

Chapitre 2 : Ouvrage de soutènement



Dr. Boumekik Nour el islam

Université Mohamed kheider Biskra

Faculté des sciences et technologie

Département de Génie Civil

Email : nourelislam.boumekik@univ-biskra.dz

Table des matières



I - Ouvrage de soutènement	3
1. Exercices d'entrés	3
1.1. Exercice	3
1.2. Exercice	3
2. Introduction	3
3. classification des ouvrages de soutènement	4
3.1. Classification des ouvrages de soutènement selon l'Eurocode 7	4
3.2. Classification selon la rigidité de l'ouvrage	5
3.3. Classification selon la manière de reprises des efforts	6
4. Objectif de l'étude d'un ouvrage de soutènement	7
5. Généralités	7
6. Coefficient de pression des terres au repos	8
7. Etats d'équilibre limite de poussée et de butée	10
8. Influence du déplacement de l'écran et de sa rugosité	12
9. Détermination de la poussée et la butée des terres sur un écran	13
9.1. Décomposition des actions	13
10. Détermination des forces de poussée et de butée par la méthode de Coulomb	15
10.1. Cas de la poussée des terres	15
10.2. Cas de la butée des terres	16
11. Exercices d'application	17
11.1. Exercice : Je commence a comprendre mon cour	17
11.2. Exercice	17
Références	18

Ouvrage de soutènement

I

1. Exercices d'entrés

1.1. Exercice

Selon quoi on fait la classification des ouvrages de soutènement ?

- La rigidité
- Selon le matériaux
- Selon la manière de reprises des efforts
- Selon l'endroit

1.2. Exercice

Quelle sont les type de stabilité qu'il faut vérifier pour un mur de soutènement

2. Introduction

Un ouvrage de soutènement est un élément construit dans le but de retenir un massif de sol en place ou de sol rapporté, ce massif pouvant lui-même porter des surcharges. Il peut être aussi utilisé pour retenir l'eau ou d'autres matériaux tels que charbon, argile, etc. Il en existe une large gamme de structures utilisées pour retenir les surfaces verticales du sol et de l'eau en tant que soutènement provisoires ou définitifs.

Les ouvrages de soutènement sont conçus pour répondre aux situations les plus diverses. Ils se distinguent principalement par :

- leur morphologie ;
- leur mode de fonctionnement ;
- les matériaux qui les constituent ;
- leur mode d'exécution ;
- leur domaine d'emploi (urbain, montagneux, aquatique,...).

3. classification des ouvrages de soutènement

3.1. Classification des ouvrages de soutènement selon l'Eurocode 7

D'après la définition de l'Eurocode 7, un ouvrage de soutènement est un élément structural qui retient des terrains (sols, roches ou remblais) et/ou de l'eau.

Les ouvrages sont classés, vis-à-vis du comportement en trois types de soutènement, ils sont caractérisés par des fonctionnements différents et conduisant à des études de stabilité interne spécifiques. Ces trois types d'ouvrages couverts par la norme sont :

3.1.1. Les murs-poids

Définition

Ce type d'ouvrages se comporte comme élément rigide indéformable ou peu déformable. La stabilité est assurée par le poids de l'ouvrage et, en partie, par du remblai derrière le mur. Ce type comprend les murs en pierre, les murs en béton et les murs en béton armé, ayant une semelle à leur base avec ou sans talon, épaulement ou contrefort (Figure 2.1).

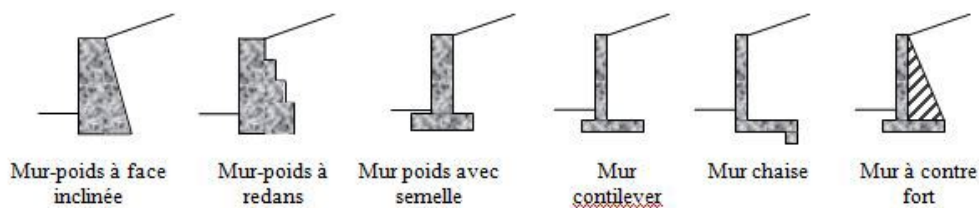


Figure 2.1 Murs-poids

3.1.2. Les écrans de soutènement

Définition

sont des ouvrages flexibles qui regroupent les palplanches auto-stables, les palplanches ancrés ou boutonnés, et les parois moulées, parois préfabriquées, parois de type berlinois, blindage de fouilles, etc. Ce sont des ouvrages de soutènement relativement minces en acier, en béton armé ou en bois supportés par des ancrages, des boutons et/ou la butée des terres. Ce type d'ouvrages est caractérisé par sa résistance à la flexion qui joue un rôle important dans le soutènement des massifs de sols (Figure 2.2).

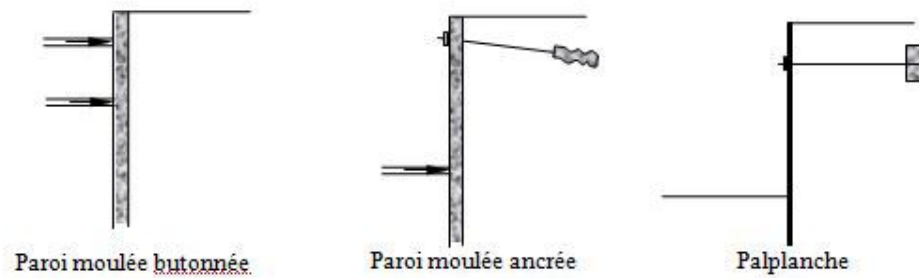


Figure 2.2 Ecrans de soutènement

3.1.3. Les ouvrages de soutènement composites

Définition

sont des ouvrages intermédiaires formés d'éléments appartenant aux deux types précédents (élément rigides et éléments flexibles), il existe un très grand nombre de murs de ce type. On peut citer comme exemple, les ouvrages en terre renforcés par des ancrages, des géotextiles ou des injections, et des ouvrages comportant des rangées multiples d'ancrages ou de clous. Si, par leurs dimensions, ces ouvrages se rapprochent des murs-poids, certains sont néanmoins relativement souples et peuvent tolérer des déformations importantes (Figure 2.3).

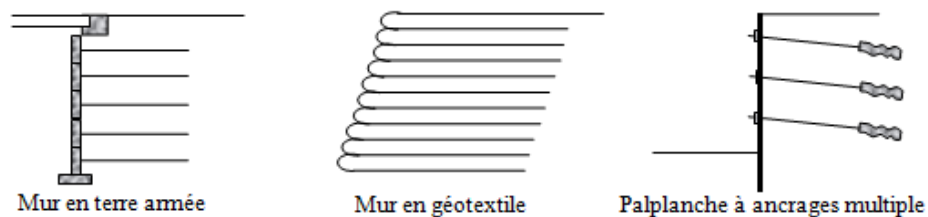


Figure 2.3 Ouvrages de soutènement composite

3.2. Classification selon la rigidité de l'ouvrage

Les ouvrages de soutènement sont également classés en deux catégories selon leur rigidité :

- **Les ouvrages rigides** : Un écran soutenant un massif de sol est dit rigide si la surface de contact sol-écran reste plane après déplacement.
- **Les ouvrages souples** : Un écran est dit souple si la surface de contact sol-écran est flexible.

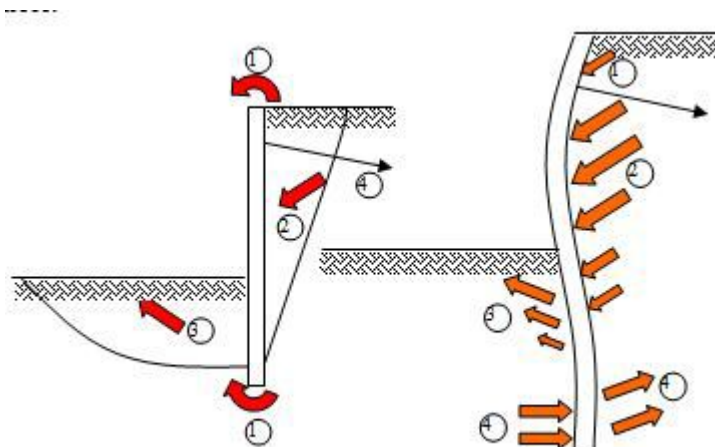


Figure 2.4 Ouvrage rigide/souple

3.3. Classification selon la manière de reprises des efforts

Mestat (1999) a présenté une classification des ouvrages de soutènement qui se distinguent par la manière dont les forces de poussée et de butée exercées par le massif de sol retenu, sont reprises. Cependant, ces forces de poussée et de butée sont généralement reprises soit par le poids de l'ouvrage de soutènement (Tableau 1.1), soit par l'encastrement de l'ouvrage de soutènement (Tableau 1.2), soit par des ancrages (Tableau 1.3).

Type d'ouvrage	Caractéristiques de fonctionnement
Mur-poids en béton ou en maçonnerie	Ouvrage rigide qui ne peut supporter sans dommages des tassements différentiels supérieurs à quelques millièmes de sa hauteur.
Mur en Terre Armée	Le sol retenu est renforcé par des inclusions souples résistant à la traction. Ouvrage souple qui supporte les tassements différentiels du sol de fondation.
Mur cellulaire, batardeau en palplanches, caisson en béton	La cellule est remplie de sol et l'ensemble forme un ouvrage qui peut être, dans certains cas, très souple.

Tableau 2.1– Ouvrages de soutènements qui reprennent la poussée par leur poids d'après Mestat (1999)*

Type d'ouvrage	Caractéristiques de fonctionnement
Mur cantilever en béton armé	Ouvrage rigide doté d'une base élargie et encastree à la partie supérieure du sol de fondation. Il fonctionne en faisant participer à l'action de soutènement une partie du poids du remblai.
Mur en parois moulées	Mur construit dans le sol en place, avant toute excavation, par bétonnage d'une tranchée remplie de boue pour en assurer la stabilité. Il fonctionne par encastrement total ou partiel dans le sol de fondation.

Rideau de palplanches, encastré dans le sol de fondation	Ouvrage flexible pour lequel l'interaction structure-sol retenue a une influence prépondérante sur le comportement de l'ouvrage.
--	--

Tableau 2.2– Ouvrages de soutènement reprenant la poussée par leur encastrement d'après Mestat (1999)

Type d'ouvrage	Caractéristiques de fonctionnement
Paroi moulée ou rideau de palplanches avec des ancrages	Ouvrage flexible renforcé par une série d'ancrages dans le sol. Les ancrages sont des armatures métalliques (câbles ou barres) qui sont attachées d'une part à la paroi (ou au rideau) et d'autre part dans le massif du sol par un corps d'ancrage ou par un scellement avec un coulis d'injection.
Paroi berlinoise	Paroi réalisée à partir de poteaux placés préalablement dans le sol en place. Au fur et à mesure de l'excavation, des éléments préfabriqués (poutres, plaques), ou moulée en place sont placées entre les poteaux. La poussée des terres est reprise par des ancrages fixés sur les poteaux.

Tableau 2.3 – Ouvrages de soutènement reprenant en totalité ou en partie la poussée par leur ancrage dans le massif retenu ou dans le sol de fondation d'après Mestat (1999)

4. Objectif de l'étude d'un ouvrage de soutènement

Un ouvrage de soutènement est généralement considéré comme un ouvrage continu et soumis aux sollicitations suivantes :

- pression du sol exercée par le poids du massif retenu et par les surcharges appliquées et transmises à l'ouvrage par le sol ;
- pression de l'eau au contact des faces avant et arrière ;
- réaction du sol exercée devant l'ouvrage de soutènement, contre la partie enterrée et réaction de l'eau exercée au contact de la même face
- réactions d'appui des tirants ou des butons lorsque l'écran est étayé.

L'étude d'un ouvrage de soutènement a pour objectif de déterminer ses caractéristiques géométriques et mécaniques, compatibles avec la sécurité et l'économie du projet :

- pour un mur-poids : hauteur et profondeur d'encastrement ;
- pour un rideau de palplanches : fiche de l'écran, module des palplanches, forces d'ancrage et dimensions des tirants, caractéristiques des butons ;
- pour une paroi moulée en béton : fiche de l'écran, épaisseur et ferrailage, forces d'ancrage et dimensions des tirants ;
- pour un mur composite : longueur des armatures, hauteur des couches, types de géotextiles ou géogrilles et propriétés du renforcement.

Cf. "Mur de soutènement"

5. Généralités

L'étude des murs de soutènement nécessite la connaissance des états de contraintes dans le sol. Ces états dépendent essentiellement des propriétés du massif de sol retenu et du mouvement du mur. Les trois états d'équilibre qui peuvent être envisagés sont :

- Etat d'équilibre initial
- Etat d'équilibre de poussée
- Etat d'équilibre de butée

Lorsqu'un massif de sol soutenu par un mur de soutènement rigide est en équilibre élastique, le mur ne peut ni se déformer, ni se déplacer ; ainsi que le sol ne peut pas présenter de déformation latérale (dilatation ou compression) : Dans cet **état d'équilibre initiales**, le massif exerce sur le mur une action désignée sous le nom de pression naturelle des terres ou de pression au repos.

On peut passer de l'état primitif d'équilibre élastique du sol à l'état d'équilibre plastique par deux opérations différentes.

Si l'on écarte d'une manière quelconque le mur du massif de sol, on constate que l'action du terrain sur le mur décroît, le sol est l'objet d'une expansion dans le sens horizontal, la pression sur la paroi verticale du mur diminue jusqu'à ce que les conditions d'équilibre plastique soient satisfaites, la pression verticale restant inchangée. A partir de cet état, toute augmentation nouvelle de déplacement provoque simplement un écoulement plastique sans changer l'état des contraintes. Le passage de l'équilibre élastique à l'écoulement plastique représente la rupture du sol. Si le déplacement se poursuit, on constate l'ouverture des fissures dans le massif et une partie du terrain suit l'écran dans son mouvement. Cet état est appelé **état d'équilibre limite de poussée** qui se produit pour une faible déformation horizontale.

Le mécanisme est analogue lorsqu'on refoule le mur contre le massif, le sol est comprimé dans le sens horizontal, la pression sur la paroi verticale du mur augmente avec le déplacement de celui-ci tandis que la pression verticale due au poids propre du sol reste inchangée. Puisque la compression latérale est empêchée par le poids du sol, la rupture qui s'ensuit par écoulement plastique représente **l'état d'équilibre limite de butée** dans le massif.

6. Coefficient de pression des terres au repos

Définition

Le coefficient de pression des terres au repos, est un paramètre géotechnique important. Il permet de caractériser l'état de contrainte effective dans un sol en place en présentant le rapport des contraintes horizontales et verticales à l'intérieur d'un massif dont la surface libre est horizontale.

on considère une masse de sol de poids volumique γ limité par une surface horizontale et soumise à l'action de la pesanteur (Figure 2.5). La masse est limitée par un mur lisse AB. Un élément de sol placé à une profondeur z sera soumis à une pression verticale σ_v et une pression horizontale σ_h . La contrainte verticale est donc connue $\sigma_z = \sigma_v = \gamma.z$. Pour obtenir la contrainte horizontale σ_x ou σ_h il faudrait connaître la loi de comportement du sol.

Si le mur AB ne se déplace ni à droite ni à gauche par rapport à sa position initiale la masse de sol sera dans un état d'équilibre élastique; c'est-à-dire la déformation horizontale est nulle. Le rapport entre la contrainte horizontale et la contrainte verticale est appelé **le coefficient de pression des terres au repos , K_0** .

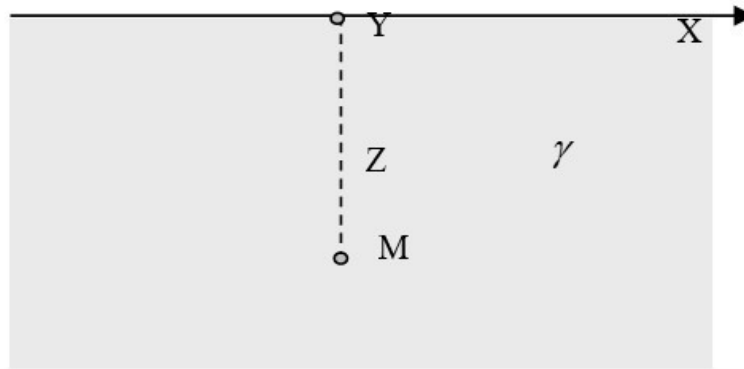


Figure 2.5 Massif infini

Lors d'un essai triaxial drainé ($u=0$ au cours de l'essai), dans lequel on augmente la contrainte σ_1 de telle sorte que la déformation horizontale reste nulle, on constate que la contrainte effective horizontale est proportionnelle à la contrainte effective verticale.

Le rapport entre la contrainte effective horizontale et la contrainte effective verticale est appelé le **coefficient de pression des terres au repos**. On note

$$K_0 = \sigma_h / \sigma_v \dots\dots\dots 2.1$$

Lorsque il s'agit de matériau de remblai contenant un pourcentage important d'argile, le coefficient K_0 est compris entre 0,5 et 1 suivant le mode d'exécution du remblai, le compactage et les caractéristiques de consolidation du matériau.

Le coefficient de pression des terres au repos K_0 peut être évalué à partir :

- des relations théoriques : leur domaine est limité pour les sols normalement consolidés, par exemple : formule de Jaky (1948) *.
- des essais au laboratoire :
- d'essais en place (essais au pressiomètre auto foreur) ;
- d'expressions empiriques relie ce paramètre à d'autres paramètres géotechniques (angle de frottement interne, pression de préconsolidation), lorsque l'histoire du chargement est relativement simple.

Plusieurs formules théoriques et empiriques sont données pour l'estimation de K_0 pour un sol normalement consolidé. Généralement l'expression la plus utilisée est celle donnée par Jaky (1948), qui tient compte de l'angle de frottement du sol :

$$K_0 = 1 - \sin(\varphi) \dots\dots\dots 2.2$$

Cette expression est largement utilisée à cause de ses significations pratiques et sa simplicité, mais elle est limitée pour les sols normalement consolidés.

D'autres auteurs ont proposé, pour les sables et graviers, l'expression :

$$K_0 = \frac{1 - \sin(\varphi')}{\cos(\varphi')} \dots\dots\dots 2.3$$

Cette expression donne des résultats plus élevés que ceux de la formule de Jaky.

Les expressions du coefficient de pression des terres au repos

7. Etats d'équilibre limite de poussée et de butée

L'action des terres sur un écran peut être analysée à partir de l'hypothèse suivante :

- sol travaillant en phase plastique (poussée active ou butée passive)

La détermination de l'action des terres sur l'écran en plasticité suppose :

- un écran rigide,
- un milieu homogène isotrope,
- un massif entièrement à l'état limite de rupture plastique généralisée, ce qui signifie qu'en tout point le critère de Coulomb est vérifié :

$$\tau = C + \sigma' \cdot \tan(\varphi) \dots\dots\dots 2.4$$

Soit un sol homogène, sans eau, à surface horizontale non chargée. Dans le cas où il n'y a pas de possibilité de déplacement latéral, les contraintes effectives verticales et horizontales sont :

$$\sigma'_v = \gamma \cdot h \dots\dots\dots 2.5$$

$$\sigma'_k = K_0 \cdot \gamma \cdot h \dots\dots\dots 2.6$$

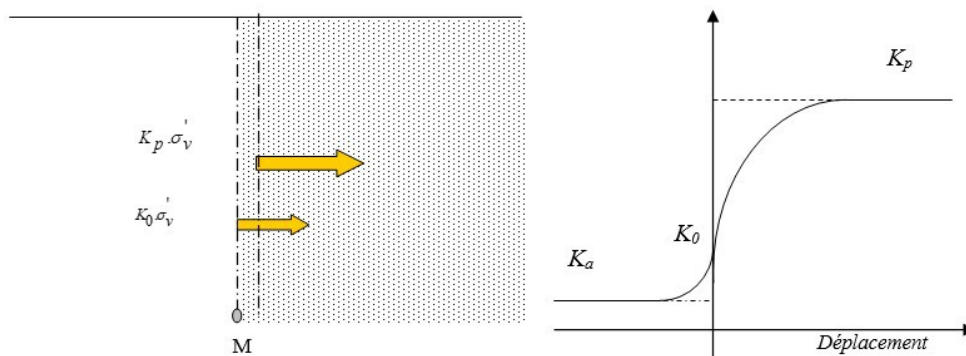


Figure 2.6 Déplacement de l'écran correspondant à une mise en butée

Supposons que la partie à gauche de M soit remplacée par un écran (figure 2.6). Si l'écran se déplace vers le massif. La contrainte augmente et devient supérieur à jusqu'à atteindre un état d'équilibre limite où le cercle de Mohr devient tangent à la droite limite de Mohr-Coulomb (figure 2.7). C'est l'état d'équilibre limite passif ou **équilibre limite de butée**, la contrainte prend la valeur :

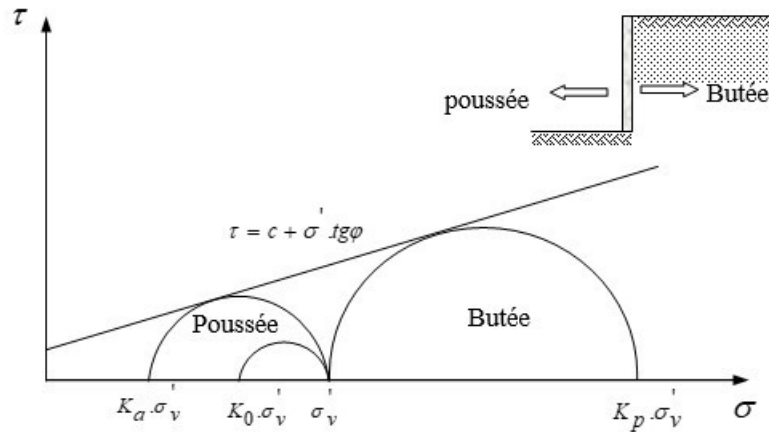


Figure 2.7 Evolution des contraintes en état de poussée et butée

$$\sigma_h = K_p \cdot \sigma_v \dots\dots\dots 2.7$$

Avec K_p : coefficient de butée des terres.

Une déformation plus importante est nécessaire pour atteindre l'état de butée (de l'ordre 5% pour un sable dense et 12% pour un sable lâche).

Si, au contraire, l'écran se déplace vers la gauche, le sol a tendance à suivre ce mouvement et la contrainte diminue jusqu'à ce qu'elle atteigne l'équilibre limite où le cercle de Mohr devient tangent à la droite limite de Coulomb (Figure 2.7). C'est l'état d'équilibre limite de poussée, la contrainte prend la valeur :

$$\sigma_k = K_a \cdot \sigma_v \dots\dots\dots 2.8$$

Avec K_a : coefficient de poussée des terres.

Une faible déformation horizontale (de l'ordre 1%) suffit pour atteindre cet état limite.

L'intensité et la direction des efforts limites de poussée et de butée exercés par un massif de sol sur un écran sont fonction :

- des propriétés de résistance du sol ;
- des conditions de frottement entre le sol et le soutènement ;
- des actions qui s'exercent sur le massif (poids propre du sol, surcharges, forces hydrauliques, forces sismiques, etc.) ;
- des caractéristiques du mur (rigidité, géométrie, système d'appui) ;
- de l'amplitude et la direction du mouvement du mur par rapport au sol.

8. Influence du déplacement de l'écran et de sa rugosité

Les expériences de Terzaghi ont donné une forte impulsion à la recherche expérimentale en cette matière ; depuis 1934 de nombreux essais, sur modèle réduit ou en vraie grandeur, ont été poursuivis pour préciser l'influence des déplacements de l'écran sur la poussée des terres. Les résultats des divers essais sont bien concordants, on constate d'abord que la totalité du coin de glissement est en état d'équilibre limite, car on distingue presque en chaque point du coin des amorces de rupture.

Les essais montrent d'autre part que la ligne de rupture n'est rectiligne que dans sa partie haute, qu'elle s'incurve au voisinage de l'écran et que la rugosité de l'écran a une influence notable sur la forme de cette partie curviligne. Parallèlement, l'intensité de la poussée et la butée est fonction de cette rugosité.

Dans leur déplacement relatif, le massif et l'écran développent un frottement qui dépend de la nature de la paroi et de celle des grains du sol.

Soit δ l'angle de frottement sol-écran. L'obliquité δ des contraintes de contact du massif et de l'écran est donc, dans ce cas, une donnée physique comme l'angle de frottement interne des terres. Le frottement est décrit par le critère de Coulomb, le long de l'interface, la contrainte tangentielle maximale mobilisable dans un sol pulvérulent s'écrit :

$$\tau = \sigma \cdot \tan(\delta) \dots\dots\dots 2.9$$

Pour les sols cohérents, la résistance maximale mobilisable au cisaillement le long de l'écran peut s'écrire :

$$\tau = a + \sigma \cdot \tan(\delta) \dots\dots\dots 2.10$$

Avec a : adhérence sol-écran.

La mesure du coefficient de frottement massif-écran détermine immédiatement la valeur absolue de l'obliquité δ .

Il faut seulement se rappeler que la valeur de δ ne peut dépasser la valeur φ de l'angle de frottement interne des terres. En effet, si la mesure de δ conduisait à une valeur supérieure, on observerait en pratique la formation d'une pellicule de terrain collée contre la paroi et solidaire de l'écran substituant son propre frottement interne φ au frottement δ des maçonneries contre les terres.

En valeur absolue, l'obliquité δ peut donc varier entre 0 et φ . Le signe de cette obliquité dépend du sens du mouvement relatif de l'écran et du coin de glissement ; dans les problèmes de poussée des terres, sur les murs de soutènement, δ est généralement positif, l'apparition du frottement négatif est assez rare, elle est due le plus souvent à un phénomène de tassement différentiel entre le mur et le massif.

9. Détermination de la poussée et la butée des terres sur un écran

9.1. Décomposition des actions

En pratique on distingue trois composantes principales :

- Celle due au poids propre ;
- Celle due à la surcharge ;
- Celle due à la cohésion (théorème des états correspondants).

Ces trois composantes peuvent être calculées selon des théories qui sont applicables pour les sols en petites déformations (élasticité) pour un calcul de stabilité en petites déformations, ou bien en rupture généralisée (grandes déformations) pour un calcul d'ouvrage à l'état limite de ruine.

Ces trois composantes seront simplement additionnées pour former une action résultante.

9.1.1. Action des terres en état de rupture sur l'écran due au poids propre du milieu

Plusieurs méthodes sont utilisées pour déterminer la contrainte due au poids des terres, notamment celles de Coulomb, Rankine, Boussinesq...etc. les contraintes sur l'écran peuvent être inclinées par rapport à l'horizontale si $\delta \neq 0$.

Le coefficient dû au poids des terres $K\gamma$ est noté $K_{a\gamma}$ en cas de poussée et $K_{p\gamma}$ en cas de butée. Si le sol est homogène, le diagramme de contrainte est triangulaire et la résultante agit au tiers de la hauteur à partir de la base de l'écran (Figure 2.8).

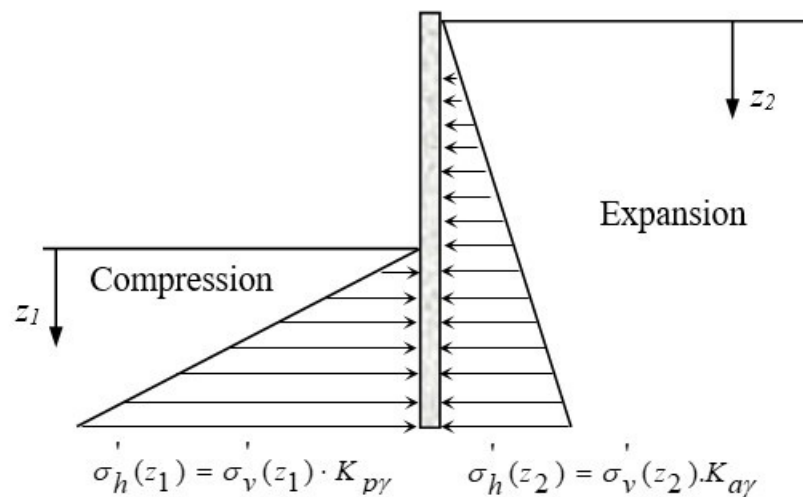


Figure 2.8 Diagramme des contraintes sur un écran, due au poids propre du terrain en rupture généralisée

9.1.2. Action des terres en état de rupture sur l'écran due aux surcharges

Lorsque la surface libre du massif supporte une surcharge, on peut alors considérer, que le massif n'est pas pesant. L'étude d'un massif non pesant peut également être utile si l'on désire appliquer le théorème de la superposition des états d'équilibre. En un point de l'écran, la contrainte sur l'écran a une intensité $Kq.q$ et une obliquité δ . Le coefficient dû à une surcharge Kq est noté K_{aq} en cas de poussée et K_{pq} en cas de butée. (Figure 2.9).

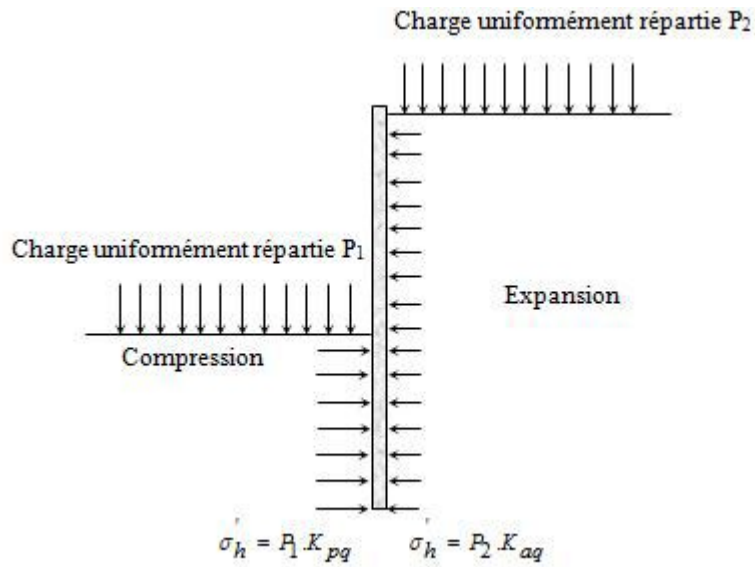


Figure 2.9 Diagramme des contraintes sur un écran, due à la cohésion d'un terrain en rupture généralisée

10. Détermination des forces de poussée et de butée par la méthode de Coulomb

10.1. Cas de la poussée des terres

Coulomb (1776)* a considéré un coin triangulaire (Figure.2.10) qui tend à glisser sur la partie du massif considérée rigide. Le principe de calcul consiste à écrire l'équation d'équilibre des forces appliquées sur le coin triangulaire de sol ABC, ces trois forces sont : le poids du sol W , la résultante F des efforts de frottement et de cohésion le long de la ligne de glissement bc et la réaction P de l'écran ab sur le massif.

Coulomb a étudié en première étape le cas simple, d'un écran lisse, de massif à surface libre horizontale et de cohésion nulle. La projection des forces sur les axes parallèle et perpendiculaire à la surface de glissement bc , a permet d'obtenir l'expression de la force de poussée P appliquée sur le mur. L'expression est fonction de l'angle d'inclinaison de la surface de rupture par rapport à l'horizontale θ . La valeur maximale de poussée P_{max} a été obtenue par la différentiation de l'expression.

Ainsi, pour un sol granulaire ($c' = 0$)

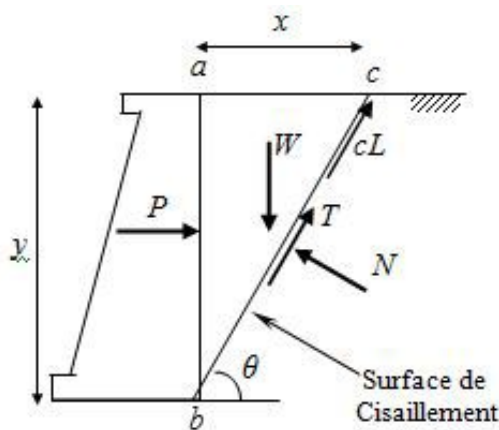


Figure 2.10 Géométrie pour l'analyse de coulomb

$$N = W * \cos(\theta) + P_a * \sin(\theta) \dots\dots\dots 2.11$$

$$T = W * \sin(\theta) + P_a * \cos(\theta) \dots\dots\dots 2.12$$

D'après les 2 équation précédentes

$$\frac{T}{N} = \frac{W * \sin(\theta) - P_a * \cos(\theta)}{W * \cos(\theta) + P_a * \sin(\theta)} \dots\dots\dots 2.13$$

$$W = \frac{1}{2} \gamma H^2 \cot \theta \dots\dots\dots 2.14$$

$$P = W \operatorname{tg}(\theta - \varphi) = \frac{1}{2} \gamma H^2 \operatorname{ctg}(\theta) \operatorname{tg}(\theta - \varphi) \dots\dots\dots 2.15$$

$$K_p = \frac{(1 + \sin(\theta))}{(1 - \sin(\theta))} \dots\dots\dots 2.22$$

11. Exercices d'application

11.1. Exercice : Je commence a comprendre mon cour

C'est quoi les murs-poids

- Ce type d'ouvrages se comporte comme élément rigide indéformable ou peu déformable
- sont des ouvrages flexibles qui regroupent les palplanches autostables

11.2. Exercice

Les ouvrages de soutènement sont également classés en deux catégories selon leur rigidité, quelle sont ces deux catégories ?

Références



- 1
Mestat, P., & Riou, Y. (1999). À propos des benchmarks en géotechnique. *Revue française de génie civil*, 3(7-8), 657-671.
- 2
Jaky, J. (1948). Pressure in silos. *Proc. 2nd ICSM*, 1948.
- 4
Handin, J. (1969). On the Coulomb-Mohr failure criterion. *Journal of Geophysical Research*, 74(22), 5343-5348.