

Chapitre:

STABILITE DES MURS DE SOUTENEMENT

1. INTRODUCTION

un mur de soutènement sert à soutenir, c'est-à-dire à contenir et à résister aux très fortes pressions d'un terrain, le plus souvent composé de terre ou de sable. Généralement, il permet de lutter contre les éboulements et les glissements de terrain quand le sol est en pente. Il est beaucoup utilisé sur les berges et les voies publiques mais le mur de soutènement a aussi son utilité dans les jardins des particuliers.

2. PRINCIPE

Pour le calcul des murs de soutènement, les caractéristiques mécanique de base telles que la cohésion c , l'angle de frottement interne ϕ et le poids volumique du sol γ derrière le mur et son sol de fondation doivent être avant tout déterminés. Ils permettent à l'ingénieur d'évaluer la force latérale qui agit sur son ouvrage de soutènement et de procéder à la conception du mur de soutènement qui s'effectue en deux étapes :

1. vérification de la stabilité de l'ouvrage : celle-ci comprend :

☞ la stabilité locale :

- la stabilité au glissement
- la stabilité au renversement
- la stabilité du sol de fondation

☞ la stabilité globale : celle-ci vérifie la stabilité de l'ensemble vis-à-vis du cisaillement du sol.

3. CONDITIONS DE STABILITE D'UN MUR DE SOUTENEMENT

Dans plusieurs des problèmes qui se rencontrent dans l'étude de la stabilité des constructions, le poids propre des parties que l'on se propose de calculer est assez peu important, relativement aux forces extérieures, pour qu'on puisse le négliger ou l'apprécier arbitrairement dans un premier calcul. Il est ainsi possible de déterminer presque sans tâtonnements les dimensions convenables des diverses parties de la construction. Il n'en peut être de même pour les murs de soutènement, car la seule force qu'ils puissent opposer à la poussée des terres ou de l'eau réside dans leur poids propre. Lorsque l'on cherche à déterminer algébriquement les conditions de stabilité d'un mur d'un type donné, et à en déduire l'épaisseur à la base, on arrive à des formules d'un calcul si laborieux qu'il est de beaucoup préférable d'avoir recours à une série de tâtonnements et l'on arrivera assez rapidement à un résultat convenable si l'on a choisi judicieusement le type du mur dont on veut vérifier les conditions de stabilité. Le problème doit en effet être posé en ces termes.

Étant donné le profil d'un mur et la poussée à laquelle il doit résister, vérifier s'il réalise les conditions de stabilité sans excès de force. S'il n'en est pas ainsi, il est facile de modifier ses dimensions et de vérifier à nouveau. Lorsqu'il s'agit d'un mur de retenue d'eau dont la poussée est exactement connue, on pourra limiter le cube des maçonneries au strict nécessaire, tandis que lorsqu'il s'agit de poussée de terres dont le talus naturel n'est pas déterminé d'une manière bien rigoureuse, il serait oiseux de pousser très loin les tâtonnements ; mais encore ici la théorie sera utile comme contrôle des dimensions que l'expérience ou les formules empiriques auraient indiquées.

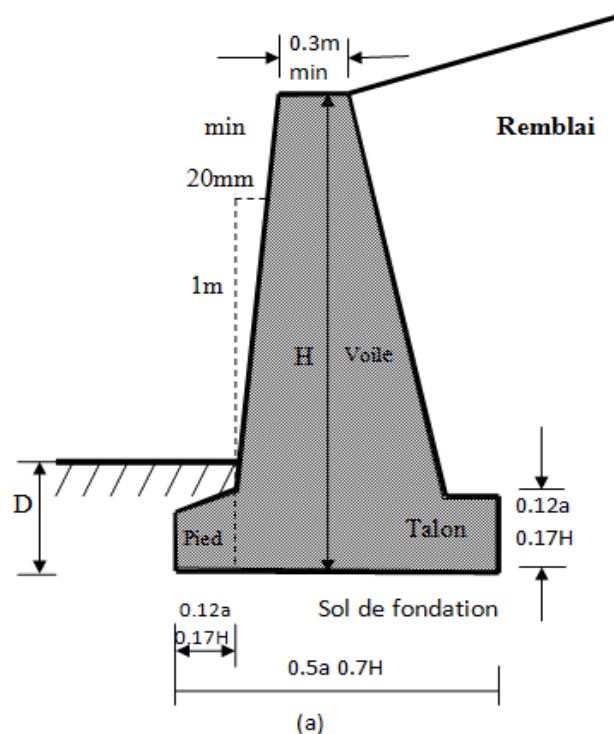
3.1 PREDIMENTIONNEMENT DES MURS DE SOUTÈNEMENT

Pour la conception des murs de soutènement, l'ingénieur suppose certaines dimensions et vérifie la stabilité de son ouvrage. Si cette dernière ne vérifie pas les dimensions sont modifiées et la vérification de la stabilité est vérifiée une deuxième fois et ainsi de suite jusqu'à satisfaction .

La figure (1) donne pour un mur poids et cantilever les différentes dimensions sous forme de proportions de la hauteur totale du mur (H).

Le sommet du mur de soutènement doit être supérieur ou égale à 0,3 m afin de pouvoir couler le béton dans le système de coffrage. La profondeur de fondation $D_f \geq 0,6$ m, cette condition permet à la base du mur d'être loin de la zone du gel dégel du sol.

Le redimensionnement des murs en contrefort est le même que celui des murs cantilever. Les raidisseurs sont de 0,3 mètres d'épaisseur posés un intervalle régulier de 0,3 à 0,7H.



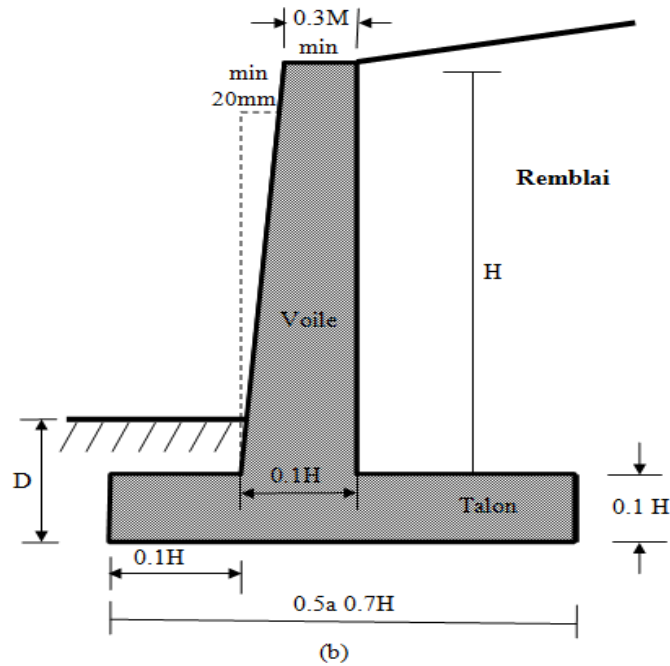


Figure 1 : Pré dimensionnement d'un mur de soutènement

(a) voile avec surface inclinée (b) voile avec surface droite.

3.2 Les Différences forces agissant sur un ouvrage de soutènement

Considérons un ouvrage de soutènement simple, par exemple un mur en béton retenant un massif de sol, figure 2, et examinons sommairement les types de sollicitations qui s'exercent sur ce mur. En dehors des forces de pesanteur, représentées par le poids du mur, s'exercent sur les faces du mur, en contact avec le sol, trois forces dont la connaissance est du ressort de la mécanique des sols :

- sur la face amont du mur, généralement verticale, le massif de sol retenu exerce des efforts ayant tendance soit à renverser le mur, soit à le déplacer horizontalement. La résultante générale de ces efforts est une force dont la composante principale est horizontale. On l'appelle force de poussée (ou encore poussée) et on la note F_a , l'indice « a » précisant qu'il s'agit d'une force active ;

- sur la face aval du mur, dont la partie enterrée est souvent faible, le sol exerce des efforts qui ont tendance à retenir le mur. Leur résultante générale est une force dont la composante principale est horizontale et opposée à la composante horizontale de F_p . On appelle cette résultante force de butée (ou encore butée) et on la note F_p , l'indice « p » précisant qu'il s'agit d'une force passive ;

- Sur la base du mur, le sol de fondation exerce des efforts dont la résultante générale est une force inclinée par rapport à la verticale. Sa composante verticale, notée N , est appelée force portante, tandis que la composante horizontale, notée T , est appelée force de résistance au glissement, car elle s'oppose au glissement du mur sur sa base sous l'action de la force de poussée.

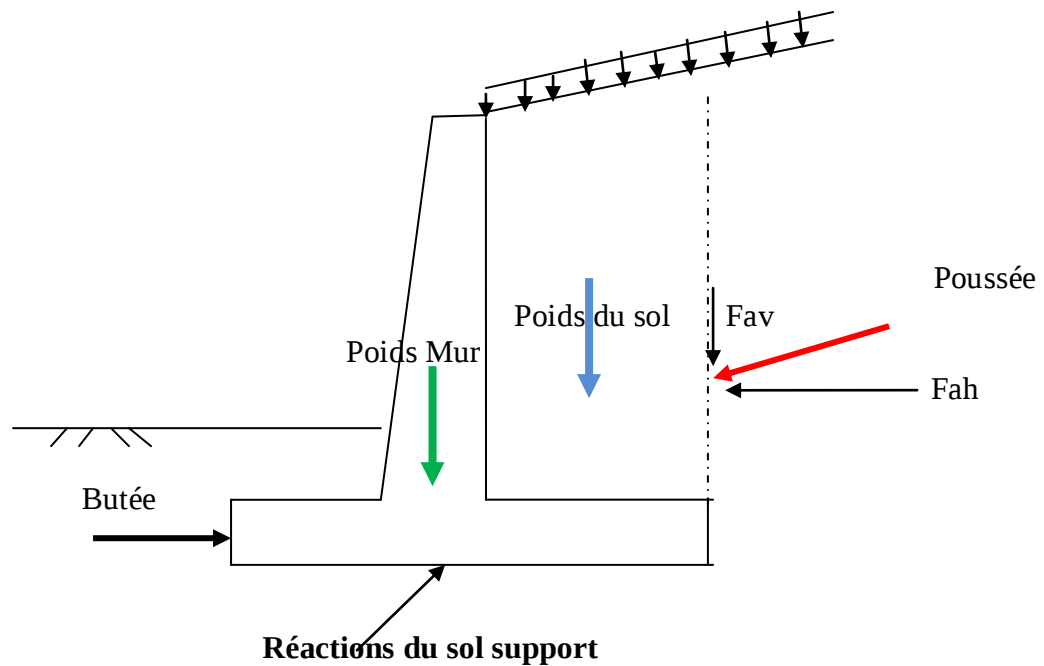


Figure 2 : Forces agissants sur un mur de soutènement

Le calcul des efforts de poussée ou de butée dans les ouvrages de soutènement doit tenir compte des paramètres et des facteurs suivants :

- le poids volumique du sol;
- la résistance au cisaillement du sol ;
- le frottement entre le sol et l'ouvrage ;
- l'inclinaison de la surface du sol à l'amont et à l'aval de l'ouvrage ;
- les déformations et déplacements relatifs de l'ouvrage par rapport au sol ;
- la présence d'une nappe d'eau ;
- les surcharges à la surface du sol.

Même si l'étude de la stabilité externe des ouvrages de soutènement repose sur des méthodes de calcul à la rupture, la poussée ou la butée calculée tient compte des déformations de service de l'ouvrage. Ainsi, lorsqu'il n'y a pas possibilité de déplacement d'un mur de soutènement, comme cela est le cas pour les murs latéraux d'un pont cadre, la force de poussée doit être calculée avec le coefficient de pression des terres au repos et non avec le coefficient de poussée .

4. Mode de rupture des murs de soutènement et calcul de la stabilité

Cinq modes de rupture peuvent être rencontrés dans les ouvrages de soutènement figure 3 :

- le glissement de l'ouvrage sur sa base (figure 3.a) ;
- le renversement de l'ouvrage (figure 3.b) ;
- le poinçonnement du sol de fondation (figure 3.c) ;
- le grand glissement englobant l'ouvrage (figure 3.d) ;
- la rupture des éléments structuraux de l'ouvrage (figure 3.e).

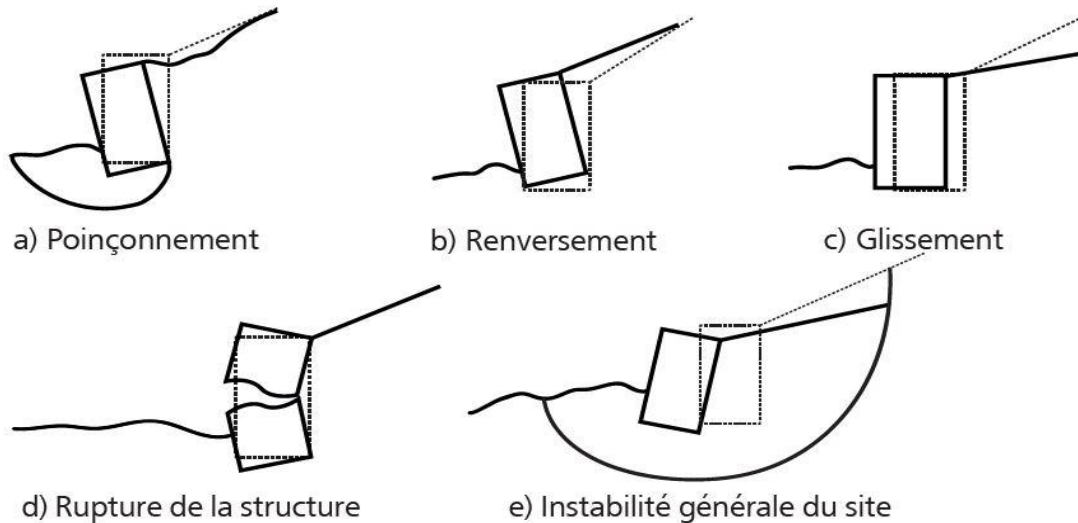


Figure 3 : Modes de rupture des murs de soutènement

Les quatre premiers types de rupture sont relatifs à l'instabilité externe de l'ouvrage, la rupture des éléments structuraux constituant l'instabilité interne. Les parois de soutènement (rideaux de palplanches, parois moulées) ont une instabilité externe limitée aux ruptures par renversement et par glissement. Par contre, on rencontre dans ce type d'ouvrage une rupture par renard hydraulique lorsqu'existe une dénivellation de nappe de part et d'autre de la paroi. L'étude de la stabilité externe d'un ouvrage de soutènement fait appel à des concepts et à des méthodes de calcul qui sont communs à l'ensemble des ouvrages. Par contre, l'étude de la stabilité interne est assez spécifique à chaque type d'ouvrage. Cette partie de cours concerne les trois premiers modes de rupture.

5. CALCUL DE LA STABILITE DES MURS

La vérification à la stabilité d'un mur de soutènement comprend la vérification à la stabilité globale et la vérification à la stabilité locale c'est-à-dire :

- a. Stabilité au renversement
- b. stabilité au glissement
- c. la stabilité du sol de fondation

5.1. Vérification à la stabilité locale

Seules les stabilités au renversement, au glissement sont traitées dans cette section.

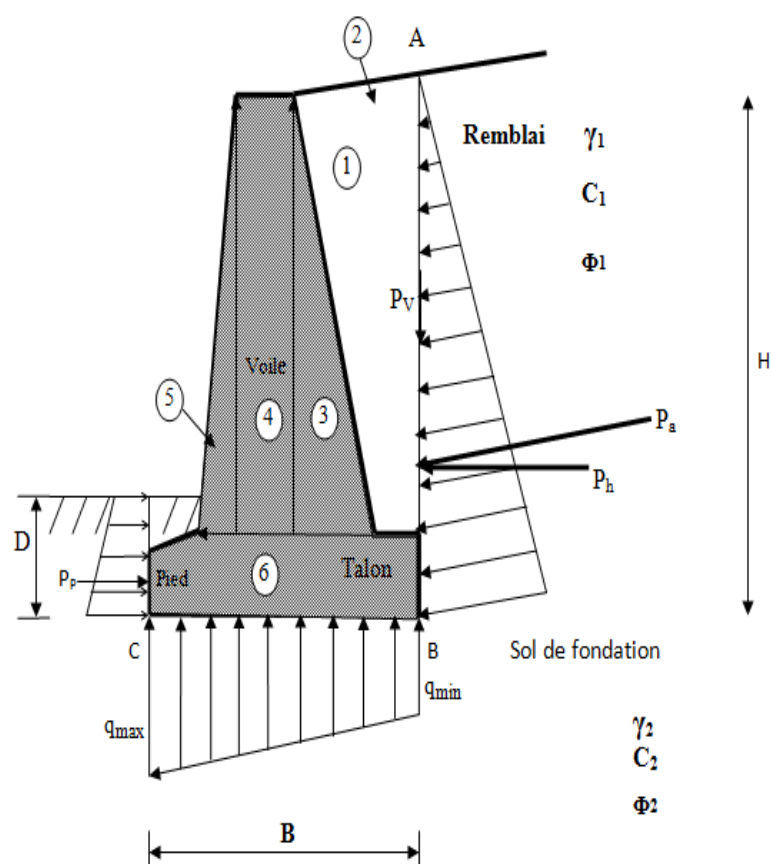
a. Stabilité au renversement

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

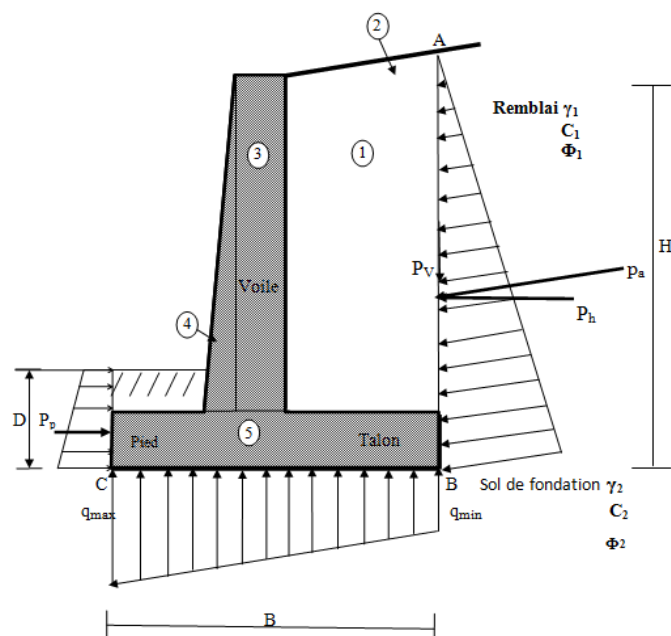
- Forces de renversement : poussée, résultante éventuelle des sous-pressions de l'eau.
- **Force stabilisatrices** : poids, butée.

Si la condition suffisante n'est pas vérifiée, la stabilité au renversement est assurée si:

$$F_R = \frac{\sum \text{moment stabilisants}}{\sum \text{moment renversants}} \quad (1)$$



(a)



(b)

Figure 4 : Stabilité au renversement d'un mur

(a) voile avec surface incliné (b) voile avec surface droite.

b. Stabilité au glissement sur la base

On doit s'assurer que les contraintes de cisaillement mobilisées à la base du mur sont en deçà de la résistance à l'adhérence base/sol. Par analogie avec le critère de rupture du sol de Mohr-Coulomb, on écrit que la contrainte de cisaillement maximum à la base du mur ou résistance à l'adhérence est égale à :

La stabilité au glissement à la base est assurée si ce coefficient est au moins égal à 1.50 :

$$F_G = Fr/Fm \geq 1.50 \quad (3)$$

tel que :

Fr représente la somme des forces résistantes

$$Fr = R_v \cdot \tan \delta + B \cdot C_a + F_p$$

R_v : Résultante des forces verticales

$$\delta = (1/2; 2/3) \phi_2$$

$$C_a = (0.5; 0.75) C_2$$

F_p : Force de butée

F_m représente l'ensemble des forces motrices .

Par souci de prudence, il est couramment recommandé de négliger une éventuelle butée sur la semelle, notamment à l'aval du mur. En outre, la résistance au glissement peut être améliorée en munissant la base de la semelle par un système de bûches dans lequel le frottement se fait sol/sol .

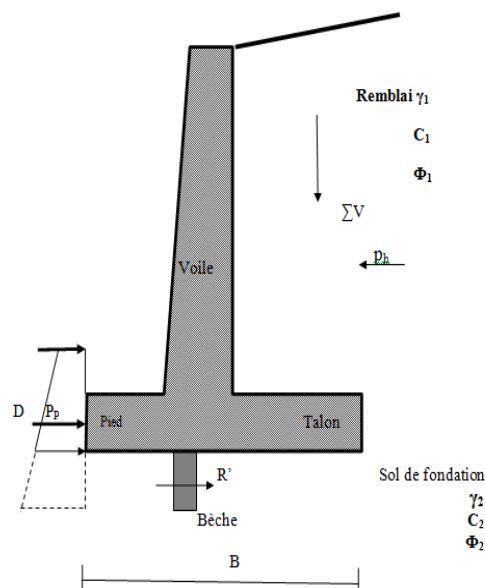


Figure 5 : Stabilité au glissement d'un mur

c. la stabilité du sol de fondation

la pression verticale transmise au sol par l'intermédiaire de la base du mur de soutènement doit être vérifiée vis-à-vis du cisaillement du sol.

La répartition des contraintes verticales sous la fondation est illustrée sur la figure (6) où $q_{\text{piéd}}$ et q_{talon} sont les valeurs max et min.

Si la somme des force verticales appliquées à la base est $\sum v$ et la force horizontale est $P_a \cdot \cos \alpha$, alors la résultante des forces R est :

$$R = \sum V + (P_a \cdot \cos \alpha) \quad (5)$$

Le moment résiduel de ces forces par rapport au point c est

$$M_{\text{net}} = \sum MR - \sum M0 \quad (6)$$

la ligne d'action de la résultante R coupe la base du mur au point E. la distance CE est donnée par :

$$CE = X = M_{\text{net}} / \sum V \quad (7)$$

D'où l'excentricité de la résultante R est :

$$e = \frac{B}{2} - X$$

$$e = \frac{B}{2} - \frac{\sum MR - \sum M0}{\sum V} \quad (8)$$

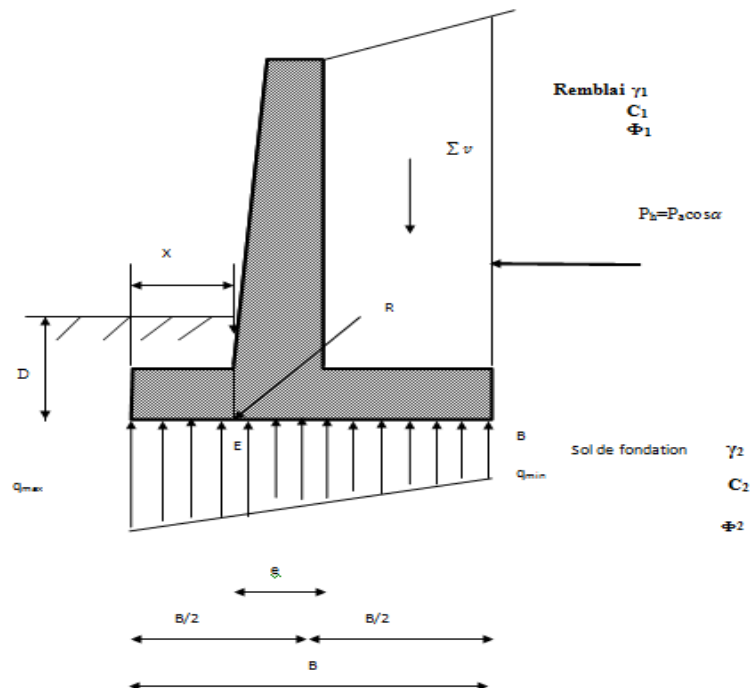


Figure 6: Capacité portante du sol

La distribution de la pression sous la base de fondation est déterminée par le principe simple de la RDM.

$$q_{\max} = \frac{\sum V}{A} + \frac{M_{net.Y}}{I} \quad \text{et} \quad q_{\min} = \frac{\sum V}{A} - \frac{M_{net.Y}}{I} \quad (9)$$

Pour les pressions max et min, la valeur de y est égale à $\frac{B}{2}$, ce qui donne :

$$q_{\max} = q_{\text{peid}} = \frac{\sum V}{B \cdot 1} + \frac{e \cdot (\sum V) B / 2}{\frac{1}{12} (B^3)} = \frac{\sum V}{(B)} \left(1 + \frac{6e}{B}\right) \quad \text{et}$$

$$q_{\min} = q_{\text{talon}} = \frac{\sum V}{B \cdot 1} - \frac{e \cdot (\sum V) B / 2}{\frac{1}{12} (B^3)} = \frac{\sum V}{(B)} \left(1 - \frac{6e}{B}\right) \quad (10)$$

La somme des forces $\sum V$ englobe aussi le poids du sol.

Si $e < \frac{B}{2}$ ($q_{\min} < 0$) il y a alors naissance des contraintes de traction dans le sol. Il faut éviter ce cas en dimensionnant à nouveau l'ouvrage de soutènement, et refaire les calculs.

La capacité portante ultime (limite) du sol q_u est calculée par l'équation de MEYERHOF (1976) :

$$q_u = c \cdot N_c \cdot F_{cd} \cdot F_{ci} + q \cdot N_q \cdot F_{qd} \cdot F_{qi} = 1/2 \cdot \gamma \cdot B' \cdot N_\gamma \cdot F_{\gamma d} \cdot F_{\gamma i} \quad (11)$$

Les coefficients de capacité portante sont donnés par les formules simples de MEYERHOF :

$$N_c = (N_q - 1) \cot \theta \quad (12)$$

$$N_q = \tan^2 \left(45 + \frac{\theta}{2} \right) \cdot e^{\pi \tan \theta} \quad (13)$$

$$N_\gamma = (N_q - 1) \cot \theta \quad (14)$$

La fondation du mur est considérée comme étant une fondation continue (filante). Une fois la capacité portante limite déterminée, le coefficient de sécurité est obtenu en divisant la capacité portante ultime par la contrainte max. au niveau de la fondation :

$$F_{s(\text{capacité portante})} = q_u / q_{\max} \quad (15)$$

Le coefficient de sécurité nécessaire pour la stabilité de la fondation vis-à-vis du cisaillement est $F_s \geq 3$.

5.2 Vérification à la stabilité globale

en plus des modes de rupture discutés auparavant deux autres types d'instabilité peuvent se produire .

5.2.1. Rupture de cisaillement superficielle

En général le coefficient de stabilité contre le glissement horizontal est plus petit que le coefficient de stabilité pour la rupture au cisaillement superficiel représentée sur la figure 7.

Ainsi, si le coefficient F_s (glissement) $\geq 1,5$ la stabilité contre le glissement horizontal et la stabilité contre le cisaillement superficiel sont toutes les deux vérifiées.

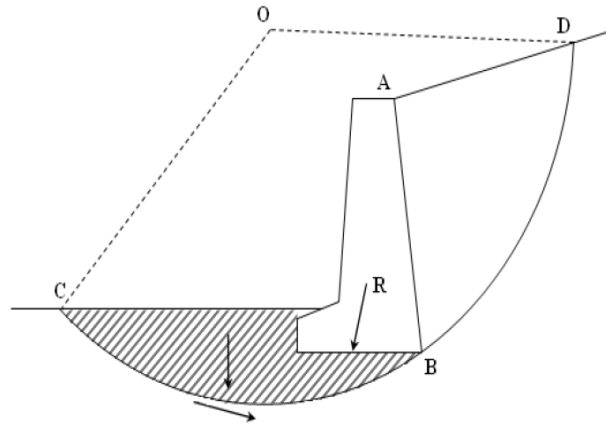


Figure 7 : Rupture superficielle

5.2.2. Rupture de cisaillement en profondeur

Elle est essentiellement due à l'existence des couches de sol à faible résistance à une profondeur $1,5H$ (H étant la hauteur du mur).

La surface de rupture cylindrique est déterminée par itération ou par la méthode log-spiral pour plusieurs centre de rupture 'o'. la surface pour laquelle le coefficient de stabilité est minimum est appelée de glissement critique comme représenté sur les deux figures 7 et 8.

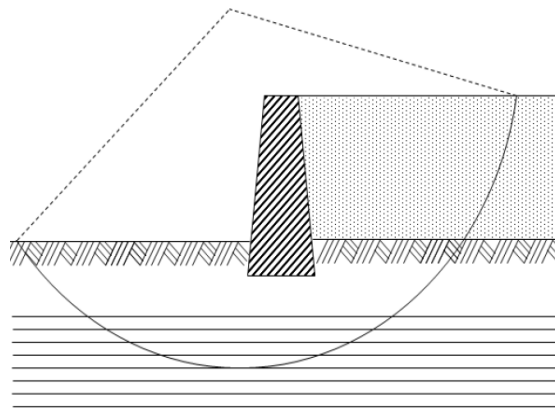


Figure 8: Rupture profonde