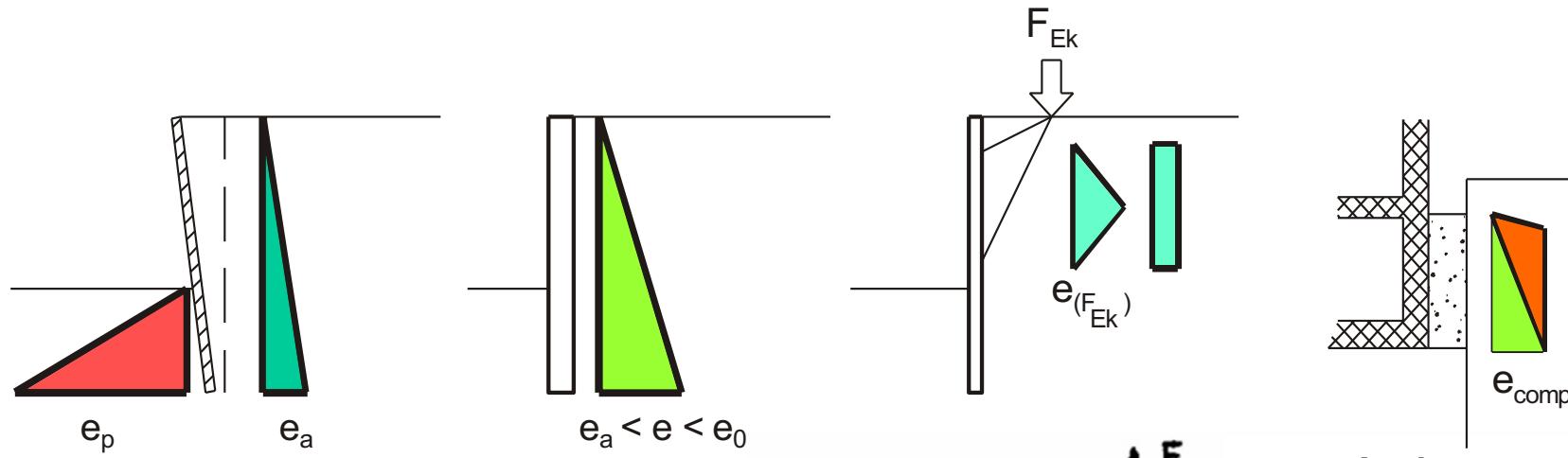
Principes de détermination des actions



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: $y > h/100$

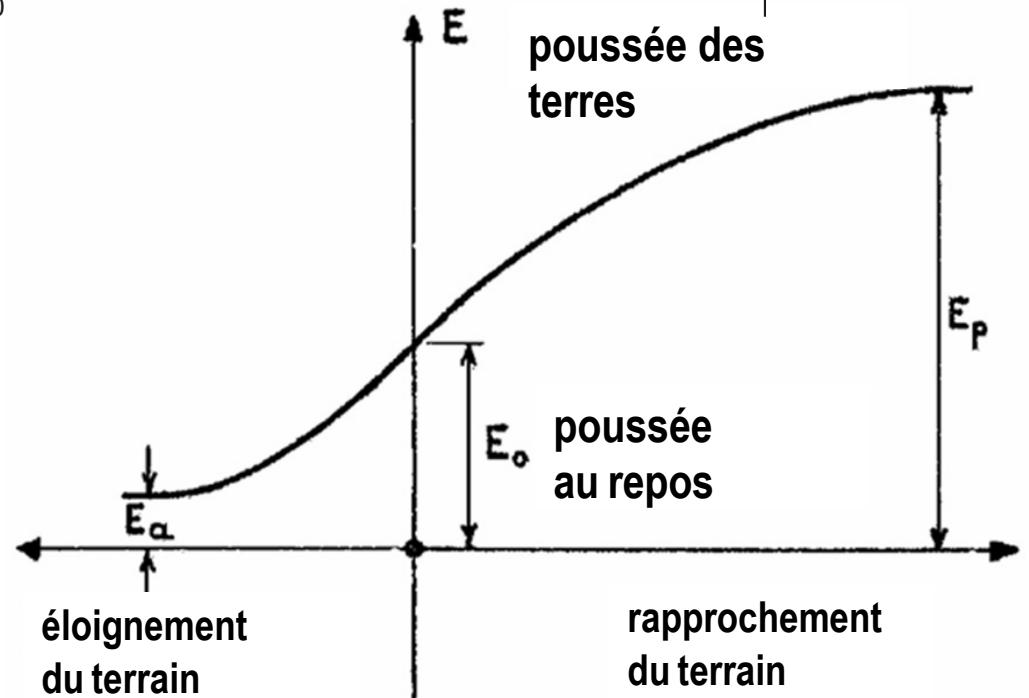
Principes de détermination des actions



Compatibilité des actions avec les déformations

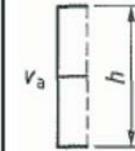
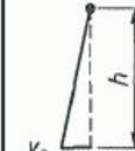
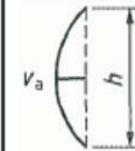
Le choix des actions est tel que celles-ci soient compatibles avec les déformations du terrain

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



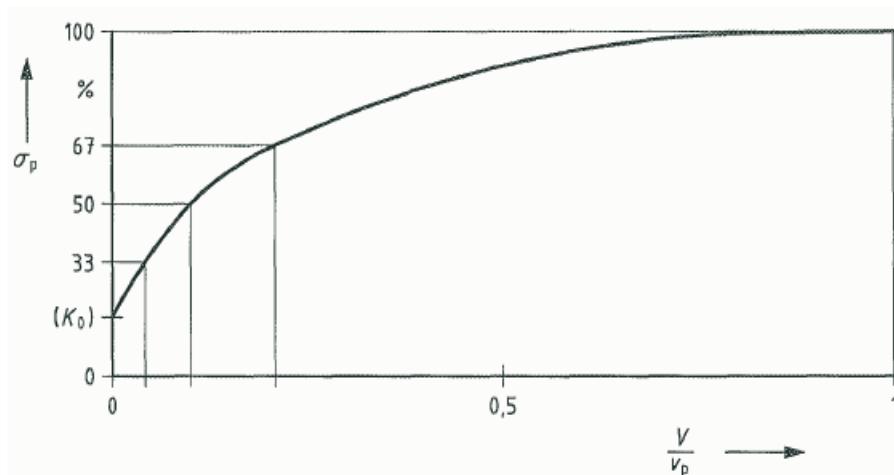
Mouvement nécessaire à la mobilisation d'un état limite de poussée (état limite actif)

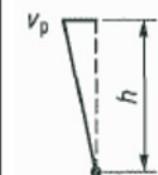
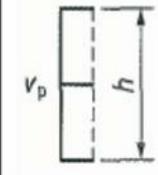
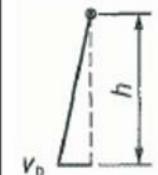
- Amplitude du mouvement fonction de:
 - type de mouvement de l'ouvrage (i.e. rotation, translation, flexion)
 - de la densité du sol
- Ordre de grandeur de v_a/h
 - Annexe C (Tabl. C.1) de l'Eurocode 7
- Hypothèses
 - sol non cohérent
 - ouvrage à parement vertical
 - massif à surface horizontale

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)

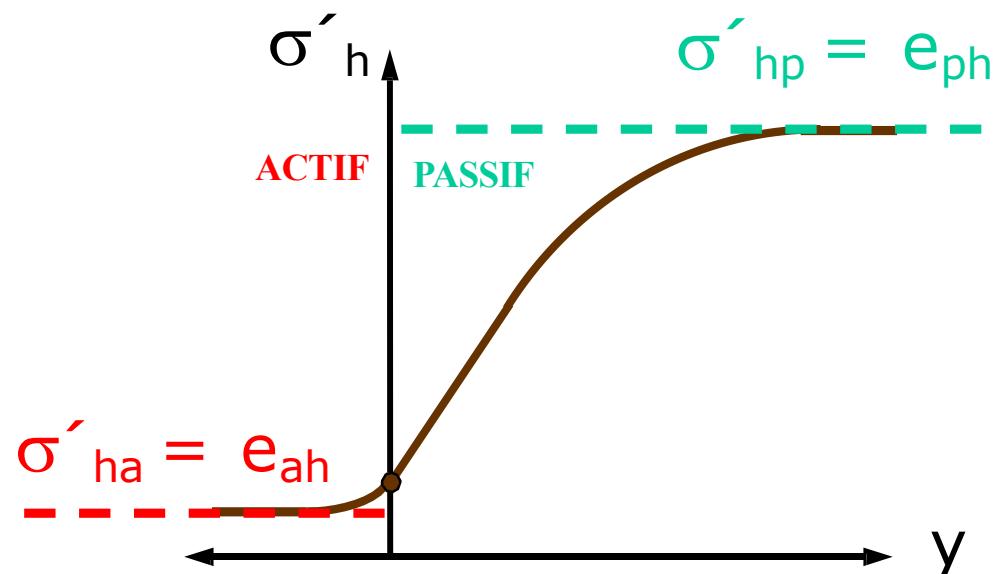
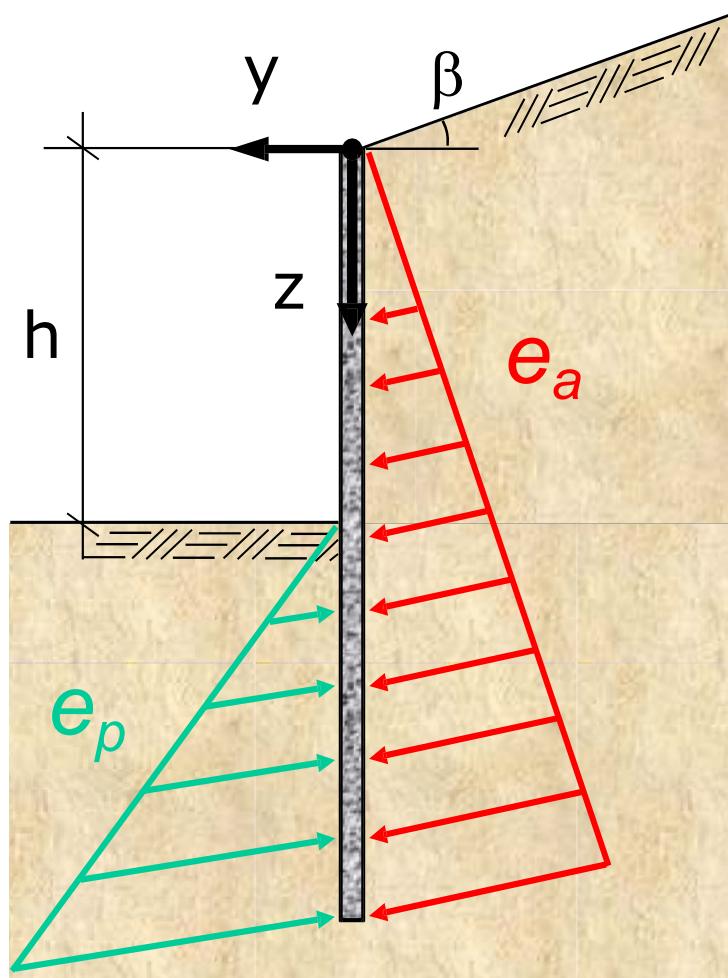
- Mouvement nécessaire **beaucoup plus grand** que celui qui produit la pression des terres à l'état limite de poussée
- Ordre de grandeur de v_p/h
 - pour la pression de butée totale
 - pour la moitié de la valeur limite (entre parenthèses)



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



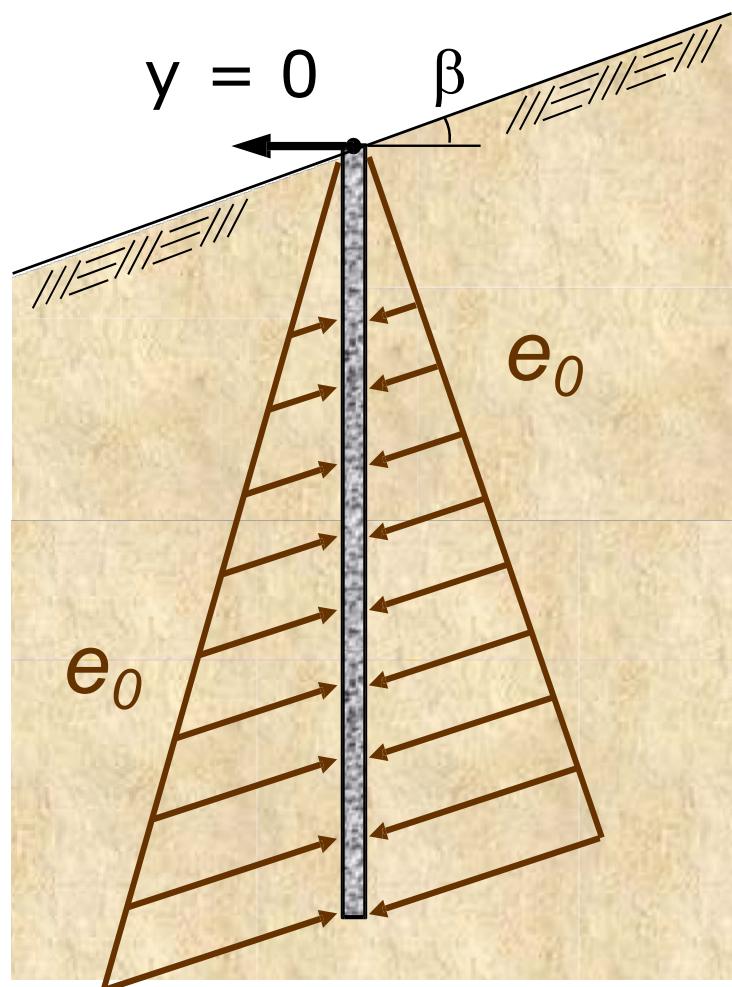
Méthode aux équilibres limites

- 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 β), normalement consolidé

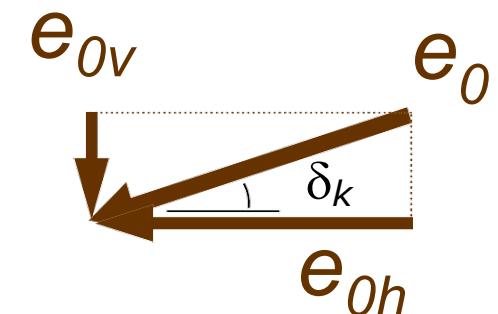
$$K_0 = \{(1 - \sin \varphi'_k) (1 + \sin \beta)\} / \cos \beta$$

$$K_{0h} = (1 - \sin \varphi'_k) (1 + \sin \beta)$$

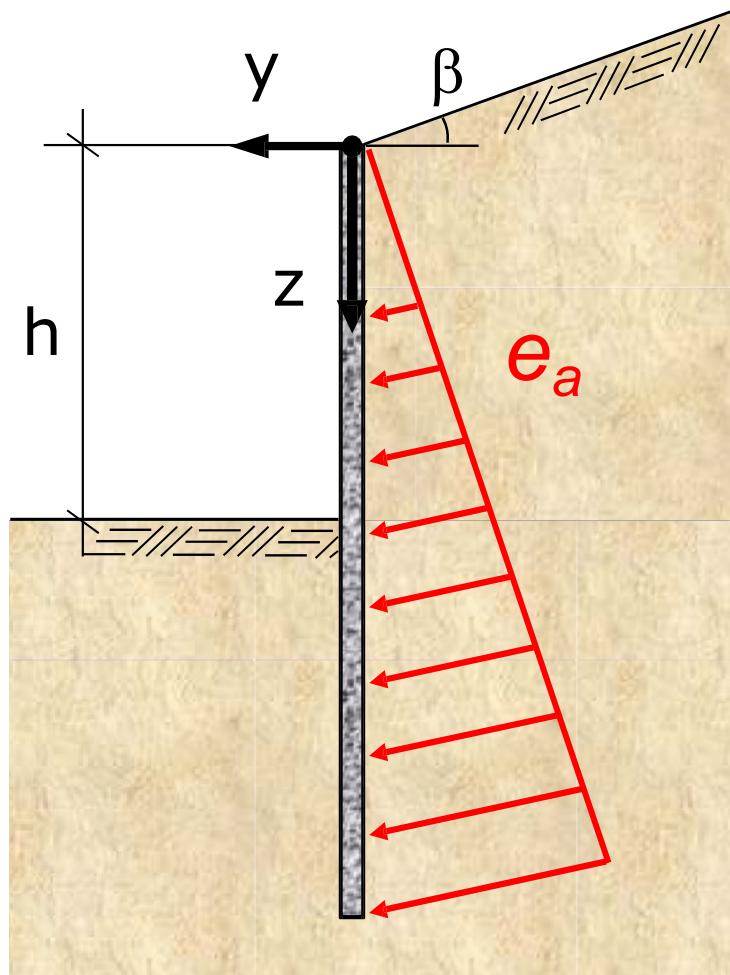
$$e_{0h,k} = K_{0h} \sigma'_v$$

$$e_{0v,k} = e_{0h,k} \tan \delta_k$$

$$\delta_k = \beta$$



Poussée limite active



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

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

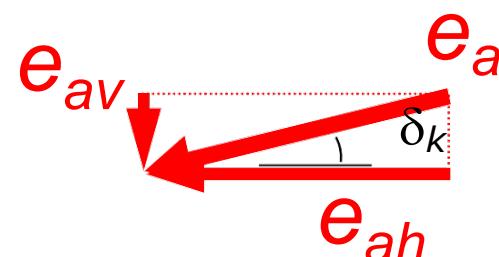
$$e_{a,h} = e_a \cos \delta$$

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

- Inclinaison de la poussée

- $\delta_k = 2/3 \phi'_k$ paroi rugueuse et déplacement relatif suffisant entre le sol et l'ouvrage

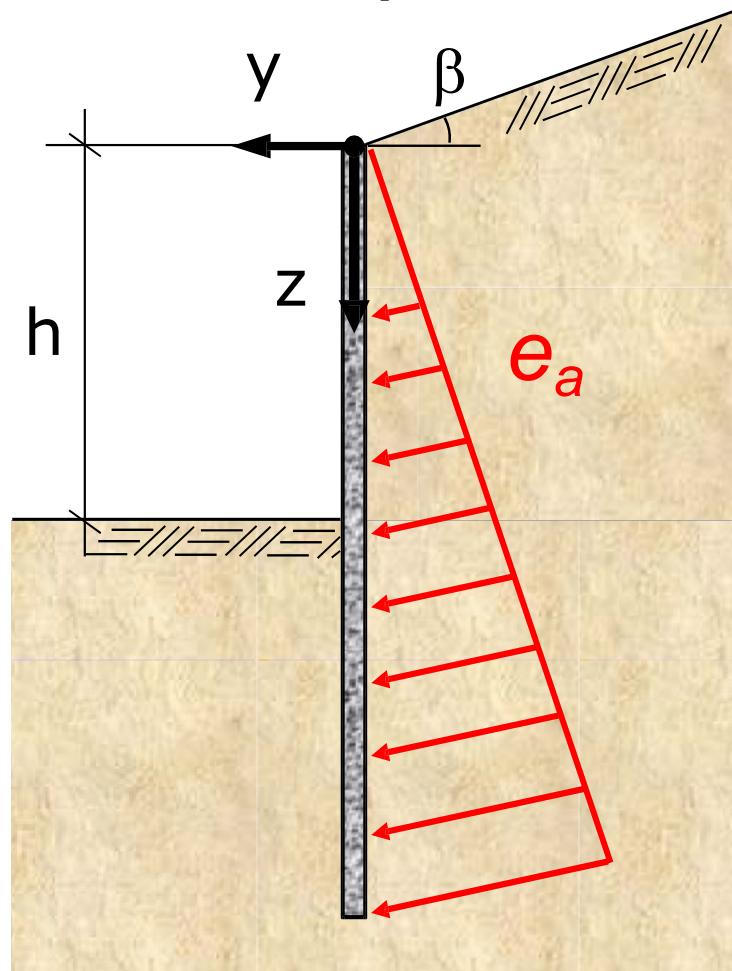
- $\delta_k = 0$ paroi lisse ou peu de déplacement relatif entre le sol et l'ouvrage



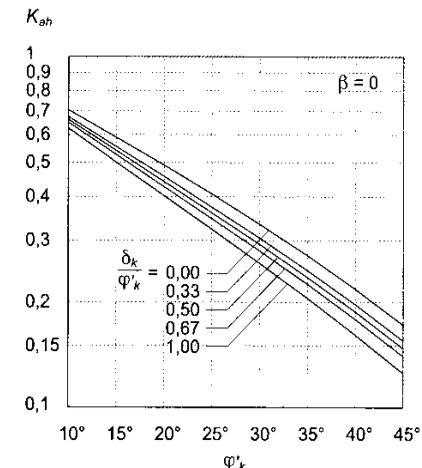
Poussée limite active

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

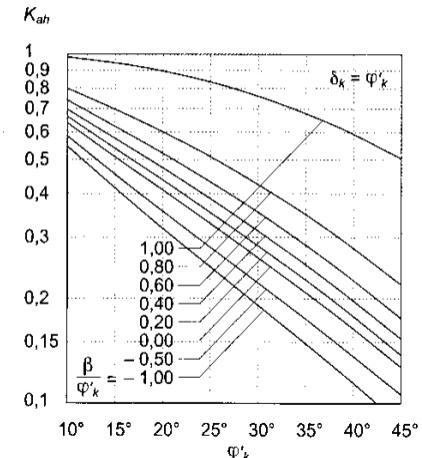
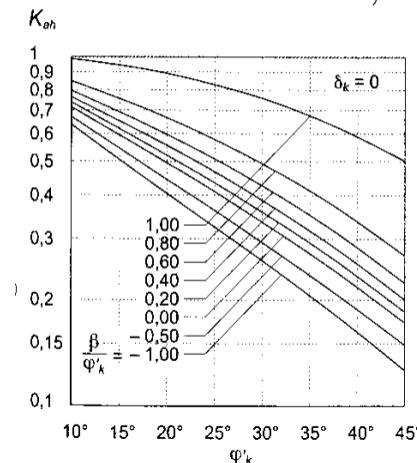
$$K_a = \frac{\cos(\phi' - \lambda)^2}{\cos^2 \lambda \cos(\lambda + \delta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\delta + \phi') \sin(\phi' - \beta)}{\cos(\lambda + \delta) \cos(\lambda - \beta)}} \right]^2}$$



Règle des signes



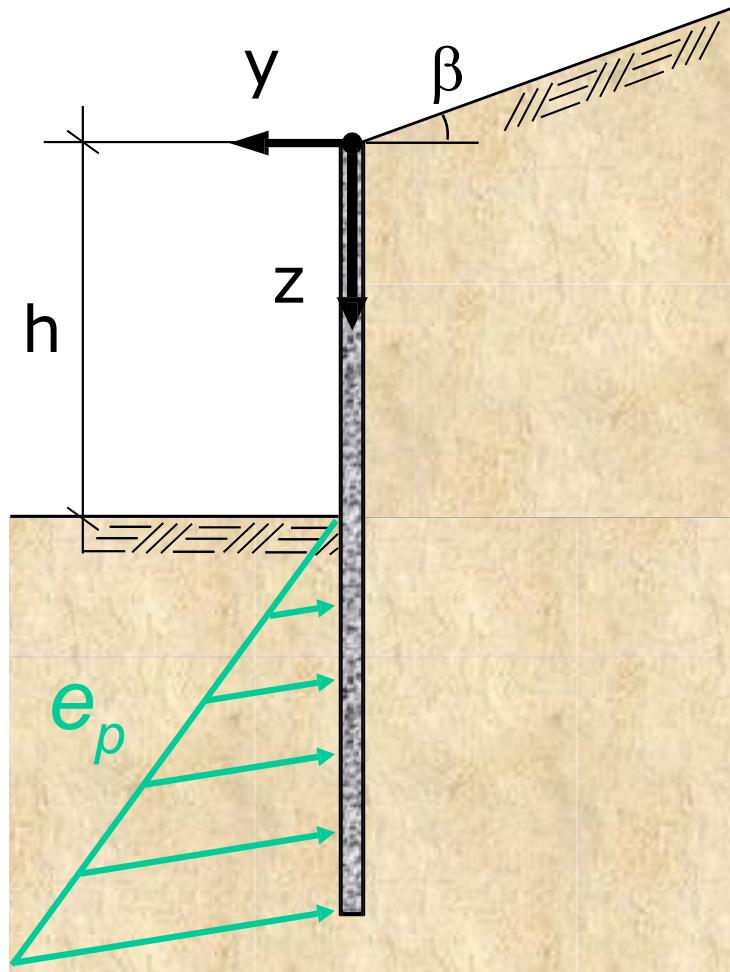
$$K_{a,h} = K_a \cos \delta$$



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



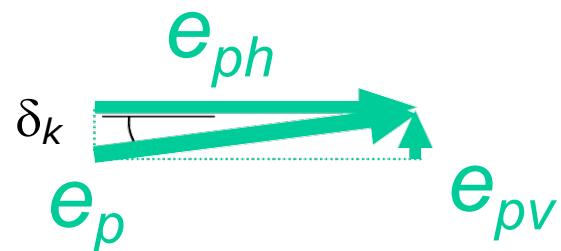
$$e_p = K_p(\phi', \delta, \beta) \sigma'_v + \underbrace{(K_p(\phi', \delta, \beta) - 1)c' \cot \phi'}_{2c' \sqrt{K_p} \text{ cas } \delta=\beta=0}$$

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

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

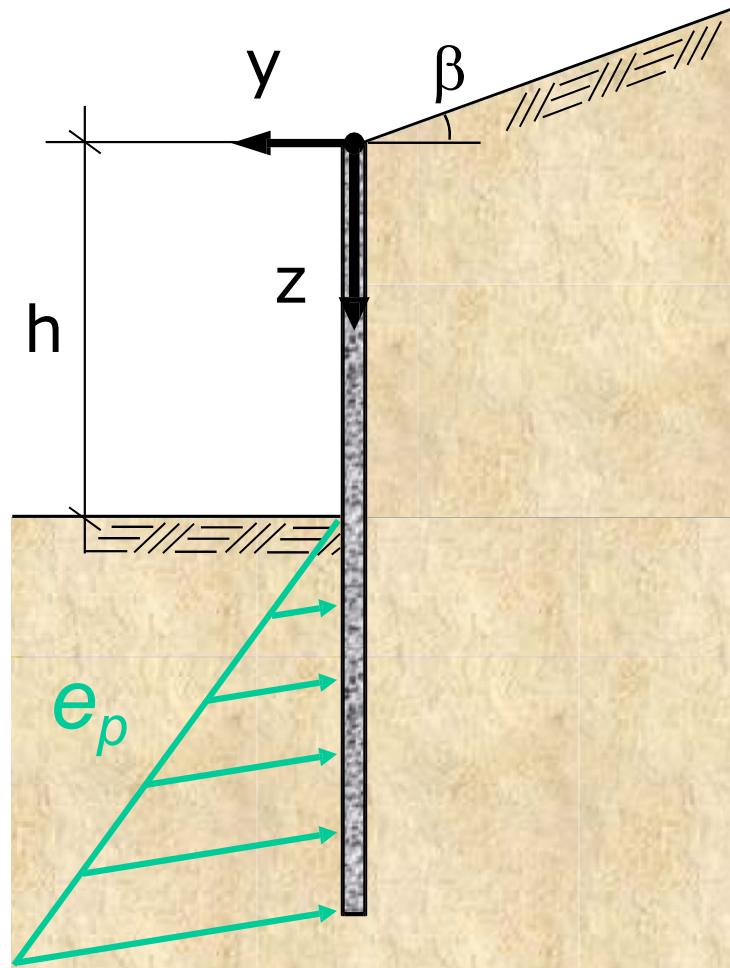
- Inclinaison de la poussée

- $\delta = -\frac{1}{2}\phi'$ 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
(ou la solution de Lancellotta)

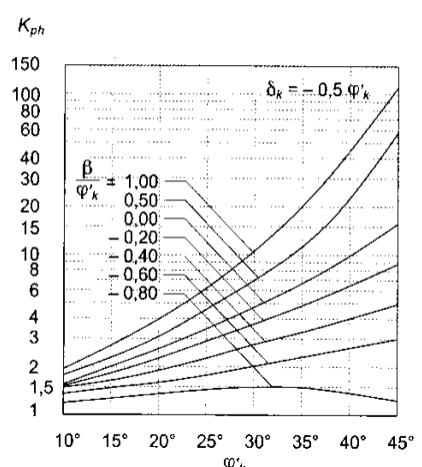
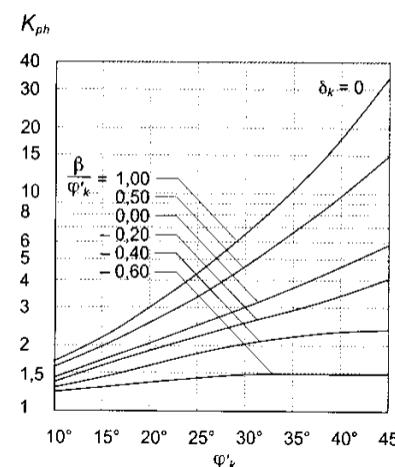
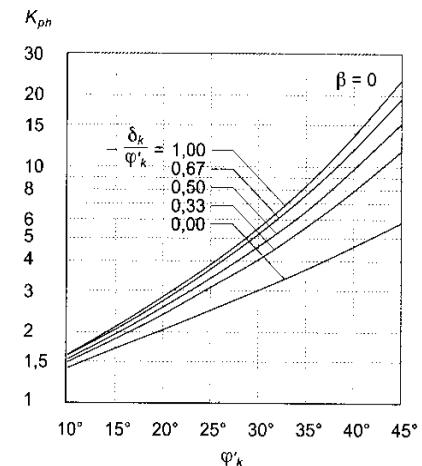


$$K_{p,h} = K_p \cos \delta$$

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



Règle des signes

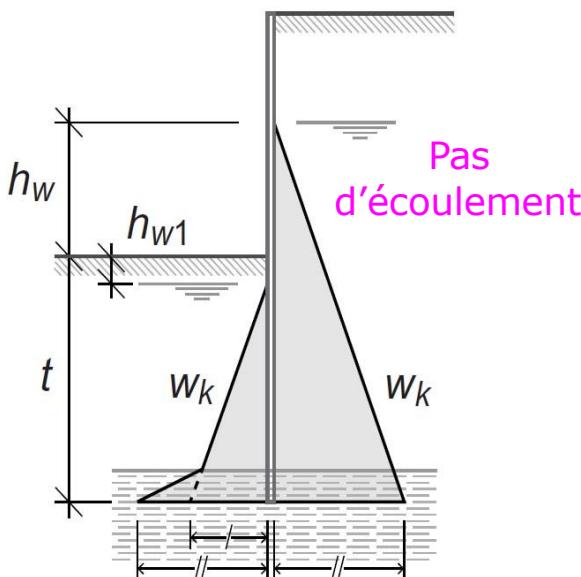


e.g. abaques à l'annexe B de la SIA 261

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)

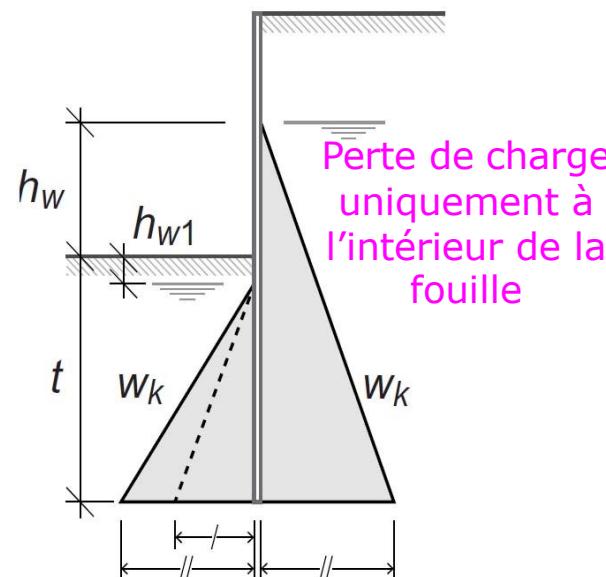
Paroi fichée dans une couche peu perméable



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

Terrain homogène et anisotope

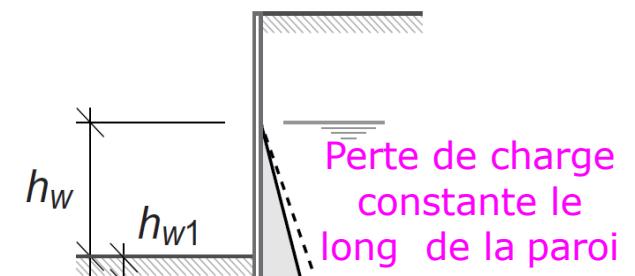
$(k_h \gg k_v)$ ou paroi fichée dans une couche perméable



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

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

Terrain homogène et isotrope

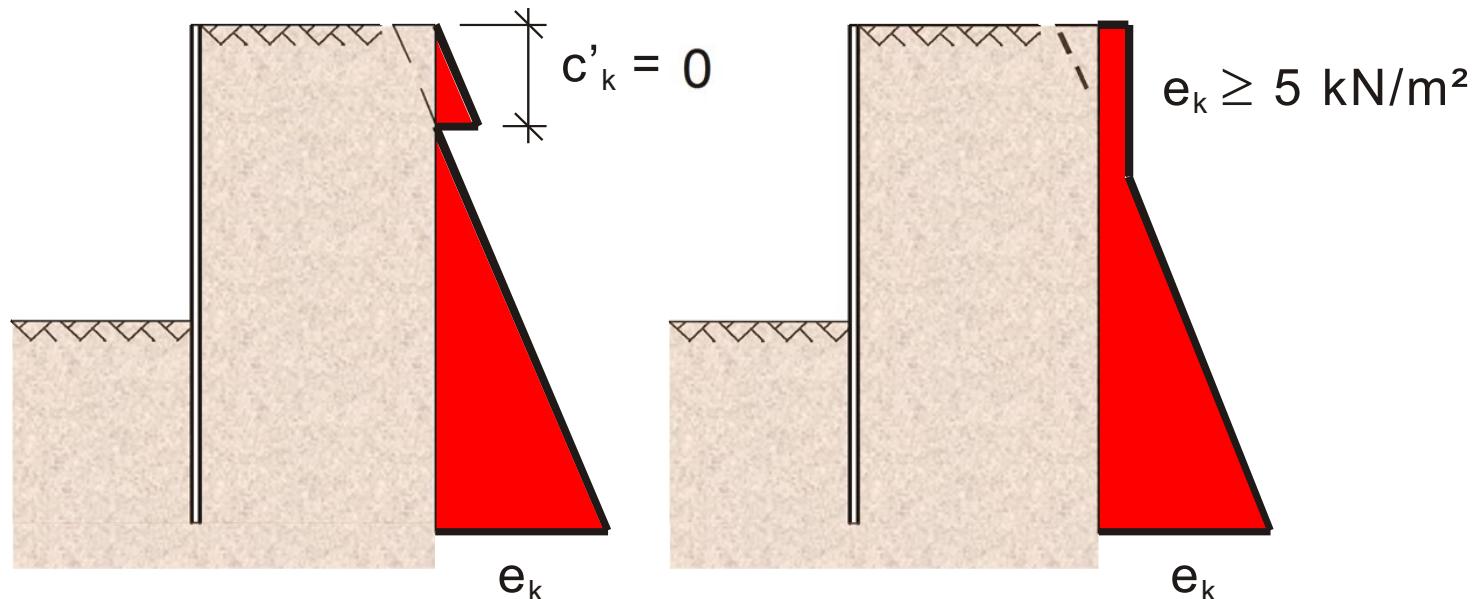


$$i = \frac{h_w + h_{w1}}{h_w + 2 \cdot t - h_{w1}}$$

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

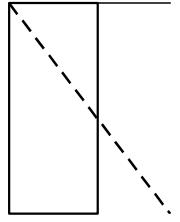
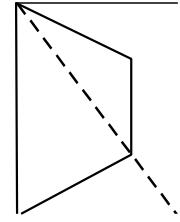
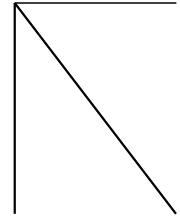
Indications particulières

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)

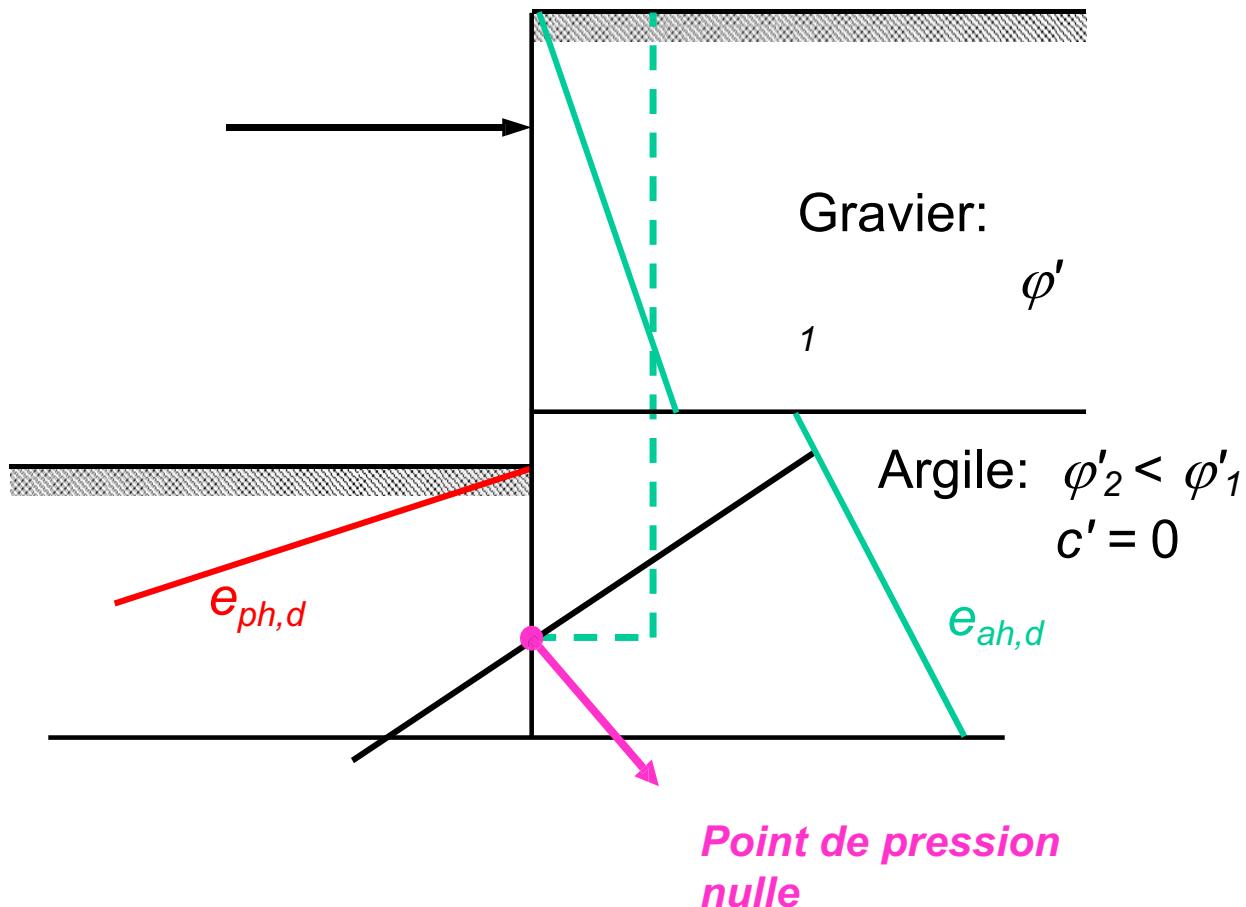
	Cas 1	Cas 2	Cas 3
Sol de fondation	Moyennement à fortement compact	Moyennement à fortement compact	Consistance molle, compacité lâche
Conditions d'appui	1-2 niveaux	> 2 niveaux	quelconque
Redistribution de la poussée des terres	possible	possible	Possible partiellement ou impossible
Répartition de la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



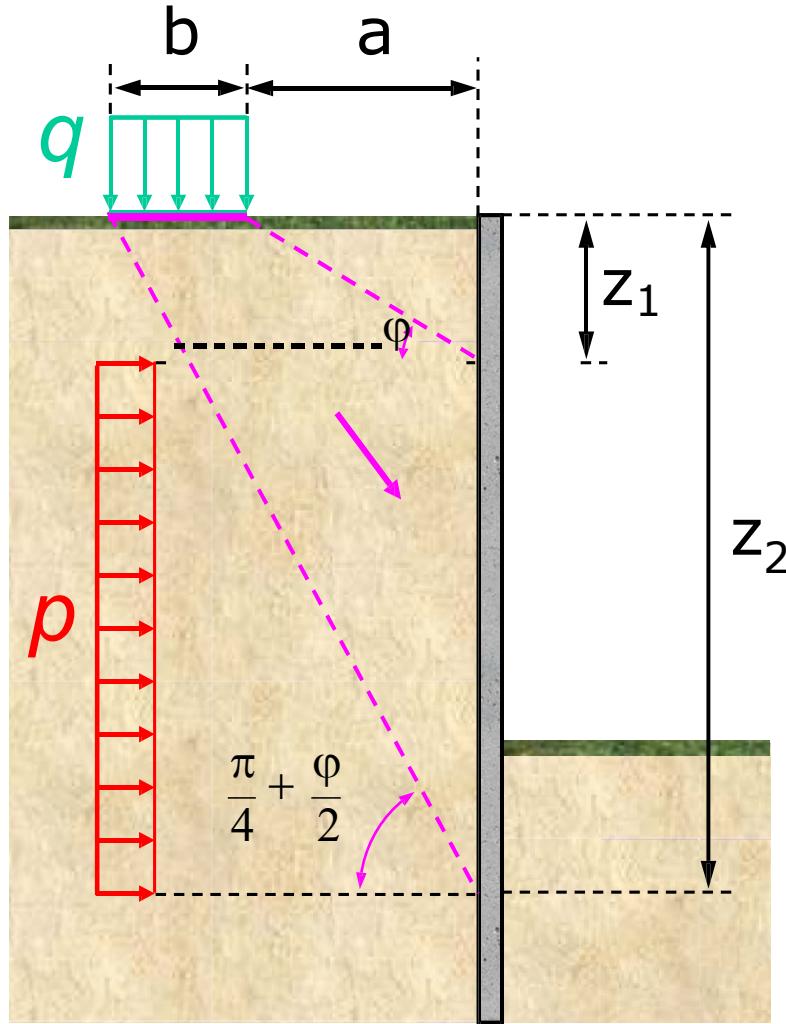
Indications particulières

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



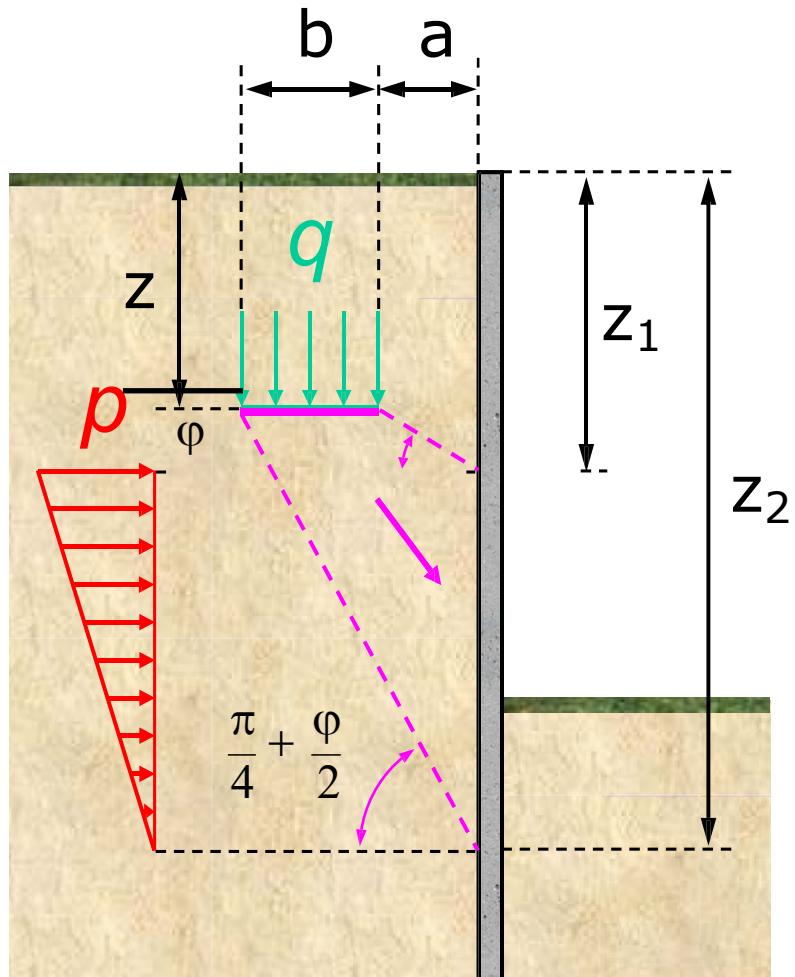
$$p = \frac{q \cdot b \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)}{(a + b) \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) - a \cdot \operatorname{tg} \varphi}$$

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

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

Méthode de Krey

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



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

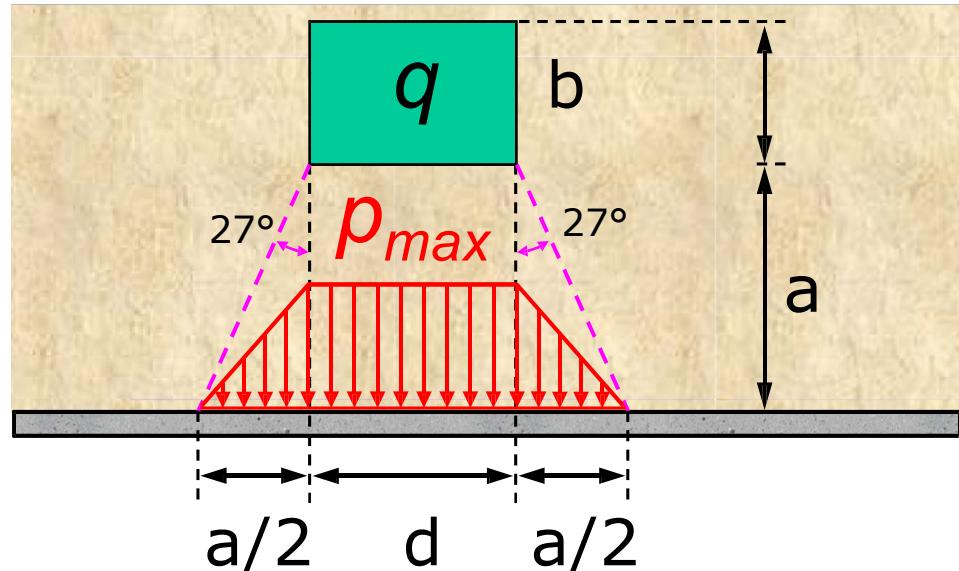
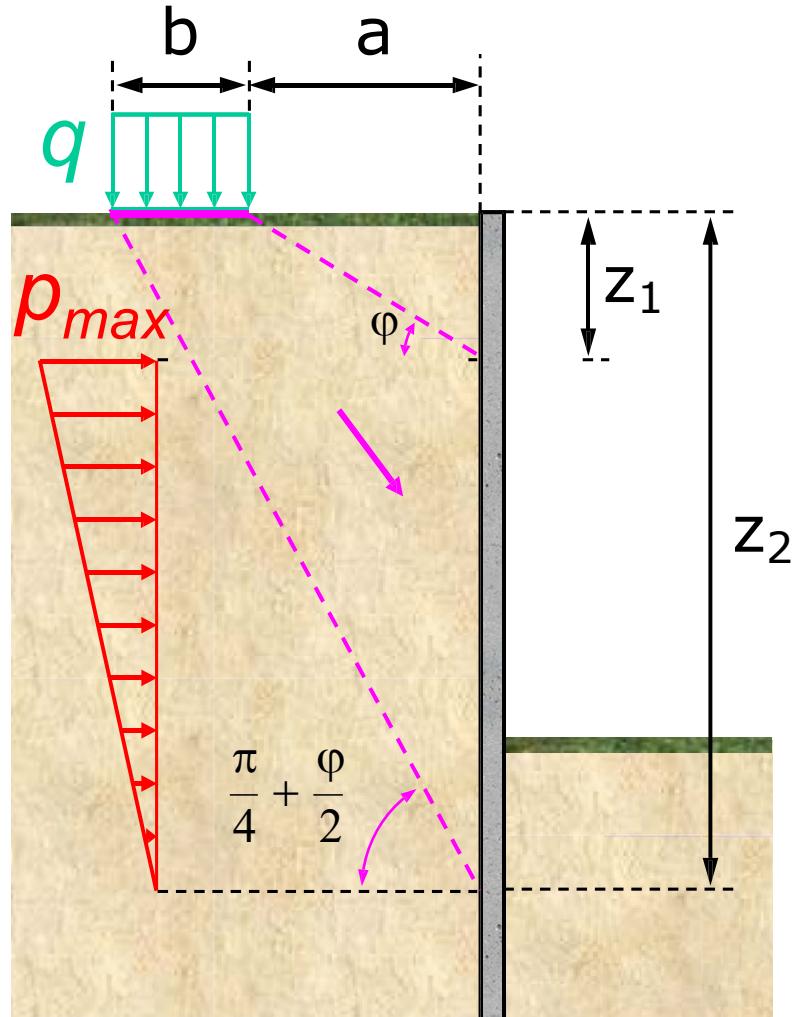
$$z_1 = z + a \cdot \operatorname{tg} \phi$$

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

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 $b \times d$

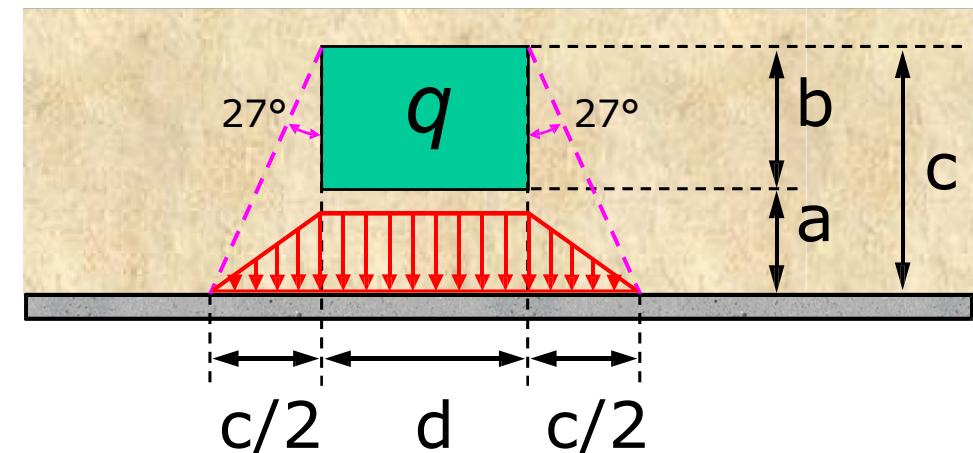
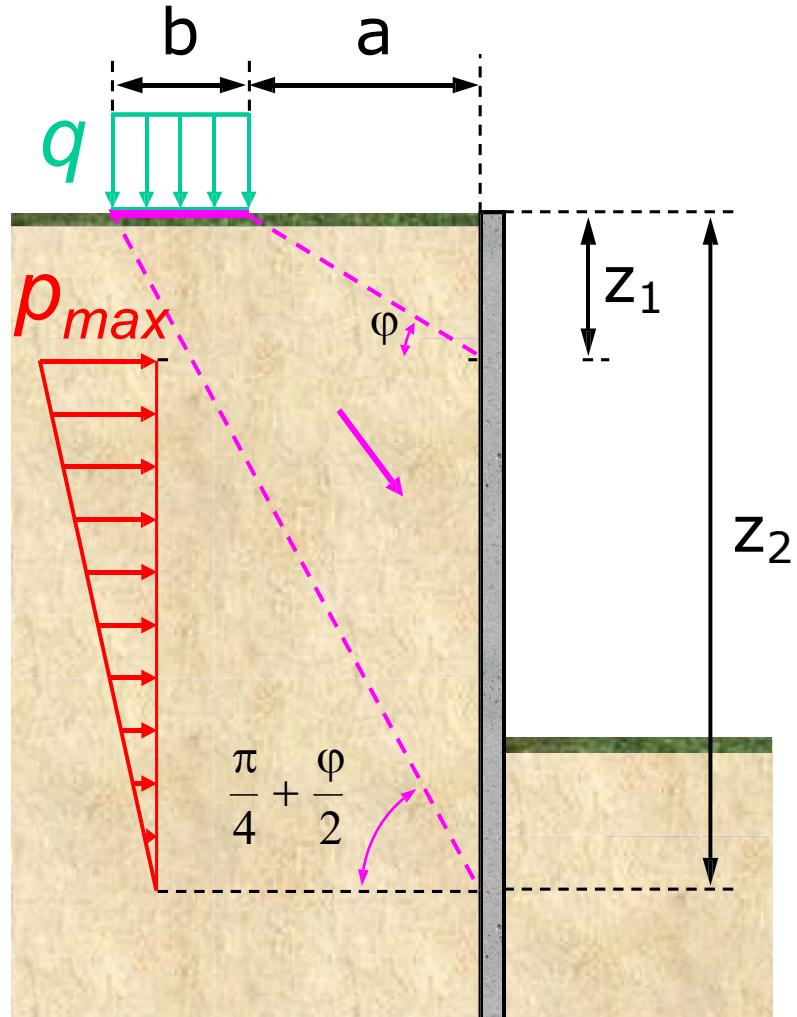


$$z_1 = a \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad z_2 = (a + b) \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right)$$
$$p_{max} = \frac{4 \cdot q \cdot b \cdot d \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)}{(2 \cdot d + a) \cdot (z_2 - z_1)}$$

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)

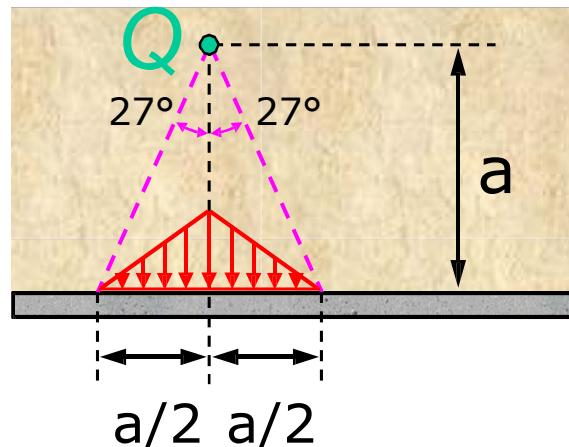
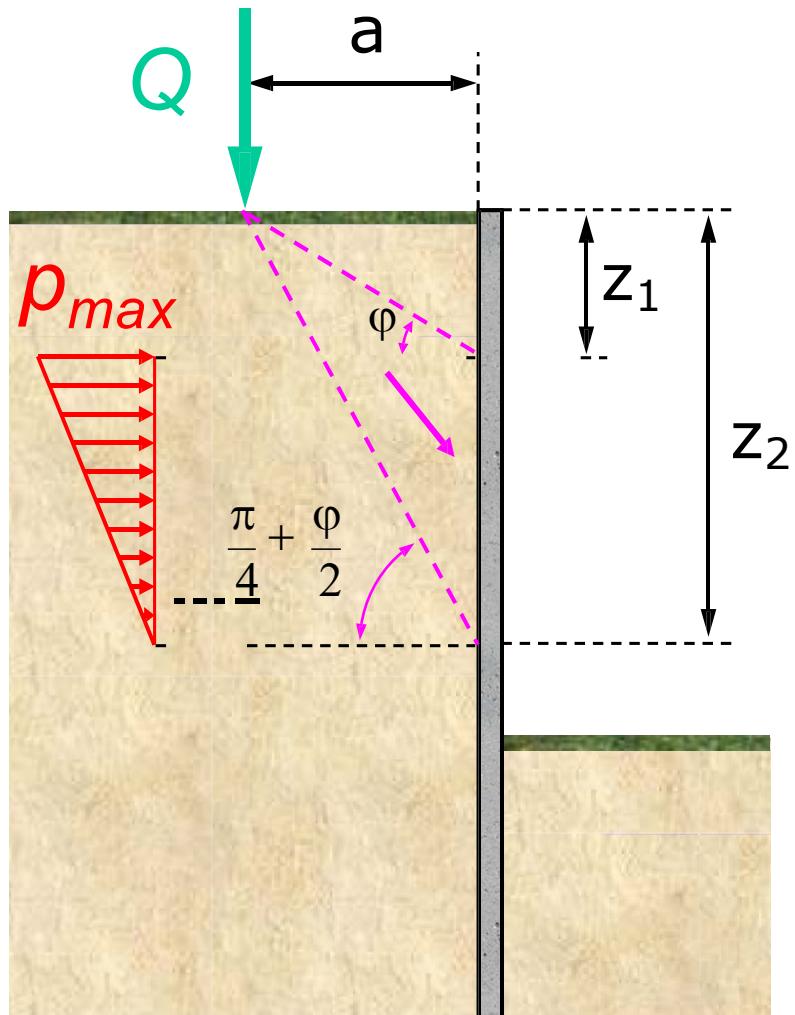


$$z_1 = a \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad z_2 = (a + b) \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right)$$
$$p_{max} = \frac{4 \cdot q \cdot b \cdot d \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)}{(2 \cdot d + c) \cdot (z_2 - z_1)}$$

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)



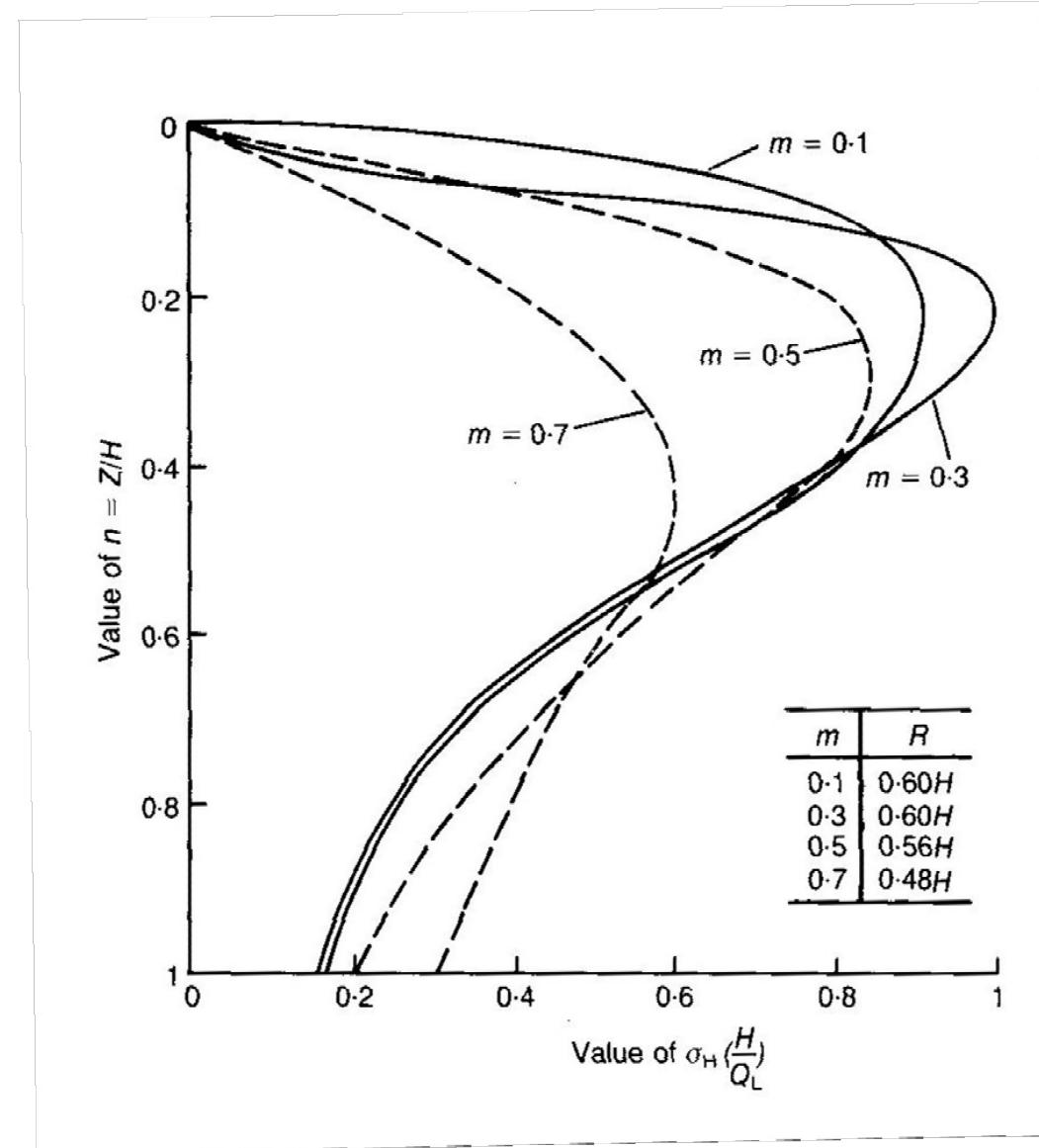
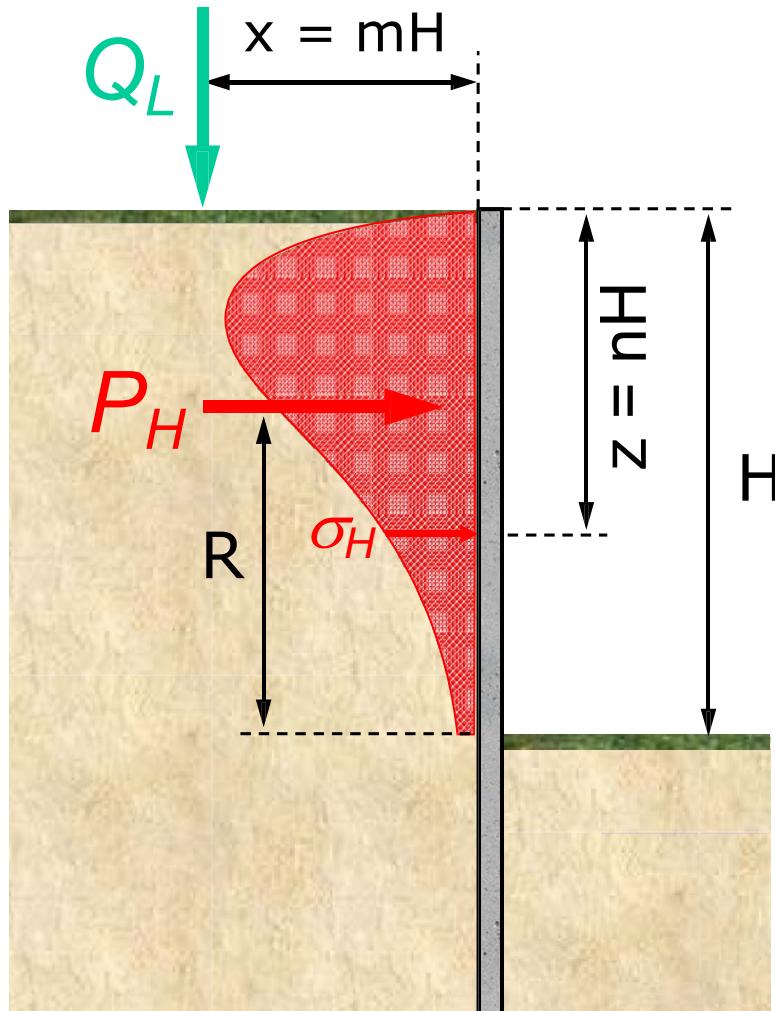
$$z_1 = a \cdot \tan \varphi \quad z_2 = a \cdot \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right)$$
$$p_{max} = \frac{4 \cdot Q \cdot \tan \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)}{a^2 \cdot \left[\tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) - \tan \varphi \right]}$$

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

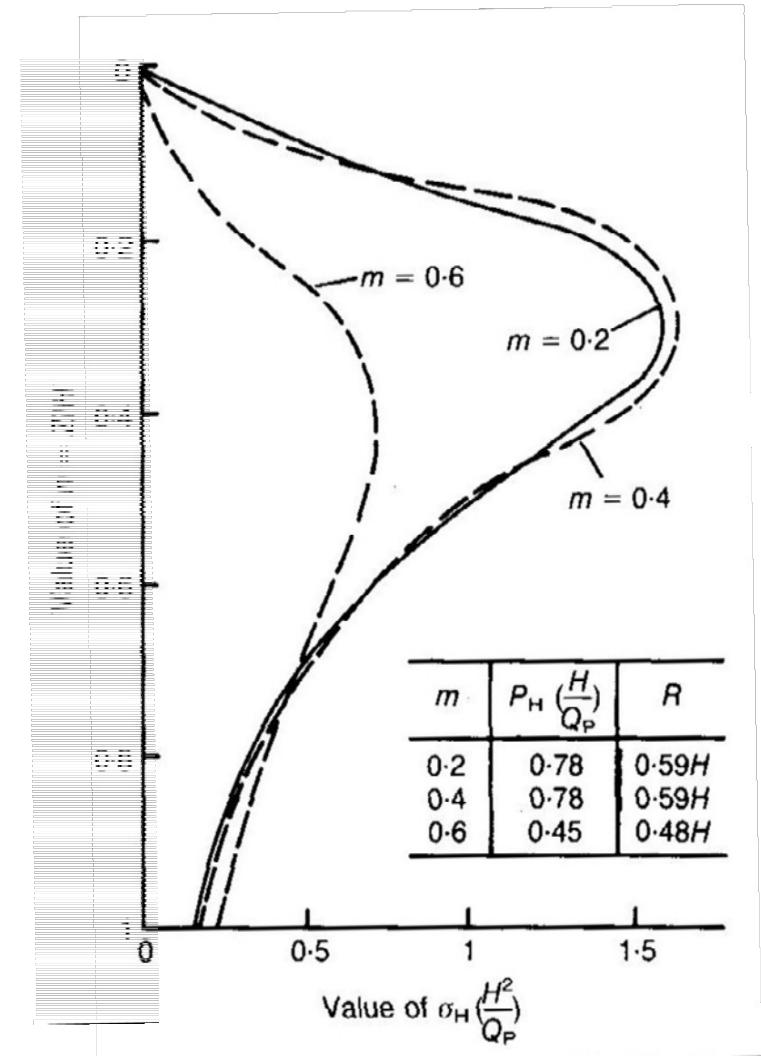
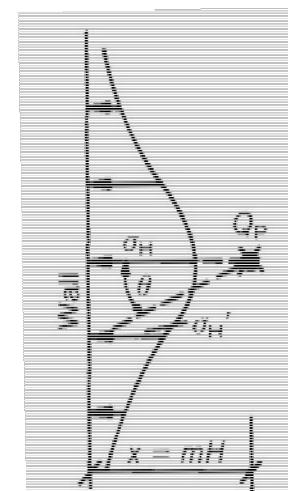
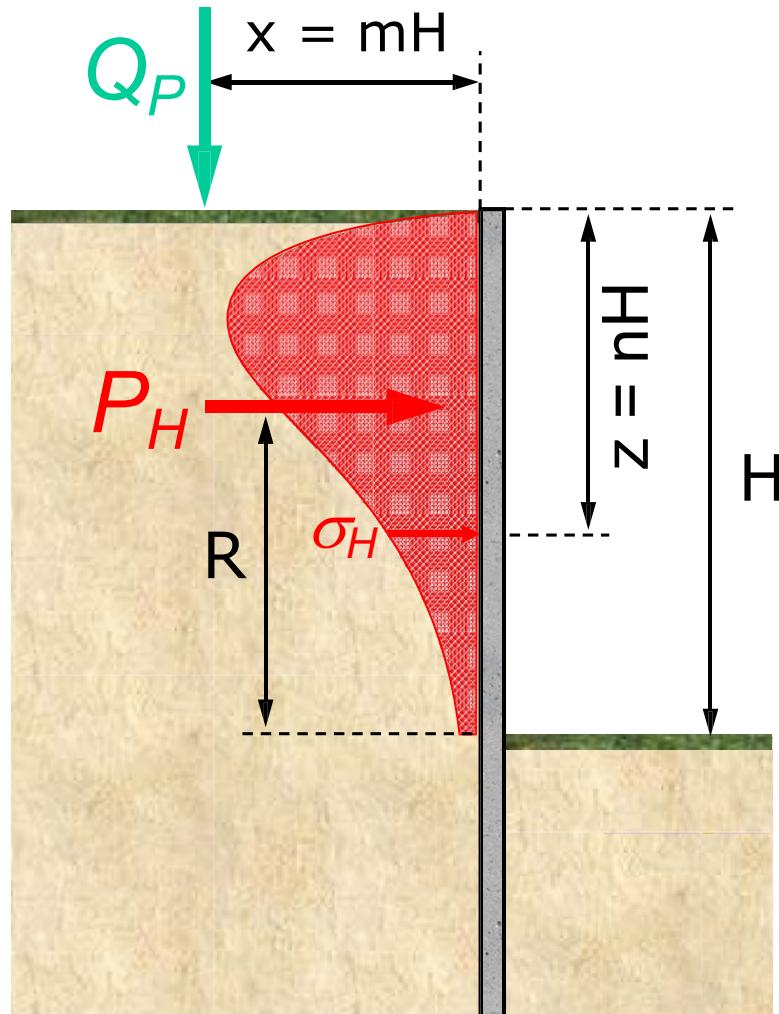


Solutions de Boussinesq modifiées par des expérimentations

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

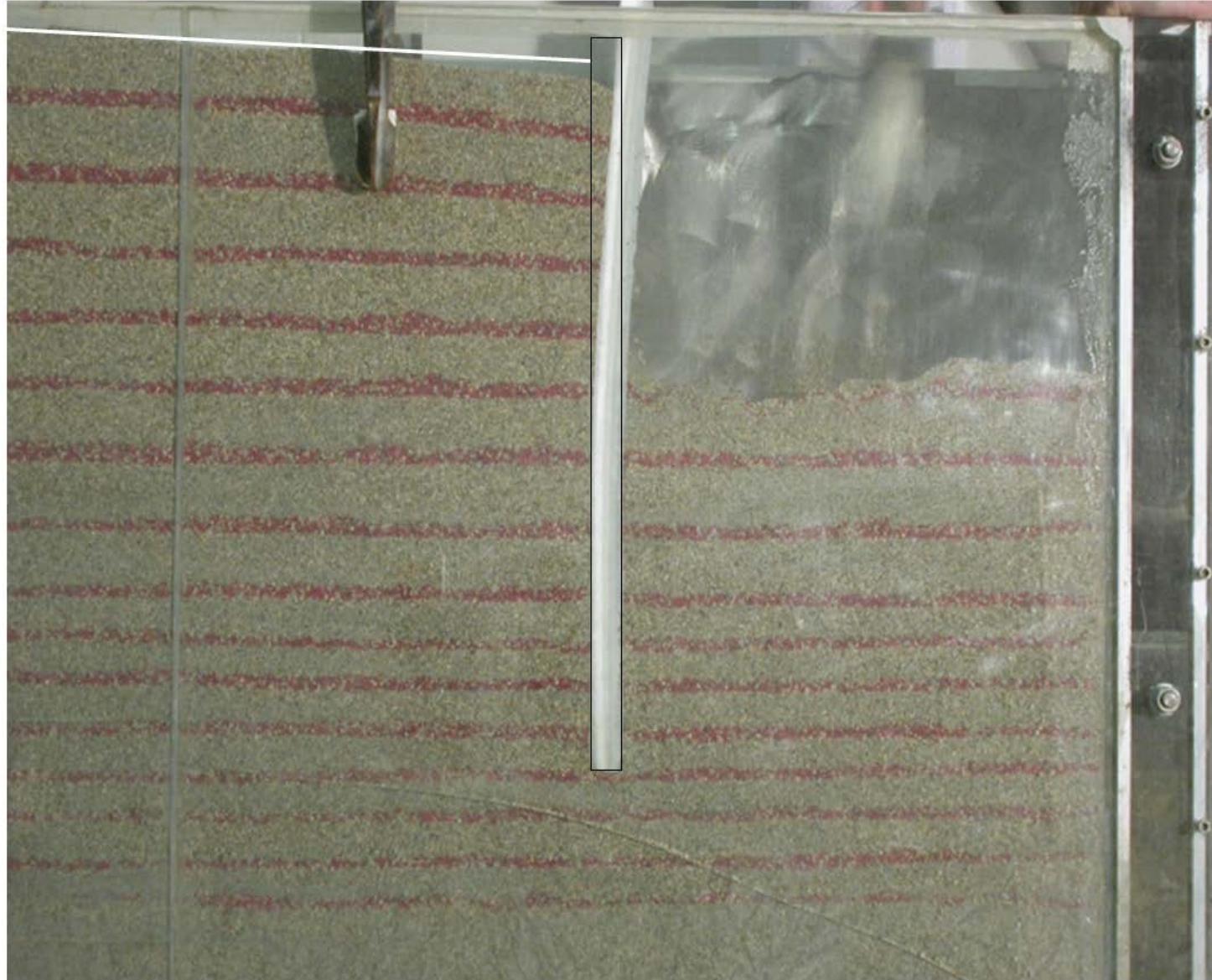


CONDITIONS AUX LIMITES SUR LA PAROI & DIMENSIONNEMENT

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



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

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_ω par l'équilibre de rotation
 $M(z_\omega) = 0$
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 buté en pied

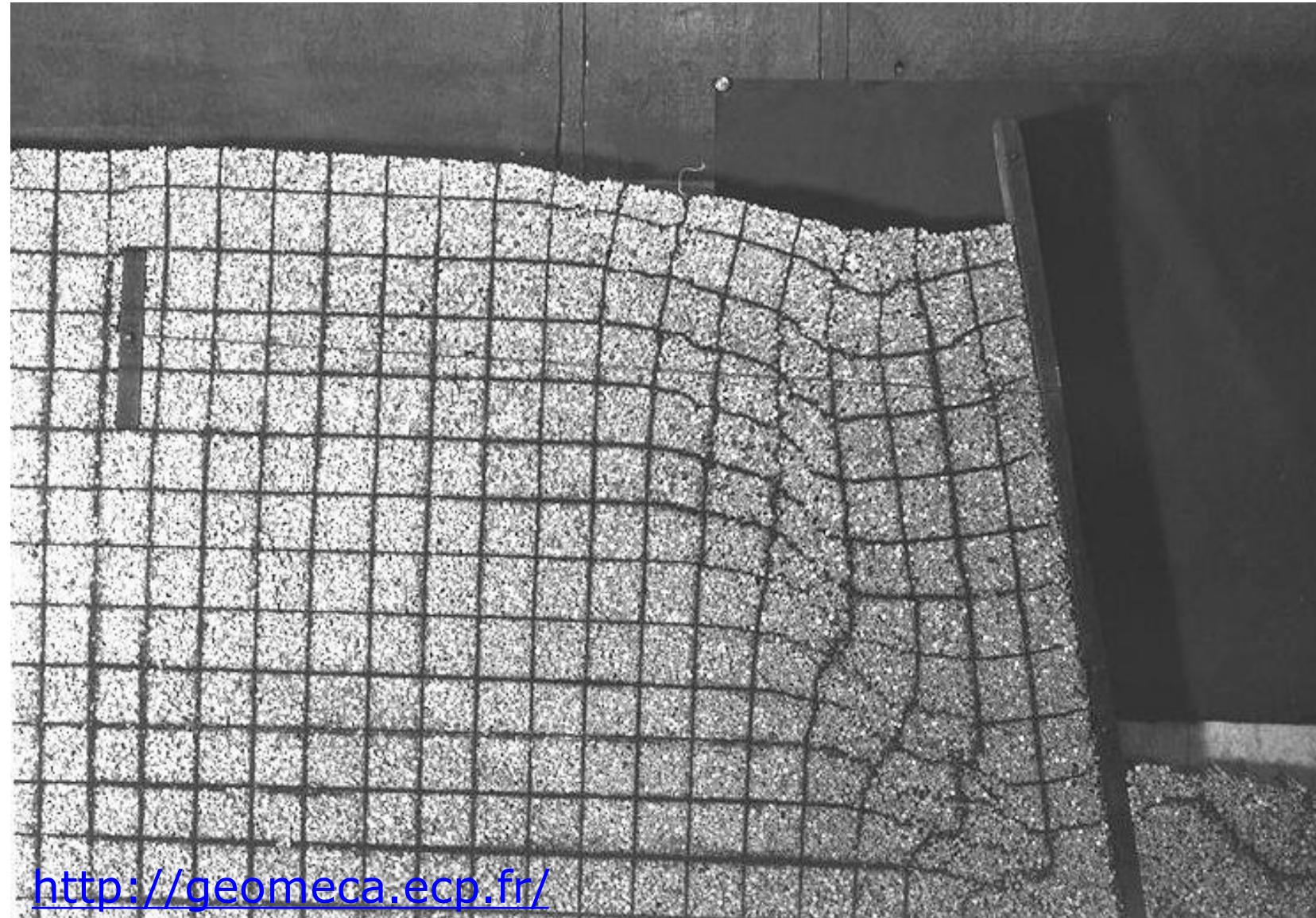
- Stabilité assurée par un niveau d'ancrage + butée
- Pas d'encastrement en pied
- Pivotement de la paroi au niveau du niveau d'appui et déplacement horizontal en pied
- Fiche minimale, effort d'ancrage max.

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/>

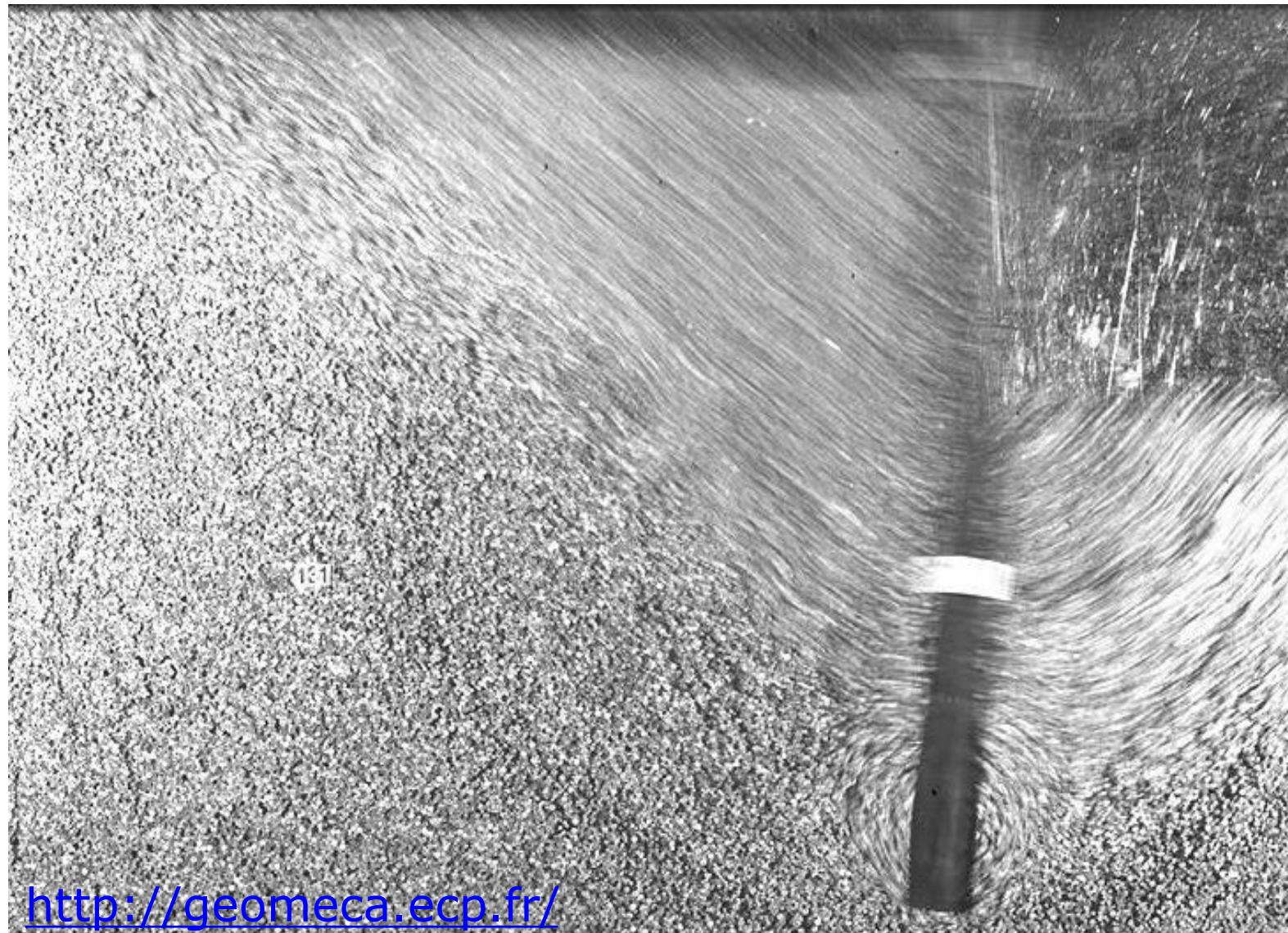
Démarche de calcul – ancré & butée en pied

1. Détermination des actions et du point de pression nulle
2. Détermination du moment fléchissant 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



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

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 déterminer l'inconnue et la résultante de contre-butée
 3. Calcul de la sur-longueur b nécessaire pour la contre-butée
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 de fiche 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 devient 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