

# Chapitre 5

## Actions et sollicitations

### 5.1 Introduction

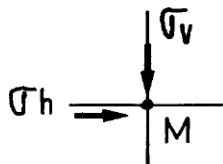
Le rôle des ouvrages de soutènement est de retenir les massifs de terre. Il en existe une grande variété se caractérisant par des fonctionnements différents et conduisant à des études de stabilité interne spécifiques. Tous ces ouvrages ont en commun la force de poussée exercée par le massif de sol retenu. Par contre, c'est principalement la manière dont est reprise cette force de poussée qui différencie les différents types d'ouvrages.

L'objet du présent chapitre est de déterminer les forces de poussée et de butée en fonction de la géométrie du mur et du massif de sol retenu, des caractéristiques mécaniques du sol et des déplacements relatifs du mur par rapport au sol.

### 5.2 États d'équilibre limite

#### 5.2.1 Sol au repos

Soit un massif de sol semi-indéfini à surface libre horizontale et n'étant soumis à aucune force extérieure. Soit  $\sigma_v$  la contrainte verticale sur une facette horizontale en un point M quelconque du milieu (figure 5.1). Par raison de symétrie, cette contrainte est principale. Soit  $\sigma_h$  la contrainte sur un élément de facette verticale. Cette contrainte est également principale, donc horizontale.



**Figure 5.1** Contraintes principales dans un sol à surface horizontale

Par définition,  $\sigma_h$  et  $\sigma_v$  sont liées par la formule suivante :

$$\sigma_h = K_0 \cdot \sigma_v$$

(5.1)

avec  $K_0$  : coefficient de pression des terres au repos.

$K_0$  dépend de la nature du sol, de la profondeur considérée et de l'histoire du sol.

Les valeurs ci-après peuvent être retenues comme ordre de grandeur :

Sable :  $K_0 \# 0.5$ ,

argile :  $K_0 \# 0.7$ ,

argile très molle, vase :  $K_0 \# 1$ ,

roche à très grande profondeur :  $K_0 \geq 1$ ,

(tunnels profonds)

$K_0 = 1$  correspond à un champ de contraintes sphérique ou hydrostatique. Pour les matériaux granulaires,  $K_0$  est souvent estimé à l'aide de la formule de Jaky :

$$K_0 = 1 - \sin\varphi'$$

### 5.2.2 Équilibres limites de poussée et de butée

Dans les problèmes de translation des murs de soutènement, tels que schématisés en figure 5.2, en admettant que le déplacement du mur ne modifie pas les contraintes verticales  $\sigma_v$ , la poussée est caractérisée par une chute des contraintes horizontales, est la butée par une augmentation de celles-ci. La *pression ultime de butée*  $F_p$  est très grande devant la *pression ultime de la poussée*  $F_a$  [10] [18] [19].

Supposons que l'on force l'écran à se déplacer vers le massif. Les contraintes horizontales sur l'écran vont croître jusqu'à ce que se produise la rupture du massif de terre. La résistance maximale atteinte avant rupture correspond à un état d'équilibre limite : c'est l'état d'équilibre passif. La contrainte  $\sigma_h$  prend alors la valeur donnée par la formule suivante :

$$\sigma_{hp} = K_p \cdot \sigma_v \quad (5.2)$$

avec  $K_p$  : coefficient de butée des terres.

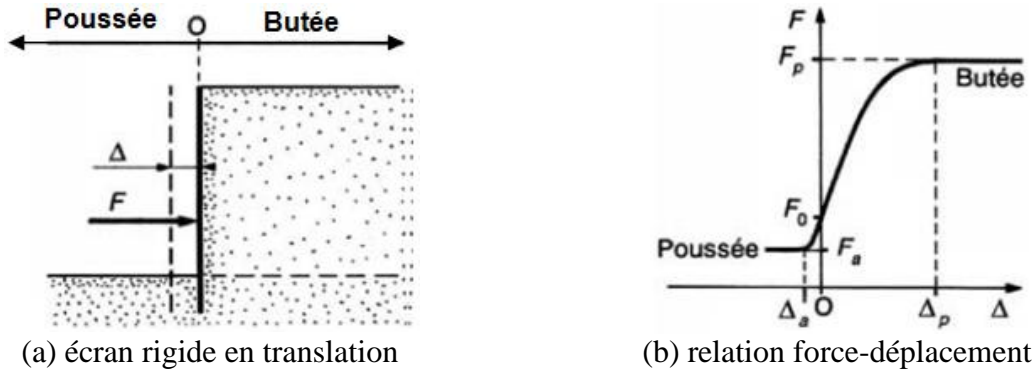
Si, au contraire, l'écran se déplace vers la gauche, le sol a tendance à suivre ce mouvement et la contrainte  $\sigma_h$  diminue jusqu'à une valeur limite correspondant à l'effondrement du massif de sol. Juste avant la rupture, un nouvel état d'équilibre limite est atteint : c'est l'état d'équilibre actif défini par la formule suivante :

$$\sigma_{ha} = K_a \cdot \sigma_v \quad (5.3)$$

avec  $K_a$  : coefficient de poussée des terres.

Si l'on compare les déplacements, on constate qu'il faut un déplacement  $\Delta_p$  beaucoup plus important pour atteindre l'état complet de butée que le déplacement  $\Delta_a$  nécessaire pour atteindre celui de poussée. Plus précisément, si  $H$  est la hauteur hors fiche de l'écran, les ordres de grandeur de ces déplacements sont [19] :

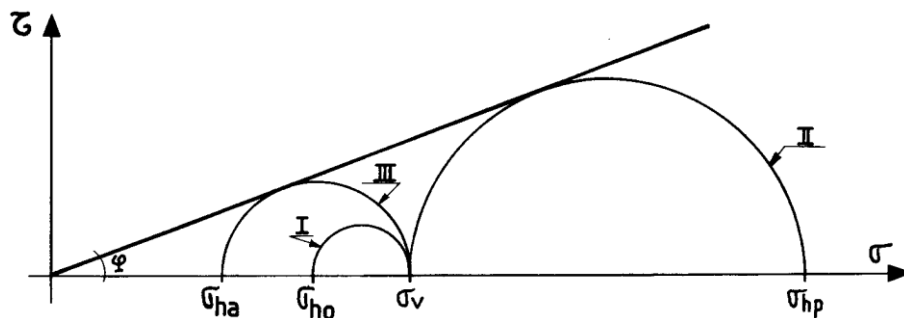
$$\Delta_a \approx \frac{H}{1000} \quad \text{et} \quad \Delta_p \approx \frac{H}{100}$$



**Figure 5.2** Relation force-déplacement pour un écran rigide en translation [19]

En cas d'un mur lisse, les contraintes tangentielles à la surface de contact sol/mur sont nulles, et le vecteur pression est réduit à la composante normale. Ainsi, en états limites de poussée et de butée d'un sol pulvérulent ( $c = 0$ ) sur un mur vertical lisse, le critère de rupture de Mohr-Coulomb permet d'obtenir les pressions de poussée et de butée (figure 5.3) [1] [10] [18] [19].

Sur la figure 5.3, le cercle I représente l'état des contraintes au repos. L'équilibre est surabondant. Le cercle de Mohr n'est pas tangent à la courbe intrinsèque. Le cercle II représente l'équilibre limite de butée et le cercle III représente l'équilibre limite de poussée.



**Figure 5.3** Evolution des cercles de Mohr en cas de poussée et de butée [1]

– Valeurs de  $K_a$  et  $K_p$ 

Les formules (5.4) et (5.4bis) se déduisent des propriétés du cercle de Mohr.

$$\boxed{K_a = tg^2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)} \quad \boxed{\sigma_{ha} = \sigma_v tg^2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)} \quad (5.4)$$

$$\boxed{K_p = tg^2 \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right)} \quad \boxed{\sigma_{hp} = \sigma_v tg^2 \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right)} \quad (5.4bis)$$

## – Résultantes des efforts sur l'écran

Comme  $\sigma_v = \gamma \cdot z$  (poids des terres),  $z$  étant la profondeur du point considéré, les formules (5.4) et (5.4bis) montrent que les contraintes horizontales sont proportionnelles à la profondeur et fournissent la valeur de la résultante des pressions appliquées sur l'écran.

Pour un mur de hauteur  $H$ , les résultantes de poussée et de butée s'appliquent au tiers inférieur du mur et sont données respectivement par les formules (5.5) et (5.5bis).

$$\boxed{F_a = \frac{1}{2} \cdot K_a \cdot \gamma \cdot H^2} \quad \boxed{F_a = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 tg^2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)} \quad (5.5)$$

$$\boxed{F_p = \frac{1}{2} \cdot K_p \cdot \gamma \cdot H^2} \quad \boxed{F_p = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 tg^2 \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right)} \quad (5.5bis)$$

**5.3 Pression sur un écran dans un sol pulvérulent en état limite**

Pour les murs non fixes dans un sol frottant ( $\varphi \neq 0$ ), les pressions limites agissant sur les murs peuvent être déterminées par superposition approchée des effets séparés du poids des terres ( $P_\gamma$ ), de la cohésion ( $P_c$ ) ainsi que celui de la surcharge ( $P_q$ ) [1] [10] [18] :

$$\boxed{P = P_\gamma + P_c + P_q} \quad (5.6)$$

Absi (1983) a montré que pour un sol cohérent, cette superposition mène à un état d'équilibre surabondant, ce qui donne des résultats pessimistes, mais de côté de la sécurité [20].

Plusieurs méthodes sont utilisées pour déterminer la pression  $P_\gamma$  due au poids des terres, notamment celles de Coulomb (1773), Rankine (1860) et Boussinesq (1882).

### 5.3.1 Calcul de $P_y$ par la méthode de Coulomb

Mise au point par Coulomb en 1773, cette méthode permet de déterminer les forces de poussée et de butée limites s'exerçant derrière un écran ou un mur quelconque sans considération de l'état des contraintes s'exerçant dans le sol derrière le mur. Elle repose sur deux hypothèses :

- 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. En d'autres termes, cela signifie que l'angle de frottement  $\delta$  entre l'écran (ou le mur) et le sol est connu.

Cette méthode consiste à étudier l'équilibre du prisme  $ABC$  limité par un plan incliné. Ce prisme est soumis à son poids  $W$ , à la réaction  $R$ , inclinée de  $-\varphi$  (poussée) ou de  $+\varphi$  (butée) et à la réaction de l'écran -  $F_a$  ou -  $F_p$ , inconnue mais d'inclinaison  $\delta$  (figure 5.4).

La poussée correspond à la valeur maximale de  $F_a$  obtenue en faisant varier l'inclinaison  $\delta$ . La butée correspond au minimum de  $F_p$ .

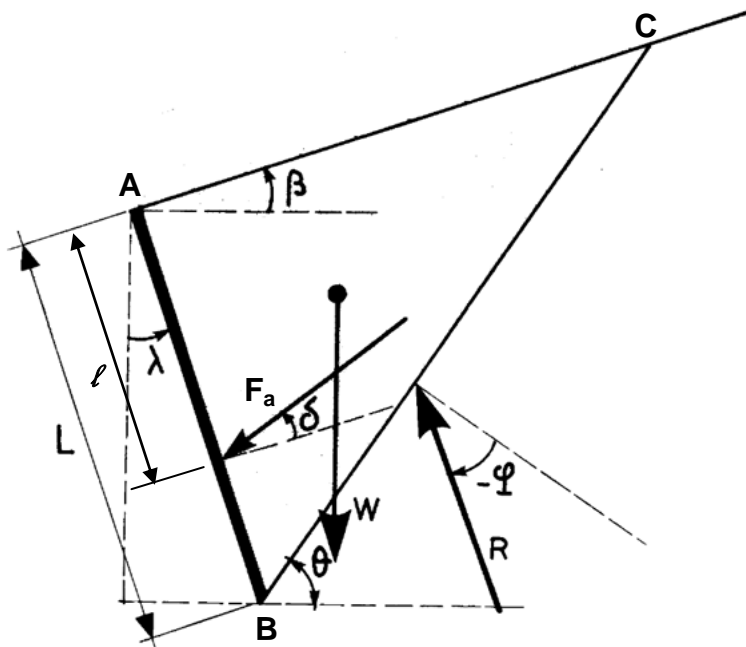


Figure 5.4 Coin de coulomb [1]

Les valeurs de  $K_{ay}$  et  $K_{py}$  peuvent être exprimées par la formule unique suivante, due à M. Havard. Il s'agit d'une adaptation des formules habituellement proposées qui fournissent séparément les expressions de ces deux termes.

$$K = \frac{\cos^2(\lambda - \varepsilon \cdot \varphi)}{\cos(\lambda + \delta) \left[ 1 + \varepsilon \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \varepsilon \cdot \delta) \sin(\varphi - \varepsilon \cdot \beta)}{\cos(\lambda + \delta) \cos(\lambda - \beta)}} \right]^2} \quad (5.7)$$

avec  $\varepsilon = +1$  pour le coefficient de poussée  $K_{ay}$ ,

$\varepsilon = -1$  pour le coefficient de poussée  $K_{py}$ .

À une distance  $l$  quelconque, les contraintes de poussée et de butée sur l'écran ainsi que les résultantes sont données par les formules suivantes :

$$\begin{aligned} P_{ay} &= K_{ay} \cdot \gamma \cdot l \\ P_{py} &= K_{py} \cdot \gamma \cdot l \end{aligned} \quad (5.8)$$

$$\begin{aligned} F_{ay} &= \frac{1}{2} K_{ay} \cdot \gamma \cdot L^2 \\ F_{py} &= \frac{1}{2} K_{py} \cdot \gamma \cdot L^2 \end{aligned} \quad (5.9)$$

$L$  est la longueur de l'écran. Les résultantes  $F_{ay}$  et  $F_{py}$  s'appliquent au tiers de  $L$  à partir de la base de l'écran.

### 5.3.2 Calcul de $P_y$ par la méthode de Rankine

La méthode suppose implicitement que l'obliquité  $\delta$  du vecteur contrainte est égale à l'inclinaison  $\beta$ , et ignore ainsi l'effet de la rugosité de l'interface sol/mur sur l'inclinaison des contraintes.

Cette méthode admet l'hypothèse fondamentale suivante : la présence de discontinuités, provoquées par la présence de murs ou d'écrans à la surface d'un massif de sol, ne modifie pas la répartition des contraintes verticales dans le sol (figure 5.5) [4] [19].

Soit un sol pulvérulent dont la surface fait un angle  $\beta$  avec l'horizontale. Sur un plan parallèle à la surface et à la profondeur  $h$ , la contrainte est verticale et vaut  $\gamma h \cos \beta$ . Déterminons la contrainte  $P$  qui s'exerce sur un plan vertical à la profondeur  $h$  (figure 5.6).

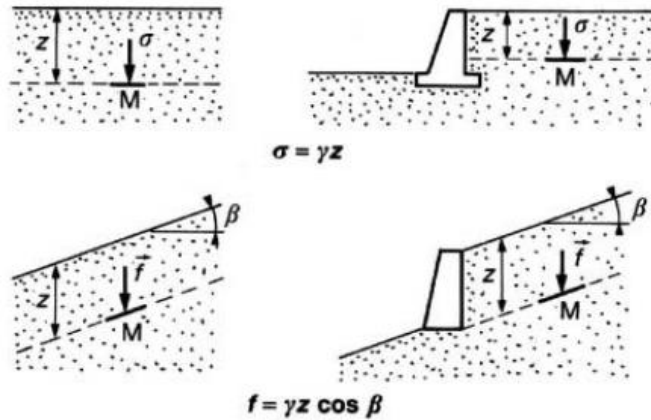


Figure 5.5 Hypothèse de la méthode de Rankine [19]

Au point M, l'état de contraintes est représenté par un cercle de Mohr passant par le point A. Le cercle  $(R_1)$  correspond à la poussée et la contrainte de poussée  $P_{ay}$  est donnée par le point B, tandis que le cercle  $(R_2)$  correspond à la butée et la contrainte de butée  $P_{py}$  est donnée par le point C. En se basant sur le *concept des facettes conjuguées*, on montre que les pressions  $P_{ay}$  et  $P_{py}$  exercées sur un mur vertical ( $\lambda = 0$ ) par un sol pulvérulent dont la surface est inclinée de  $\beta$  par rapport à l'horizontale, sont données par :

$$\begin{aligned} P_{ay} &= K_{ay} \cdot \gamma h \cos \beta \\ P_{py} &= K_{py} \cdot \gamma h \cos \beta \end{aligned} \tag{5.10}$$

avec :

$$K_{ay} = \frac{1}{K_{py}} = \frac{\cos \beta - \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \varphi}}{\cos \beta + \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \varphi}} \tag{5.11}$$

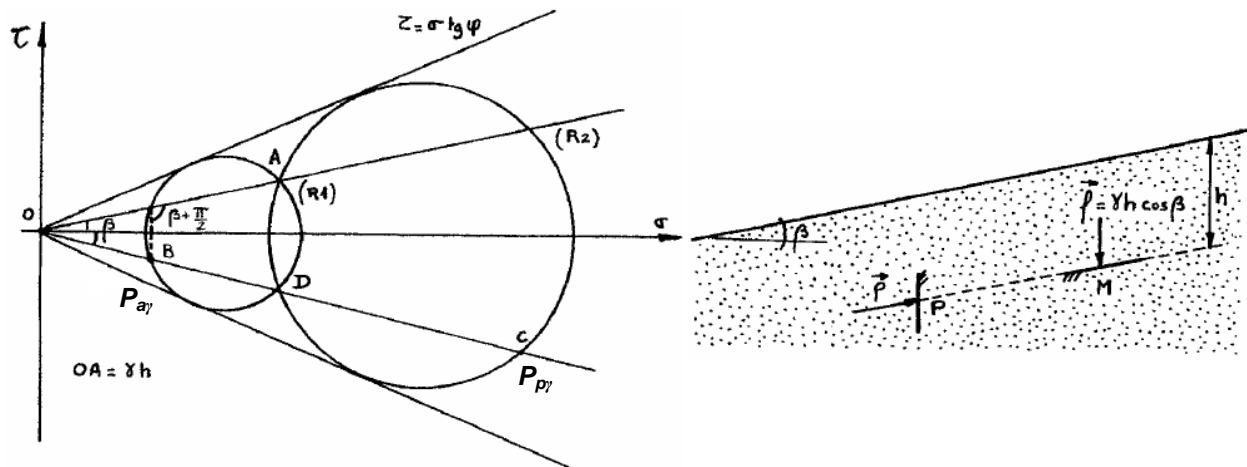


Figure 5.6 Équilibre limite de Rankine pour un sol pulvérulent à surface inclinée [4]

Dans le cas particulier d'un sol horizontal ( $\beta = 0$ ) correspondent les pressions qu'on a déjà évaluées par le critère de rupture de Mohr-Coulomb (voir équations 5.4 et 5.4bis).

La méthode a pour inconvénients de négliger l'effet de la rugosité de l'interface sol/mur et de considérer un mécanisme de rupture du sol, composé d'un réseau de droites faisant des angles de  $\pm(\pi/4 + \varphi/2)$  de part et d'autre des facettes majeures (figure 5.7). Ces dernières sont horizontales en cas de poussée et verticales en cas de butée. Le mécanisme de rupture, comme l'a montré Boussinesq, est plutôt curviligne [10].

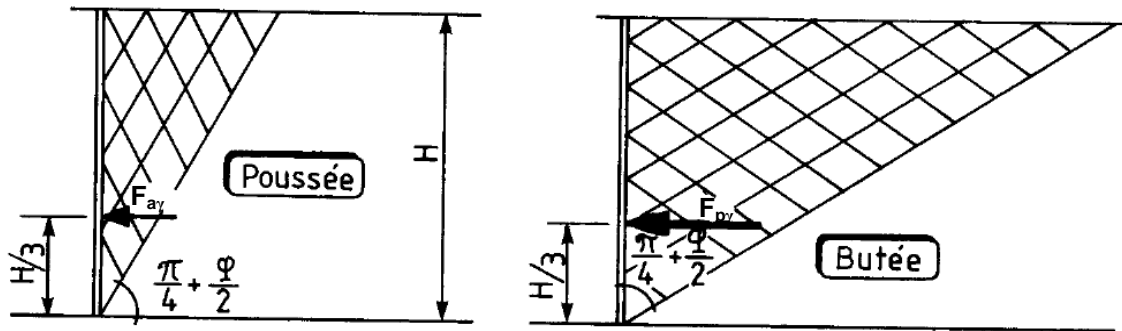


Figure 5.7 Écran lisse - Allure des lignes de glissement [1]

### 5.3.3 Calcul de $P_\gamma$ par la méthode de Boussinesq

Boussinesq (1882) a amélioré la théorie de Rankine en prenant l'interaction réelle entre le sol et l'écran, c'est-à-dire en choisissant la valeur de l'angle de frottement  $\delta$  sol-écran. Dans cet équilibre, Boussinesq considère une première zone où on a l'équilibre de Rankine se raccordant à une seconde zone où il tient compte des conditions aux limites sur l'écran (figure 5.8).

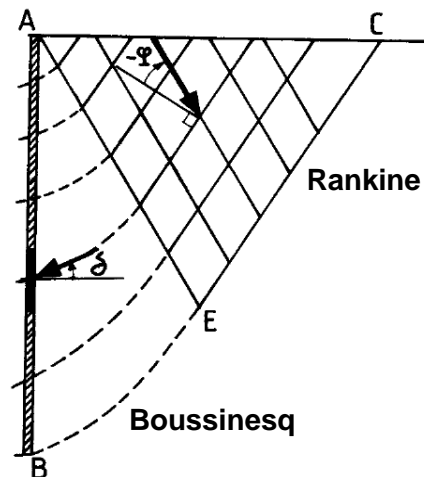


Figure 5.8 Écran rugueux - Allure des lignes de glissement [1]



L'étude de l'équilibre limite du milieu conduit à un système d'équations différentielles qui ne sont pas intégrables. A. Caquot et J. Kerisel ont résolu le problème (1948) par intégration numérique. Des tables de coefficients de poussée et de butée ont pu être publiées. Elles donnent les coefficients de poussée  $K_{a\gamma}$  et de butée  $K_{p\gamma}$  pour le massif pulvérulent non surchargé décrit sur la figure 5.9 en fonction de  $\beta$ ,  $\lambda$  et  $\delta$  [21].

Le tableau 1.A en annexe 1, extrait des tables de Caquot-Kérisel, permet de déterminer le coefficient de pression des terres  $K_{a\gamma}$ , selon la géométrie du système sol/mur et la rugosité de l'interface sol/mur.

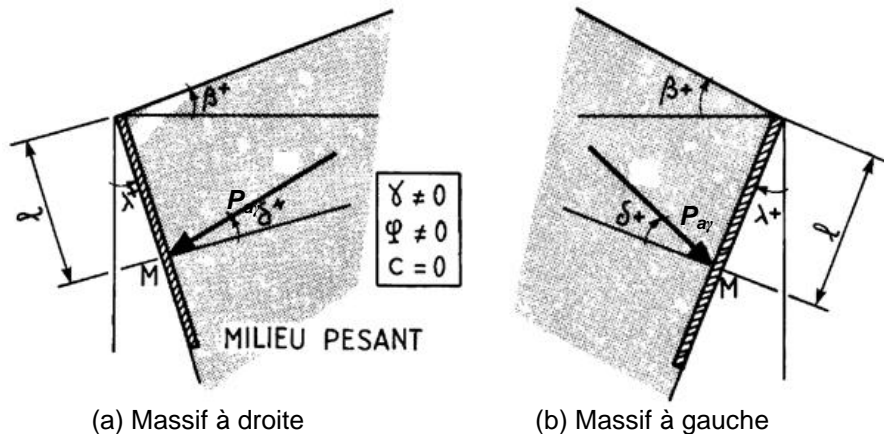
Le tableau 1.B fournit les valeurs du coefficient de butée  $K_{p\gamma}$  dans le cas d'une surface horizontale ( $\beta = 0$ ). En cas où  $\delta$  est différent de  $\varphi$ , le sous-tableau inférieur donne un coefficient minoratif à multiplier aux valeurs des deux autres sous-tableaux.

À une distance  $l$  quelconque, les contraintes de poussée et de butée sur l'écran ainsi que les résultantes sont données par les formules suivantes :

$$\begin{aligned} P_{a\gamma} &= K_{a\gamma} \cdot \gamma \cdot l \\ P_{p\gamma} &= K_{p\gamma} \cdot \gamma \cdot l \end{aligned} \tag{5.12}$$

$$\begin{aligned} F_{a\gamma} &= \frac{1}{2} K_{a\gamma} \cdot \gamma \cdot L^2 \\ F_{p\gamma} &= \frac{1}{2} K_{p\gamma} \cdot \gamma \cdot L^2 \end{aligned} \tag{5.13}$$

$L$  est la longueur de l'écran. Les résultantes  $F_{a\gamma}$  et  $F_{p\gamma}$  s'appliquent au tiers de  $L$  à partir de la base de l'écran.

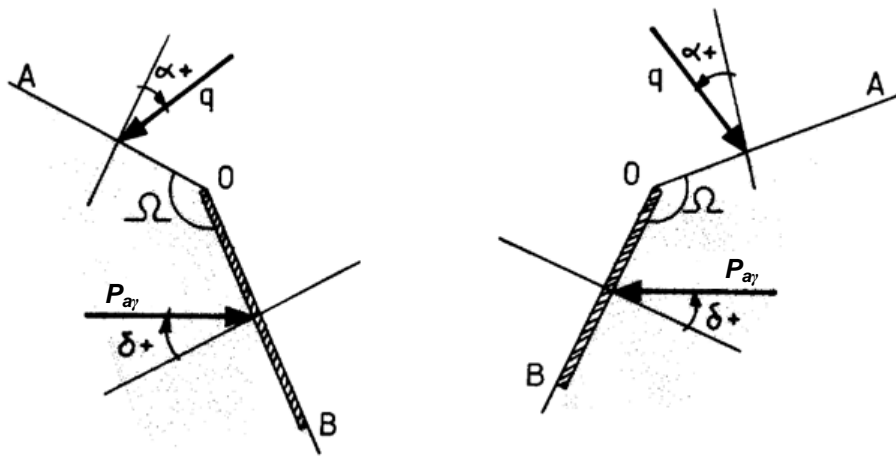


**Figure 5.9** Tables de butée-poussée - Définitions et conventions de signe des paramètres [1]

### 5.4 Effet d'une pression uniforme $q$

Le massif non pesant ( $\gamma = 0$ ) supporte une surcharge uniforme  $q$  inclinée de  $\alpha$  sur la normale à la surface libre. Le problème consiste à déterminer la contrainte uniforme (d'après l'hypothèse de Rankine généralisée) qui s'exerce en chaque point de l'écran OB. Cette contrainte d'une intensité  $P_q$  et d'une inclinaison  $\delta$ , est due à la présence de la surcharge  $q$ .

Les convention de signes relatives à  $\alpha$  et  $\delta$  sont données sur la figure 5.10. L'angle  $\delta$  est l'une des données du problème. Il dépend de la rugosité de l'écran et correspond au frottement écran/sol : si l'écran est parfaitement lisse,  $\delta = 0$ , si l'écran est parfaitement rugueux,  $\delta = \varphi$ .



**Figure 5.10** Milieu non pesant. Cas de la poussée. Conventions de signe [1]

L'équilibre de poussée est défini en considérant l'état limite tel que  $P_q < q$ . L'équilibre de butée est obtenu en intervertissant la position de l'écran ainsi que  $q$  et  $P_q$ . Les contraintes de poussée et de butée ainsi que les résultantes sont données par les formules suivantes :

$$\begin{aligned} P_{aq} &= K_{aq} \cdot q \\ P_{pq} &= K_{pq} \cdot q \end{aligned} \quad (5.14)$$

$$\begin{aligned} F_{aq} &= K_{aq} \cdot L \cdot q \\ F_{pq} &= K_{pq} \cdot L \cdot q \end{aligned} \quad (5.15)$$

Les coefficients de poussée  $K_{aq}$  et de butée  $K_{pq}$  étant fonction de  $\alpha$ ,  $\delta$ ,  $\varphi$  et  $\Omega$  [20] [21]. L'Herminier et Absi ont publié des tables donnant la valeur des coefficients  $K_{aq}$  et  $K_{pq}$  en fonction des différentes valeurs possibles  $\alpha$ ,  $\delta$ ,  $\varphi$  et  $\Omega$ .

Le tableau 1.C en annexe 1 donne les valeurs typiques du coefficient de poussée  $K_{aq}$  pour une surcharge normale ( $\alpha = 0$ ) en fonction de  $\varphi$ ,  $\delta$  et la différence ( $\lambda - \beta$ ).

Une solution analytique a été établie par Sokolovsky (1961) par le biais de la méthode des caractéristiques de contraintes, comme suit :

$$P_q = q \frac{\cos\delta \mp \sin\varphi \cos\Delta_2}{\cos\alpha \pm \sin\varphi \cos\Delta_1} e^{\mp 2\Psi tg\varphi} \quad (5.16)$$

$$K_q = \frac{\cos\delta \mp \sin\varphi \cos\Delta_2}{\cos\alpha \pm \sin\varphi \cos\Delta_1} e^{\mp 2\Psi tg\varphi} \quad (5.17)$$

avec :

$$\Psi = \Omega - \frac{\pi}{2} + \frac{\Delta_1 + \Delta_2 \pm \alpha \mp \delta}{2}$$

$$\sin\Delta_1 = \frac{\sin\alpha}{\sin\varphi}$$

$$\sin\Delta_2 = \frac{\sin\delta}{\sin\varphi}$$

On considère le signe supérieur pour la poussée ( $K_{aq}$ ), et le signe inférieur pour la butée ( $K_{pq}$ ).

### Remarque

Si  $\Omega = \pi/2$ ,  $\alpha = 0$  et  $\delta = 0$ ,  $K_{aq} = tg^2(\pi/4 - \varphi/2)$  et  $K_{pq} = tg^2(\pi/4 + \varphi/2)$ . On retrouve dans ce cas les mêmes coefficients de poussée et de butée que dans le milieu pulvérulent pesant.

La contrainte horizontale  $\sigma_h$  de poussée due à d'autres cas de surcharges verticales, comme le schématise la figure 5.11, peut être déterminée en considérant le sol comme un milieu élastique horizontal semi-infini soutenu par un écran vertical, par les formules de Boussinesq comme suit [19] :

– charge concentrée  $Q$  :

$$\sigma_h(z) = \frac{3Qzd^2}{2\pi R^5} \quad (5.18)$$

– charge  $Q$  répartie sur la longueur du mur :

$$m > 0.4 \Rightarrow \sigma_h = 1.27 \frac{Qm^2n}{H(m^2 + n^2)} \quad (5.19)$$

$$m < 0.4 \Rightarrow \sigma_h = 0.203 \frac{Qm}{H(0.16 + n^2)^2} \quad (5.20)$$

– charge  $q$  sous forme d'une bande :

$$\sigma_h = 2 \frac{q}{\pi} [(\beta + \sin\beta)\sin^2\alpha + (\beta - \sin\beta)\cos^2\alpha] \quad (5.21)$$

En considérant le mur comme infiniment rigide fixe, la contrainte  $\sigma_h$  pour les différentes distributions de surcharge est doublée.

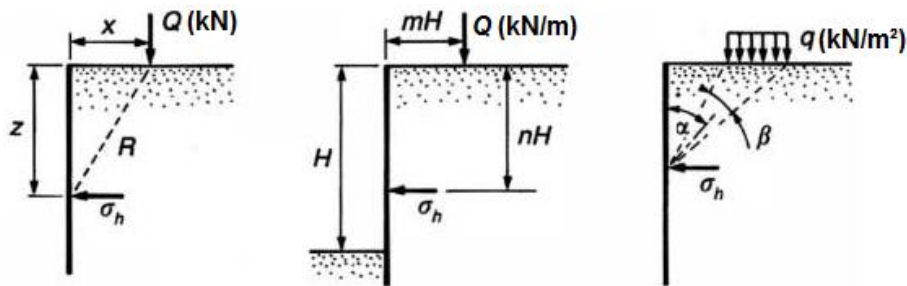


Figure 5.11 Surcharges verticales en surface [19]

### 5.5 Effet de la cohésion du sol

On tient compte de l'effet de la cohésion ( $P_c$ ) à l'aide du théorème des états correspondants. L'action de la cohésion revient à appliquer une pression hydrostatique  $H$  d'intensité égale à  $c/tg\varphi$  sur le pourtour du massif. L'écran est donc soumis à deux actions (figure 5.12a) [1] [10] :

- une action directe correspondant à la pression  $c/tg\varphi$  sur  $OB$ ,
- une action indirecte qui est l'influence sur l'écran  $OB$  de la surcharge  $c/tg\varphi$  s'exerçant sur la surface libre  $OA$ .

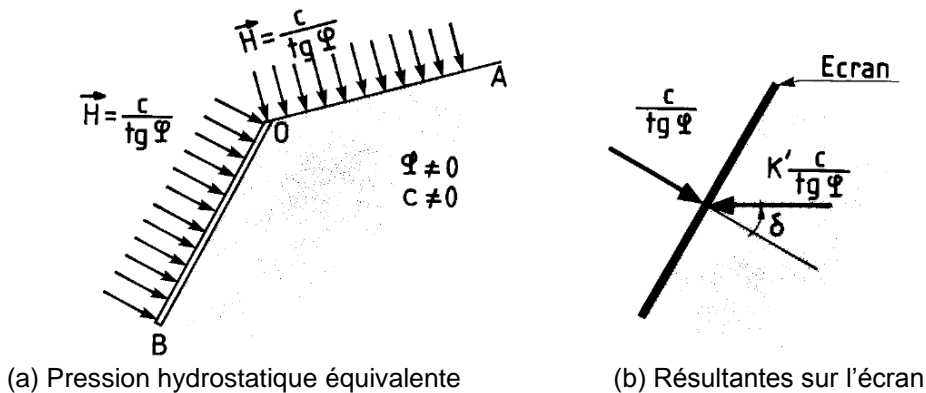


Figure 5.12 Application du théorème des états correspondants [1]

L'influence de la cohésion correspond à la somme géométrique de ces deux contraintes (figure 5.12b). En ne considérant que les *composantes normales* à l'écran, l'influence de la cohésion en un point quelconque de l'écran se traduit par les formules suivantes :

- poussée : contrainte résultante due à la cohésion  $\rightarrow P_{ac} = \frac{c}{tg\varphi} (1 - K_{aq} \cos\delta)$
- butée : contrainte résultante due à la cohésion  $\rightarrow P_{pc} = \frac{c}{tg\varphi} (K_{pq} \cos\delta - 1)$

En pratique, les massifs ayant une cohésion élevée exercent de faibles forces de poussée sur les murs et réagissent par de fortes forces de butée. En outre, un massif de sol cohérent exerce une poussée plus petite que celle d'un massif pulvérulent, toutes choses étant par ailleurs égales. Le contraire est vrai en cas de butée [10].

## 5.6 Étude particulière du milieu purement cohérent

En cas d'un sol purement cohérent ( $\varphi = 0$ ), le principe de superposition des effets n'est pas applicable, puisqu'on ne peut étudier séparément l'effet de la cohésion, le théorème des états correspondants n'est pas applicable. on calcule d'ailleurs une pression globale en se basant sur la méthode de Rankine appliquée à ce cas [22].

En admettant l'hypothèse des facettes conjuguées, on montre que la pression  $P$  exercée par un sol purement cohérent dont la surface est inclinée de  $\beta$  par rapport à l'horizontale, sur un mur vertical, est déterminée à une profondeur donnée par :

$$P_{a,p} = K_{a,p} (\sigma_{v0} + q) \cos\beta \quad (5.22)$$

$$K_{a,p} = 2\cos^2\beta \pm 2 \sqrt{\left(\frac{c}{\sigma_{v0} + q}\right)^2 - \sin^2\beta \cos^2\beta - 1} \quad (5.23)$$

Le signe + et l'indice p correspondent à la butée, et le signe - et l'indice a à la poussée.

$\sigma_{v0}$  est la contrainte verticale due au poids des terres et  $q$  est une pression verticale uniforme appliquée à la surface du remblai, comme le montre la figure 5.13.

En cas d'un mur vertical et un remblai à surface horizontale ( $\beta = 0$ ), on obtient en poussée :

$$K_a = 1 - 2c/(\sigma_{v0} + q) \quad (5.24)$$

et en butée :

$$K_p = 1 + 2c/(\sigma_{v0} + q) \tag{5.25}$$

On obtient ainsi, même pour un sol homogène vis à vis de la cohésion, des coefficients dépendant de la profondeur, le long du mur.

On remarque que selon cette méthode, comme le schématise la figure 5.13b, la pression  $P(z)$  en cas de poussée devient négative sur une hauteur  $Z_0$  égale à  $(2c/\gamma - q/\gamma)$ , indépendamment de l'inclinaison  $\beta$  de la surface du sol. Cette zone de traction est à éliminer dans la détermination des pressions agissant sur le mur, du fait que le sol résiste mal à la traction. En cas de butée,  $Z_0$  est égal à 0.

En cas d'un mur non vertical, l'étude peut être abordée selon la méthode de Rankine, mais avec des calculs plus complexes.

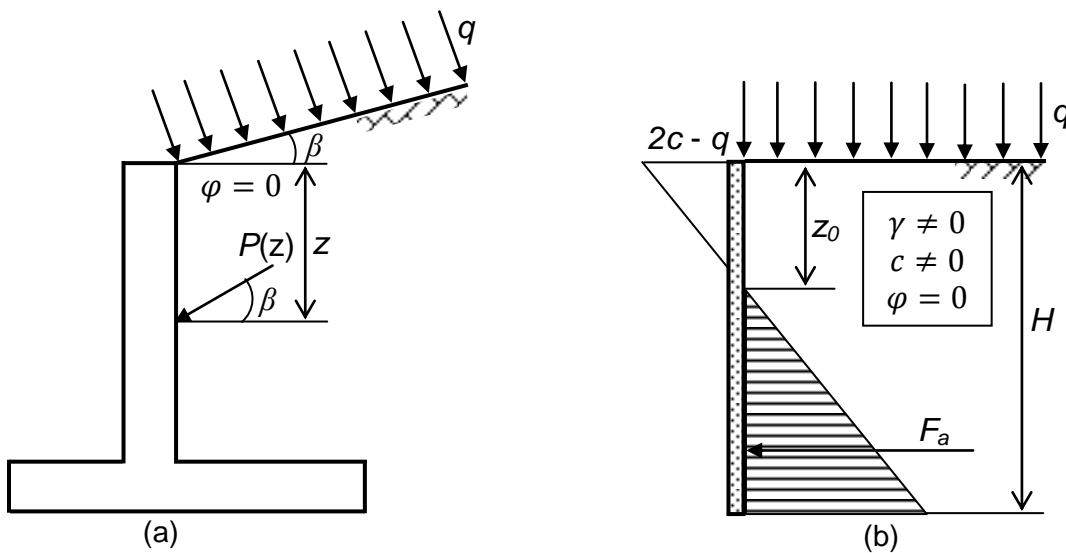


Figure 5.13 Schéma de calcul de la pression d'un sol purement cohérent [10]

### 5.7 Calcul des pressions dans un sol multicouche

On retient la règle suivante : lors de l'étude des pressions d'une couche, les couches sus-jacentes agissent comme une surcharge uniforme au toit de cette couche [10] [23].

La figure 5.16 illustre un exemple d'application de cette règle. Les couches sus-jacentes à la couche  $i$  agissent comme une surcharge  $q'$  au niveau AA', égale à :

$$q' = q + \sum_{j < i} \gamma_j H_j \tag{5.26}$$

La force de poussée due à cette surcharge sur la paroi AB est :

$$F_q = K_q(\varphi_i)q'\overline{AB} = K_q(\varphi_i)q' \frac{H_i}{\cos\lambda} \quad (5.27)$$

La pression de poussée en un point en abscisse  $x$  dans la paroi AB est telle que :

$$P_{ay} = K_{ay}(\varphi_i)\gamma_i x \quad (5.28)$$

La force de poussée due au poids des terres sur la paroi AB est :

$$F_{ay} = \frac{1}{2} K_{ay}(\varphi_i)\gamma_i \overline{AB}^2 = \frac{1}{2} K_{ay}(\varphi_i)\gamma_i \frac{H_i^2}{\cos^2\lambda} \quad (5.29)$$

Outre ces effets, celui de la cohésion de la couche  $i$  est pris en compte à travers une surcharge directe appliquée normalement sur le parement AB, soit :

$$P_{cd} = \frac{c}{tg\varphi} \quad (5.30)$$

et une surcharge indirecte égale à  $c/tg\varphi$ , appliquée sur AA' et dont la pression induite sur le parement AB est inclinée de  $\delta$ , et égale à :

$$P_{cd} = K_q \frac{c}{tg\varphi} \quad (5.31)$$

La démarche est identique pour l'équilibre limite de butée.

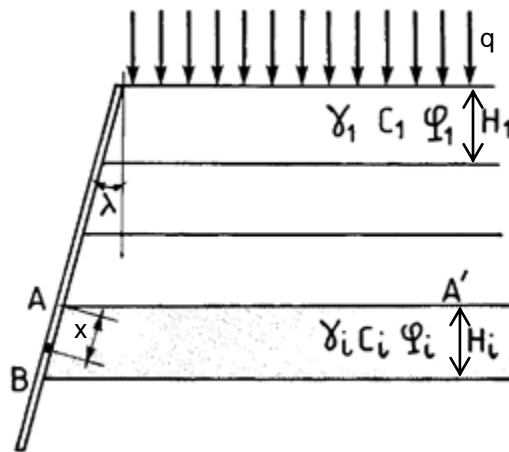


Figure 5.16 Schéma de calcul de la pression dans un sol multicouche [1]

## 5.8 Prise en compte de la pression interstitielle et comportement du sol

Deux actions doivent être superposées [1] [10] [23] :

- l'action de la poussée des terres  $P'_\gamma$ , en considérant le poids volumique déjaugé en dessous de la nappe,
- la poussée hydrostatique de l'eau  $u$ , qui est normale à l'écran.

La pression de poussée  $P_\gamma$  due au poids des terres est comme suit :

$$P_\gamma = P'_\gamma + u \quad (5.32)$$

En absence de drainage, un sol fin se comporte d'une manière non drainée, et la pression du sol sur le mur se calcule en tant que contrainte totale, selon l'équation ci-dessus.

En présence d'un drain, et en considérant une alimentation continue soit par une pluie ou par une nappe souterraine, la surpression interstitielle s'annule et le sol se comporte d'une manière drainée, la pression des terres sur le mur étant plutôt effective ( $P'_\gamma$ ).

Lors de l'écoulement en régime permanent et en présence d'un drain, il est faut étudier le réseau d'écoulement, formé des lignes de courant et des lignes équipotentiels, et en déduire la force résultante de la pression.

On admet couramment pour les configurations simples mur/sol que les lignes du courant sont pratiquement verticales; la force d'écoulement  $P_e$  est donc verticale. La force de poussée due au poids des terres, en notant par  $i$  le gradient hydraulique, est comme suit :

$$F_{a\gamma} = \frac{1}{2} K_{a\gamma} (\gamma' \pm i\gamma_w) h^2 \quad (5.33)$$

Les signes + et - correspondent respectivement aux écoulements descendant et ascendant.

## 5.9 Direction de la pression des terres

Selon la figure 5.14, en cas de poussée, le déplacement du mur mobilise des contraintes de cisaillement descendantes, alors qu'en butée elles sont plutôt ascendantes. Ainsi, dans les conditions ordinaires de fonctionnement du mur, le vecteur de pression de poussée est dirigé vers le bas, et celui de la butée est dirigé vers le haut.