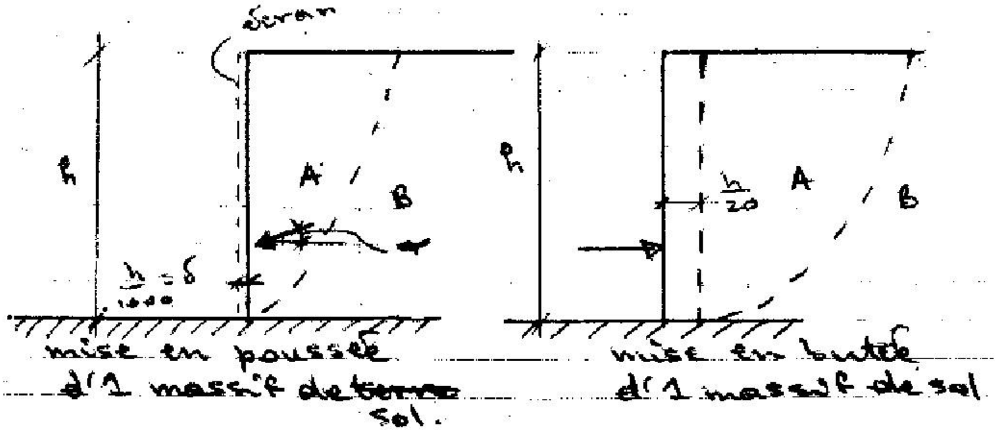
CHAPITRE II

POUSSEE DES TERRES

CHAPITRE 2 – POUSSEE DES TERRES.

I – POUSSEE DES TERRES :

Un massif de sol limité par un écran peut soit le soutenir soit le refouler.



1 - Poussée :

L'écran s'oppose au mouvement du massif de sol. Dans ce cas, le massif de sol exerce sur chaque élément de l'écran une action appelée « pression active » ou « poussée ».

Les études expérimentales ont démontrer qu'elle prend une valeur maximale quand l'écran se déplace de h/1000 .

Elle dépend de la densité du sol, de l'angle de frottement interne, de la cohésion, du coefficient de frottement du massif sur l'écran, de la rigidité de l'écran et du mode de son déplacement possible, de la forme de la surface libre du massif, et de l'inclinaison de l'écran sur la verticale.

Lorsque cette poussée maximum s'établit, une zone A du massif s'est légèrement déplacé et se trouve séparé de la zone B par une faible bande appelée ***ligne de cisaillement***, le long de laquelle la rupture s'est produite par cisaillement.

2 – Butée :

L'écran exerce un effort sur le massif. Dans ce cas, le massif oppose sur chaque élément de la surface de l'écran une pression passive ou butée. Celle-ci prend une valeur maximum après un déplacement de l'écran relativement important de l'ordre de h/20 , donc bien supérieur à celui qui a conduit à la poussée maximum. Alors cette poussée max. dépend des mêmes paramètres que la poussée.

La ligne de rupture par cisaillement délimite une zone de massif en mouvement beaucoup plus importante que la poussée.

3 – Equilibre intermédiaire :

La poussée et la butée correspondent à deux états extrêmes de rupture du massif. Il est évident qu'il peut donc exister tous les équilibres intermédiaires en fonction des déplacements possibles de l'écran et des forces extérieures qui lui sont appliquées. Les pressions actives et passives dépendent donc alors des caractéristiques élasto-plastiques des massifs.

Calcul des poussées :

Les théories utilisées pour déterminer la valeur des poussée et butée sont nombreuses et dépendent de plusieurs hypothèses :

- le sol est considéré en état d'équilibre limite et plastique,
- il se produit au sein du massif un coin de glissement dont on étudie l'équilibre,
- le sol est considéré comme un milieu élastique.

Théorie basée sur les lois de l'équilibre limite ou plastique : la théorie de Rankine.

Les théories mathématiques de l'équilibre limite linéaire étudié par Rankine et le tracé du cercle de Mohr montre que les contraintes varient linéairement avec la profondeur h des points en lesquelles elles étaient calculées. C'est le principe de similitude qui implique la linéarité de la loi des pressions.

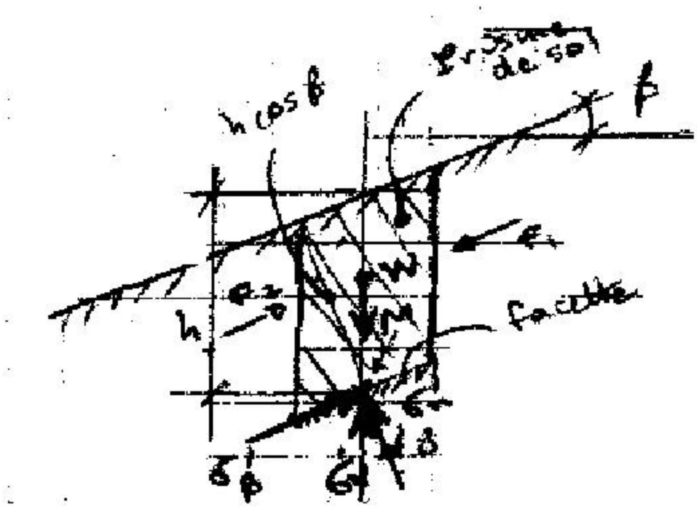


Figure 2 – Méthode de Rankine .

La méthode de Rankine consiste à calculer la contrainte sur une facette inclinée du même angle β que la surface du terrain et à une profondeur h . Elle est basée sur deux hypothèses :

- le massif de sol est globalement en plasticité,
- la présence de discontinuité au sein du milieu ne modifie pas la répartition des contraintes verticales dans le sol (Mur, palplanche, etc …).

Cette dernière hypothèses revient à ne pas tenir compte de la valeur du coefficient de frottement mur-sol (δ=0 angle).

$$W = 1.dB.\cos\beta.h.\gamma$$

$$\boxed{\sigma_v{}' = \frac{W}{dB} = \gamma..h.\cos\beta}$$

Où :

$\sigma'v$ contrainte verticale sur la facette dB,

W poids du prisme de sol.

Mais pour calculer l'action sur un écran, on a besoin de la contrainte σ'_β qui induit une poussée sur l'écran. Le tracé dur cercle de Mohr par Rankine a aboutit à l'expression suivante :

$$\boxed{\frac{\sigma'_\beta}{\sigma'_v} = \frac{\cos\beta - \sqrt{\sin^2\varphi - \sin^2\beta}}{\cos\beta + \sqrt{\sin^2\varphi - \sin^2\beta}}}$$

qui pour un talus horizontal (β=0) devient : $\boxed{\frac{\sigma'_H}{\sigma'_v} = \frac{1-\sin\varphi}{1+\sin\varphi} = tg^2(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2})}$

On poseras par définition :

$Ka = tg^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)$ appelé coefficient de poussée active,

$Kp = tg^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right)$ appelé coefficient de poussée passive ou de butée

$$\boxed{\sigma'_H = Ka.\sigma'_v}$$

C'est le cas d'un sol homogène sans cohésion.

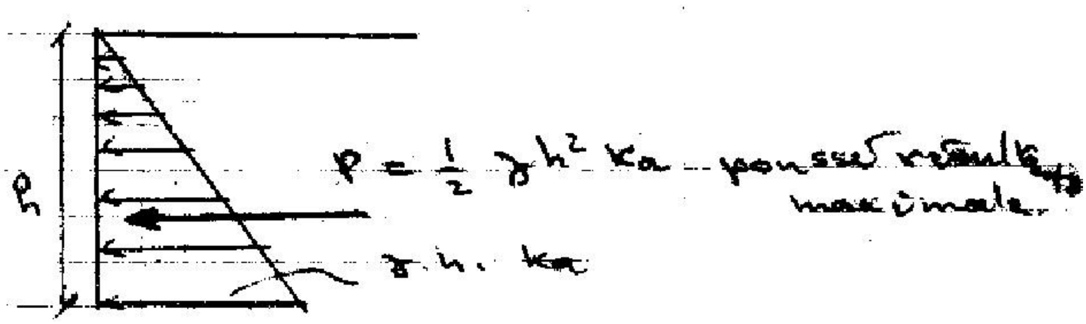


Figure 3 - Poussée résultante maximale.

Pour un mur incliné :

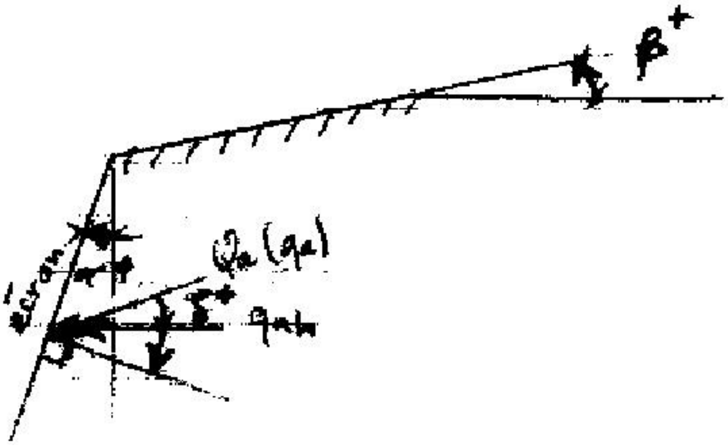
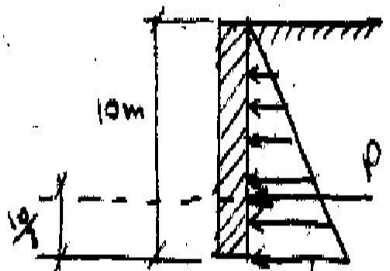


Figure 4 - Mur incliné et talus incliné.

$$Ka_h = \frac{\cos^2(\alpha+\varphi)}{\cos^2\alpha + \left[1+\sqrt{\dfrac{\sin(\varphi+\delta).\sin(\varphi-\beta)}{\cos(\alpha-\delta).\cos(\alpha+\beta)}}\right]^2}$$

$$Kp_h = \frac{\cos^2(\alpha+\varphi)}{\cos^2\alpha - \left[1+\sqrt{\dfrac{\sin(\varphi+\delta).\sin(\varphi-\beta)}{\cos(\alpha-\delta).\cos(\alpha+\beta)}}\right]^2}$$

<u>Application</u>: Calculer la poussée P qui s'exerce sur le mur et son pt d'application



$\gamma = 1{,}6\ T/m^3$

$\varphi = 30°$

$c = 0\ t/m^2$

$1{,}6 \times 10 \times 0{,}33 = 5{,}33\ T/m^2$

$Ka = tg^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{30}{2}\right) = 0{,}33$

$P = 5{,}33 \times \frac{10}{2} = 26{,}7\ T/ml$

pt d'applic. $z = \frac{10}{3} = 3{,}33m$

Cas des sols cohérents :

- **Théorème des états correspondants de CAQUOT :**

Un massif d’angle de frottement interne φ et de cohésion C est assimilable à un massif de même angle de frottement interne soumis à une compression triaxiale uniforme.

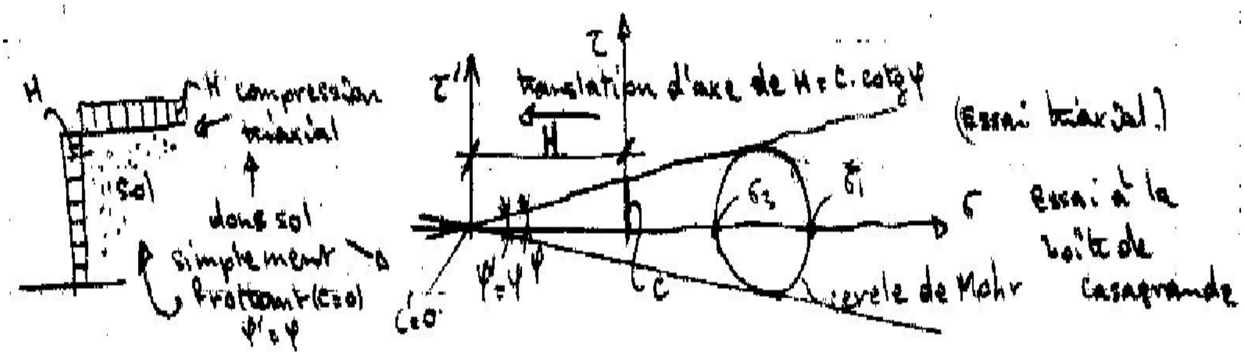


Figure – Méthode de Caquot.

Remarque : CAQUOT suppose que la résultante des poussées P est incliné d’un angle δ par rapport à la normale à l’écran. Donc la théorie de Rankine n’est qu’un cas pessimiste, bon pour la sécurité de l’ouvrage. En effet, la théorie de Caquot est basé sur l’analyse des contraintes en chaque point du massif pulvérulent. Elle a l’avantage de tenir compte de l’angle δ que fait la poussée P avec la normale à l’écran. Cette théorie suppose des équilibres limites de rupture. Elle suppose en outre que les pressions sur l’écran sont proportionnelles à la distance z de l’arête et de la forme.

{ pression active p = Ka . γ . z (poussée)
{ —— passive b = Kp . γ . z (butée)

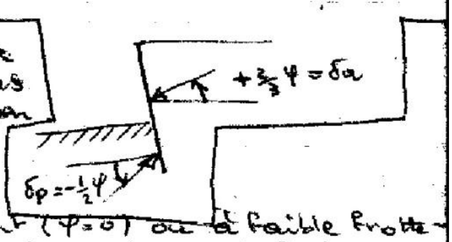
les lignes de rupture ne st plus des droites, et leurs formes dépendent de l'angle δ.

Ka, Kp st les coefs. de poussée et de butée de CAQUOT applicables aux efforts de m noms et inclinés suivant δ (tables de CAQUOT et KERISEL)

Ka, Kp st les valeurs des coefs. composante horizontales de poussée et de butée (Ils st donnés par des tableaux). ~~Kcos~~ Il n'existe pas actuellement de règles pratiques bien définis pour le choix de la valeur de δ :

- pour la poussée, les coefs varient assez peu avec δ. Il est habituelle de prendre δa = 0 ce qui donne la valeur supérieure (sol-palplanche) δa = + 2/3 φ (sol-béton)
- par contre pour la butée, il est courant d'admettre δp = −1/2 φ ou δp = −3/4 φ ce qui correspond à la mobilisation partielle du frottement massif - palplanche.

- Théorie de Rankine pour les sols cohérents
  la cohésion n'est à considérer qu'après avoir vérifier qu'elle n'est pas modifié par la construction de l'ouvrage et qu'elle présente 1 caractère permanent.
  l'équilibre pseudo-élastique de Rankine ds les cas de terrains purement cohérent (φ=0) ou à faible frottement interne (φ < 10°) n'est pas 1 équilibre de rupture généralisé. et les résultats obtenus st ds le sens de la sécurité.



• Massif purement cohérent (c, $\varphi = 0$) à surface libre horiz. ($\beta = 0$)

A la profondeur z règne 1 pression σ sur 1 surface facette horiz. Considérons le cercle de Mohr limite correspondant à cette profon.

Il est tangent à la courbe intrinsèque composée des 2 droites // à l'axe des abscisses. On voit immédiatement que ds l'équilibre de poussée on a : $p = \sigma - 2c$ et de butée $b = \sigma + 2c$

Si on a 1 mur de soutèn. en palplanche

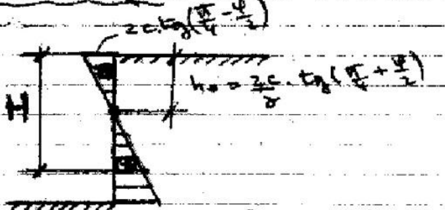
Partant de ces 2 éqs, il est facile de connaître la pression résultante sur 1 écran de soutènement en palplanche. A la prof z_1 par rapport au niveau du Terre-plein, les pressions sur les facettes horizontale de part et d'autre du rideau sont σ_1 et σ_2, les pressions sur l'écran sont : $p = \sigma_1 - 2c$ $\quad b = \sigma_2 + 2c$

d'où la résultante : $b - p = 4c - (\sigma_1 - \sigma_2)$

Ds 1 terrain homogène $\sigma_1 - \sigma_2$ est la pression verticale σ au niveau h. Donc ds le cas d'1 sol frottant et cohérent, les ~~pressions~~ valeurs de la poussée et de la butée (en admettant toujours 1 mur lisse → $\delta = 0$)

$$\begin{cases} p = \gamma \cdot h \cdot tg^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right) - 2c \cdot tg\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right) \\ b = \gamma \cdot h \cdot tg^2\left(\frac{\pi}{4} + \varphi\right) + 2c \cdot tg\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) \end{cases}$$

l'allure des diagrs :

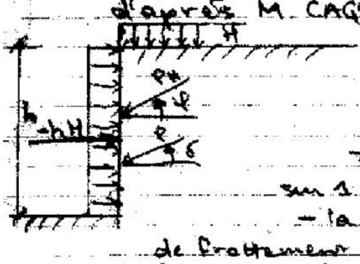


la hauteur de fouille H à donner sans faire de blindage (on a aucune pression sur les parois équilibre) :

$$\boxed{H = 2h_0 = \frac{4c}{\gamma} \cdot tg\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right)}$$

En fait, la valeur de H est théorique car on ne peut admettre pratiquement des tractions par adhérence. Il est donc très prudent d'admettre la cohésion qui présente 1 caractère aléatoire et on conseille ds le cas des sols faiblement cohérents de ne pas prendre en compte cette cohésion et donc se placer ainsi ds la sécurité.

• Application au terrain à frottement interne non-négligeable d'après M. CAQUOT ($\varphi > 10°$)



D'après le Th. des états correspondants de CAQUOT l'influence de la cohésion est assimilable à une compression triaxial uniforme : $H = c \cdot cotg\,\varphi$

Ds l'équilibre limite de CAQUOT, la poussée totale P' sur 1 écran vertical est la somme de 3 termes :

– la poussée P d'1 milieu pulvérulent pesant de mê angle de frottement interne prop. à la prof. et faisant un angle δ avec l'écran et de résultante P.

$$P = \frac{1}{2} K_a \cdot \gamma \cdot h^2$$

– la compression uniforme –H de résultante –hH le milieu de résultante $P_H = h.H.tg(\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}).e^{-(\frac{\pi}{2}-\varphi).tg\varphi}$

Pour simplifier les calculs, on emploie habituellement la formule

$$p' = p - (1-ka).c.cotg\varphi$$

qui en posant $(1-ka).c.cotg\varphi = Ca$ devient $\boxed{p' = p - Ca}$

ce qui revient à assimiler l'effet de la compression H sur la surface libre à celui d'1 couche de terrain de poids H et donc d'intensité $ka.H = ka.c.cotg\varphi$

En résumé d'après CAQUOT, la résultante

$$\boxed{p' = \underbrace{\gamma.h.ka}_{p(c=0),\ \varphi\neq 0} + ka.H' - H}$$

cette la formule précédente

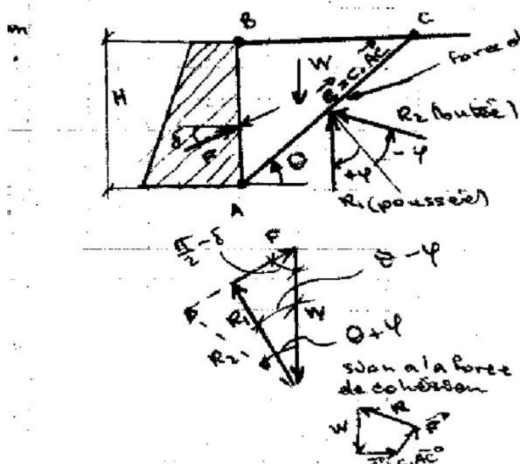
d'où $p' = \gamma.h.ka + H(ka-1) = \gamma.h.ka + (ka-1).c.cotg\varphi$.

De m pour la butée :

$$\boxed{b' = b + (k_p-1).c.cotg\varphi = b + c_p}$$

avec $c_p = (k_p-1).c.cotg\varphi$

- Méthode de COULOMB : Théorie du coin de glissement



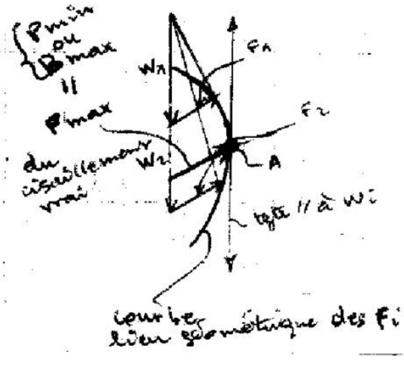
la méthode de Coulomb ~~se base~~ propose sur les 2 hypots suivantes :

- la plasticité est atteinte suivant 1 surface plane (AC), la direction δ de la force de frottement mur-sol est connu. Alors le principe du calcul consiste à écrire l'équilibre statique d'1 coin de sol ABC sous l'action :
- du poids W du coin de sol ABC
- de la force F exercé par le mur sur le sol
- De la réaction R exercé par le sol sur le plan de rupture AC qui présente 1 angle φ avec la normale à ce plan. Elle est située d'1 côté ou de l'autre de cette normale selon qu'il s'agit d'1 état de poussée R_1 ou de butée R_2. la valeur de la force F est fct de l'angle θ que fait la surface de rupture avec l'horizontale et de la réaction R de poussée ou de butée. Ces 2 cas limites se traduisent par :

$$\frac{dF(\theta)}{d\theta} = 0 \quad \text{avec} \quad F = \frac{W \sin(\theta \pm \varphi)}{\cos(\delta - \theta \pm \varphi)}$$

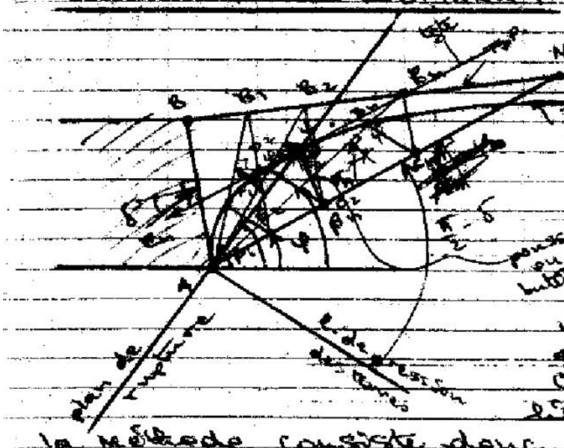
la solution a été donné par Muller-Breslau sous la forme

$$F = \frac{1}{2}.H.K \quad \text{avec} \quad K = \frac{\sin(\pi/2 - \varphi)}{\sqrt{\sin(\pi/2 + \varphi)} + \sqrt{\sin(\varphi+\delta).\sin\varphi}}$$



On détermine graphiquement la force F en faisant varier θ, on obtient une courbe lieu géométrique des points des Fi, et on trouve le maximum de cette courbe par rapport à la direction des Wi. A partir de ce pt, on trace le Fi correspondant qui est la force de poussée ou de butée qu'on cherche.

Construction de CULMANN :



Cette méthode est utilisée pour la détermination des poussées et des butées dans certains cas particuliers qui ne peuvent être résolus par les méthodes habituelles. Par exemple pour 1 terre-plein de forme quelconque ou la surcharge qu'il doit supporter n'est pas uniforme. C'est 1 généralisation de la loi de Coulomb puisque basée sur des lignes de rupture rectilignes.

La méthode consiste donc à déterminer graphiquement quelle est parmi tous les plans possibles de rupture celui qui conduit à la poussée optimale.

Soit AB_1, AB_2, AB_n les plans possibles de rupture correspondant au point A plans inclinés de $\beta_1, \beta_2 ... \beta_n$ sur le plan horizontal. Ces plans délimitent des prismes de terre ~~$ABB_1, ABB_2, ... ABB_n$~~ $ABB_1, ... ABB_n$. Le poids W_n d'1 prisme de terre est équilibré par :

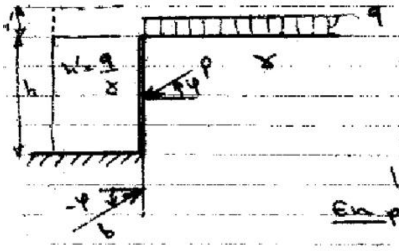
- la réaction du mur E_n incliné sur la normale de AB de δ.
- la réaction F_n du plan AB_n incliné sur la normale à ce plan de l'angle φ

La construction de Culmann est la suivante :

- Par B_n, on porte la parallèle au parement du mur et qui coupe le talus naturel au pt C_n.
- Par C_n, on trace la // à la droite d'angle $(\frac{\pi}{2} - \delta)$ avec AN ou ligne de pression des terres et qui coupe la droite AB_n en D_n.
  la m̂ chose pour les autres B_i, on joint par 1 courbe tous les points D_i avec A aussi.
- On trace la tgte à cette courbe // à AN.

L'influence des surcharges sur 1 terre-plein horizontale

① Surcharge uniforme indéfinie.



En supposant que l'influence d'1 surcharge verticale q ~~uniforme~~ uniforme se transmet sur l'écran à travers le massif considéré et que la pression est inclinée de $\pm\varphi$ sur la normale à l'écran, Mr CAQUOT a donné les expressions suiv. :

En poussée : $p = q \cdot tg(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}) \cdot e^{-(\frac{\pi}{2} - \varphi) \cdot tg\varphi}$

En butée : $b = q \cdot tg(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}) \cdot e^{(\frac{\pi}{2} + \varphi) \cdot tg\varphi}$

N.B. : L'Herminier et Absi ont publié des tables générales (cf : Equilibre limite d'1 coin de 1 milieu non pesant cahier n° 16 – Eyrolles)

Toutefois, pour simplifier les calculs, on peut assimiler sans grosses erreurs l'influence de la surcharge à celle d'1 hauteur de terrain de m̂ poids

$h' = \frac{q}{\gamma} \Rightarrow \sigma_h = h' \gamma \cdot ka = \frac{q}{\gamma} \gamma \cdot ka = q \cdot ka$ (effet de la surcharge)

On aura ainsi à 1 profondeur z d'1 terrain de poids spécifique γ,

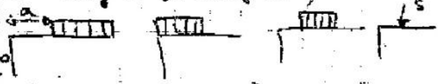
- pour la poussée : $p = \gamma . z . k_a + q . k_a = k_a(\gamma z + q)$

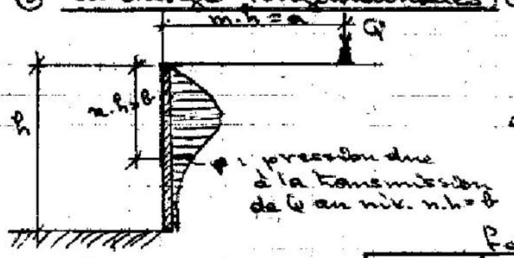
$$\boxed{p = k_a(\gamma . z + q)}$$

- pour la butée : $b = \gamma . z\, k_p + q . k_p = \boxed{k_p(\gamma . z + q) = b}$

② Surcharge uniforme partielle : (cf. GRAU règles pratiques)

③ Surcharge longitudinales : (voies de portiques ou chemin de fer





A défaut de formules correspondant à 1 équilibre de rupt., l'influence d'1 surcharges linéaires peut se calculer d'après les éqs de Boussinesq corrigées par les essais de Gerber et Spangler. Ces formules sont :

si $m > 0,4$ ⇒ $\boxed{p = \dfrac{4Q}{\pi . h} \dfrac{m^2 . n}{(m^2 + n^2)^2}}$

si $m < 0,4$ ⇒ $\boxed{p = \dfrac{Q}{h} \dfrac{0,203 . n}{(0,16 + n^2)^2}}$

le diag. ainsi obtenu sera à ajouter à celui des pressions des terres