

$$F_a = F_{a1} + F_{a2} = K_q \cdot q \cdot H + K_{ar} \cdot \gamma \cdot \frac{H^2}{2}$$

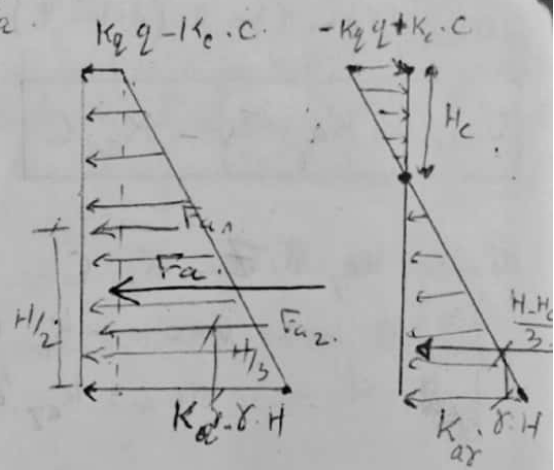
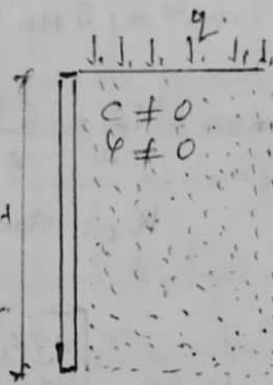
Point d'application de $F_a = H_a$ / $H_a = \frac{F_{a1} \cdot \frac{H}{2} + F_{a2} \cdot \frac{H}{3}}$

sol cohérent surchargé:

$$\sigma_{ha} = K_{ar} \cdot \gamma \cdot z - K_c \cdot c + K_q \cdot q$$

$$\begin{cases} z=0 \Rightarrow \sigma_{ha} = -K_c \cdot c + K_q \cdot q \\ z=H \Rightarrow \sigma_{ha} = K_{ar} \cdot \gamma \cdot H - K_c \cdot c + K_q \cdot q \end{cases}$$

$$\sigma_{ha} = 0 \Rightarrow H_c = \frac{-K_q \cdot q + K_c \cdot c}{K_{ar} \cdot \gamma}$$



1^{er} cas: $F_a = F_{a1} + F_{a2} = (K_q \cdot q - K_c \cdot c) H + K_{ar} \cdot \gamma \cdot \frac{H^2}{2}$

2^{ème} cas: $F_a = (K_{ar} \cdot \gamma \cdot H) \cdot \left(\frac{H - H_c}{2} \right)$

méthode de superposition:

$$\sigma_{ha} = \underbrace{K_{ar} \cdot \gamma \cdot z}_{\gamma \neq 0, z \neq 0, c=0} + \underbrace{K_q \cdot q}_{\gamma=0, z \neq 0, c=0} - \underbrace{K_c \cdot c}_{q=0, \gamma=0, c \neq 0}$$

$$\begin{array}{c} \downarrow \downarrow \downarrow \downarrow \downarrow \downarrow \\ \gamma \neq 0, c \neq 0 \end{array} = \begin{array}{c} \downarrow \downarrow \downarrow \downarrow \downarrow \downarrow \\ \gamma \neq 0, c=0 \end{array} + \begin{array}{c} \downarrow \downarrow \downarrow \downarrow \downarrow \downarrow \\ \gamma=0, c=0 \end{array} - \begin{array}{c} \downarrow \downarrow \downarrow \downarrow \downarrow \downarrow \\ \gamma=0, c \neq 0 \end{array}$$

sol purement cohérent surchargé: $K_{ar} = 1$

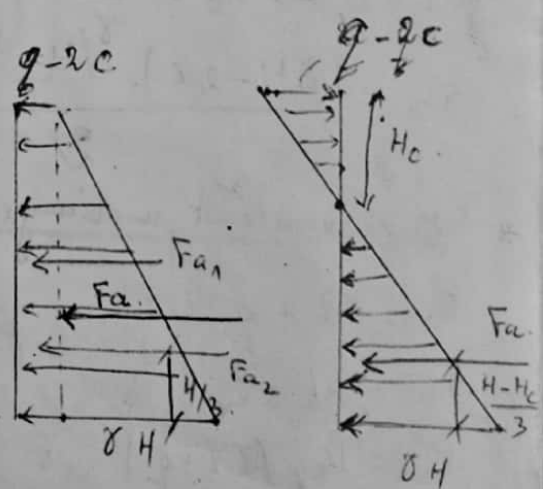
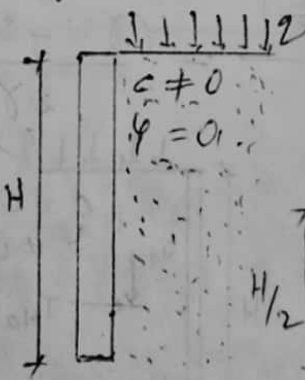
$$\sigma_{ha} = \gamma \cdot z + q - 2c$$

$$\begin{cases} z=0 \Rightarrow \sigma_{ha} = q - 2c \\ z=H \Rightarrow \sigma_{ha} = \gamma \cdot H + q - 2c \end{cases}$$

$$\sigma_{ha} = 0 \Rightarrow H_c = \frac{2c - q}{\gamma}$$

1^{er} cas: $F_a = (q - 2c) H + \frac{\gamma H^2}{2}$

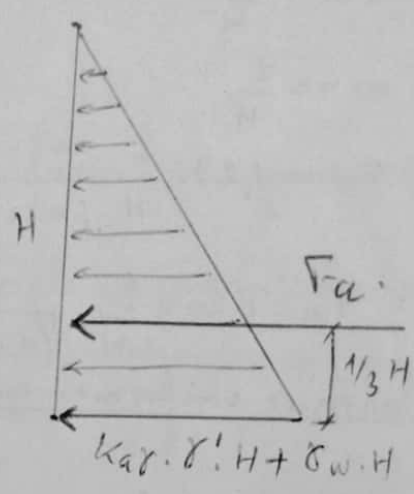
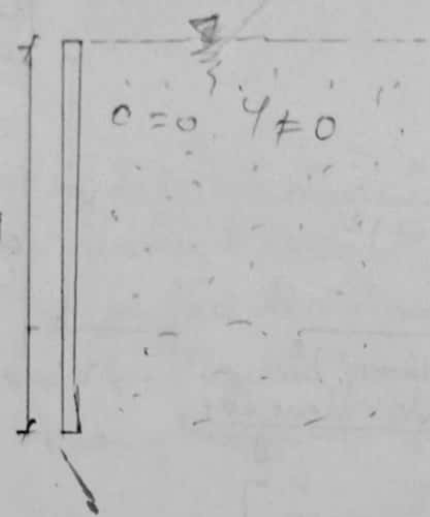
2^{ème} cas: $F_a = \gamma \cdot H \times \left(\frac{H - H_c}{2} \right)$



Sol pulvérisant saturé:

$$\begin{aligned} \sigma'_v &= \sigma'_v + \sigma_v - u \\ &= \gamma \cdot z - \gamma_w \cdot z = z(\gamma - \gamma_w) \\ \sigma'_v &= \gamma' \cdot z \quad \gamma': \text{décharge} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{Ha} &= K_{ar} \cdot \gamma' \cdot z \\ \sigma_{Hw} &= K_{aw} \cdot u = K_{aw} \cdot \gamma_w \cdot z \\ \sigma_{Hw} &= \gamma_w \cdot z \cdot 1 \\ \sigma_{Ha} &= K_{ar} \cdot \gamma' \cdot z + \gamma_w \cdot z \end{aligned}$$



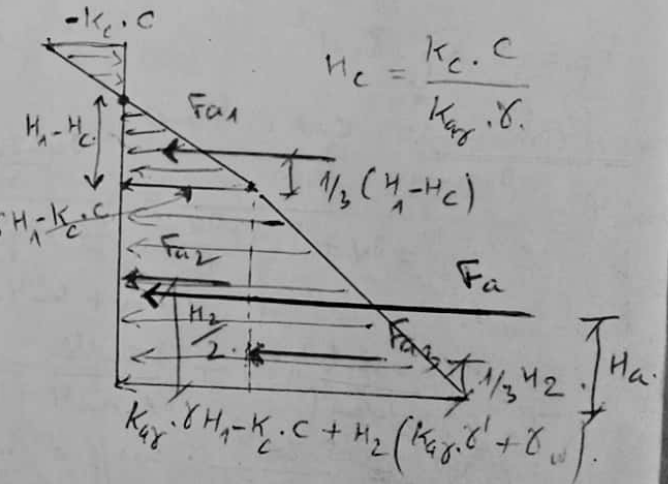
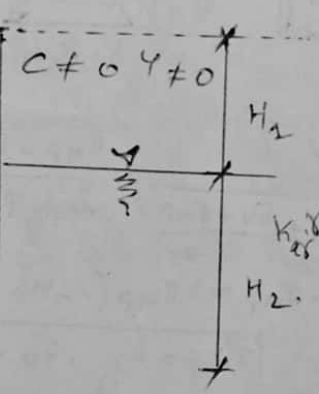
$$\begin{cases} z=0 \rightarrow \sigma_{Ha}=0 \\ z=H \rightarrow \sigma_{Ha} = K_{ar} \cdot \gamma' \cdot H + \gamma_w \cdot H = H(K_{ar} \cdot \gamma' + \gamma_w) \end{cases}$$

$$F_a = H(K_{ar} \cdot \gamma' + \gamma_w) \cdot \frac{H}{2} = \frac{1}{2} H^2 (K_{ar} \cdot \gamma' + \gamma_w)$$

* Sol cohérent saturé à une certaine hauteur:

$$\begin{aligned} \sigma_{Ha} &= K_{ar} \cdot \gamma \cdot z - K_c \cdot c \\ \begin{cases} z=0 \rightarrow \sigma_{Ha} = -K_c \cdot c \\ z=H_1 \rightarrow \sigma_{Ha} = K_{ar} \cdot \gamma H_1 - K_c \cdot c \end{cases} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{Ha} &= K_{ar} \cdot \gamma \cdot H_1 - K_c \cdot c + K_{ar} \cdot \gamma' \cdot z + \gamma_w \cdot z \\ z \neq H_2 \rightarrow \sigma_{Ha} &= K_{ar} \cdot \gamma H_1 - K_c \cdot c + K_{ar} \cdot \gamma' \cdot H_2 + \gamma_w \cdot H_2 \end{aligned}$$



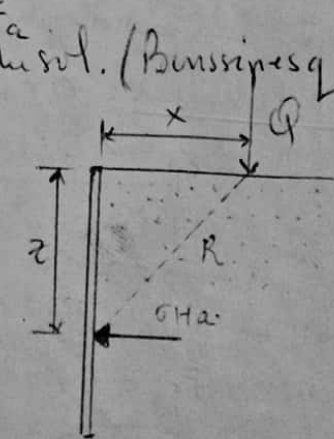
$$\begin{aligned} F_a &= F_{a1} + F_{a2} + F_{a3} \\ F_{a1} &= (K_{ar} \cdot \gamma H_1 - K_c \cdot c) \left(\frac{H_1 - H_c}{2} \right) \\ F_{a2} &= (K_{ar} \cdot \gamma H_1 - K_c \cdot c) \cdot H_2 \\ F_{a3} &= \frac{1}{2} H_2^2 (K_{ar} \cdot \gamma' + \gamma_w) \\ \text{Point d'application de } F_a: H_a / H_a &= \frac{F_{a1}(H_2 + H_1 - H_c) + F_{a2} \cdot \frac{H_2}{2} + F_{a3} \cdot \frac{2}{3} H_2}{F_a} \end{aligned}$$

* Cas Particuliers: surcharges à la surface du sol. (Boussinesq)

• Charge concentrée:

$$\sigma_H = \frac{3CQ}{2\pi} \cdot x \cdot z \cdot R^{-5}$$

$$R = \sqrt{x^2 + z^2}$$



• Charge linéique parallèle à l'axe:

$$x = mH \Rightarrow m = \frac{x}{H}$$

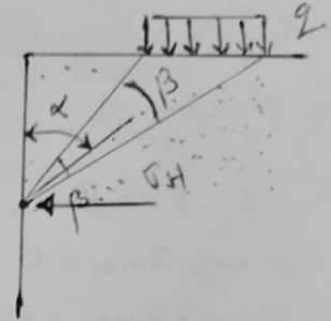
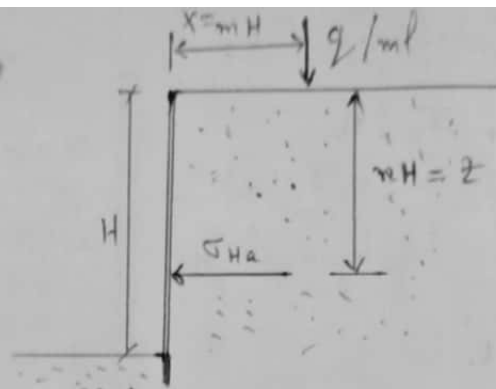
$$z = nH \Rightarrow n = \frac{z}{H}$$

$$m > 0,4 : \sigma_H = 1,27 \cdot \frac{q}{H} \cdot \frac{m^2 \cdot n}{(m^2 + n^2)^2}$$

$$m < 0,4 : \sigma_H = 0,203 \cdot \frac{q}{H} \cdot \frac{m}{(0,16 + n^2)^2}$$

• bande linéaire uniformément chargée:

$$\sigma_H = \frac{2q}{\pi} \left[(\beta + \sin \beta) \sin^2 \alpha + (\beta - \sin \beta) \cos^2 \alpha \right]$$

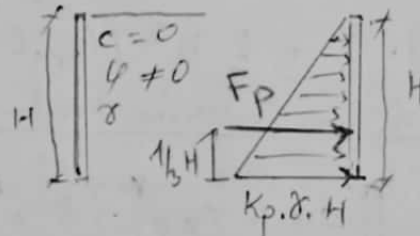


* Forces de Butée:

• non pulvéulent: $c = 0; \varphi \neq 0$

$$\sigma_{HP} = K_{ps} \cdot \gamma \cdot z$$

$$F_p = \frac{1}{2} K_{ps} \cdot \gamma \cdot H^2$$



• cohérent: $c \neq 0 \varphi \neq 0$

$$\tan \varphi = \frac{\sigma_{HP} - \sigma_v}{c \cdot \cot \varphi + \sigma_v + \frac{\sigma_{HP} - \sigma_v}{2}} = \frac{\sigma_{HP} - \sigma_v}{2c \cot \varphi + \sigma_v + \sigma_{HP}} = \frac{\sigma_{HP} - \sigma_v}{2c \cot \varphi + \sigma_v + \sigma_{HP}}$$

$$\sigma_{HP} - \sigma_v = 2c \cdot \cot \varphi + \tan \varphi \cdot \sigma_v + \tan \varphi \cdot \sigma_{HP} \Rightarrow \sigma_{HP} (1 - \tan \varphi) = \sigma_v (1 + \tan \varphi) + 2c \cot \varphi$$

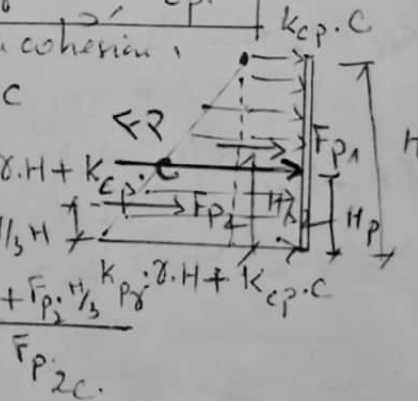
$$\sigma_{HP} = \left(\frac{1 + \tan \varphi}{1 - \tan \varphi} \right) \sigma_v + \frac{2c \cot \varphi}{1 - \tan \varphi} \Rightarrow \sigma_{HP} = K_{ps} \cdot \sigma_v + K_{cp} \cdot c$$

avec: $K_{cp} = \frac{2 \cot \varphi}{1 - \tan \varphi}$: coeff de butée dû à la cohésion

$$\sigma_{HP} = K_{ps} \cdot \gamma \cdot z + K_{cp} \cdot c$$

$$F_{p1} = K_{cp} \cdot c \cdot H \quad F_{p2} = \frac{1}{2} \cdot H^2 \cdot K_{ps} \cdot \gamma$$

$$F_p = F_{p1} + F_{p2} \rightarrow \text{point d'application } H_p / H_p = \frac{F_{p1} \cdot \frac{H}{2} + F_{p2} \cdot \frac{1}{3} K_{ps} \cdot \gamma \cdot H}{F_{p1} + F_{p2}}$$



• uniquement cohérent: $c \neq 0 \varphi = 0$

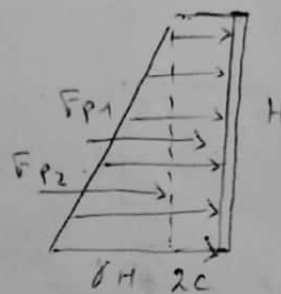
$$K_{ps} = 1 \quad K_{cp} = 2$$

$$\sigma_{HP} = K_{ps} \cdot \gamma \cdot z + 2c$$

$$\left. \begin{array}{l} z = 0 \rightarrow \sigma_{HP} = 2c \\ z = H \rightarrow \sigma_{HP} = \gamma H + 2c \end{array} \right\}$$

$$F_{p1} = 2c \cdot H \quad F_{p2} = \frac{1}{2} \gamma H^2$$

$$F_p = F_{p1} + F_{p2} \quad H_p / H_p = \frac{F_{p1} \cdot \frac{H}{2} + F_{p2} \cdot \frac{1}{3}}{F_{p1} + F_{p2}}$$



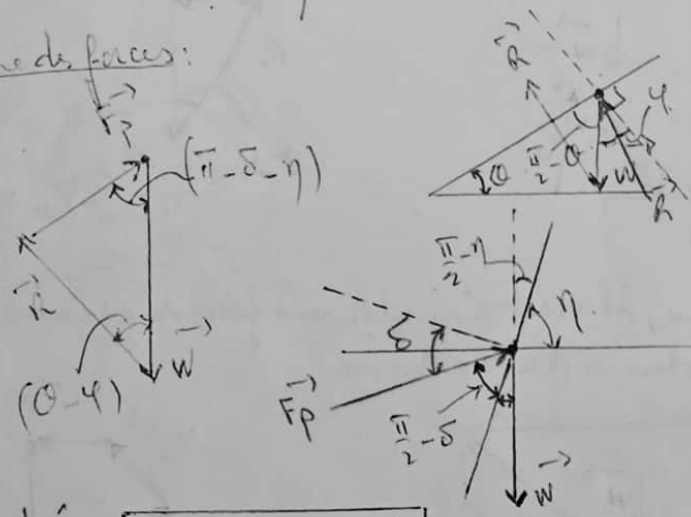
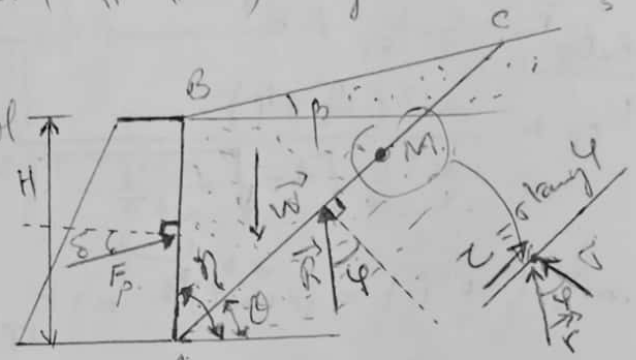
5) Méthode de Coulomb :

Hypothèses :

- * détermine la force de poussée ou de butée derrière l'écran pour ~~la~~ considération de l'état des contraintes derrière l'écran.
- * le sol se rompt suivant une surface de rupture plane passant par le pied de l'écran
- * la force agissant sur l'écran a une direction connue cela signifie que l'angle de frottement δ entre le sol et l'écran est connu. $(-\varphi \leq \delta \leq +\varphi) \Rightarrow$ généralement $\delta = \frac{2}{3}\varphi$

Principe :

- mur de soutènement soutenant un massif de sol pulvéulent ($c=0$) et angle de frott. φ
- AC : plan de rupture faisant l'angle θ avec l'horizontale.
- En chaque pt. P du plan de rupture s'exerce la contrainte $\vec{r}$ faisant l'angle φ avec la normale au plan $\vec{c}$
- $\vec{R}$: réaction totale du sol sur le plan AC $\vec{R} = \int r ds$
- les forces agissant sur le coin de sol ABC (prisme ABC) :
- $\vec{W}$: poids du sol ABC $\vec{F}_p$: force exercée par le mur sur le sol. $\vec{R}$
- le coin de sol ABC est en équilibre : $\sum \vec{F} = \vec{0} \Rightarrow \vec{W} + \vec{F}_p + \vec{R} = \vec{0}$
- le polygone des forces :



$$(\vec{W}, \vec{R}) = \left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) - \left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) = \frac{\pi}{2} - \varphi - \frac{\pi}{2} + \theta = (\theta - \varphi)$$

$$(\vec{W}, \vec{F}_p) = \left(\frac{\pi}{2} - \eta\right) + \left(\frac{\pi}{2} - \delta\right)$$

$$(\vec{W}, \vec{F}_p) = (\pi - \delta - \eta)$$

* Force de Butée :

$$F_p = \frac{1}{2} K_p \gamma H^2 \quad \text{avec} \quad K_p = \frac{\sin^2(\eta + \varphi)}{\sin^2 \eta \cdot \sin(\eta + \delta) \left[1 - \sqrt{\frac{\sin(\varphi - \delta) \sin(\varphi + \beta)}{\sin(\eta + \delta) \sin(\eta - \beta)}} \right]^2}$$

* Force de Poussée :

$$F_a = \frac{1}{2} K_a \gamma H^2 \quad \text{avec} \quad K_a = \frac{\sin^2(\eta - \varphi)}{\sin^2 \eta \cdot \sin(\eta + \delta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi - \beta)}{\sin(\eta + \delta) \sin(\eta - \beta)}} \right]^2}$$

• Remarque : On suppose une répartition linéaire des contraintes sur le parement du mur et l'application de la force est à $\frac{H}{3}$ de la base.

* Cas de Rankine: $\eta = \frac{\pi}{2}$ $\delta = 0$ et $\beta = 0$

• Pousée: $K_{ax} = \frac{\sin^2(\frac{\pi}{2} - \varphi)}{\sin^2 \frac{\pi}{2} \cdot \sin \frac{\pi}{2} \cdot \left[1 + \sqrt{\frac{\sin^2 4}{\sin^2 \frac{\pi}{2}}} \right]^2} = \frac{\sin^2(\frac{\pi}{2} - \varphi)}{(1 + \sin \varphi)^2}$

$\sin^2(\frac{\pi}{2} - \varphi) = (1 - \sin \varphi)^2 \Rightarrow K_{ax} = \frac{(1 - \sin \varphi)^2}{(1 + \sin \varphi)^2} = \frac{(1 - \sin \varphi)(1 - \sin \varphi)}{(1 + \sin \varphi)^2}$

$K_{ax} = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}$

• Butée: $F_a = \frac{1}{2} \cdot K_{ax} \cdot \gamma \cdot H^2$

$K_{px} = \frac{\sin^2(\frac{\pi}{2} + \varphi)}{\sin^2 \frac{\pi}{2} \cdot \left[1 - \sqrt{\frac{\sin^2 4}{\sin^2 \frac{\pi}{2}}} \right]^2} = \frac{\sin^2(\frac{\pi}{2} + \varphi)}{(1 - \sin \varphi)^2}$

$\sin^2(\frac{\pi}{2} + \varphi) = (1 + \sin \varphi)^2 \Rightarrow K_{px} = \frac{(1 + \sin \varphi)^2}{(1 - \sin \varphi)^2} = \frac{(1 + \sin \varphi)^2}{(1 + \sin \varphi)(1 - \sin \varphi)} = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$

$F_p = \frac{1}{2} K_{px} \cdot \gamma \cdot H^2$

* Cas où $\delta = \varphi$:

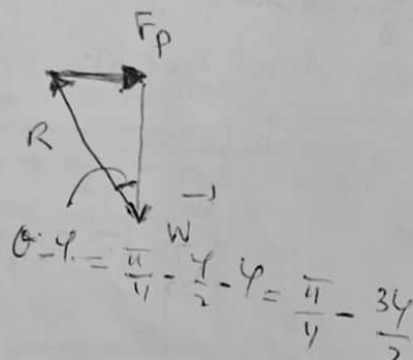
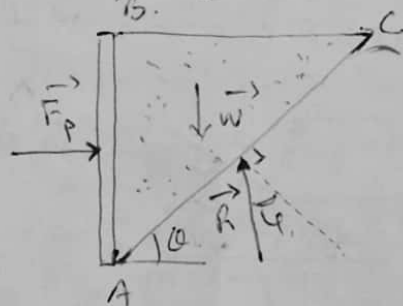
$F_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 \cdot \frac{\cos \varphi}{(1 + \sqrt{1 - \sin^2 \varphi})^2}$

$F_p = \frac{1}{2} \gamma H^2 \cdot \cos \varphi$

• subcohérent

• la force de pousée maximale si $\theta = \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}$

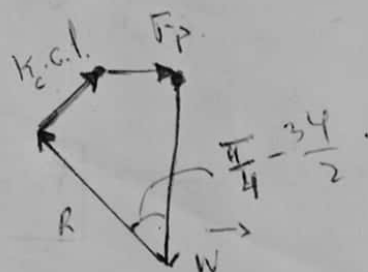
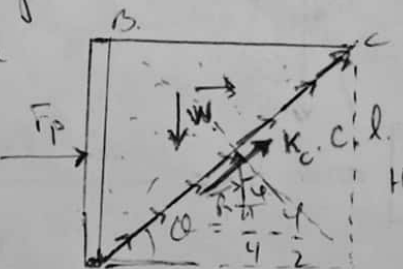
• subcohérent:



- Pour avoir l'éq. libre du mur, il vient s'ajouter une force supplémentaire distorsion parallèle au plan de rupture due à la cohésion.

$l = AC$: longueur de plan de rupture.

$l = \frac{H}{\sin \alpha} = \frac{H}{\sin(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2})}$



$F_p = \frac{1}{2} \cdot K_{px} \cdot \gamma H^2 + K_{cp} \cdot C \cdot l$

$F_p = \frac{1}{2} \cdot K_{px} \cdot \gamma H^2 + K_{cp} \cdot C \cdot \frac{H}{\sin(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2})}$ avec $K_{cp} = \frac{2 \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}$

$F_a = \frac{1}{2} K_{ax} \cdot \gamma H^2 - K_{ca} \cdot C \cdot \frac{H}{\sin(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2})}$

avec $K_{ca} = \frac{2 \cos \varphi}{1 + \sin \varphi}$

$F_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 \cdot \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} - 2CH \tan(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2})$

2) Méthode de Poncelet:

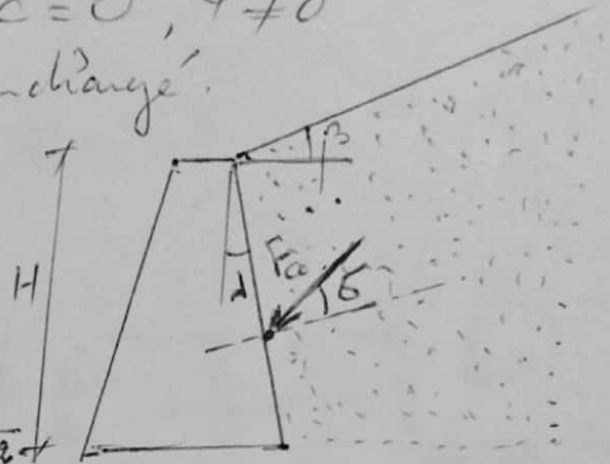
$\beta \neq 0, \delta \neq 0, \lambda \neq 0, \gamma = 0, c = 0, \varphi \neq 0$
 x elle s'applique sur 1 sol pulvérisant non surchargé.

$$F_a = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot \left(\frac{H}{\cos \lambda} \right)^2 \cdot K_{\text{Poncelet}}$$

avec

$$K_{\text{Poncelet}} = \frac{\cos^2(\varphi - \lambda)}{\cos(\lambda + \delta)} \cdot \frac{1}{\left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \cdot \sin(\varphi - \beta)}{\cos(\lambda + \delta) \cos(\beta - \lambda)}} \right]^2}$$

Remarque: le point d'application est à $\frac{H}{3}$ de la base.



① Définition :

C'est un ouvrage qui sert à retenir soit des terres en remblai soit les terrains en place (terres en déblai)

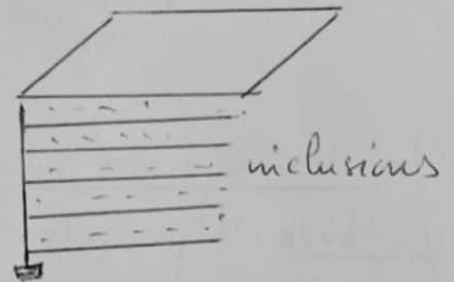
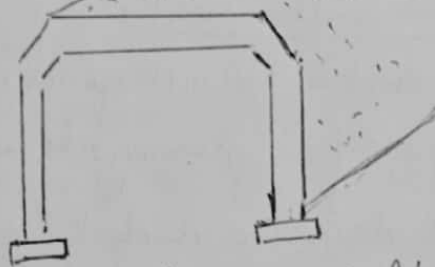
② Différents types d'Ouvrage de soutènement : 3 modes peuvent être distingués

a - la poussée est reprise par le poids de l'ouvrage : exemples

1 - le mur poids en maçonnerie ou en béton :

2 - le mur en terre armée : le sol est renforcé par des inclusions souples résistant à la traction.

3 - Ouvrage cellulaire : des murs caissons en éléments prefabriqués.

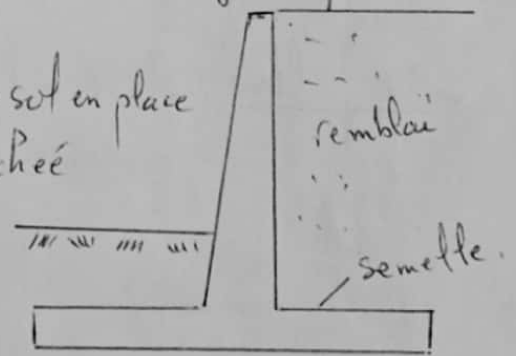


b - la poussée est reprise par encastrement de l'ouvrage : exemples

1 - le mur cantilever en béton armé : doté d'une base élargie (fondation) encastrée dans le sol.

2 - le mur en paroi moulée : mur construit au sein du sol en place avant toute excavation par bétonnage d'une tranchée remplie de boue pour en assurer la stabilité.

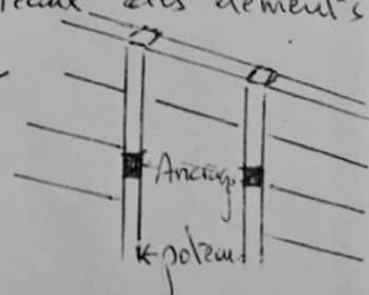
3 - rideau de palplanches : rideaux métalliques flexibles emboîtés les uns aux autres.

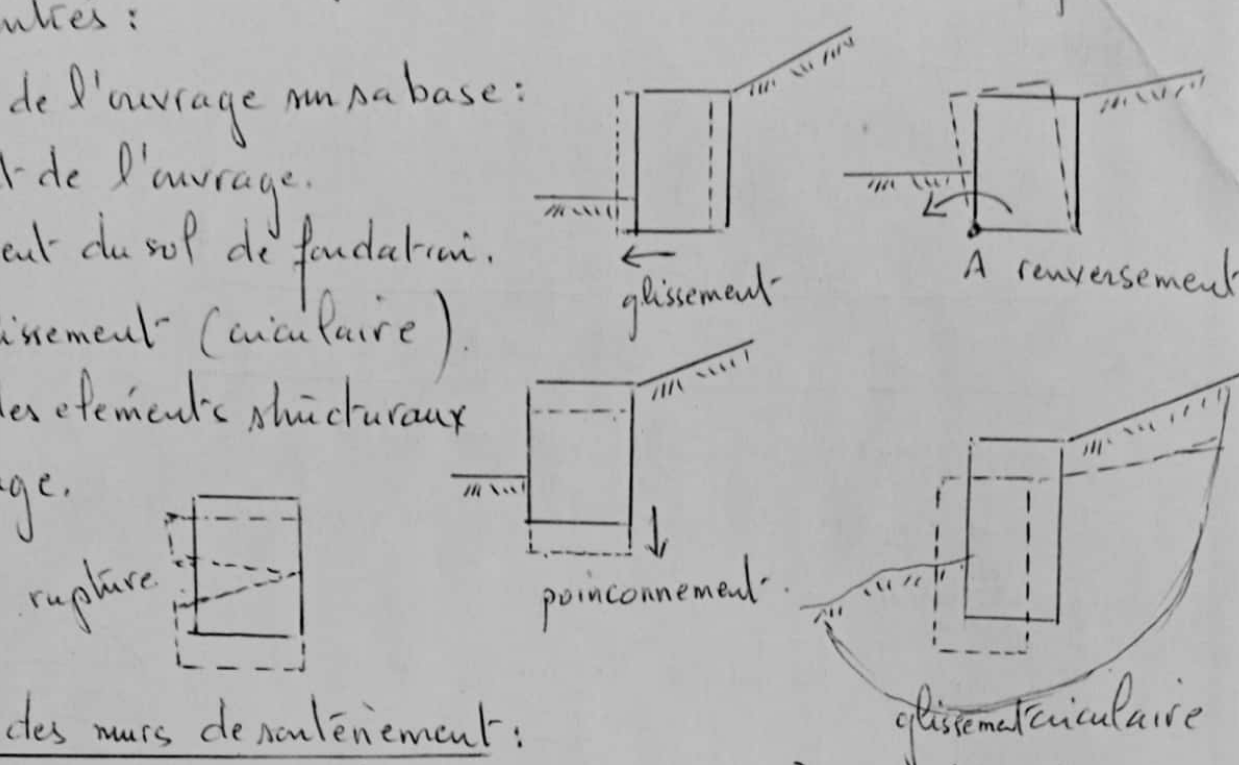
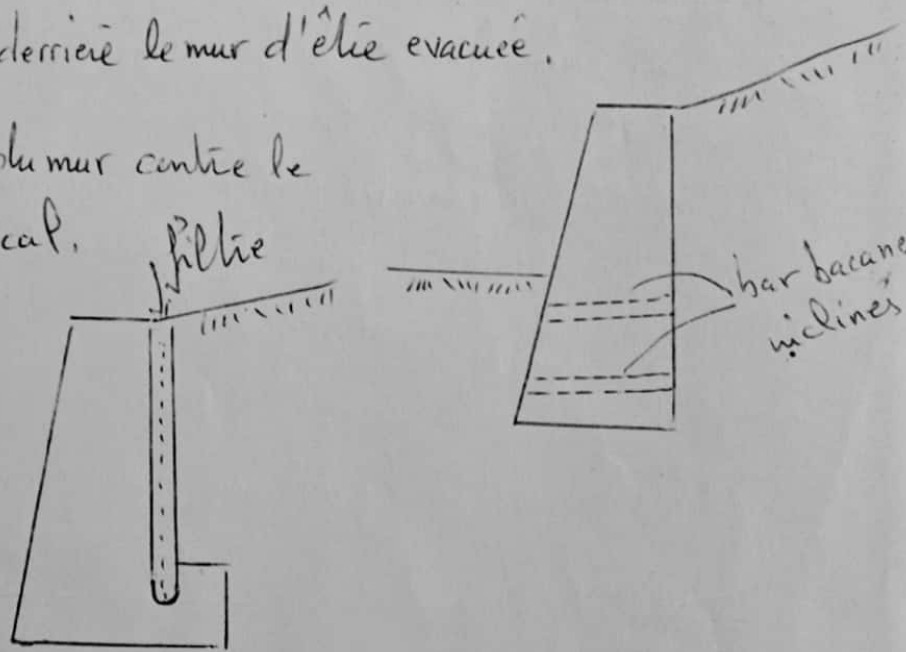


c - la poussée est reprise en totalité ou en partie par des ancrages : exemples

1 - paroi berlinoise : réalisée à partir de poteaux placés préalablement dans le sol. Au fur et à mesure de l'excavation, en place entre les poteaux des éléments de soutènement soit prefabriqués (poutres + plaques) soit coulés en place.

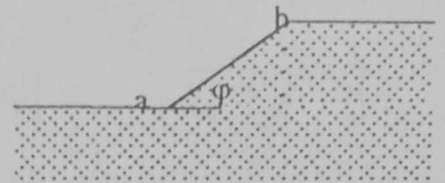
2 - les murs épinglés : murs d'éléments verticaux en béton armé mais l'ancrage est en précontrainte.



- 3) Modes de rupture des Ouvrages de soutènement: 5 modes de rupture ② peuvent être rencontrés :
- 1 - le glissement de l'ouvrage sur sa base :
 - 2 - le renversement de l'ouvrage.
 - 3 - le poinçonnement du sol de fondation.
 - 4 - le grand glissement (circulaire).
 - 5 - la rupture des éléments structuraux de l'Ouvrage.
- 
- 4) Le drainage des murs de soutènement :
- Hypothèse : Il faut avoir présent à l'esprit qu'un remblai horizontal totalement saturé d'eau pousse environ 2,5 fois plus que le même remblai à l'état sec.
- Parmi les dispositifs de drainage, on distingue :
 - les barbacanes : des tubes légèrement inclinés vers l'aval et traversant le mur ce qui permet à l'eau située derrière le mur d'être évacuée.
 - le filtre : placé à l'arrière du mur contre le parement vertical.
- 

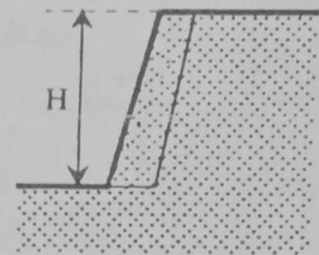
Murs de soutènement

Lorsqu'il existe une différence de niveau entre les points a et b ; l'angle que fait la droite avec l'horizontale s'appelle angle de talus naturel (φ).



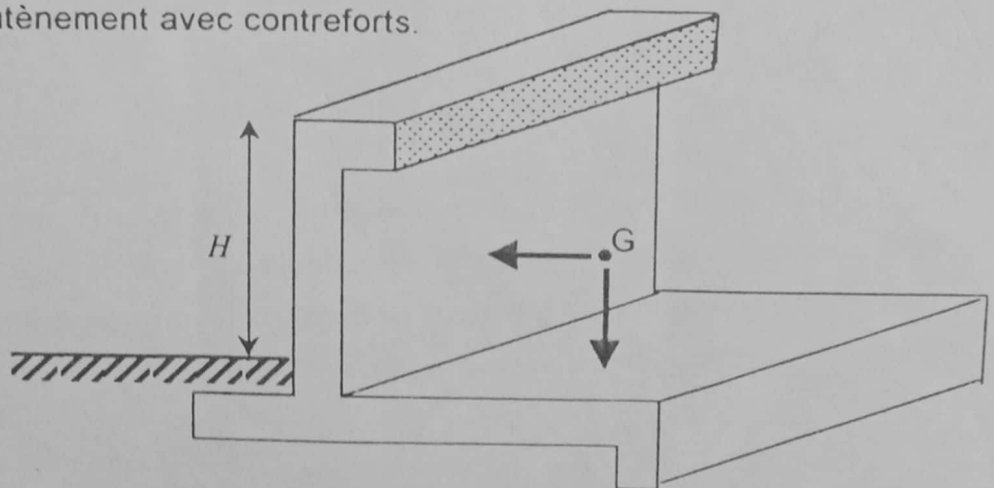
A partir d'une certaine valeur de φ ; le talus n'est plus stable.

Si on change les caractéristiques du talus pour la construction d'un ouvrage ($\varphi=90^\circ$)

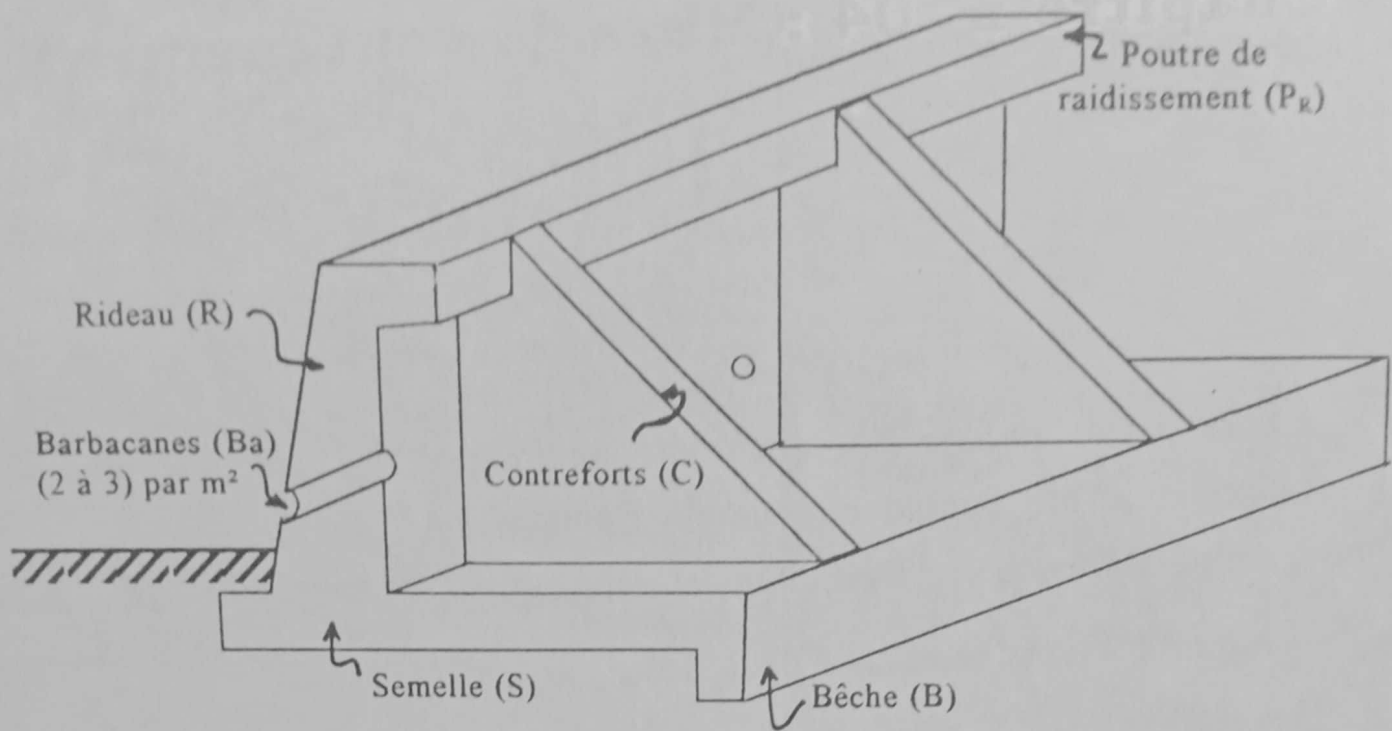


$\Rightarrow$ on est obligé de construire un ouvrage de soutènement du terrain qui s'appelle « mur de soutènement » et on peut avoir () en fonction de la hauteur H :

- a. mur de soutènement sans contreforts.
- b. Mur de soutènement avec contreforts.



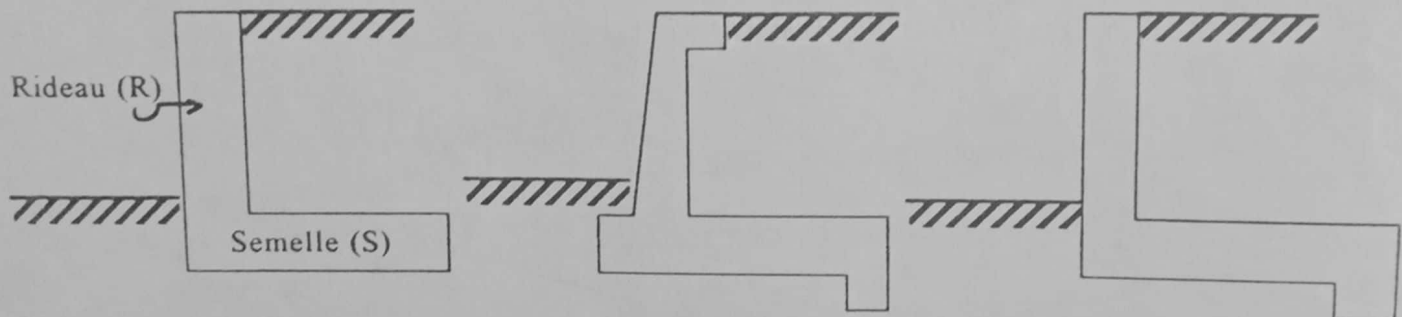
a. Mur de soutènement sans contrefort



b. Mur de soutènement avec contrefort

1. Mur de soutènement sans contreforts.

Sans-Contreforts : [quand la hauteur $H \leq 4m$].



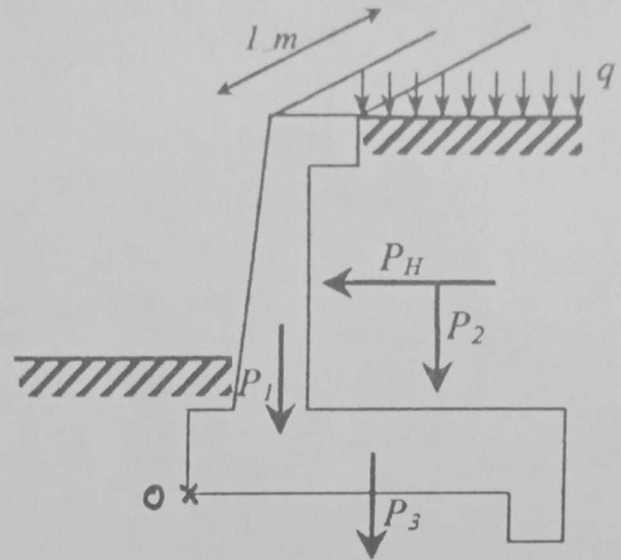
Un mur de soutènements contient : un Rideau R qui peut être terminer ~~(terminé)~~ ou pas dans sa partie supérieure par une poutre de raidissement (PR) ; une semelle (S) qui peut déborder ou pas du rideau ; cette semelle peut être terminer par une bêche (B).

b. Les forces agissantes sur ce mur de soutènement :

On a deux types de forces :

b.1. Forces verticales :

- La surcharge q ;
- Le poids propre du rideau (R) ; P_1
- Les poids des terres (P_2) ;
- Le poids propre de la semelle (P_3)



b.2. Forces horizontales :

- Poussées des terres (P_H) ;
- Poussées dues à la surcharge ;

Pour des raisons de sécurité ; on néglige la butée ;

c. Stabilité du mur : on vérifie la stabilité Δ :

- Au renversement ;
- Au glissement ;
- A l'enfoncement.

c.1. Stabilité au renversement :

Soit :

M_r : Moment des forces horizontales par rapport au point O

(Moment de renversement)

M_s : (Moment stabilisateur) moment ^{des} forces verticales par rapport au point O.

Pour qu'il y est stabilité vis à vis du renversement ; il faudrait que :

$$\frac{M_s}{M_r} \geq 2$$

c.2. Stabilité au glissement :

La force horizontale a tendance à faire glisser le mur ; et pour que ce dernier soit stable $\Rightarrow$ il faut que :

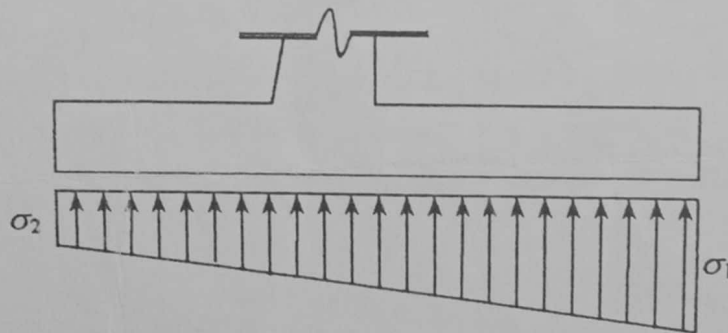
$$\frac{\sum \text{Force horizontale}}{\sum \text{Force verticales}} \leq f \text{ avec } f : \text{coefficient de frottement béton sur terre.}$$

On peut avoir les grandeurs suivantes pour f :

- Sur l'argile humide : $f = 0.3$;
- Sur l'argile sèche : $f = 0.5$;
- Sur du sable : $f = 0.4$;
- Sur du gravier : $f = 0.6$.

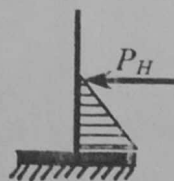
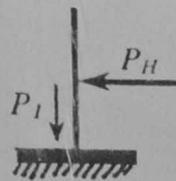
c.3. Stabilité à l'enfoncement : [Vérification des contraintes sur le sol].

Il faudrait que les contraintes sur le sol soient inférieures à la contrainte admissible du sol.



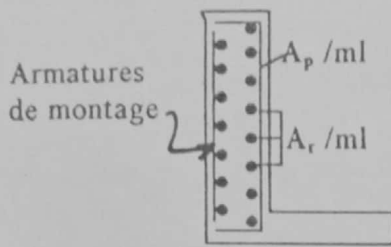
d. Modèle de calcul :

Le rideau est considéré comme étant encasté sur la semelle.



Puisque la poussée des terres n'est pas concentré $\Rightarrow$ le diagramme des moments fléchissants n'est pas linéaire.

Et le ferrailage sera :



- Diagramme des moments fléchissants.

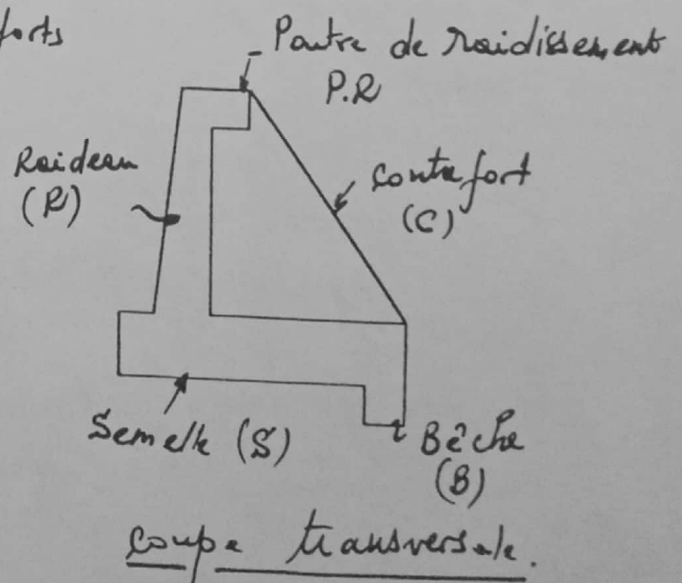
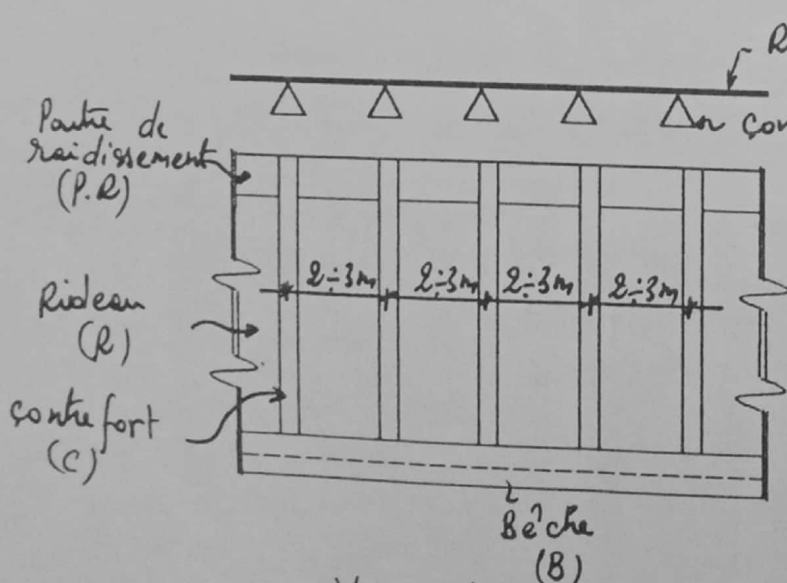
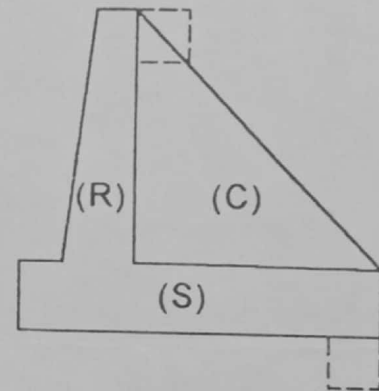
Semelle :

La semelle sera calculée avec un diagramme des contraintes trapézoïdales et sera considérée comme dissymétrique et continue.

2. mur de soutènement avec contreforts :

Ce mur de soutènement est constitué :

- D'un rideau R ;
- D'une poutre de raidissement ou pas ;
- D'un contrefort espacé tous les 2.00 à 3.00 m ;
- D'une semelle ;
- D'une bêche ou pas.



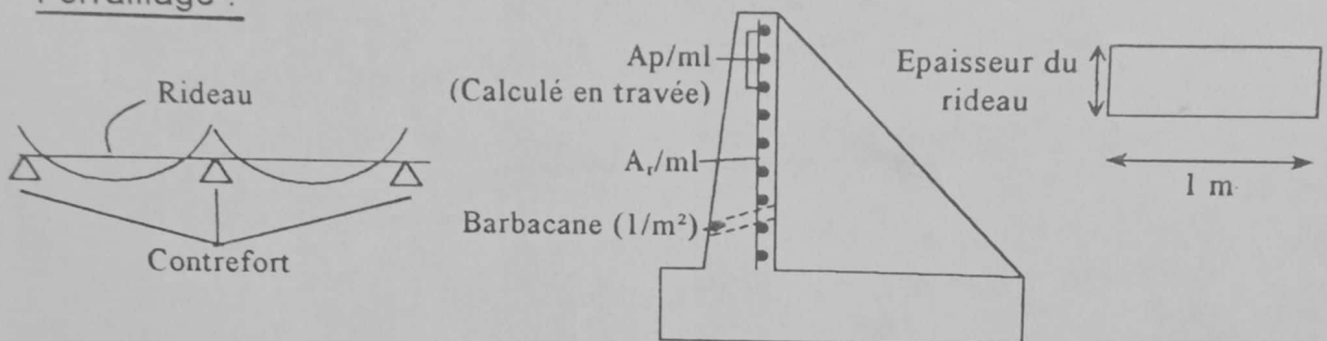
Stabilité :

Forces agissantes :

- Poids propre du rideau ;
- Poids propre de la semelle ;
- Poids des terres ;
- Poids du contrefort tous les 2 à 3.00 m
- Surcharge.

Le rideau sera considéré comme appuyé sur le contrefort.

Ferraillage :



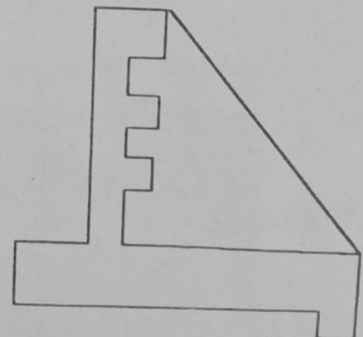
On fera la vérification à :

- la stabilité au renversement ;
- la stabilité au glissement
- la stabilité à l'enfoncement.

Remarque :

Si la hauteur des murs de soutènement est grande
⇒ il faut assurer des barbacanes pour l'évacuation de l'eau.

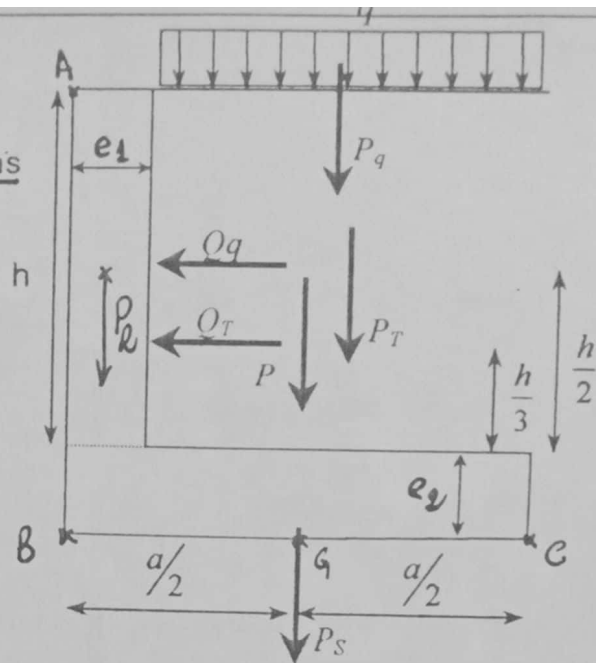
- Si la hauteur du mur de soutènement est très très grande ⇒ on ajoutera sur la hauteur du mur des poutres de renforcement espacées de 3 à 4m.
- On adoptera des dimensions et lors de la vérification de la stabilité
⇒ on peut changer ces dimensions.



3. Calcul du ferrailage :

3.1. Mur de soutènement sans contrefort :

- PR : Poids du rideau ;
- Ps : Poids de la semelle
- Poids des terres ; P_T
- Pq : Surcharge.



La résultante : P

Q_T : la poussée des terres = $K_p \cdot \gamma \frac{h^2}{2}$ et appliqué à $\left(\frac{1}{3}h\right)$ de la base du rideau.

$$K_p = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right) ; \varphi : \text{angle de frottement.}$$

Q_q : Poussée due à la surcharge appliqué à $\left(\frac{h}{2}\right)$ de la base du rideau

$$Q_q = K_q \cdot q \quad \text{avec } k_q = k_p.$$

pour le calcul, on utilise une bande de 1m de largeur ;

$$P_R = e_1 \cdot h \cdot 1.00 \cdot 2500$$

$$P_S = e_2 \cdot a \cdot 1.00 \cdot 2500$$

$$P_T = \gamma \cdot 1.00 \cdot (a - e_1) \cdot h$$

$$P_q = q(a - e_1) \cdot 1.00$$

Vérification de la stabilité :

a. Stabilité au renversement :

Moment stabilisateur : $M_{FT/B} = Ms$

$$Ms = P_R \cdot \frac{e_1}{2} + P_S \cdot \frac{a}{2} + P_T \cdot \left[\frac{a - e_1}{2} + e_1\right] + P_q \left(\frac{a + e_1}{2}\right)$$

Moment de renversement : $M_{FH/B} = Mr$

$$M_R = Q_q \left(\frac{h}{2} + e_2 \right) + Q_T \left(\frac{h}{3} + e_2 \right)$$

On doit vérifier que : $\frac{Ms}{Mr} > 2$

b. Stabilité au glissement :

Il faut que $\frac{\sum F_{\text{horizontales}}}{\sum F_{\text{verticales}}} = \frac{Q_q + Q_T}{P_2 + P_s + P_T + P_q} < f$

f : coefficient de frottement béton-terre.

c. Vérification des contraintes :

$\sigma'_B = \frac{P}{S} + \frac{M_G}{I} V$; $S = 100 \cdot a \rightarrow$ surface de la base de la semelle.

$$I = \frac{100 \cdot a^3}{12} ; V = \frac{a}{2}$$

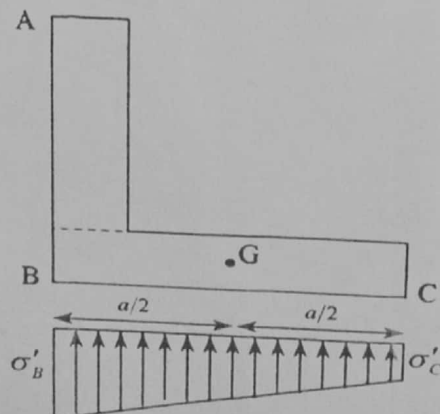
$$\sigma'_B = \frac{P}{100 \cdot a} + \frac{6 \cdot M_G}{100 \cdot a^2}$$

$$\sigma'_c = \frac{P}{100 \cdot a} - \frac{6 \cdot M_G}{100 \cdot a^2} \text{ et on doit avoir :}$$

$$\sigma'_B \leq \bar{\sigma}_{sol}$$

$$\sigma'_c \geq 0$$

M_G : Le moment de toutes les forces par rapport au centre de gravité de la semelle (G)



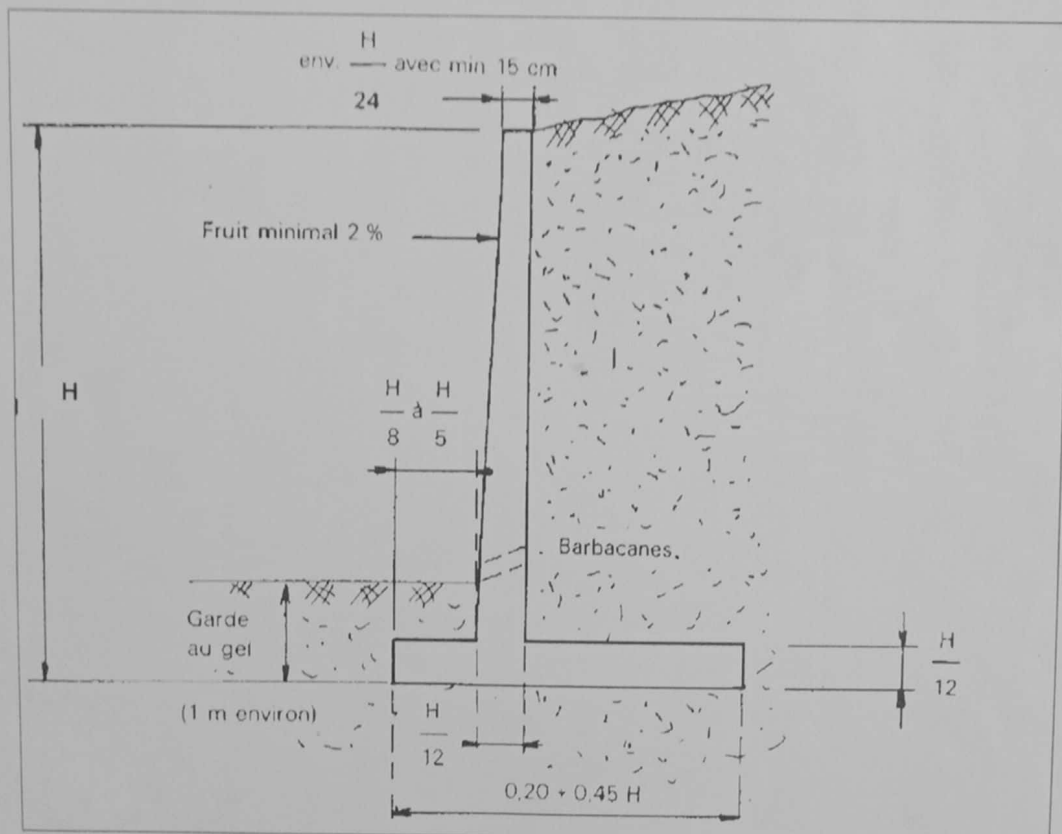
5 . PRÉDIMENSIONNEMENT

Le calcul complet d'un mur de soutènement est une étude assez laborieuse, le dimensionnement de l'ouvrage et ses vérifications demandant une succession de calculs longs et itératifs.

Aussi pour arriver de la façon la plus rapide aux bons résultats, il est important de pré-dimensionner de la manière la plus juste possible les caractéristiques géométriques du mur.

Pour l'étude et la réalisation des murs-cantilevers courants en béton armé, des règles simples de l'art en vigueur ont été éditées dans divers guides pour leur conception qui demandent à être adaptés aux nouvelles règles Eurocodes. Notons que le CEREMA-DTecITM (ex. SETRA) a élaboré dernièrement un logiciel traitant du calcul des murs de soutènement qui permet de vérifier leur stabilité externe, justifier les sections de béton, réaliser le calcul du ferrailage dans des sections (uniquement pour les murs en T) et d'optimiser les dimensions du mur (patin, talon, semelle pour les murs en T - fruit avant, base pour les murs poids) [15]¹⁵

Fig. 5.46



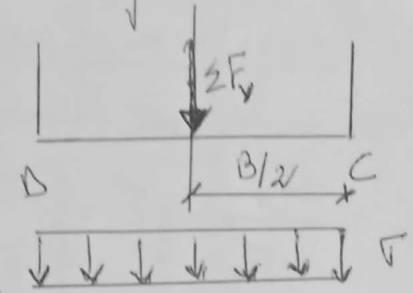
(Il est prudent de majorer de 15 % la largeur de semelle ainsi déterminée, car elle ne permet pas toujours de satisfaire les vérifications de la stabilité externe).

Il est aussi encore possible dans une première approche d'utiliser les anciennes abaques du CEREMA SETRA (dossier MUR 73 [5.1]). Des extraits du document applicables aux cas les plus courants sont donnés dans une annexe de l'ouvrage.

* 3 cas peuvent être envisagés :

① Cas où $e = 0 \rightarrow d = \frac{B}{2}$ de la base $\rightarrow$ la résultante des forces verticales ΣF_v tombe dans l'axe du mur.

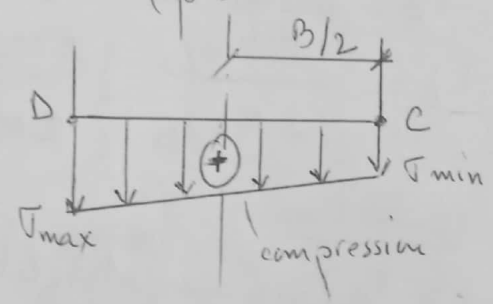
$$\sigma = \frac{\Sigma F_v}{B} \text{ en } \text{kn/m}^2 \text{ (kPa) ou } \text{daN/cm}^2$$



condition :

- * si $\sigma \leq \bar{\sigma}_{\text{sol}} \rightarrow$ sécurité au poinçonnement est assurée (pas d'enfoncement du mur dans le sol)
- * si $\sigma > \bar{\sigma}_{\text{sol}} \rightarrow$ sécurité au poinçonnement non assurée (le sol ne peut pas supporter le mur)
avec $\bar{\sigma}_{\text{sol}}$: contrainte admissible du sol

② Cas où $e \neq 0$ avec $e \leq B/6 \rightarrow$ la résultante des forces verticales ΣF_v passe dans le tiers central de la base du mur (pas de contraintes de traction dans le béton de la semelle)
le béton est entièrement comprimé.



$$\begin{cases} \sigma_{\text{max}} = \frac{\Sigma F_v}{B} \cdot \left(1 + \frac{6 \cdot e}{B}\right) \\ \sigma_{\text{min}} = \frac{\Sigma F_v}{B} \cdot \left(1 - \frac{6 \cdot e}{B}\right) \end{cases}$$

Condition :

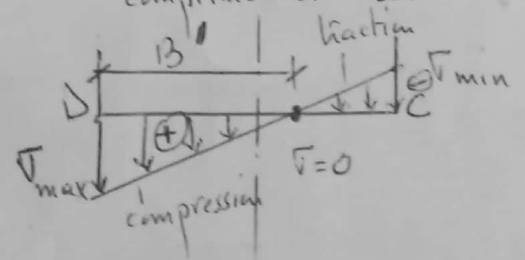
- * si $\sigma_{\text{max}} \leq \bar{\sigma}_{\text{sol}} \rightarrow$ sécurité au poinçonnement assurée.
- * si $\sigma_{\text{max}} > \bar{\sigma}_{\text{sol}} \rightarrow$ " " " non assurée.

③ Cas où $e \neq 0$ avec $\frac{B}{6} < e \leq \frac{B}{2} \rightarrow$ la résultante des forces verticales ΣF_v ne tombe pas dans le tiers central de la base du mur (contraintes de traction dans le béton de la semelle) $\rightarrow$ une partie de béton comprimée et l'autre tractionnée.

• Méthode de Meyerhof :

B' : largeur réduite de la semelle du mur
(largeur fictive)

$$B' = B - 2 \cdot e$$
$$\sigma_{\text{max}} = \frac{2 \cdot \Sigma F_v}{B'}$$



- condition $\rightarrow \sigma_{\text{max}} \leq \bar{\sigma}_{\text{sol}}$: sécurité au poinçonnement assurée.
- $\rightarrow \sigma_{\text{max}} > \bar{\sigma}_{\text{sol}}$: " " " non assurée.