

1. Introduction

Les ouvrages de soutènements sont ceux qui retiennent des terrains (sols, roches ou remblais) et de l'eau. Le matériau est retenu par l'ouvrage s'il est maintenu à une pente plus raide que celle qu'il adopterait éventuellement si aucun ouvrage n'était présent. Les ouvrages de soutènement comprennent tous les types de murs et de systèmes d'appui dans lesquels des éléments de structure subissent des forces imposées par le matériau soutenu. Un ouvrage de soutènement est une construction destinée à prévenir l'éboulement ou le glissement d'un talus raide.

Les ouvrages de soutènement sont essentiellement employés, soit en site montagneux pour protéger les chaussées routières contre le risque d'éboulement ou d'avalanches, soit en site urbain pour réduire l'emprise d'un talus naturel, en vue de la construction d'une route, d'un bâtiment ou d'un ouvrage d'art.

2. Etat d'équilibre limite d'un sol

Les sols exercent des pressions verticales sur les couches sous-jacentes, ce qui engendre des pressions horizontales. Or, comme le comportement du sol diffère de celui des liquides, la pression horizontale n'est pas égale à la pression verticale. Et c'est la pression horizontale qui exerce une pression sur les ouvrages de soutènements dans le cas générale ; ceux-ci doivent donc être conçus de manière à résister à cette poussée.

Nous verrons donc les différentes approches servant à évaluer la pression horizontale ou poussée des terres (poussée (active) et butée (passive)).

2.1. Sol au repos

Considérons un massif de sol semi-indéfini à surface libre horizontale et n'étant soumis à aucune force extérieure. Soit σ_v la contrainte verticale sur une facette horizontale en un point M quelconque du milieu, figure 1.

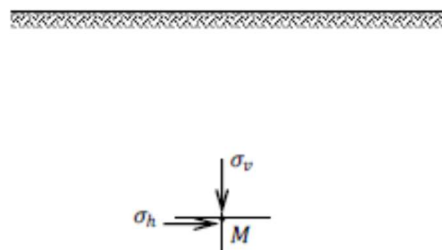


Fig. 1 Contraintes principales dans un sol à surface horizontale

Par raison de symétrie, cette contrainte est principale. Soit σ_h contrainte horizontale principale sur une facette verticale.

Par définition, σ_h et σ_v sont liées par la formule suivante : $\sigma_h = K_0 \sigma_v$

K_0 Coefficient de pression des terres au repos. Est souvent estimé à l'aide de la formule de

Jaky: $K_0 = 1 - \sin \phi'$

Le tableau IV.1 donne les valeurs qui peuvent être retenues comme ordre de grandeur.

Tableau IV. 1 Valeurs de pression des terres au repos K_0

Sable	$K_0 = 0.5$
Argile	$K_0 = 0.7$
Argile très molle, vase	$K_0 = 1$
Roche à très grande profondeur (tunnels profonds)	$K_0 \geq 1$

2.2. Equilibre limite de poussée et de butée

Supposons que, dans le massif semi-indéfini à surface libre horizontale, la partie à gauche de M soit remplacée par un écran. Au point M, la contrainte régnant sur l'écran est égale à σ_h , figure 2.

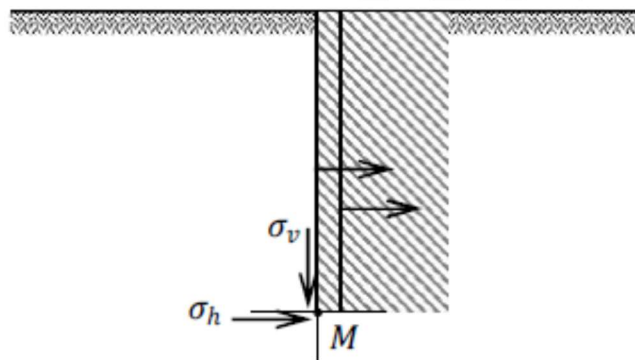


Fig. 2 Déplacement de l'écran ; Butée

Si 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, butée. La contrainte σ_h prend alors la valeur donnée par la formule suivante : $\sigma_h = K_p \sigma_v$

Si, au contraire, le massif se déplace vers la gauche, le sol a tendance à suivre ce mouvement et la contrainte σ_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, poussée, défini par la formule suivante : $\sigma_h = K_a \sigma_v$

K_p Coefficient de butée des terres.

K_a Coefficient de poussée des terres.

3. Force de poussée et force de butée

La force de poussée (force de butée) est la résultante des contraintes, son point d'application se trouve au centre de gravité du diagramme des contraintes, la méthode de superposition est applicable.

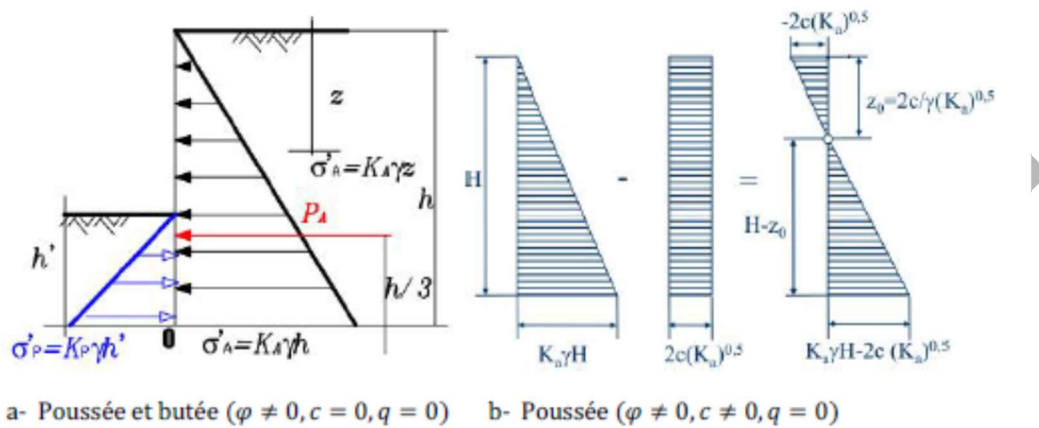
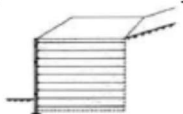
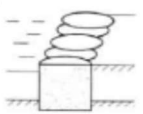
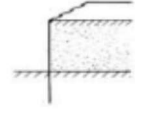
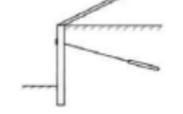
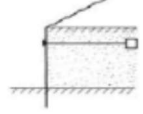


Fig. 3 Distribution de poussée et butée des terres sur un écran

4. Classification des ouvrages de soutènements

Les ouvrages de soutènements sont classés selon plusieurs critères, on peut citer à titre d'exemple, les murs de soutènements et les écrans de soutènements.

Tableau 2 Différents types d'ouvrages de soutènement

Mode de poussée	Ouvrages de soutènement		
Poids	 Murs poids en béton ou en maçonnerie	 Murs en terre armée	 Ouvrages cellulaires
Encastrement	 Mur cantilever en BA	 Paroi moulée	 Rideau de palplanches
Ancrage	 Mur en béton ancré	 Paroi moulée ancrée	 Rideau ancré

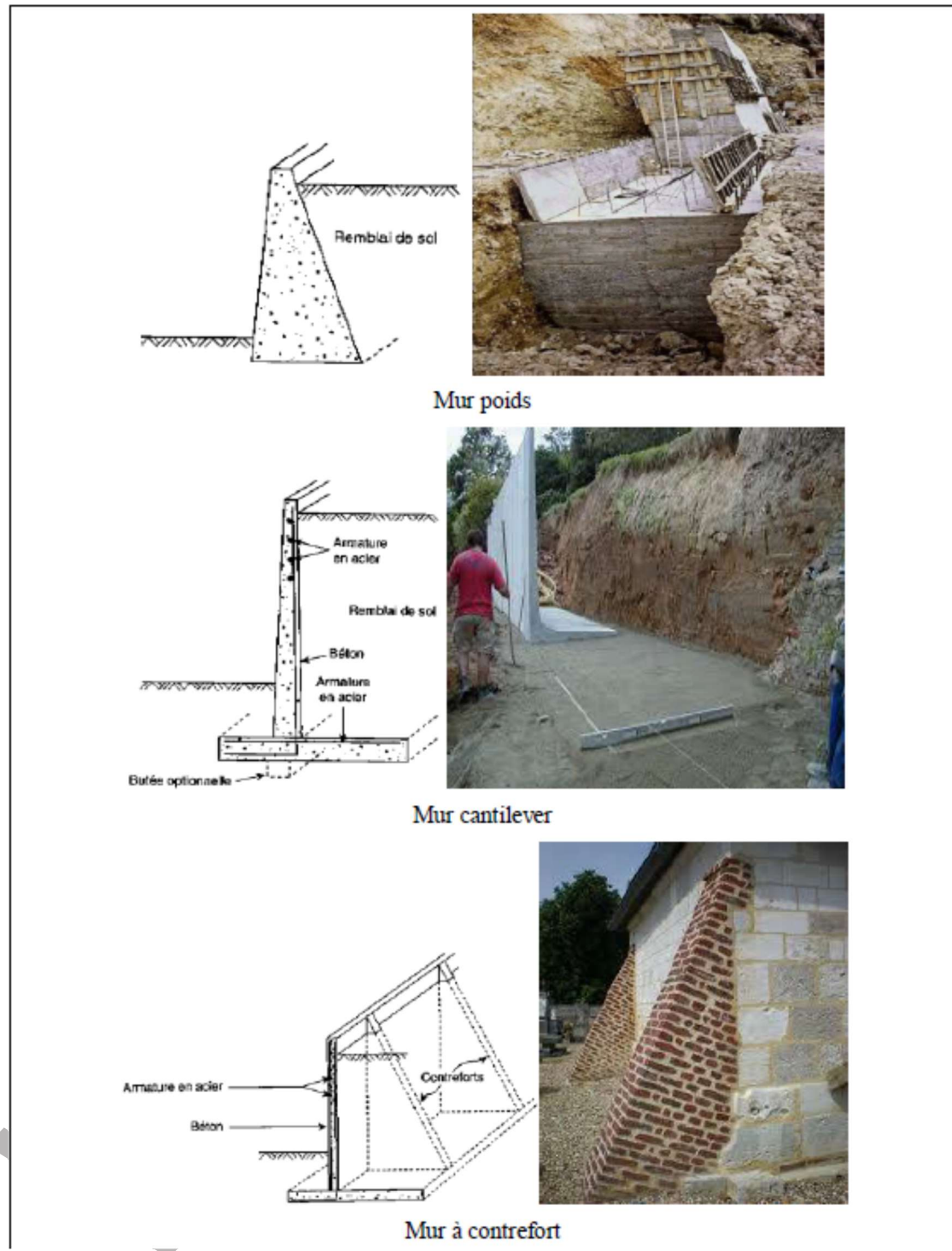


Fig. 4 Quelques types des murs de soutènements

5.1. Les murs de soutènement

Il existe quatre types de murs de soutènements

✓ **Mur poids** : est le plus ancien et le plus simple à construire. Il ne comporte pas d'armature en acier. Sa stabilité est assurée par son poids et sa largeur.

- ✓ **Mur cantilever** : est appuyé sur une large semelle filante. Ce mur en porte-à-faux est relativement mince et nécessite une armature en acier. sa stabilité est assurée par la semelle chargée de sol du côté amont ainsi que par son propre poids. Le sol s'appuyant sur le mur du côté aval de même que la butée optionnelle placée sous la semelle s'opposent aux forces de glissement.
- ✓ **Mur à contreforts** : à l'exception des contreforts qui permettent de réduire son épaisseur, le mur à contreforts ressemble au mur cantilever. Les contreforts sont placés à intervalles réguliers, l'espacement idéal correspondant à la demi hauteur du mur. La stabilité du mur contrefort est assurée par le poids du sol sur la semelle et le poids du mur lui-même.
- ✓ **Mur à caissons** : le mur caissons est le plus résistant. Il est constitué d'un ensemble de boîtes alignées, superposées, ou encore alignées et superposées. Chaque boîte ou caisson est remplie de sol, de pierres ou d'un autre matériau de poids volumique élevé. La stabilité du mur est assurée par la largeur des caissons et le poids du matériau de remplissage.

5.1.1. Frottement sol-mur

Le frottement entre la paroi de soutènement et le sol, frottement sol-mur, est un paramètre dépend de l'ouvrage de soutènement.

Tableau 3 Angle de frottement sol mur en fonction de l'état de surface de la Parementure

Angle de l'interface en fonction de l'état de la surface du parement	
Etat de surface du parement	δ Angle de frottement sol-mur
Surfaces très lisses ou lubrifiées	$\delta = 0$
Surface peu rugueuse (béton lisse, béton traité)	$\delta = \frac{1}{3} \varphi$
Surface rugueuse (béton, béton projeté, maçonnerie, acier...)	$\delta = \frac{2}{3} \varphi$
Murs caissons...	$\delta \geq \frac{2}{3} \varphi$
Parements fictifs inclinés des murs cantilevers	$\delta = \varphi$

5.1.2. 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 5, et examinons sommairement les types de sollicitations qui s'exercent sur ce mur.

En dehors des forces de pesanteur, représentées par le poids W 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;

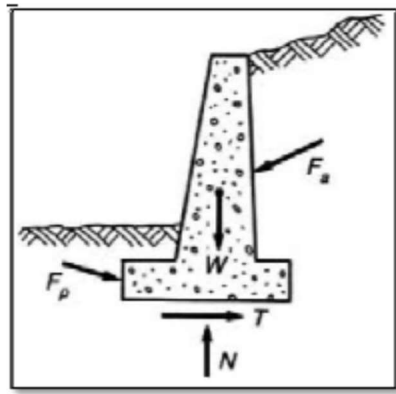


Fig. 5 Sollicitations exercées sur un mur de soutènement

- ✓ 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_a .

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.

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 γ ;
- ✓ la résistance au cisaillement du sol C, φ ;
- ✓ le frottement entre le sol et l'ouvrage δ ;

- ✓ L'inclinaison de la surface du sol à l'amont et à l'aval de l'ouvrage λ, η ;
- ✓ Les déformations et déplacements relatifs de l'ouvrage par rapport au sol ;
- ✓ La présence d'une nappe d'eau γ_w ;
- ✓ Les surcharges à la surface du sol q .

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 K_0 et non avec le coefficient de poussée K_a .

5.1.3. 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 6:

- ✓ le glissement de l'ouvrage sur sa base (figure 6.a) ;
- ✓ le renversement de l'ouvrage (figure 6.b) ;
- ✓ le poinçonnement du sol de fondation (figure 6.c) ;
- ✓ le grand glissement englobant l'ouvrage (figure 6.d) ;
- ✓ la rupture des éléments structuraux de l'ouvrage (figure 6.e).

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.

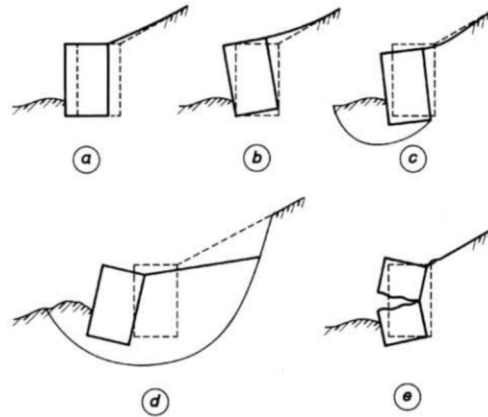


Fig. 6 Modes de rupture des murs de soutènement

✓ La stabilité au renversement

On localise arbitrairement l'axe de rotation du mur au droit de l'arête extérieure de la fondation et on compare les moments par rapport à cet axe.

Moment de force stabilisante : W, P_p

Moment de force renversante : P_a, P_w pression de l'eau.

Le rapport de ces moments est le coefficient de sécurité au renversement

$$\frac{M_S}{M_R} \geq F_{SR}$$

Où $F_{SR} = 1.5$ sans butée et $F_{SR} = 2$ on prend en compte de la butée.

✓ La stabilité au glissement

Vérifier le déplacement du mur par glissement sur le plan de sa fondation, il faut comparer :

La composante tangentielle τ de la résultante R dans le plan de fondation (la composante horizontale) à la résistance que le terrain de fondation est capable d'opposer au glissement, à savoir : $C B + N \tan \delta$.

$$\frac{C B + N \tan \delta}{\sum F_H} \geq F_{SG}$$

Où $F_{SR} = 1.5$ et $F_{SR} = 2$ on prend en compte de la butée et la cohésion.

✓ La stabilité au poinçonnement (la résistance du sol d'assise ou portance de sol)

Vérifier les contraintes appliquées par le mur par rapport à la capacité portante de sol de fondation.

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

Pour assurer la résistance de sol.

$$\sigma_{min} = \frac{N}{B} \left(1 - \frac{6e}{B} \right) \geq 0$$

Pour éviter le soulèvement de la semelle.

Où B la largeur de la semelle, e l'excentricité, σ_{max} , σ_{min} la contrainte maximal et minimale (en aval et en amont) respectivement et σ_{adm} la contrainte admissible de sol.

Pour que $\sigma_{min} \geq 0$ il faut que e est situer au tiers médian de la semelle donc $e \leq B/6$

$$e = e_{/o} = \frac{B}{2} - \frac{M_S - M_R}{\sum F_V}$$

5.1.4. Dimensionnement des murs de soutènement

Dimensionner un mur de soutènement consiste à déterminer sa géométrie et sa structure (ferrailage pour un mur en béton armé) pour qu'il soit stable sous l'action des forces, la géométrie initiale d'un mur de soutènement peut être donnée par :

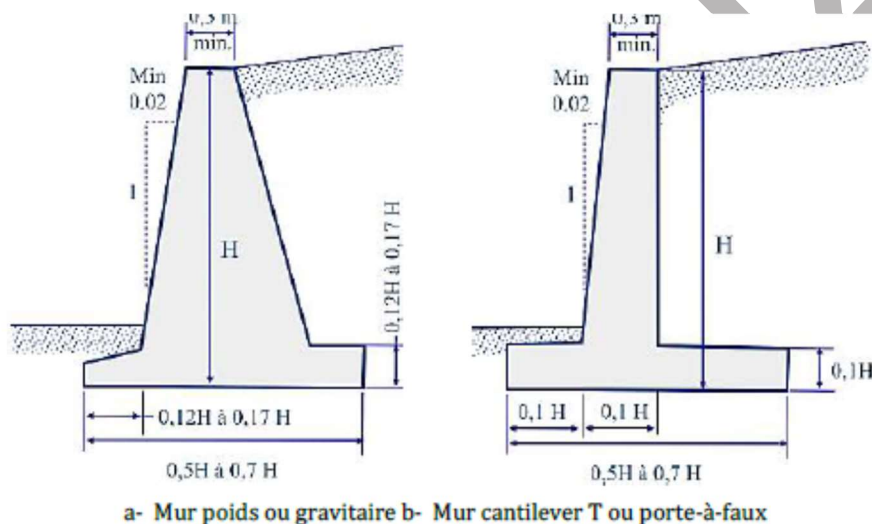


Fig. 7 Dimensionnement d'un mur de soutènement

6. Conclusion

Les ouvrages de soutènements sont construits pour retenir des terrains (sols, roches ou remblais) et de l'eau. Ils comprennent tous les types de murs et de systèmes d'appui dans lesquels des éléments de structure subissent des forces imposées par le matériau soutenu. Le présent chapitre traite les ouvrages de soutènements, où nous avons présenté les différents états d'équilibre limite d'un sol derrière un ouvrage de soutènement, pour un sol pulvérulent ou cohérent à court et long terme et différents cas de charge et de forme. Par la suite, la stabilité au glissement, au renversement et au poinçonnement des murs de soutènement, poids et cantilever, est étudiée, ainsi que leurs dimensionnements. Enfin, on a présenté les écrans de soutènements, leurs modes de mise en œuvre et les méthodes de calcul des différents types des rideaux de palplanche, à

savoir, les rideaux simplement encastrés (butée simple en pied), les rideaux ancrés et encastré en pied et les rideaux ancrés et simplement butés en pied.

W.Khrebizi