

Chapitre 6

Dimensionnement et justifications

6.1 Introduction

Dimensionner un ouvrage de soutènement consiste à déterminer ses éléments géométriques et ses éléments structuraux pour qu'il soit stable sous l'action des forces qui lui sont appliquées et notamment de la poussée des terres qu'il retient. La plupart des méthodes de dimensionnement reposent sur des calculs à la rupture avec la prise en compte de coefficients de sécurité.

6.2 Modes de rupture des ouvrages de soutènement

Cinq modes de rupture, illustrés à la figure 3 peuvent être rencontrés dans les ouvrages de soutènement rigides (figure 6.1) [3] [15] :

- le glissement de l'ouvrage sur sa base,
- le renversement de l'ouvrage,
- le poinçonnement du sol de fondation,
- le grand glissement englobant l'ouvrage,
- la rupture des éléments structuraux de l'ouvrage.

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 ouvrages de soutènement flexibles 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 l'ouvrage (figure 6.2).

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.

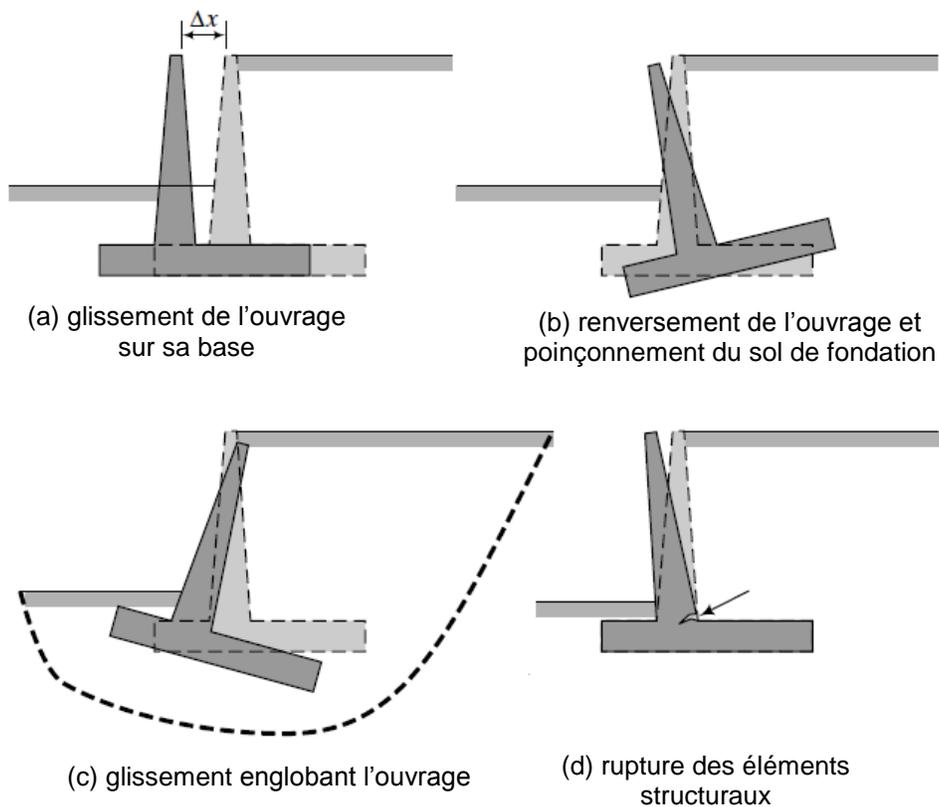


Figure 6.1 Modes de rupture des ouvrages de soutènement rigides [3]

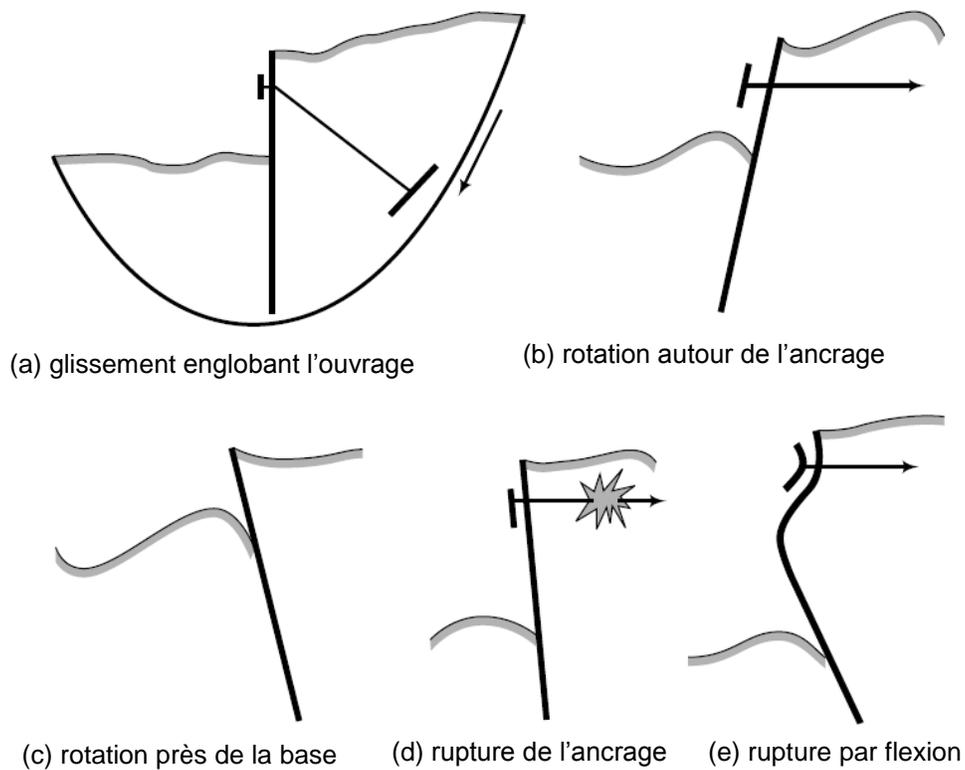


Figure 6.2 Modes de rupture des ouvrages de soutènement flexibles [3]

6.3 Dimensionnement des murs de soutènement rigides

Le dimensionnement d'un mur rigide se base sur l'hypothèse d'un mur très long, et le calcul se fait ainsi pour une longueur unité. La hauteur du mur, ainsi que sa rugosité sont des données du problème, et souvent on cherche la largeur du mur vérifiant simultanément les critères suivants de stabilité du système sol/mur [1] [3] [4] [10] [11] [15] [18] :

- stabilité au renversement du mur,
- stabilité au glissement à la base du mur,
- capacité portante du sol sous la fondation,
- stabilité au glissement général du sol derrière le mur,
- tassement du sol sous la semelle du mur,
- résistance du matériau du mur.

6.3.1 Forces agissant sur le mur

Les figures 6.3a et b montrent les efforts s'appliquant sur les murs. En général, la poussée est appliquée sur un écran fictif vertical passant par le talon AA' de la semelle.

- poids propre du mur W_1 et des terres situées sur la fondation W_2 ,
- résultantes de la poussée des terres F_a ,
- résultante de la butée des terres F_p ; cette butée est négligée lorsque la fondation est superficielle,
- résultante des efforts qui s'appliquent sur la semelle R .

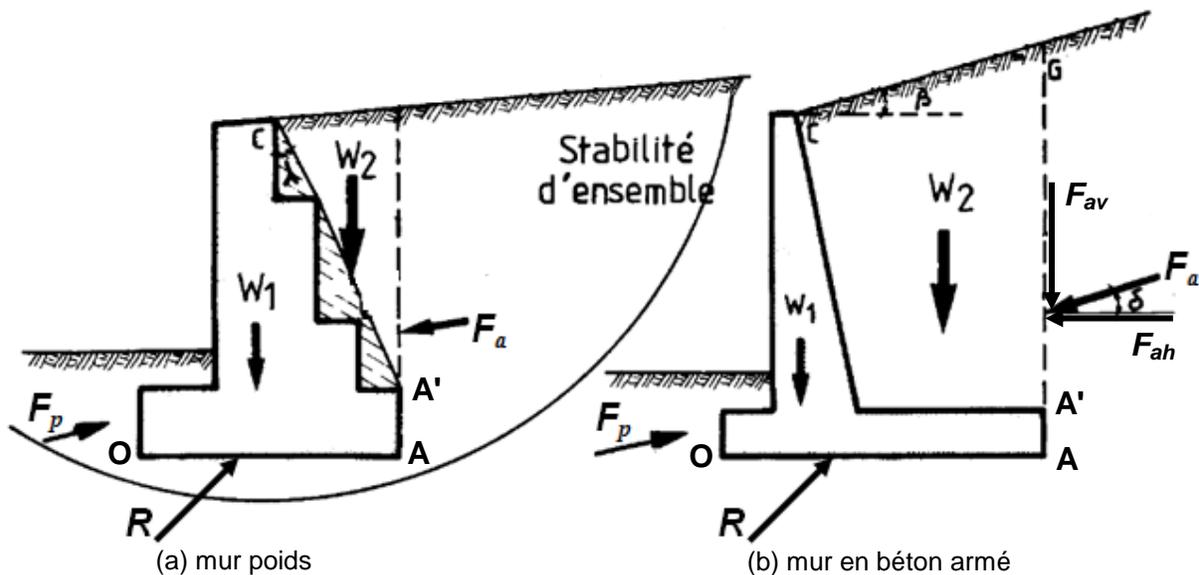


Figure 6.3 Définitions des actions [1]

6.3.2 Stabilité au renversement

La poussée totale sur le parement due à la poussée des terres et aux surcharges tend à faire basculer le mur par rotation autour du point O. Le poids du mur et de la terre au-dessus du talon tend à s'opposer à cette rotation, soit :

- moment stabilisateur M_s : moment de F_{av} , W_1 et W_2 par rapport à O,
- moment de renversement M_r : moment de F_{ah} par rapport à O,
- F_{sr} coefficient de sécurité vis à vis du renversement pris généralement supérieur ou égal à 1.5.

La condition de sécurité vis à vis du renversement s'écrit:

$$F_{sr} = \frac{M_s}{M_r} \geq 1.5 \quad (6.1)$$

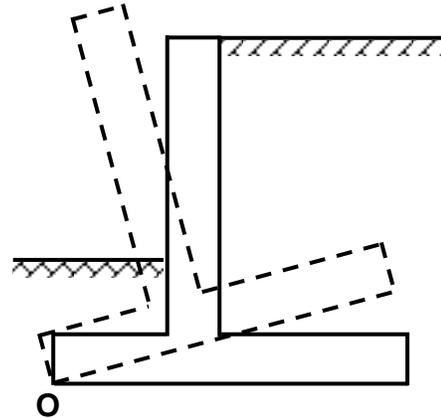


Figure 6.4 Renversement du mur

Remarque

Une condition suffisante de stabilité est formulée par la règle du "tiers central" qui stipule que la stabilité est assurée si la résultante R des forces passe par le tiers central de la base du mur, soit $e \leq B/6$, e étant l'excentricité de R par rapport au milieu de la base de la semelle du mur.

En cas d'un sol mou de résistance médiocre, il est recommandé d'éviter les moments de renversement en dimensionnant la semelle telle que l'excentricité $e \approx 0$ [10] [18].

6.3.3 Stabilité au glissement

La composante horizontale de la poussée des terres F_{ah} tend à provoquer le glissement suivant la base du mur. Si l'on néglige la butée (toujours), la seule force s'opposant au glissement est la résistance au cisaillement mobilisable sous la base de la semelle; Soit :

- ψ_a : l'angle de frottement sol/ la base (interface sol/semelle du mur), pris souvent égal à $2\varphi/3$,
- a : l'adhérence sol/base du mur (liée à cohésion du sol c et à la rugosité δ' du mur),

- R : la résultante des forces extérieures agissant sur l'ouvrage, avec :
 - N : composante verticale de R
 - T : composante horizontale de R
- F_{sg} : coefficient de sécurité vis à vis du glissement pris généralement supérieur ou égal à 1.5.

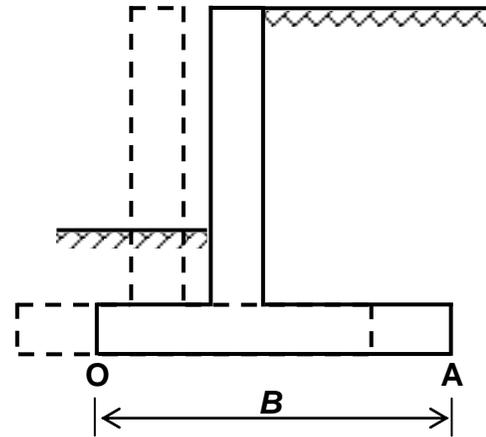


Figure 6.5 Glissement du mur

La résistance au cisaillement mobilisable le long de OA s'écrit :

$$S = a \cdot B + N \cdot \operatorname{tg} \psi_a \quad (6.2)$$

avec B : la largeur de la semelle du mur.

Le coefficient de sécurité au glissement s'exprime comme le rapport des forces horizontales qui peuvent s'opposer au glissement aux forces horizontales qui tendent à le provoquer, d'où :

$$F_{sg} = \frac{S}{T} = \frac{a \cdot B + N \cdot \operatorname{tg} \psi_a}{T} \geq 1.5 \quad (6.3)$$

En cas d'un sol frottant ($\varphi \neq 0$) à la base du mur, pour des raisons de sécurité, on néglige l'adhérence a , ce qui permet d'écrire l'expression suivante du coefficient de sécurité F_{sg} :

$$F_{sg} = \frac{\operatorname{tg} \psi_a}{\operatorname{tg} \theta} \geq 1.5 \quad (6.4)$$

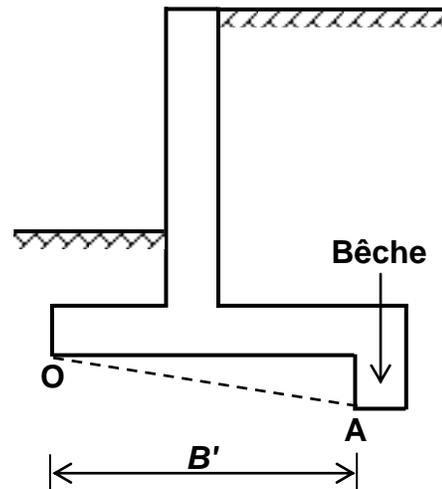
L'angle θ est l'inclinaison de la résultante R des efforts sur le mur par rapport à l'axe central vertical de la semelle.

En cas d'un sol purement cohérent à la base du mur ($\varphi = 0$), la résistance à l'adhérence sera réduite à a . Ce dernier peut être pris égal à $2c_u/3$, c_u étant la cohésion non drainée du sol d'assise à la base du mur. La stabilité au glissement à la base est assurée si :

$$F_{sg} = \frac{a \cdot B}{T} \geq 1.50 \quad (6.5)$$

Remarque

- 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 cisaillement peut être améliorée en munissant la base de la semelle par un système de bèches dans lequel le frottement se fait sol/sol et on peut ainsi prendre ψ_a égal à φ (figure 6.6),
- La largeur de la semelle du mur B devient B' dans le cas d’une semelle avec bêche pour le calcul de la résistance au cisaillement S .

**Figure 6.6** Mur en béton avec bêche**6.3.4 Stabilité du sol de fondation**

L’action des différentes forces conduit à une résultante oblique R et excentrée au niveau de OB . La vérification consiste à comparer la contrainte de référence q_{ref} , définie ci-après à la contrainte admissible q_a pour le sol de fondation.

Deux approches sont utilisées pour déterminer la contrainte de référence [1] [11] :

a) *Contrainte aux trois quarts*

- Si $e \leq \frac{B}{6}$, la résultante est dans le tiers central. On doit vérifier que :

$$q_{ref} = \frac{3q_{max} + q_{min}}{4} = q_0 \left(1 + \frac{3e}{B}\right) \leq q_a \quad (6.6)$$

avec :

$$q_{max} = \frac{N}{B} \left(1 + \frac{6e}{B}\right)$$

$$q_{min} = \frac{N}{B} \left(1 - \frac{6e}{B}\right)$$

$$q_0 = \frac{N}{B}$$

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

$$d = \frac{M_s - M_r}{N}$$

– Si $\frac{B}{6} < e < \frac{B}{2}$, la résultante est hors du tiers central. On doit vérifier que :

$$q_{ref} = \frac{3}{4} q_{max} = q_0 \left(1 + \frac{3e}{B} \right) \leq q_a \tag{6.7}$$

avec :

$$q_{max} = \frac{2N}{3d}$$

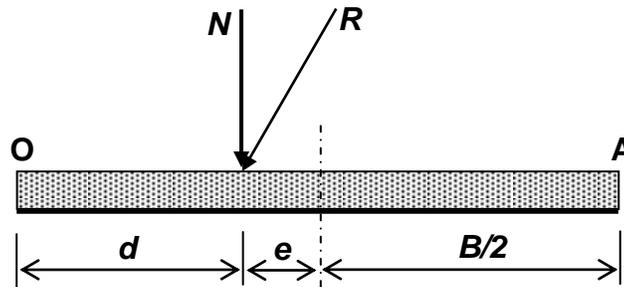


Figure 6.7 Stabilité du sol de fondation [11]

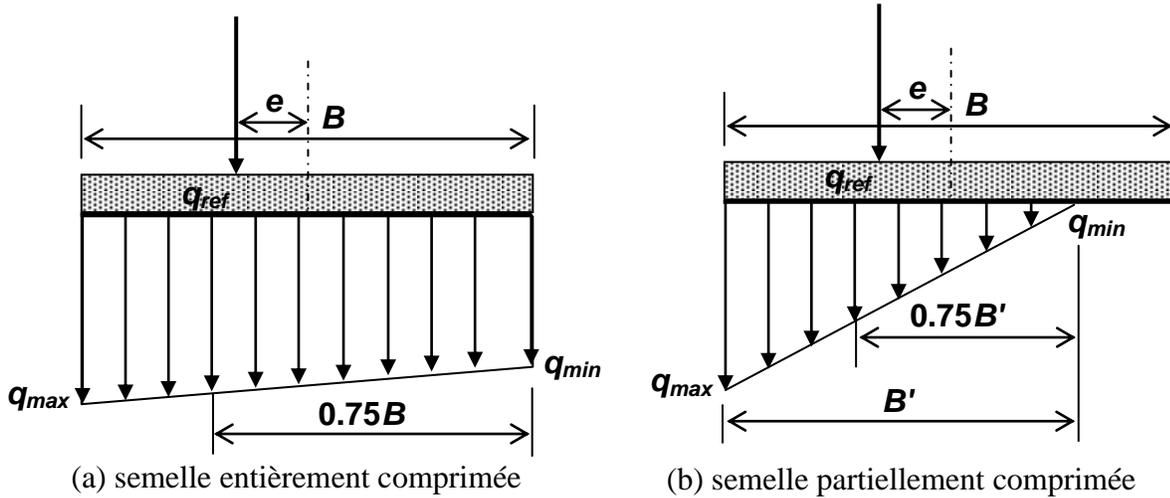


Figure 6.8 Répartition théorique des contraintes sur le sol de fondation [11]

b) Méthode de Meyerhof

La méthode de Meyerhof consiste à considérer comme contrainte de référence la contrainte verticale moyenne sur une largeur égale à la largeur de la semelle diminuée de deux fois l'excentrement de la résultante.

$$q_{ref} = \frac{N}{B - 2e} \leq q_a \tag{6.8}$$

Remarques

1. la contrainte admissible q_a se calcule selon les méthodes de la capacité portante des fondations superficielles, ceci en tenant compte de l'inclinaison de la résultante,
2. les murs en maçonnerie ou en béton armé lorsque la fondation est compressible, sont dimensionnés pour que l'excentrement e reste inférieur à $B/6$ (résultante dans le tiers central),
3. pour les mure en béton armé reposant sur des sols résistants, une excentricité $e < B/4$ est admissible.

6.3.5 Stabilité au glissement général

Il y a rupture du mur par grand glissement lorsque la partie du massif de sol qui glisse englobe le mur, la surface de rupture passant alors à l'arrière du mur (figure 6.9). On utilise, en général, des surfaces de rupture cylindriques, à section circulaire, et l'on détermine par un calcul systématique, le plus souvent fait à l'ordinateur, la valeur minimale du coefficient de sécurité et la position du cercle de rupture correspondant. Les méthodes de calcul ont été exposées au chapitre 2. La valeur du coefficient de sécurité doit être supérieure ou égale à 1.5.

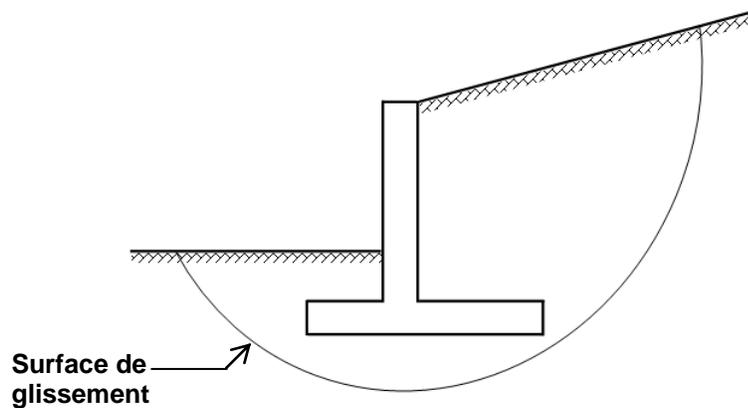


Figure 6.9 Rupture par grand glissement

6.3.6 Résistance du matériau du mur

Il s'agit de dimensionner les éléments de la structure du mur à l'aide d'un calcul classique en béton armé.

6.3.7 Tassement du sol sous le mur

Le calcul est identique à celui du tassement d'une fondation superficielle [24]. Le tassement S_b du sol *sous le mur* doit être inférieur à celui du sol *derrière le mur*, soit S_r (figure 6.10a), sinon un changement dans l'obliquité des pressions (poussées dirigées vers le haut et butées vers le bas)

peut conduire à une amplification des pressions et par conséquent à une instabilité du mur sous forme de glissement ou renversement prononcés (figure 6.10b).

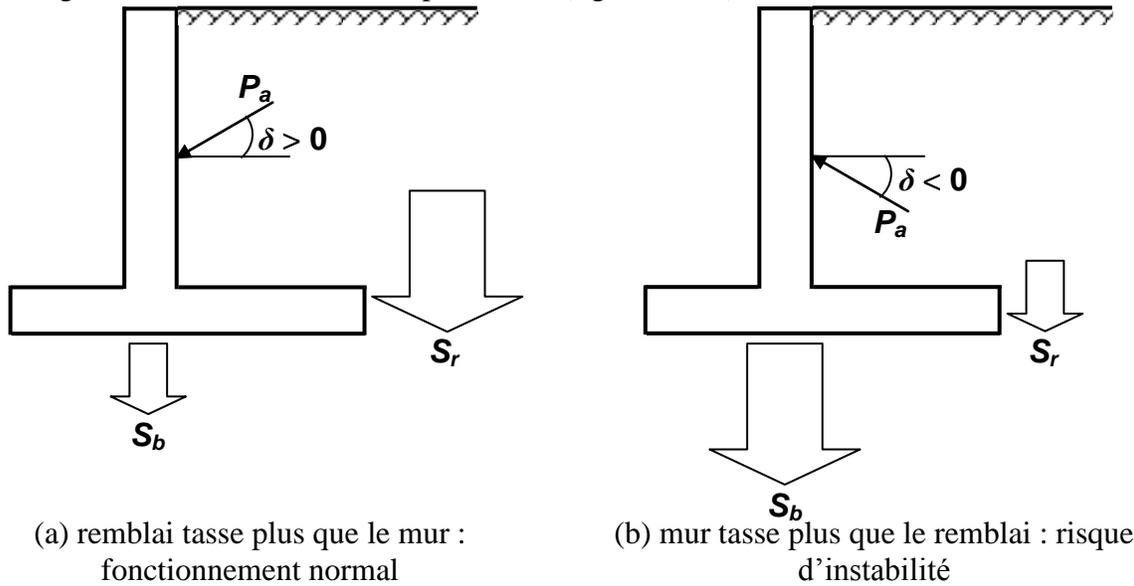


Figure 6.10 Différents cas de tassement relatif sol/mur [10]

6.3.8 Dimensions usuelles des murs de soutènement rigides

Les figures 6.11 et 6.12 montrent les dimensions les plus courantes des ouvrages de soutènement rigides. Ces indications peuvent servir pour dégrossir un avant-projet.

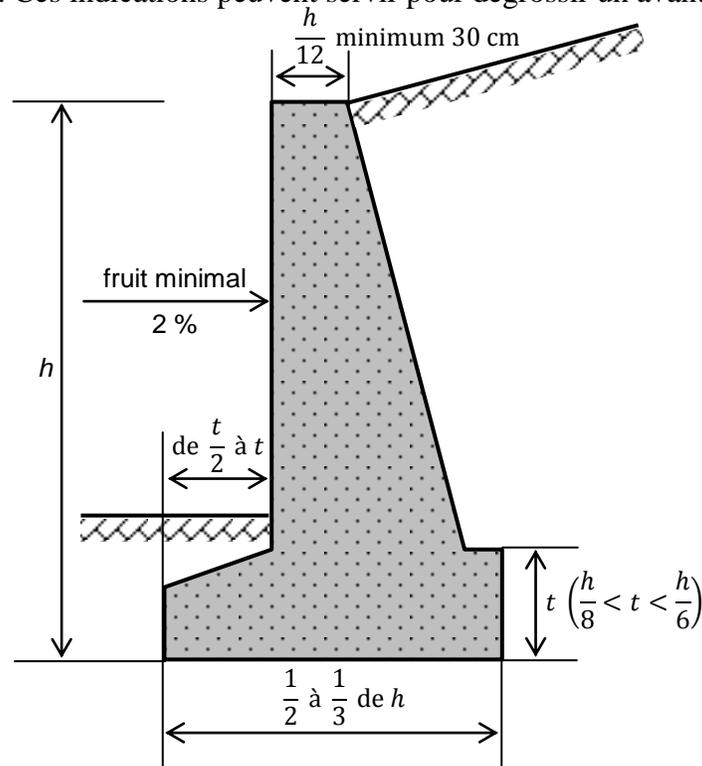


Figure 6.11 Dimensions usuelles d'un mur poids [11]

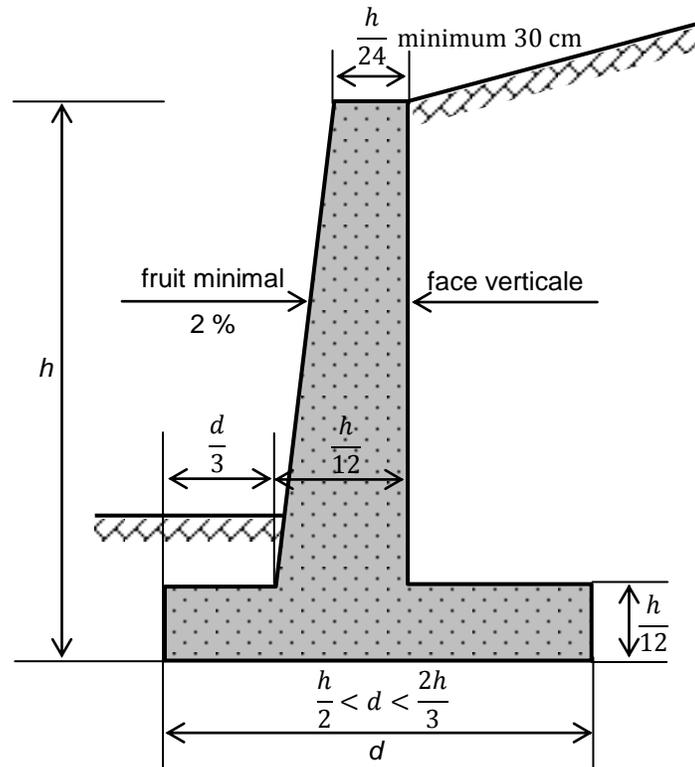


Figure 6.12 Dimensions usuelles d'un mur en béton armé [11]

6.4 Dimensionnement des murs de soutènement flexibles

On s'intéresse dans ce paragraphe au dimensionnement des rideaux de palplanches et des parois moulées. En ce qui concerne le dimensionnement de ces ouvrages, il convient de distinguer :

- les rideaux simplement encastrés en pied (sans ancrage) concevables uniquement pour des ouvrages de faible hauteur,
- les rideaux avec ancrage simple ou multiples.

Le dimensionnement d'un rideau consiste à déterminer, comme le schématise la figure 6.13, les éléments suivants [1] [10] [18] :

- la fiche D minimale ou partie encastrée du rideau,
- l'effort F dans l'ancrage et dimensionnement du tirant d'ancrage,
- les efforts dans les rideaux (moment fléchissant et effort tranchant),
- la stabilité au glissement général de l'ensemble sol/rideau, en déterminant le coefficient de sécurité F_s au glissement le long de la surface étudiée,

- la flèche u_0 ou déplacement en tête du rideau.

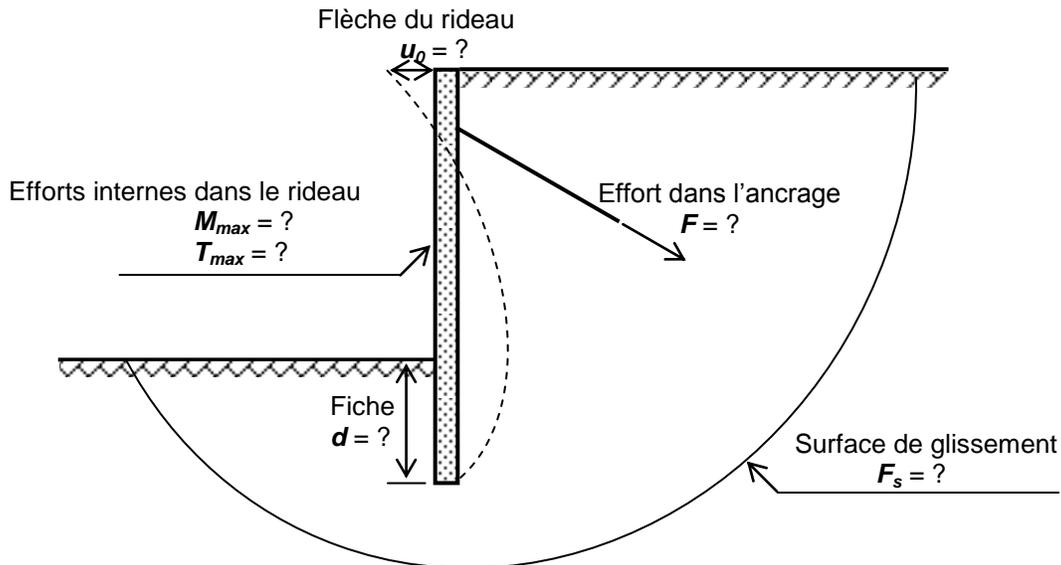


Figure 6.13 Schéma des inconnues du dimensionnement d'un mur flexible [10]

6.4.1 Méthodes de calcul

Les méthodes de calcul d'un rideau plan se divisent en général en trois grandes catégories :

- méthodes de la théorie de poussée/butée des écrans,
- méthodes de la théorie du module de réaction,
- méthode des éléments finis.

La première catégorie se base sur une équilibre limite du sol autour du rideau. Les profils de pression de poussée et/ou de butée sont calculés et l'équilibre statique du rideau permet de déterminer la fiche et les efforts dans le rideau et dans le tirant d'ancrage.

Il est usuellement recommandé d'utiliser ces méthodes en phase préliminaire en vue d'un prédimensionnement de la fiche du rideau, ou lors du dimensionnement dans un modeste projet de rideaux [1] [25].

Les paramètres géotechniques requis par ces méthodes sont le poids volumique γ , l'angle de frottement φ et la cohésion c .

L'interface sol/rideau est supposée avoir une certaine rugosité. Le tableau 6.1 récapitule les valeurs courantes de l'obliquité δ (+ pour la poussée et - pour la butée), aussi bien pour les sables que les argiles [1] [10] [18].

Les deux autres catégories considèrent le sol plutôt comme un matériau élasto-plastique. Elles tiennent ainsi compte de la rigidité relative sol/rideau et supposent que les pressions mobilisées dans le sol dépendent du déplacement du rideau à la profondeur étudiée. Elle nécessitent cependant un calcul automatique sur ordinateur.

On se limite ci-après à l'étude des méthodes de la première catégorie.

Tableau 6.1 Valeurs recommandées du rapport δ/φ [1]

Parement ⁽¹⁾	Angle de frottement interne du sol					
	< 30°		30 à 35		> 35°	
	Poussée	Butée	Poussée	Butée	Poussée	Butée
Lisse	0	-1/3	0	-2/3	+1/3	-2/3
Rugueux	0	-1/3	+1/3	-2/3	+2/3	-2/3
Très rugueux	+1/3	-1/3	+2/3	-2/3	+2/3	-2/3

(1) Lorsque les mur de soutènements retiennent de remblais ou sont équipés d'un tapis drainant synthétique, il convient d'adopter $\delta = 0$ pour la poussée.

6.4.2 Méthode de la butée simple

Comme le montre la figure 6.14, considérons un rideau ancré en un point A, et ayant une fiche mobilisant la butée limite sur la fiche du rideau. Les forces agissant sur l'écran sont la force P résultante des poussées à l'amont, la force B résultante de la butée limite agissant sur la fiche D et l'effort T dans l'ancrage.

Les inconnues du problème sont donc D et T et la méthodologie des calculs est comme suit :

Étape 1. Écrire les forces de poussée P et de butée B en fonction de la fiche D ,

Étape 2. Écrire que la somme des moments de flexion par rapport au point A est nulle, ce qui aboutit à une équation en D ,

Étape 3. Calculer les forces de P et B ,

Étape 4. Considérer un coefficient de sécurité F_s égal à 2 sur la force de butée et déduire F de l'équilibre des forces horizontales, soit :

$$F = P - B/F_s \tag{6.9}$$

Étape 5. Déterminer les diagrammes du moment de flexion et de l'effort tranchant et en déduire les efforts maximums T_{max} et M_{max} .

Cette méthode est recommandée aux rideaux rigides, ce qui correspond à des rideaux dans des sols mous, ou à des rideaux courts de grande inertie [25].

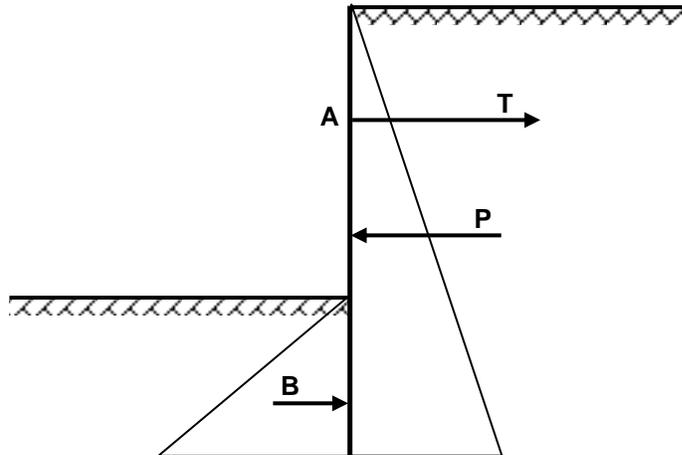


Figure 6.14 Schéma d'un rideau travaillant en butée simple [10]

6.4.3 Méthode du rideau encastré

a) Cas d'un rideau sans tirant d'ancrage

Le problème tel que schématisé à la figure 6.15, repose sur les hypothèses suivantes [1] [10] [25] :

- en deçà du centre de rotation, la poussée côté amont et la butée côté aval atteignent les valeurs limites données par la théorie de poussée/butée,
- la contre-butée est mobilisée sur une hauteur égale à 20 % de la hauteur f_0 sur laquelle est mobilisée la butée,
- la contre-butée est remplacée par une force concentrée C au point du centre de rotation O .

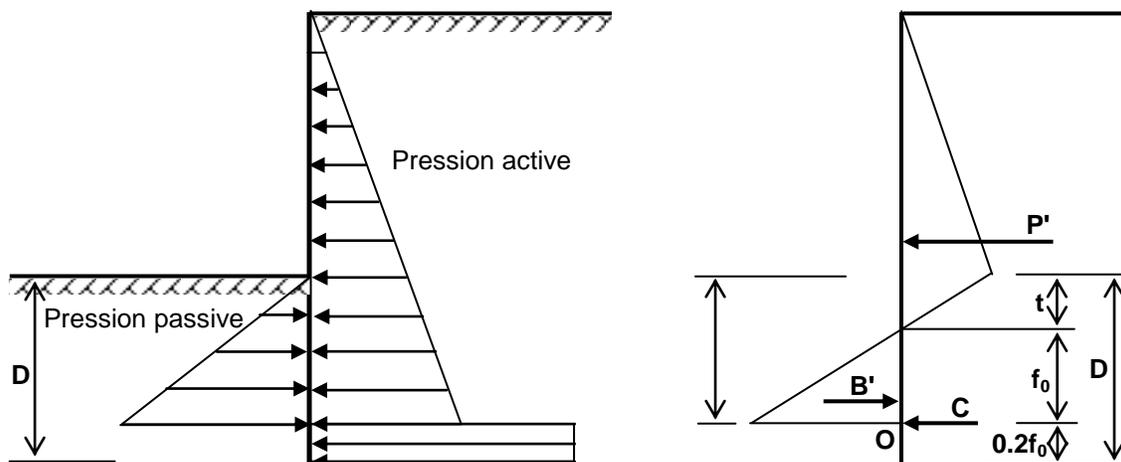


Figure 6.15 Diagramme de pressions d'un rideau encastré sans ancrage [10]

Selon la figure 6.15, le diagramme de calcul résulte de la différence des pressions actives et passives, et peut être remplacé par trois forces : poussée P' , butée B' et contre-butée C . La distance t correspond à l'égalité des pressions active et passive, et est donc connue.

Les inconnues du problème sont donc f_0 et C et la démarche de calculs est comme suit :

Étape 1. Écrire les forces de poussée P' et de butée B' en fonction de la fiche D (ou de f_0),

Étape 2. Écrire que la somme des moments de flexion par rapport au centre de rotation O est nulle, ce qui aboutit à une équation en f_0 ,

Étape 3. Calculer f_0 et en déduire les forces P' et B' , en considérant un coefficient de sécurité F_s égal à 2 sur la force de butée,

Étape 4. Déduire la contre-butée C de l'équilibre des forces horizontales :

$$C = P' - B'/F_s \quad (6.10)$$

Étape 5. Calculer la fiche du rideau :

$$D = t + 1.2f_0 \quad (6.11)$$

Étape 6. Déterminer les diagrammes du moment de flexion et de l'effort tranchant et en déduire les efforts maximums T_{max} et M_{max} .

b) Cas d'un rideau avec tirant d'ancrage

Les hypothèses précédentes restent valables pour ce cas. Comme le montre la figure 6.16, le problème comporte trois inconnues, à savoir la fiche D (ou f_0), la contre-butée C et la force d'ancrage T . Les équations de la statique sont insuffisantes et il y'a lieu d'y ajouter une troisième équation sous forme d'une hypothèse supplémentaire.

On admet que le point de contrainte nulle (ou centre de pression), soit à une profondeur t du fond de fouille selon la figure 6.16, est confondu avec le point de moment nul, ce qui permet de décomposer le rideau en deux poutres sur appuis simples, comme schématisé à la figure 6.17.

Les étapes de calcul sont comme suit :

Étape1. Déterminer la profondeur t du point U en égalisant les pressions de poussée et de butée,

Étape 2. Écrire l'expression de la force de poussée P' dans la poutre supérieure,

Étape 3. Écrire que la somme des moments de flexion par rapport au centre de pression U est nulle, ce qui permet de déduire l'effort T dans le tirant,

Étape 4. De l'équilibre des forces horizontales de la poutre supérieure déduire la réaction R au point U,

Étape 5. Écrire que la somme des moments par rapport au point O dans la poutre inférieure est nulle, ce qui permet de déduire f_0 et la fiche D ,

Étape 6. De l'équilibre des forces horizontales de la poutre inférieure déduire la contre-butée C ,

Étape 7. Déterminer les diagrammes du moment de flexion et de l'effort tranchant et en déduire les efforts maximums T_{max} et M_{max} .

Une telle approche est appelée *méthode des poutres équivalentes*. Notons qu'on considère un coefficient de sécurité égal à 1 sur la butée dans cette méthode.

La méthode du rideau encasté est bien adaptée aux rideaux présentant une certaine flexibilité et fichés dans des sols résistants. La méthode des poutres équivalentes est limitée aux sols pulvérulents [1] [10] [25].

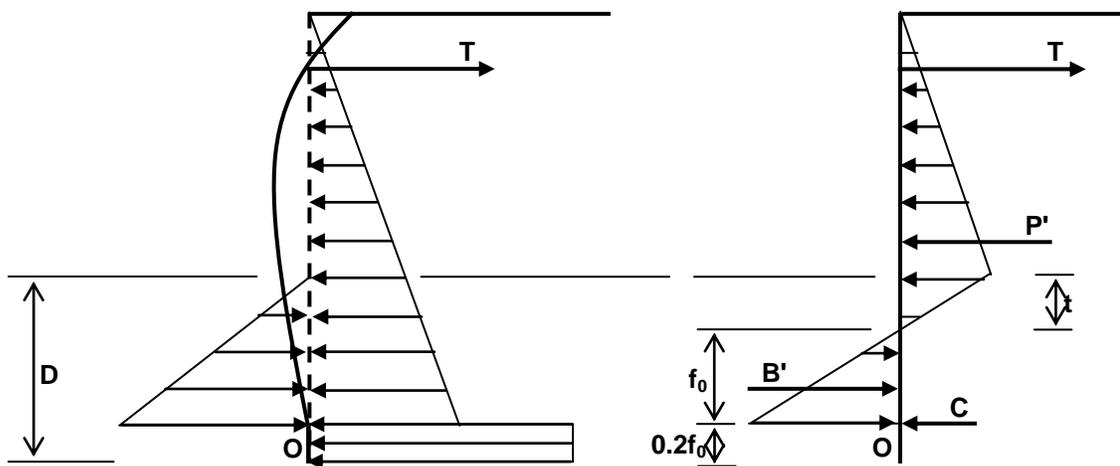


Figure 6.16 Diagramme de pressions d'un rideau encasté avec ancrage [10]

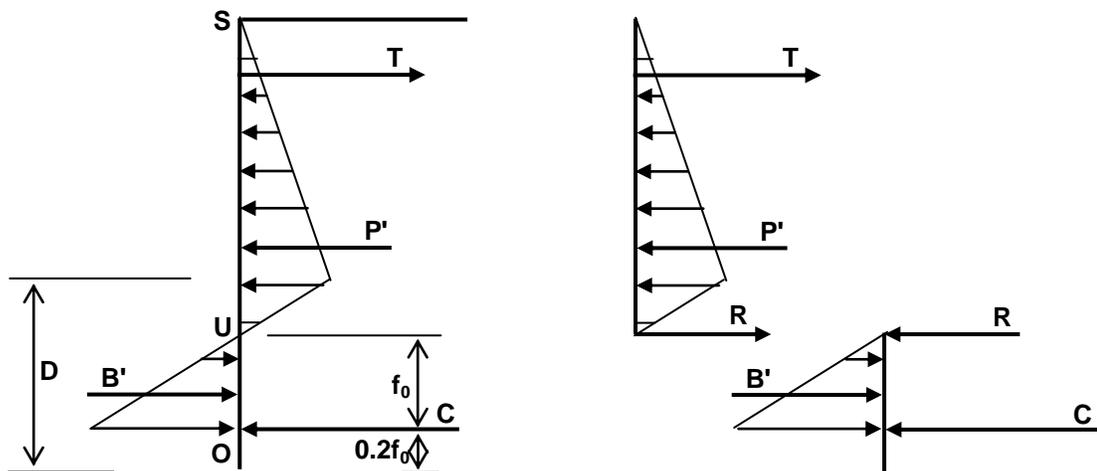


Figure 6.17 Décomposition du rideau encasté avec ancrage en deux poutres équivalentes [10]