

# Chapitre 1

## Ouvrages de soutènement

### 1. Introduction

Les ouvrages de soutènement sont des ouvrages permettant de retenir un talus vertical ou les parois d'une excavation qui présente une stabilité insuffisante.

Il existe de nombreux cas qui nécessitent le recours à des soutènements par exemple :

- Les immeubles avec plusieurs niveaux de sous-sol
- Parking souterrains
- Métro à faible profondeur
- Construction sur des terrains à forte pente
- Route et autoroutes en déblai

Donc, les ouvrages de soutènement doivent assurer la stabilité du massif de sol environnant à l'amont comme à l'aval

### 2. Les types d'ouvrages de soutènement :

Il existe de nombreux types de soutènement et qui sont classés selon leur forme géométrique, leur matériau de construction et leur mise en place ; on a

#### A. Les murs-poids

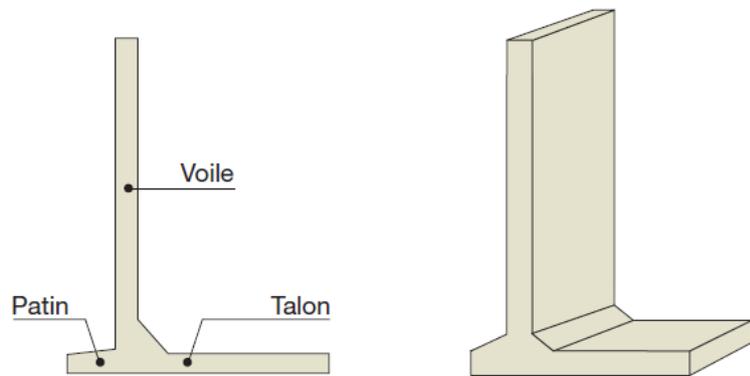
Ce sont des murs en pierre, en béton ou en béton armé, ayant une semelle à leur base avec ou sans talon. Le poids du mur lui-même, qui inclut parfois une masse stabilisatrice de sol ou remblai, joue un rôle important dans la stabilité du matériau retenu. On peut citer :



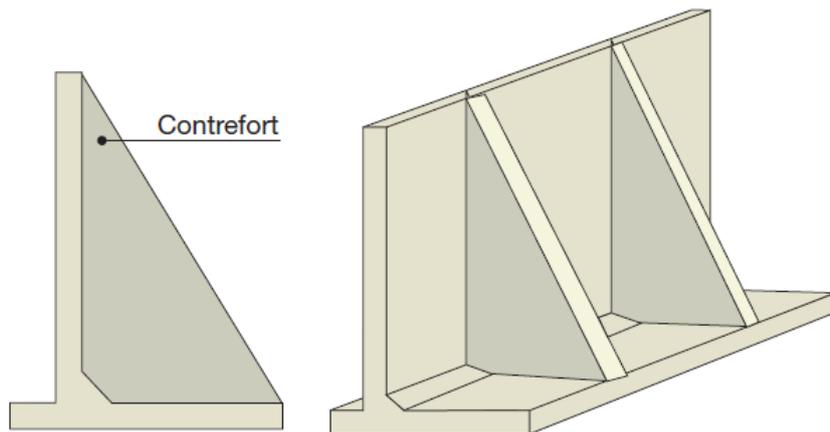
**Mur en pierre sèche**



**Mur en gabion**



**Mur cantilever en béton armé** : comprend un talon, et un patin



**Mur à contreforts** : le voile peut être équipé de contreforts, solidarissant le voile avec le talon, et améliorant la résistance mécanique du mur (sont utilisées pour des hauteurs importantes).



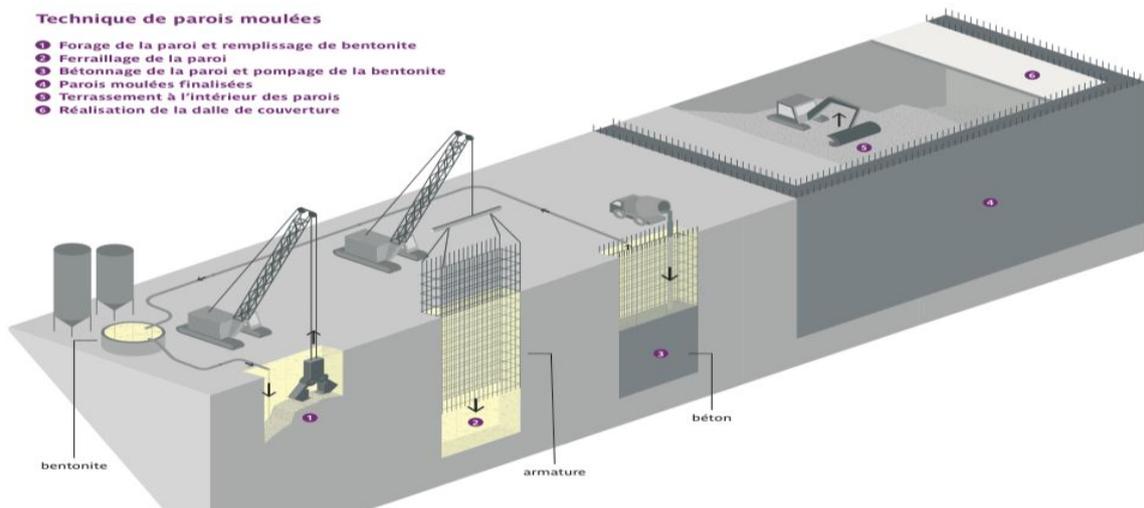
Mur poids en éléments préfabriqués

**B. Les murs encastrés :**

Ce sont des ouvrages de soutènement relativement minces en acier, en béton armé ou en bois. La résistance à la flexion de ces ouvrages joue un rôle important dans le soutènement du matériau retenu alors que leur poids a un rôle insignifiant. On peut citer comme exemples :



Rideau en palplanches métalliques

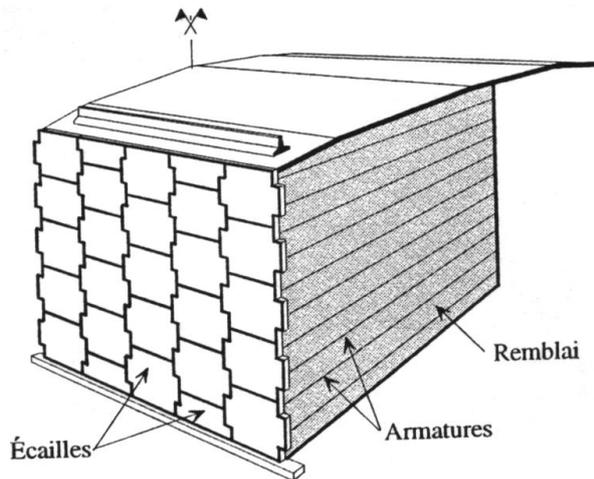


Mur de soutènement en parois moulées

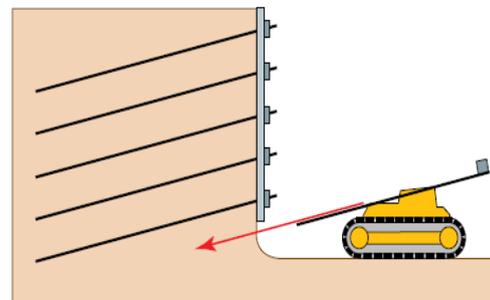
### C. Ouvrages de soutènements composites

Ce sont ouvrages formés d'éléments appartenant aux deux types précédents. Il existe un très grand nombre de murs de ce type. On peut citer comme exemples :

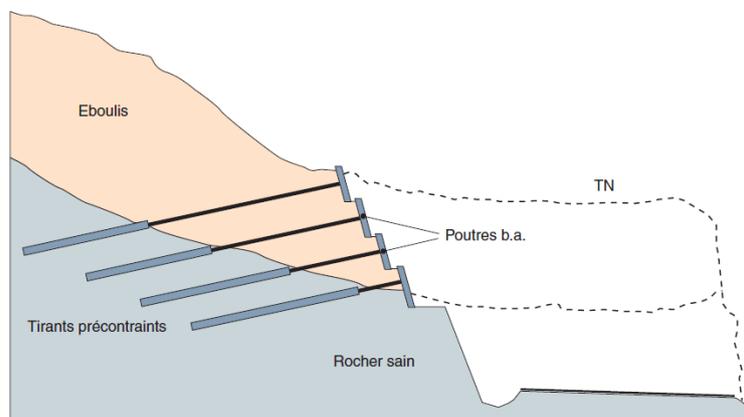
- Les murs en terre renforcés
- Les ouvrages de soutènement renforcés par des ancrages, des géotextiles, ou de clous.



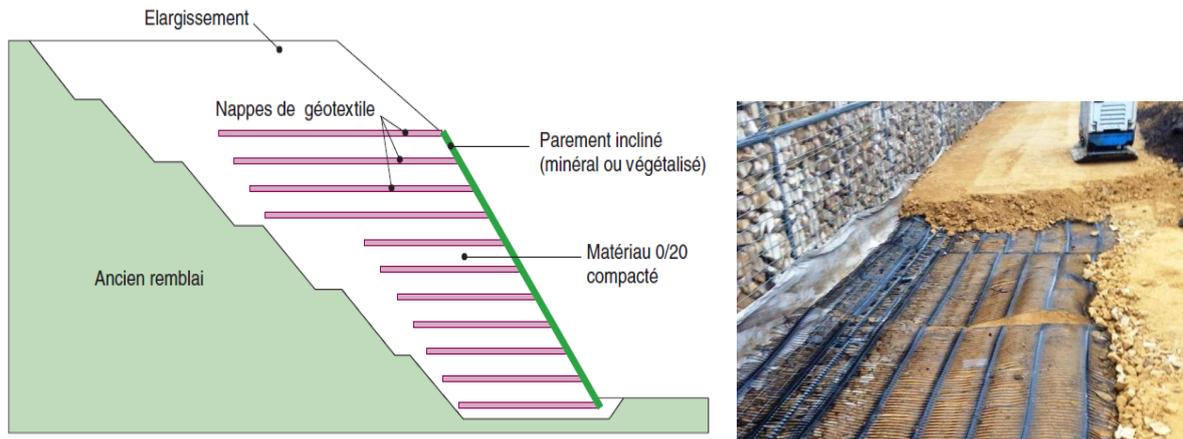
Mur en terre armée



Paroi clouée



Mur de soutènement en poutres ancrées



Mur ou remblai renforcé par des nappes de géotextile

- **Géotextiles** : se caractérisent par un comportement en traction et une résistance à l'arrachement ; ils sont utilisés pour le renforcement, le drainage, la séparation...

### 3. Calcul des ouvrages de soutènement :

Tout ouvrage de soutènement doit être conçu et calculé conformément aux principes généraux de dimensionnement. Afin d'assurer la sécurité et la qualité de l'ouvrage, les opérations suivantes doivent être effectuées :

- La reconnaissance du terrain (déterminer les différentes caractéristiques du sol support)
- Une étude topographique
- Détermination du niveau des nappes d'eau
- Détermination des surcharges : route, immeuble...
- Choisir le type de mur à réaliser (selon le site, le mode de réalisation...)
- Détermination des pressions qui agissent sur le mur
- Vérification de la stabilité externe (glissement, renversement...)
- Vérification de la stabilité interne (rupture des éléments structuraux)

#### 3.1. Définition des forces de poussée et de butée :

On considère un ouvrage de soutènement, par exemple un mur en béton retenant un massif de sol (figure ci-dessous) et l'on examine les types de forces qui s'exercent sur ce mur.

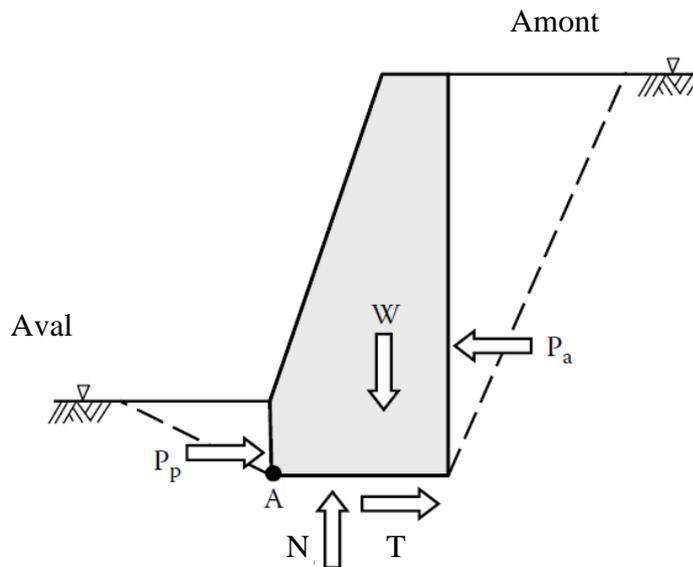


Figure 1 : forces exercées sur un mur de soutènement

**La force de poussée  $P_a$**  : l'indice (a) précise qu'il s'agit d'une **force active** ; le sol exerce sur la face amont des efforts ayant tendance soit à renverser le mur, soit à le déplacer horizontalement

**La force de butée  $P_p$**  (force de résistance): l'indice (p) précise qu'il s'agit d'une **force passive** ; le sol exerce sur la face aval des efforts ayant tendance à retenir le mur

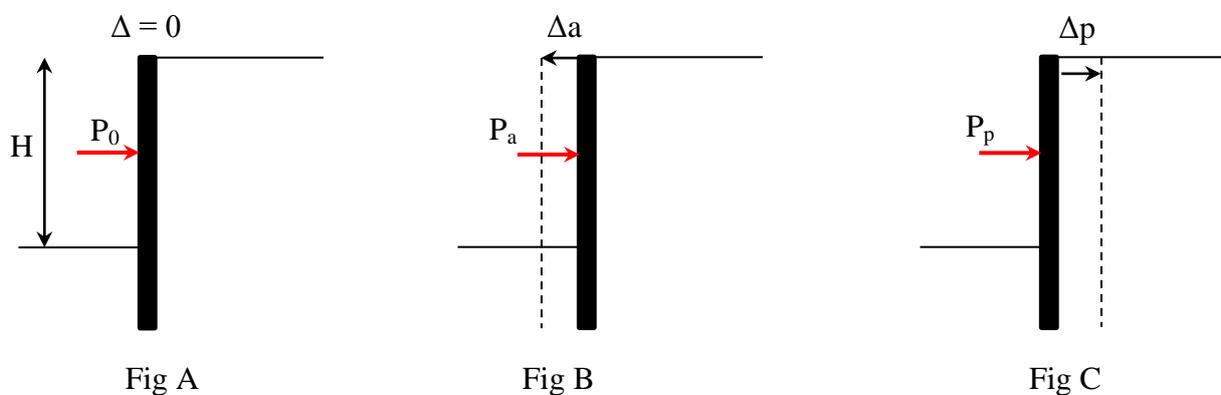
**Le poids du mur (W)**

**N** : composante verticale appelée force portante

**T** : composante horizontale appelée force de résistance au glissement

### 3.2. Relation entre pressions latérales et déplacements :

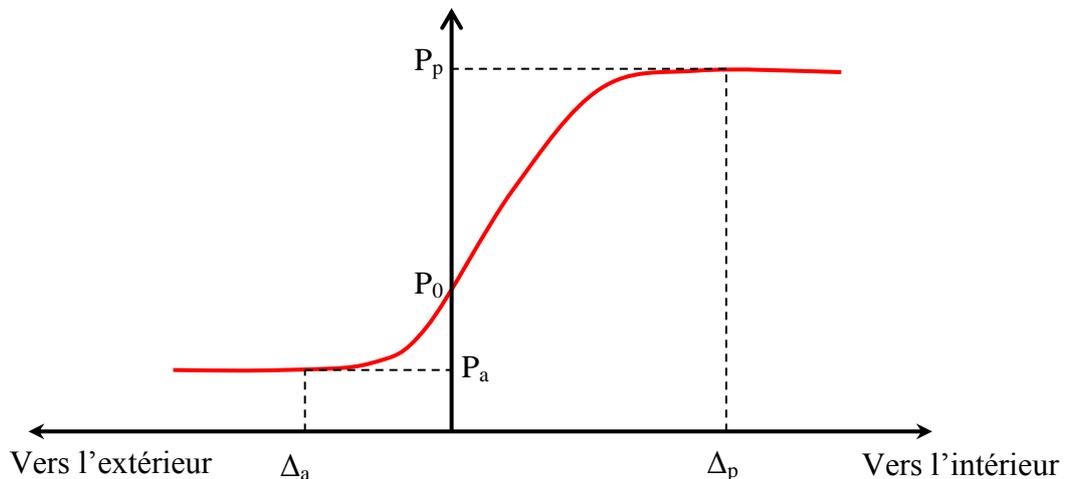
On suppose par exemple que l'on encastre légèrement à la surface horizontale d'un massif de sable un écran vertical parfaitement lisse et que l'on remblaie progressivement derrière l'écran : une force horizontale  $P$  est exercée sur l'écran



Si l'écran ne subit aucune déformation latérale  $\Delta = 0$  (Fig A) : dans ce cas le terrain exerce une certaine pression sur l'écran nommée la pression des terres au repos  $P_0$  (une pression pour maintenir l'écran immobile)

Deuxième cas : afin que l'écran puisse se déplacer vers l'extérieur ; la force  $P_0$  doit être diminuée jusqu'à une valeur  $P_a$ . Généralement la valeur de  $P_a$  est de l'ordre de la moitié de celle de  $P_0$  (le sol reste stable tant que cette force reste supérieur à  $P_a$ )

Troisième cas : afin que l'écran puisse se déplacer vers l'intérieur ; la force  $P_0$  doit être augmentée jusqu'à une valeur  $P_p$ . Généralement la valeur de  $P_p$  est de 3 à 4 fois la valeur de  $P_0$



Le massif de sol est donc en équilibre si la pression exercée sur l'écran reste comprise entre deux valeurs limites :

- La limite inférieure  $P_a$
- La limite supérieure  $P_p$

Pour passer de l'état de repos à l'état complet de poussée, le déplacement nécessaire est très faible :

$$\Delta_a = \frac{H}{10000} \div \frac{H}{1000}$$

Au contraire, pour mobiliser la butée, le déplacement  $\Delta_p$  est important :

$$\Delta_p = \frac{H}{50} \div \frac{H}{10}$$

### 3.3. Coefficient de poussée et de butée :

#### A. Terre au repos : coefficient de pression latérale

Soit un massif de sol homogène à surface horizontale, La relation entre  $\sigma_h$  et  $\sigma_v$  s'exprime en fonction de contraintes effectives ; c'est-à-dire :

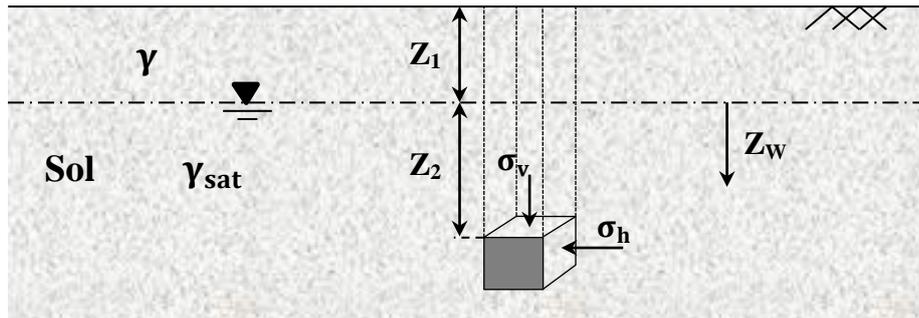


Figure 2 : Coefficient  $K_0$  de pression latérale des terres au repos

$$\sigma'_h = K_0 \sigma'_v$$

Avec :

$K_0$  : coefficient de pression des terres au repos (généralement  $< 1$ )

Le coefficient  $K_0$  peut être calculé par :

$$K_0 = 1 - \sin \phi \quad (\text{sols grenus})$$

$$K_0 = 0,44 + 0,0042 IP \quad (\text{sols cohérents})$$

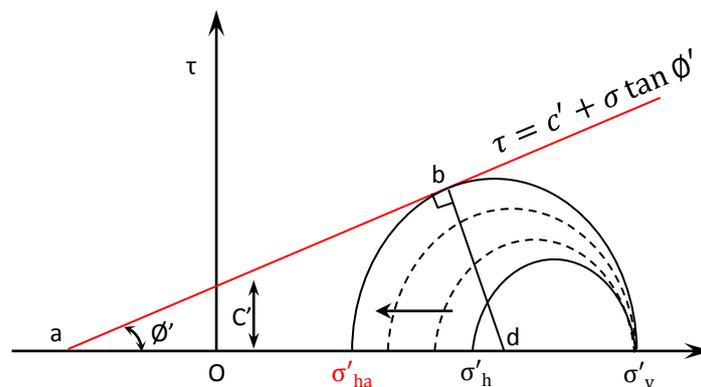
## B. Sols pulvérulents : coefficients de poussée et de butée

### B.1. Equilibre actif :

Lorsque l'écran se déplace vers l'extérieur : on a une expansion latérale du sol

Dans ce cas :

- La contrainte verticale reste constante  $\sigma_v = \gamma \cdot Z$
- La contrainte horizontale  $\sigma_h$  diminue jusqu'à atteindre  $\sigma_{ha}$



Pour calculer  $\sigma'_{ha}$  en fonction de  $\sigma'_v$ , on a :

$$ad = a0 + 0d$$

Avec :

- $a d \sin \phi' = \text{Rayon}$
- $a_0 = c \cot \phi'$
- $\sigma_d = \sigma'_v + \sigma'_{ha}/2$

On obtient :

$$\sin \phi = \frac{\frac{\sigma'_v - \sigma'_{ha}}{2}}{\frac{c'}{\tan \phi} + \frac{\sigma'_v + \sigma'_{ha}}{2}}$$

Ou :

$$\sigma'_v = \sigma'_{ha} \left( \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \right) + 2c' \left( \frac{\cos \phi'}{1 - \sin \phi'} \right)$$

On peut remplacer :

$$\frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} = \tan^2 \left( 45 + \phi'/2 \right)$$

$$\frac{\cos \phi'}{1 - \sin \phi'} = \tan \left( 45 + \phi'/2 \right)$$

On obtient :

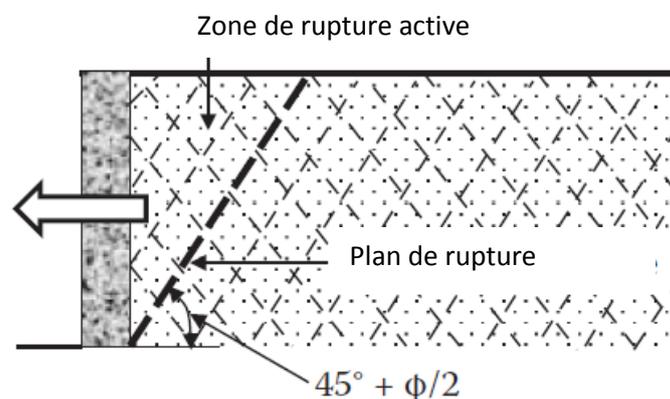
$$\sigma'_{ha} = \sigma'_v \tan^2 \left( 45 - \phi'/2 \right) - 2c' \tan \left( 45 - \phi'/2 \right)$$

$\sigma'_{ha}$  : contrainte horizontale à la limite de poussée

➤ Sols pulvérulents ;  $c' = 0$

$$\text{Donc : } \sigma'_{ha} = \sigma'_v \tan^2 \left( 45 - \phi'/2 \right)$$

$$K_a = \tan^2 \left( 45 - \phi'/2 \right) : \text{Coefficient de poussée}$$

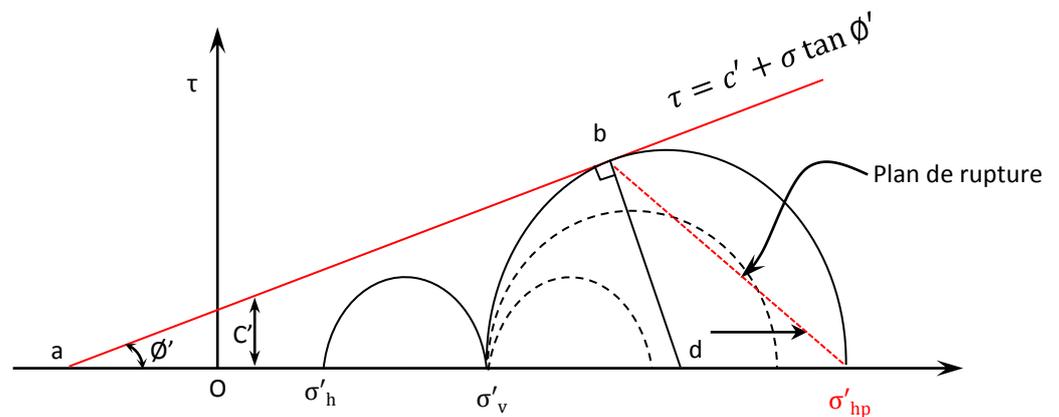


## B.2. Equilibre passif :

Lorsque l'écran se déplace vers l'intérieur : on a une contraction latérale du sol

Dans ce cas :

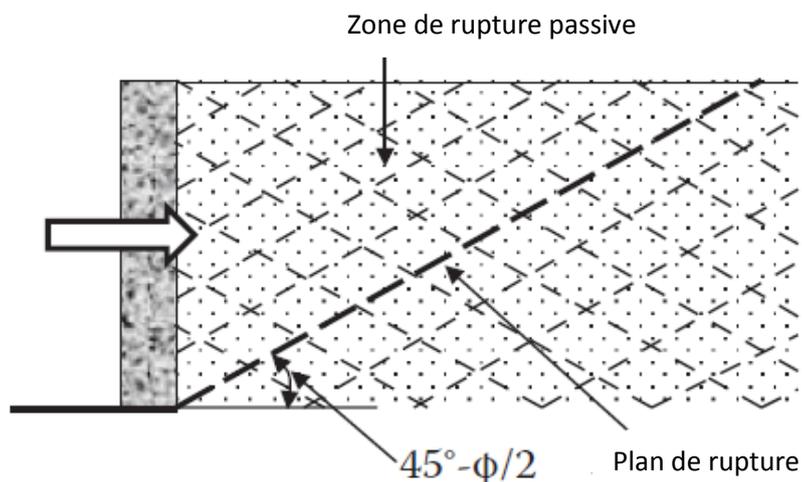
- La contrainte horizontale  $\sigma_h$  augmente jusqu'à atteindre  $\sigma_{hp}$
- La contrainte verticale devient mineure



La contrainte horizontale à la limite de butée est :

$$\sigma'_{hp} = \sigma'_v \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi'}{2} \right) + 2c' \tan \left( 45 + \frac{\phi'}{2} \right)$$

$$K_p = \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi'}{2} \right) : \text{Coefficient de butée}$$



## C. Sols cohérents : coefficients de poussée et de butée :

Pour les sols fins saturés, on distingue deux grands comportements :

- Comportement drainé
- Comportement non drainé

Comportement drainé (à long terme) : le chargement est appliquée d'une manière très lente compte tenu de la perméabilité du sol.

- Le calcul se fait en contraintes effectives, on utilise  $c'$  et  $\phi'$

Comportement non drainé (à court terme) : le chargement est appliquée d'une manière rapide, pas de dissipation des pressions interstitielle, c'est-à-dire pas de variation de volume.

- Le calcul se fait en contraintes totales, on utilise  $c_u$  et  $\phi_u = 0$

### C.1. Equilibre actif :

**Comportement non drainé ( $c_u$  et  $\phi_u = 0$ ) :**

$$\sigma_{ha} = \sigma_v K_a - 2c_u \sqrt{K_a}$$

$$K_a = \tan^2 \left( 45 - \frac{\phi_u}{2} \right) = 1$$

$$\text{Donc : } \sigma_{ha} = \sigma_v - 2c_u$$

**Comportement drainé ( $c'$  et  $\phi'$ ) :**

$$\sigma'_{ha} = \sigma'_v K_a - 2c' \sqrt{K_a}$$

### C.2. Equilibre passif :

**Comportement non drainé ( $c_u$  et  $\phi_u = 0$ ) :**

$$\sigma'_{hp} = \sigma'_v K_p + 2c_u \sqrt{K_p}$$

$$K_p = \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi_u}{2} \right) = 1$$

$$\text{Donc : } \sigma'_{hp} = \sigma'_v + 2c_u$$

**Comportement drainé ( $c'$  et  $\phi'$ ) :**

$$\sigma'_{hp} = \sigma'_v K_p + 2c' \sqrt{K_p}$$

## 4. Calcul des forces de poussée et de butée :

Les différentes méthodes utilisées pour calculer la force de poussée et de butée sont :

- La méthode de Coulomb (1773)
- La méthode de Rankine (1856)
- La méthode de Boussinesq (table de Caquot et Kerisel 1948)



$$W = \gamma \frac{H^2}{2\sin^2\alpha} \cdot \sin(\theta + \alpha) \cdot \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin(\theta - \beta)}$$

La relation classique dans le triangle est :

$$\frac{P_a}{\sin(\theta - \emptyset)} = \frac{W}{\sin(180 - \psi - \theta + \emptyset)}$$

Donc :

$$P_a = \frac{1}{2} \gamma \frac{H^2}{2\sin^2\alpha} \cdot \frac{\sin(\theta - \emptyset)}{\sin(180 - \psi - \theta + \emptyset)} \cdot \frac{\sin(\theta + \alpha) \sin(\alpha + \beta)}{\sin(\theta - \beta)}$$

Pour obtenir une valeur maximale de  $P_a$  ; on doit dériver la formule précédente par rapport à  $\theta$  :

$$\frac{\partial P_a}{\partial \theta} = 0$$

$$P_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 \frac{\sin^2(\alpha + \emptyset)}{\sin^2\alpha \sin(\alpha - \delta) \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\emptyset + \delta) \sin(\emptyset - \beta)}{\sin(\alpha - \delta) \sin(\alpha + \beta)}} \right]^2}$$

La formule générale de la force de poussée par unité de longueur est :

$$P_a = \int_0^H \sigma'_{ha} dz = \frac{1}{2} \gamma' \cdot H^2 \cdot K_a \quad (\text{Pour les sols pulvérulents})$$

Dans ce cas :

$$K_a = \frac{\sin^2(\alpha + \emptyset)}{\sin^2\alpha \sin(\alpha - \delta) \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\emptyset + \delta) \sin(\emptyset - \beta)}{\sin(\alpha - \delta) \sin(\alpha + \beta)}} \right]^2}$$

Si  $\alpha = 90^\circ$  et  $\delta = 0$ ,  $\beta = 0$  on obtient:

$$P_a = \frac{1}{2} \gamma' \cdot H^2 \tan^2(45 + \emptyset/2)$$

### Remarque :

Cette théorie ne permet pas de déterminer le point d'application de la force  $P_a$ . On suppose la répartition des contraintes triangulaire et le point d'application de la force résultante est ainsi au tiers ( $H/3$ ) inférieure de la hauteur.

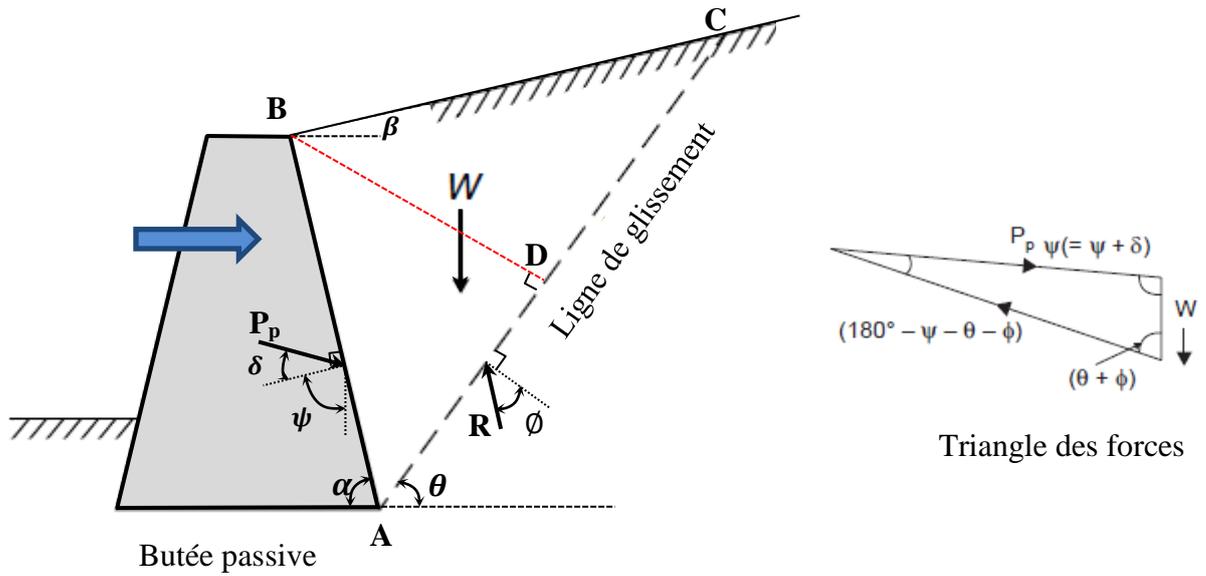
➤ Lorsque on a une nappe d'eau ; la force de poussée devient :

$$P_a = \int_0^H \sigma'_{ha} dz + \int_0^{H_w} u dz_w$$

### A.2. Butée passive :

La formule générale de la force de butée est :

$$P_p = \int_0^H \sigma'_{hp} dz = \frac{1}{2} \gamma' \cdot H^2 \cdot K_p$$



$$P_a = W \cdot \frac{\sin(\theta + \phi)}{\sin(180 - \psi - \theta - \phi)}$$

Dans ce cas :

$$K_p = \frac{\sin^2(\alpha - \phi)}{\sin^2 \alpha \sin(\alpha + \delta) \left[ 1 - \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi + \beta)}{\sin(\alpha + \delta) \sin(\alpha + \beta)}} \right]^2}$$

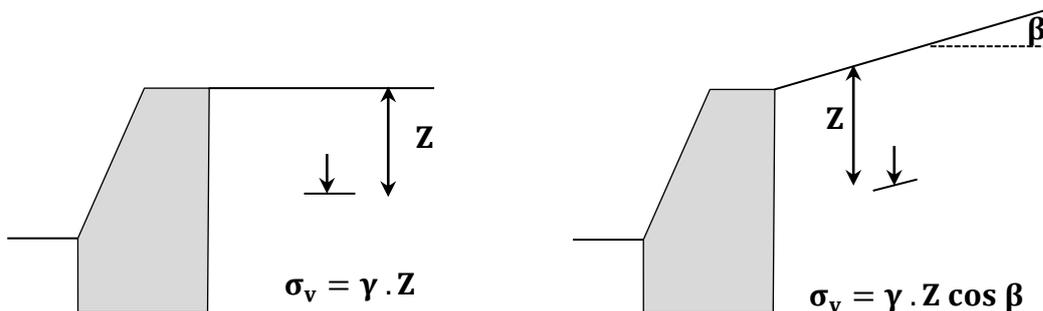
Valeurs de  $K_a$  et  $K_p$  pour :  $\alpha = 90^\circ$ ,  $\phi = 30^\circ$ ,  $\beta = 0$

$\delta$	$K_a$	$K_p$
0	0,33	3,2
10	0,32	4,5
20	0,31	5,75
30	0,3	6,4

### B. Méthode de Rankine :

Cette méthode repose sur les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Pas de frottement entre le sol et le mur, c'est-à-dire  $\delta = 0$
- Sur un plan parallèle à la surface de sol, la contrainte reste verticale

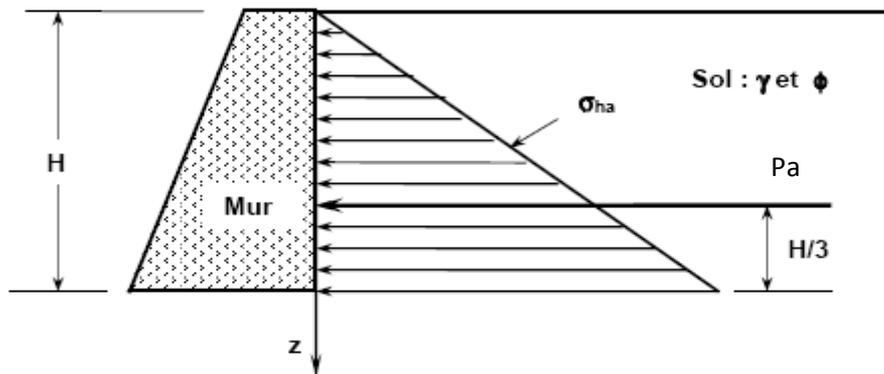


- Cette méthode conduit à une répartition triangulaire des contraintes de poussée et de butée

### B.1. Sol pulvérulent

- **Surface horizontale**

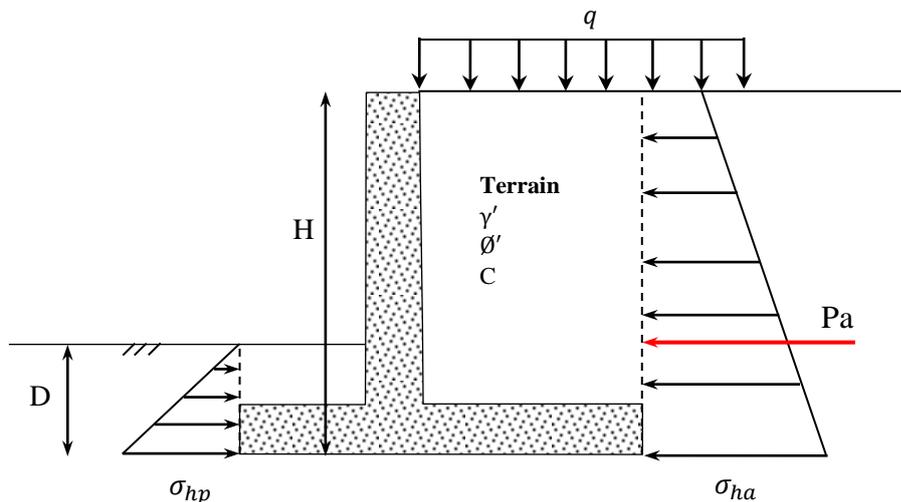
Soit un mur à parement vertical supportant un massif à surface horizontale, constitué d'un sol pulvérulent sec



$$P_a = \int_0^H \sigma'_{ha} dz = \frac{1}{2} \gamma' \cdot H^2 \cdot K_a$$

$$P_p = \int_0^H \sigma'_{hp} dz = \frac{1}{2} \gamma' \cdot H^2 \cdot K_p$$

- **Influence d'une surcharge :**



La contrainte verticale :

$$\sigma'_v = \int_0^H \gamma' dz + q = \gamma' H + q$$

$$\sigma'_{ha} = K_a \sigma'_v = K_a \gamma' H + K_a q$$

$$Z = 0 \quad \sigma'_{ha} = K_a q$$

$$Z = H \quad \sigma'_{ha} = K_a \gamma' H + K_a q$$

Dans ce cas, la force de poussée est :

$$P_a = \int_0^H \sigma'_{ha} dz = \frac{1}{2} \gamma' \cdot H^2 \cdot K_a + q H K_a$$

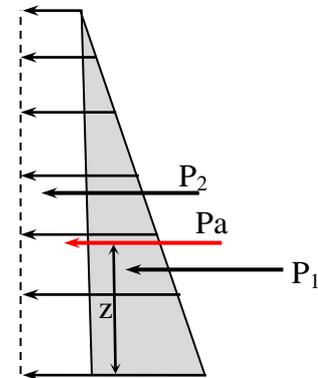
Et la force de butée :

$$P_p = \int_0^D \sigma'_{hp} dz = \frac{1}{2} \gamma' \cdot D^2 \cdot K_p$$

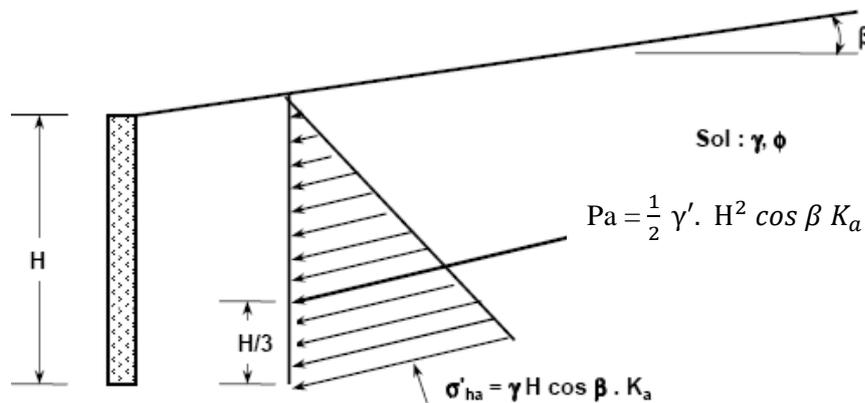
**Le point d'application de Pa**

$$\sum M_{base} = 0 ; \quad P_a z = P_1 H/3 + P_2 H/2$$

$$z = \frac{P_1 H/3 + P_2 H/2}{P_a}$$



**Surface inclinée :**

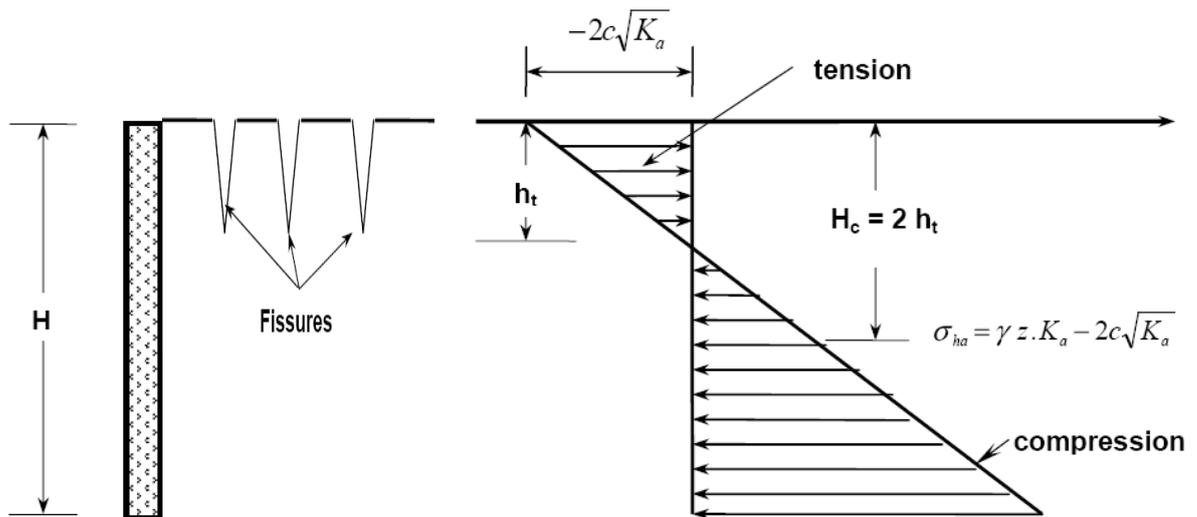


$$P_a = \frac{1}{2} \gamma' \cdot H^2 \cos \beta K_a$$

Avec :

$$K_a = \frac{\cos \beta - \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \phi}}{\cos \beta + \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \phi}}$$

## B.2. Sols cohérents :



La contrainte horizontale à l'équilibre de poussée est :

$$\sigma'_{ha} = K_a \sigma'_v - 2c'\sqrt{K_a}$$

$$Z = 0 \quad \sigma'_{ha} = -2c'\sqrt{K_a}$$

$$Z = H \quad \sigma'_{ha} = K_a \sigma'_v - 2c'\sqrt{K_a}$$

✚ On remarque que le massif de sol exerce des contraintes de traction

On doit calculer la profondeur  $h_t$ , pour laquelle  $\sigma'_{ha} = 0$

$$\sigma'_{ha} = 0 \quad K_a \gamma h_t - 2c'\sqrt{K_a} = 0$$

$$h_t = \frac{2c'}{\gamma \sqrt{K_a}}$$

### Remarque :

Généralement, on néglige la partie tendue parce que le mur se construit pas des sols pulvérulents

## A. Butée passive :

La contrainte horizontale à l'équilibre de butée est :

$$\sigma'_{hp} = K_P \sigma'_v + 2c'\sqrt{K_P}$$

$$Z = 0 \quad \sigma'_{hp} = 2c'\sqrt{K_P}$$

$$Z = H \quad \sigma'_{hp} = K_P \sigma'_v + 2c'\sqrt{K_P}$$

