

MURS DE SOUTÈNEMENT

1. - GENERALITES

1.1.- But

Les murs de soutènement ont pour but de maintenir le sol en place dans le cas où on effectue des remblais, déblais ou pour des ouvrages tels que : quais, canaux, culées de pont, terrasses... Ils ont aussi pour but de protéger d'autres ouvrages contre l'érosion ou les crues...

1.2. - Différents types de murs

Les différents types de murs ne seront pas calculés dans leur ensemble mais l'étude sera approfondie dans les cas les plus courants. Pour les autres nous nous contenterons de les énumérer ; on distingue :

- les murs poids (dont l'étude sera approfondie). Ces murs, en béton non armé s'opposent au renversement par leur poids.
- les murs poids mixtes : ils possèdent une semelle et sont faiblement armés.
- les murs profilés : en béton armé. L'écran maintient les terres mais c'est le poids du sol sur la semelle qui donne la stabilité du mur (l'étude sera faite ultérieurement).
- les murs à contrefort (intérieur ou extérieur). Ils sont identiques aux précédents mais possèdent des contreforts permettant de diminuer le cisaillement à la jonction semelle-écran.
- les murs cellulaires : construits avec des billes de bois dans les parois naturelles. Ils existent aussi des murs en éléments préfabriqués type".
- les murs en terre-armée : méthode récente qui consiste à alterner dans le sol une couche d'armatures et une couche de remblai. Le parement extérieur est constitué d'une "peau" métallique ou en béton.

2. - COIN DE GLISSEMENT - POUSSEE

2.1.- Généralités

Le calcul des murs de soutènement découle de l'étude de la rupture du terrain situé derrière le mur. Considérons un massif en équilibre élastique soutenu par un écran. Il exerce sur l'écran une action appelée pression naturelle des terres ou pression au repos. Si on écarte d'une manière quelconque l'écran, on constate que le terrain se décomprime et son action décroît. On lui donne le nom de poussée. Si l'on augmente le déplacement, on atteint des contraintes critiques qui mettent le sol en rupture. Si on effectue le procédé inverse, en repoussant l'écran contre le massif, la réaction de l'écran s'appelle butée. Celle-ci augmente jusqu'à un état d'équilibre limite. Ces efforts de butée seront négligés dans le cas des murs de soutènement mais interviendront dans le cas des palplanches.

2.2. - Coin de glissement

L'expérience montre que les murs peuvent se déplacer soit par translation soit par rotation autour d'un axe situé sous le mur. On constate alors qu'à la rupture, une fissure sensiblement rectiligne apparaît dans le massif à partir du pied. La fraction de sol comprise entre le mur et la fissure porte le nom de coin de glissement ou coin de Coulomb (en 1776, il fut le premier à

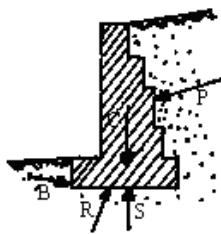
proposé une méthode de calcul basée sur l'équilibre du coin de glissement). Cette méthode est universellement employée.

3. - POUSSEE SUR LES MURS-POIDS

3.1. - Généralités - Schéma de Boussinesq

Dans ces ouvrages, c'est le pied du mur qui permet de résister aux efforts de renversement exercés par le terrain. Cinq groupes de forces sollicitent ce type d'ouvrage :

- la poussée des terres \underline{P} ,
- la butée \underline{B} ;
- la réaction \underline{R} du terrain et éventuellement les sous-pressions \underline{S} dues à l'eau ;
- le poids \underline{G} du mur.



Pour des raisons de sécurité, on fait souvent abstraction de la butée \underline{B} . On détermine donc la poussée \underline{P} et on vérifie ensuite que le terrain, en développant une réaction \underline{R} ne modifie pas la stabilité d'ensemble de l'ouvrage. La rupture d'un remblai derrière un mur de soutènement est toujours accompagnée d'une rotation ou d'une translation du mur.

Si le parement intérieur du mur est rectiligne et la surface du terre-plein aussi, s'il n'y a pas de surcharges et si le remblai est homogène et pulvérulent, Boussinesq a donné l'intensité de la poussée à la rupture :

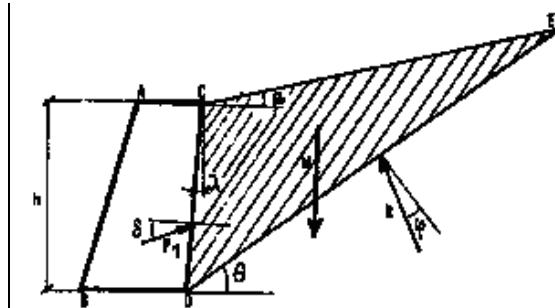
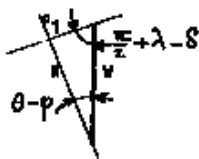
$$P_a = \frac{l^2}{2} \gamma K_a$$

K_a = coefficient qui sera déterminé dans chaque cas.

3.2. - Méthode de Coulomb

Considérons un massif de sable sec, non chargé, d'angle de frottement ϕ , incliné sur l'horizontale d'un angle β soutenu par un écran incliné de λ sur la verticale. La force de poussée \underline{P} fait l'angle δ (pris en général égal à $2/3$ de ϕ), avec la normale à l'écran. Lorsque le mur se déplace, il y a rupture du sol selon une ligne DE passant par le pied du mur. Le coin CDE est alors en équilibre sous l'action :

- du poids W du coin,
- de la réaction P_1 du mur sur le coin,
- de la réaction R du massif de sol au-dessous de DE (inclivée de ϕ sur la normale au plan de rupture).

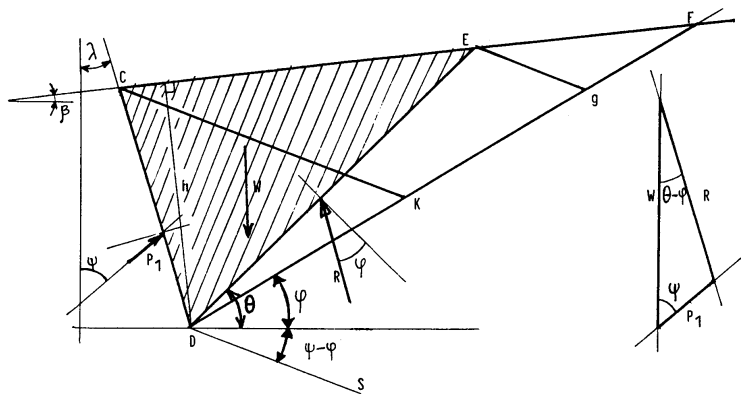


Pour un plan de rupture supposée faisant un angle θ avec l'horizontale, on peut tracer le polygone des forces qui doit être fermé. On connaît :

- W en grandeur et direction,
- la direction de R ,
- la direction de P_1 .

On peut donc déduire P_1 en fonction de l'angle θ . On fait ensuite varier θ et en calculant la valeur de θ qui annule $\frac{\partial P_1}{\partial \theta}$, on en déduit la position du plan de glissement DE auquel correspond la valeur maximale de la poussée P_a .

3.3.- Formule de Poncelet



Cette méthode est similaire à celle de Coulomb. On trace :

- l'écran CD d'obliquité ϕ sur la verticale,
- le terre plein CT d'obliquité β sur l'horizontale,
- la ligne de glissement hypothétique DE d'angle θ avec l'horizontale,
- la direction DS qui fait l'angle $\psi - \phi$ avec l'horizontale.

On mène par C et E les parallèles à DS qui coupent DF en K et g . On voit sans difficulté que le triangle DgE est semblable au triangle des forces RP_1W , ce qui permet d'écrire :

$$\frac{P_1}{W} = \frac{Eg}{Dg}$$

$$\text{Or } W = \frac{1}{2} \gamma \cdot h \cdot CE \text{ et } Eg = CK \cdot \frac{Fg}{FK} \text{ et } CE = Kg \cdot \frac{CF}{FK}$$

d'où on en déduit :

$$P_1 = \frac{1}{2} \gamma \cdot h \cdot Kg \cdot \frac{CF}{FK^2} \cdot \frac{CK \cdot Fg}{Dg}$$

Posons $DF = a$, $DF = b$, $Dg = x$. On a finalement :

$$P_1 = \frac{1}{2} \gamma \cdot h \cdot Kg \cdot \frac{CF}{FK^2} \cdot \frac{(x-b)(a-x)}{x} = A \cdot \frac{(x-b)(a-x)}{x}$$

où x varie quand θ varie. L'expression $\frac{(x-b)(a-x)}{x}$ passe par un maximum pour $x = \sqrt{ab}$:

On a pour valeur $P_1 = A.(\sqrt{a} - \sqrt{b})^2$.

Les différentes valeurs : CF, CK, FK, se calculent à partir de la longueur CD = 1 de l'écran et on obtient en fin de compte :

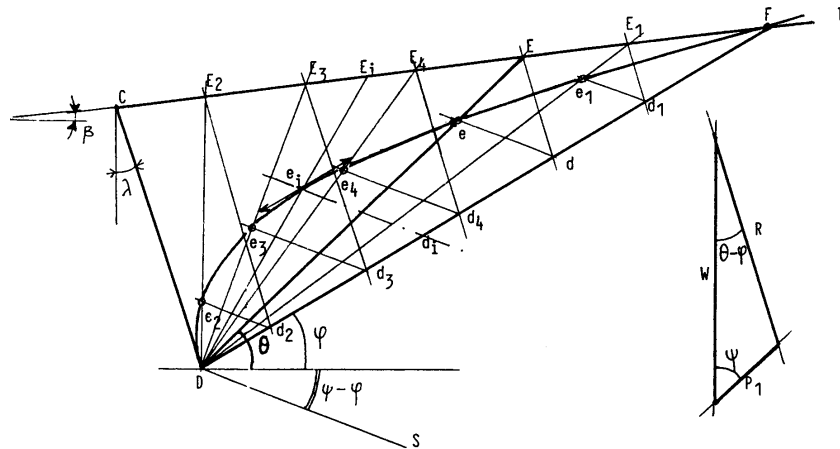
$$P_{\max} = \frac{1}{2} \gamma K_\gamma l^2$$

avec

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

3.4.- Construction de Culmann

La méthode de Coulomb se prête à une détermination graphique de la poussée ; plusieurs procédés ont été mis au point et en particulier la construction de Culmann.



De même que dans la méthode de Poncelet, on trace les lignes auxiliaires DS et DF. Par le point E, on mène une parallèle à CD. Elle coupe DF en d ; puis de d on mène une parallèle à DS. Elle coupe DE en e. Le triangle Deb est semblable au triangle des forces RWP₁ :

$$\frac{P_1}{W} = \frac{ed}{Dd} \text{ avec } W = \frac{1}{2} \cdot h \gamma \cdot CE \frac{ed}{Dd}$$

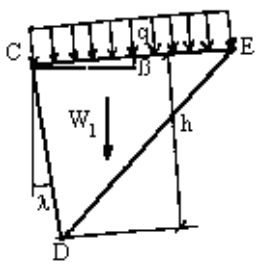
Or quand E varie, le rapport $\frac{CE}{Dd}$ reste constant, donc P₁ est proportionnel à ed.

Le maximum de P₁ sera aussi celui de ed. Quand E décrit le segment CF, le point e décrit la courbe DeF appelée courbe de Culman. La valeur maxi de ed correspond au point e_i pour lequel la tangente à la courbe est parallèle à DF.

4.- POUSSÉE SUPPLÉMENTAIRE DUE AUX SURCHARGES

4.1.- Détermination de la poussée

On supposera que l'on a le même coin de glissement que précédemment sur lequel agit une surcharge verticale uniforme d'intensité q .



Le coin CDE est toujours soumis aux trois forces P_1 , W_1 et R ; dans ce système, le poids W est remplacé par : $P_1 = W + q.CE$.

$$W_1 = W + q.CE$$

$$W_1 = \left(\frac{1}{2}.h\gamma + q\right).CE$$

que l'on peut écrire : $W_1 = \frac{1}{2}.h\gamma_1.CE$

Donc tout se passe comme si le coin avait un poids spécifique fictif γ_1 . La poussée totale sera alors :

$$P_1 = K_\gamma.\gamma_1.\frac{h^2}{2} = K_\gamma.\gamma.\frac{h^2}{2} + K_\gamma.\frac{l}{h}.ql$$

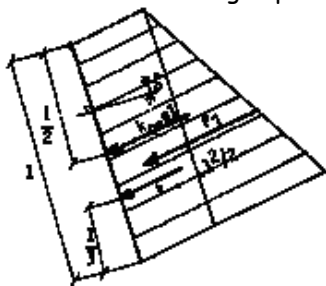
$\frac{h}{l}$ est constant et égal à $\cos(\beta - \lambda)$. Donc le sol est soumis à une poussée $P = K_\gamma.\frac{\gamma.l^2}{2}$ due au

poids propre augmente d'une poussée $P = \frac{K_\gamma.ql}{\cos(\beta - \lambda)}$ due à la surcharge.

On introduit donc un nouveau coefficient $K_q = \frac{K_\gamma}{\cos(\beta - \lambda)}$.

4.2. - Point d'application de la poussée

On se souvient que la distribution des contraintes dans le cas d'un massif non chargé est triangulaire. Or l'augmentation de contrainte due à la surcharge entraîne une augmentation de poussée constante sur une ligne parallèle à l'écran. On aura la distribution suivante :



La poussée P_1 résulte de la somme de la poussée des terres $K_\gamma.\gamma.\frac{l^2}{2}$ qui est triangulaire et dont le point d'application est à $1/3$ et de $K_q.q.l$ dont le point d'application est à $1/2$.

Dans le cas où la distribution est plus complexe, la méthode de Coulomb associée à la construction de Culmann permet d'obtenir la valeur de la poussée.

4.3. - Massifs stratifiés

Pour calculer la poussée qui s'exerce sur de tels massifs, on néglige les efforts de cisaillement à la limite de chaque couche et l'on admet que les contraintes exercées par chacune des couches sur l'écran sont égales aux contraintes que cette couche exercerait si elle était seule et si la surface supporterait une surcharge égale au poids des couches supérieures augmenté éventuellement de la surcharge réellement appliquée sur la surface libre.

4.4. - Murs à redans

Dans le cas des murs à redans, deux possibilités sont offertes pour le calcul de la poussée. La première consiste à tracer une ligne fictive passant par les sommets des redans et considérer dans ce cas un frottement sol sur sol ($\delta = \phi$) (fig. a). La partie du sol comprise entre la ligne et le mur est considérée comme en faisant partie.



La deuxième méthode consiste à faire le calcul redan par redan en considérant cette fois un angle $\alpha = 0$ par mesure de prudence. Il faut alors découper le sol suivant les redans et faire le calcul comme dans le cas des massifs stratifiés. Dans l'exemple, 3 sortes d'efforts agissent sur le redan de longueur l_2 . Tout d'abord la poussée des terres se trouvant au-dessus du redan :

$$P_1 = K_1 \cdot \gamma \cdot l_1^2, \text{ augmentée de la poussée des terres le long du redan } l_2 : K_2 \cdot \gamma \cdot \frac{(l_2)^2}{2}.$$

D'autre part un effort vertical agit sur le sommet de chacun des redans.

5. - STABILITE DES MURS DE SOUTÈNEMENT

5.1. - Remarque

Dans la plupart des cas, un mur de soutènement est enterré en pied d'une certaine hauteur. Il se trouve donc soumis à un effort de poussée P et un effort de butée B (considérée comme stabilisante). Or pour mobiliser la butée B , il faut un déplacement beaucoup plus fort que pour mobiliser la poussée P . La valeur calculée de la butée risque de ne jamais être atteinte. Dans la pratique, lorsque le déplacement du mur paraît insuffisant pour mobiliser la butée, on ne considère qu'une partie de cette butée ou on n'en tient pas compte. (Cas des remblais récents compactés servant à enterrer le pied du mur). On reste donc du côté de la sécurité.

5.2. - Vérification de la stabilité

5.2.1. - Stabilité au renversement

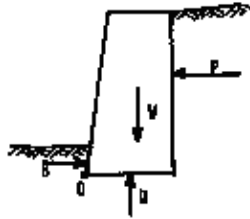
La stabilité se définit comme le rapport du moment des forces stabilisatrices sur le moment des forces de renversement, moments calculés par rapport au coin O .

Forces de renversement : poussée P, résultante éventuelle des sous-pressions de l'eau U.

Force stabilisatrices : poids W, butée B.

$$F_r = \frac{\sum M_{t/o}(B,W)}{\sum M_{t/o}(P,U)}$$

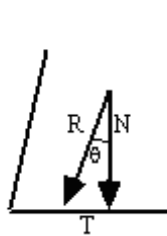
$$F_r \text{ admissible} \geq 1,5$$



N.B. : Si la résultante des forces passe par le tiers central, la vérification n'est pas à faire.

5.2.2. - Stabilité au glissement sur la base

Considérons la résultante des efforts ramenée sur la base. Ses composantes sont N et T. Si δ est l'angle de frottement interne du sol, le frottement mur-sol est exprimé par : $tg \delta = tg \frac{2}{3} \phi$



- Pour un sol pulvérulent, le coefficient de sécurité au glissement F_g est égal à :

$$F_g = \frac{tg \delta}{tg \theta} \text{ avec } tg \theta = \frac{T}{N}$$

- Pour un sol cohérent on définira F_g par

$$F_g = \frac{aS + N.tg \delta}{T}$$

a : adhérence mur-sol (fonction de la cohésion)

S : surface de la semelle.

On admettra que :

$$1,5 < F_g \leq 2$$