

5.1 Actions

Ce sont les forces appliquées à un ouvrage, qu'il s'agisse de charges, de déformations imposées, d'accéléérations sismiques, ou encore de variations de température. Selon l'Eurocode 0 (EN 1990), ces actions sont classées en trois catégories principales :

- **Actions permanentes (G)** : celles qui restent constantes dans le temps, comme le poids propre de l'ouvrage.
- **Actions variables (Q)** : celles qui varient dans le temps, comme les surcharges d'exploitation.
- **Actions accidentelles (A)** : celles qui résultent d'événements imprévus, tels que les séismes ou les explosions.

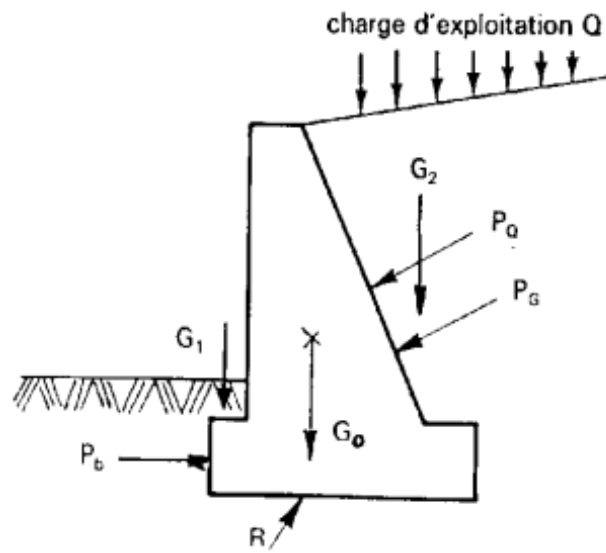
Les **actions de l'eau** contenue dans le terrain sont :

- Les **actions de l'eau** peuvent être :
 - **Statiques** (pressions hydrostatiques) si l'eau est en équilibre ou quasi-équilibre.
 - **Dynamiques** (effets hydrodynamiques) en cas de circulation d'eau.
- Le **choix des niveaux d'eau** est :
 - **Basé** sur l'étude hydrogéologique du site.
 - **Adapté** à l'état limite considéré et aux effets des actions de l'eau.

Le cas échéant les **actions sismiques** transmises par le terrain aux murs de soutènement, sont à évaluer conformément à l'Eurocode 8 (NF EN 1998).

En l'absence d'eau, les forces agissant sur un mur de soutènement sont (Figure) :

- Le **poids propre** du mur (G_0).
- Les **poids des remblais** : G_1 (aval), G_2 (amont).
- La **charge d'exploitation** appliquée au terre-plein (Q).
- Les **poussées des terres** : P_G (due au remblai) et P_Q (due à la charge Q).
- La **butée** du terrain devant le mur (P_b).
- La **réaction** du sol supportant le mur (R).



Par mesure de sécurité, l'action de la butée (P_b) est généralement négligée dans les calculs de murs de soutènement. En effet, la mobilisation de la butée nécessite des déplacements importants du terrain, ce qui est souvent incompatible avec les exigences esthétiques et fonctionnelles du projet. De plus, la butée peut être supprimée ultérieurement par des travaux de terrassement, rendant son inclusion dans les calculs potentiellement dangereuse.

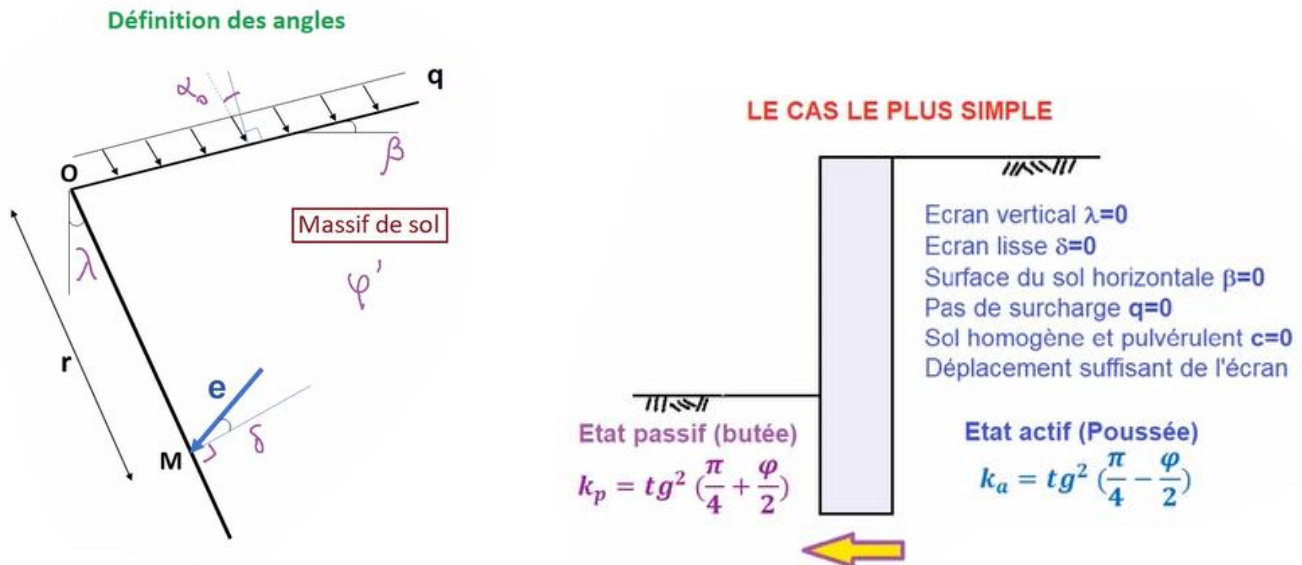
Sollicitations : L'effet de l'action : Ce sont les forces internes (moment, contrainte ...)

5.2 Hypothèses de calculs

Les calculs de poussée présentés dans ce chapitre sont basés sur des modèles théoriques développés spécifiquement pour les sols pulvérulents. En effet, la complexité du comportement des sols cohésifs et la variabilité de leur cohésion dans le temps rendent difficile leur prise en compte précise dans les calculs. Par conséquent, pour des raisons de sécurité, il est courant de négliger la cohésion du sol dans l'évaluation des efforts s'exerçant sur un mur de soutènement.

5.3 Calcul des efforts de poussée-butée

Ces efforts correspondent aux forces exercées par le sol sur un mur lorsqu'il est déplacé. Selon le sens du déplacement, on distingue la poussée active (mur s'éloigne du sol) et la butée passive (mur s'enfonce dans le sol).



Plusieurs méthodes théoriques permettent d'évaluer les efforts de poussée et de butée exercés par le sol sur une structure. Parmi les plus utilisées, on retrouve les théories de Rankine, Boussinesq et Coulomb, chacune faisant des hypothèses simplificatrices différentes sur le comportement du sol.

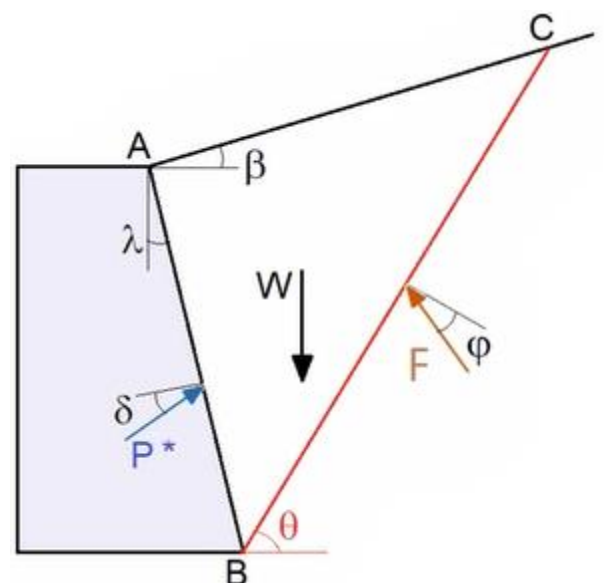
5.4 Méthode du coin de Coulomb (1776)

La méthode de Coulomb est une méthode classique utilisée pour calculer les forces exercées par un massif de terre sur une structure de soutènement (mur, écran).

Hypothèses

- Parement intérieur rectiligne (λ)
- Surface du sol rectiligne (β)
- Sol homogène pulvérulent ($c'=0$)
- Surface de rupture dans le sol plane (droite BC)
- Coin de coulomb en équilibre

A la rupture Coulomb suppose qu'il va se former dans le massif une ligne de glissement droite BC inclinée d'un angle θ par rapport à l'horizontale il va ainsi se former un coin de sol triangulaire ABC qu'on appelle coin de Coulomb.



La méthode de coulomb repose sur l'étude de l'équilibre mécanique de ce coin.

$$\vec{W} + \vec{F} + \vec{P}^* = \vec{0}$$

- W : Poids propre du mur
- F : Résultante des forces de frottements le long de la ligne de glissement BC
- P* : Réaction de l'écran sur le massif.

Cette force P* varie en fonction de l'angle θ et la force de poussée P qu'on va considérer correspond au max de P* quand θ varie.

La force de poussée P sera inclinée d'un angle δ par rapport à la normale à l'écran et c'est cet angle qui va caractériser le frottement sol/écran.

La méthode de Coulomb montre que cette force va s'écrire sous la forme :

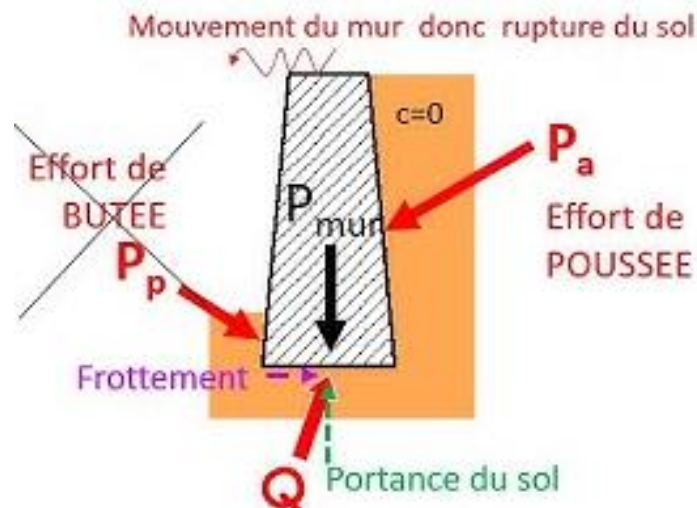
$$P = K_a \cdot \gamma \cdot \frac{AB^2}{2}$$

Le coefficient de poussée est fonction des angles ($\lambda, \beta, \varphi, \delta$) :

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

Dans le cas le plus simple c'est à dire : $\lambda=0, \beta=0, \delta=0$

$$K_a = \tan^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)$$



Ce coefficient permet de calculer l'intensité de la poussée exercée par le sol sur la structure.

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

D'où

$$P_a = \frac{1}{2} \gamma h^2 \tan\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)$$

N.B. Poncelet a généralisé cette méthode à des cas plus complexes, en tenant compte de l'inclinaison de la structure et de la présence d'un talus.

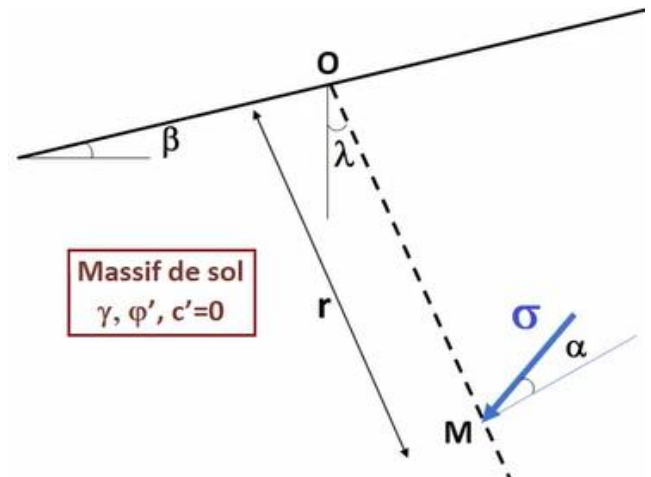
5.5 Méthode de Rankine (1857)

Hypothèses

- Massif indéfini limité par un plan incliné de
- Sol pulvérulent ($c'=0$)
- Massif en équilibre plastique
- Etat d'équilibre identique à la même profondeur

Et en conséquences :

- Les lignes de glissement sont droites
- La contrainte de poussée est proportionnelle à la profondeur



Ainsi on pourra écrire :

$$\sigma = K_a \cdot \gamma \cdot r$$

Le coefficient de poussée K_a est fonction des angles (λ, β, φ). Cette contrainte sera inclinée d'un angle α par rapport à la normale à l'écran. L'angle α est aussi fonction des angles (λ, β, φ).

Quel que soit la nature de l'écran α est le même, et par contre il ne prend pas en compte correctement le frottement sol/écran.

Cas particulier :

- Ecran vertical ($\lambda=0$)
- Surface de sol horizontal ($\beta=0$)
- Ecran parfaitement lisse ($\delta=0$)

On aura un angle $\alpha=0$ dans ce cas l'équilibre de Rankine est satisfaisant parce que la valeur $\alpha=0$ correspond bien à un écran parfaitement lisse et il rejoint le cas le plus simple :

$$K_a = \tan^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right).$$

Pour bien tenir compte du frottement sol/écran on a besoin d'un équilibre plus général. (on passe donc à l'équilibre de Boussinesq)

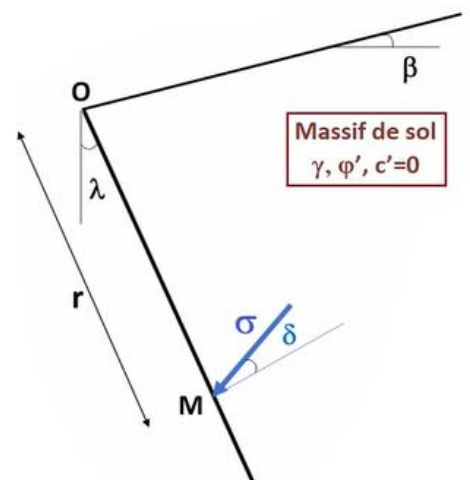
5.6 Méthode de Boussinesq (1885)

Hypothèses

- Parement intérieur rectiligne (λ)
- Surface du sol rectiligne (β) non surchargée
- Sol homogène pulvérulent ($c'=0$)
- Massif en équilibre plastique

La contrainte de poussée est inclinée d'un angle δ qui caractérise le frottement sol/mur

L'équilibre de Boussinesq considère que δ est une donnée du problème, contrairement à l'équilibre de Rankine.



Par conséquent les lignes de glissement seront incurvées au voisinage de l'écran

Par analogie à l'équilibre de Rankine la distribution des contraintes est triangulaire, c'est-à-dire qu'on peut écrire :

$$\sigma = K_a \cdot \gamma \cdot r$$

Le coefficient de poussée K_a est fonction des angles $(\lambda, \beta, \varphi, \delta)$. Il n'y a pas de solutions analytiques pour K_a mais des solutions numériques donc les coefficients de poussée sont donnés sous forme de tables les tables Caquot et Kerisel et encore plus récents les tables Kerisel et Absi.

N.B. Les valeurs des coefficients de butée sont donnés par les mêmes tables.

Cas particulier :

- Ecran vertical ($\lambda=0$)
- Surface de sol horizontal ($\beta=0$)
- Ecran parfaitement lisse ($\delta=0$)

On retrouve encore le cas le plus simple :

$$K_a = \tan^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right).$$