

# Stabilité des murs de soutènement

## I. Caractéristiques fondamentales d'un sol

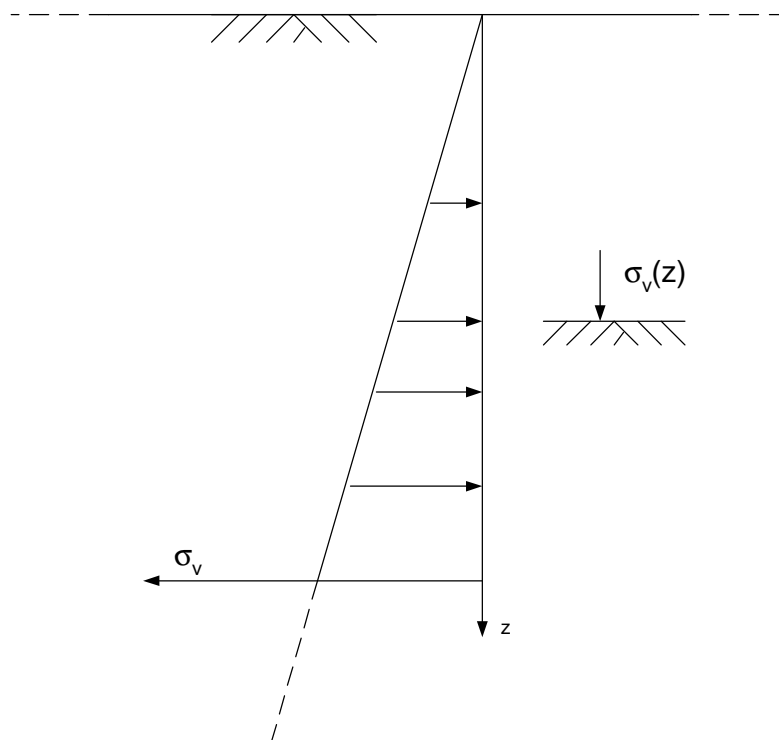
Il s'agit ici de présenter les caractéristiques fondamentales d'un sol au sens de la « mécanique des sols » : la mécanique des sols est une mécanique très particulière qui sort complètement du domaine classique de la mécanique telle que vous la connaissez et l'avez étudiée sous l'aspect Résistance des Matériaux.

Comme son nom l'indique, la mécanique des sols s'intéresse au comportement des sols ; milieu particulièrement délicat à appréhender.

### Densité $g$

Elle est exprimée généralement en  $\text{kg/m}^3$ . La densité  $g$  conditionne la valeur de la contrainte verticale  $s_v$  à une profondeur  $z$  de la surface du sol.

$s_v$  croît simplement proportionnellement à  $z$  telle que :  $s_v = g \cdot z$ .



La densité  $g$  est souvent prise entre  $1800 \text{ kg/m}^3$  et  $2000 \text{ kg/m}^3$ .

### Portance du sol $q$

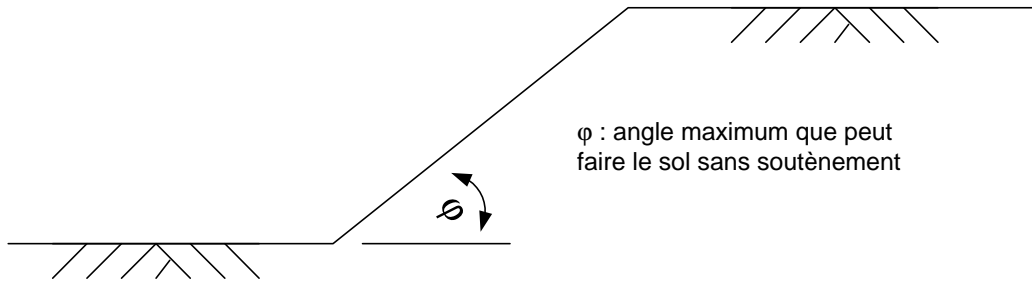
C'est la contrainte de calcul que peut reprendre un sol sans se déformer, elle est exprimée en Pa et est généralement très faible. Elle peut être déduite de l'expérience (réalisations à proximité), à partir d'essai in situ (en place), à partir d'essais de laboratoire. Le tableau suivant donne quelques valeurs à titre tout à fait indicatif.

Nature du sol	$q$ (Mpa)
Roches saines (pas de fissuration, pas de désagrégation)	0.75 à 4.5
Sable compact	0.35 à 0.75
Sable lâche (peu compact)	0.2 à 0.4
Argile	0.1 à 0.3

### Angle de talus naturel $j$ et cohésion $C$

- L'angle de talus naturel  $j$  est l'angle maximum (avec l'horizontal) que peut présenter un sol mis simplement en tas. L'exemple le plus caractéristique est le tas de sable ou de gravier.

- La cohésion  $C$  caractérise la capacité qu'a un sol à s'amalgamer (coller). Typiquement, le sable sec ou le gravier n'ont aucune cohésion ( $C=0$ ) : on dit alors qu'ils sont pulvérulent. A l'opposé, un sable humide ou des argiles ont une cohésion non nulle.  $C$  est exprimée en Pa.



Nature du sol	$C$ (kPa)	$\phi$ (°)
Gravier	0	40 à 50
Sable compact	0 à 10	30 à 40
Sable lâche (peu compact)	0 à 10	25 à 30
Argile	20	15 à 25

Angle de frottement interne

Voir la section suivante.

## II. Poussée et butée des terres

Intéressons nous maintenant au cas d'un écran ou mur de soutènement.

Dans cette partie vont être exposées les théories permettant de déterminer la pression qu'exerce le sol sur l'écran. C'est la première étape pour dimensionner ou vérifier la stabilité de tels écrans.

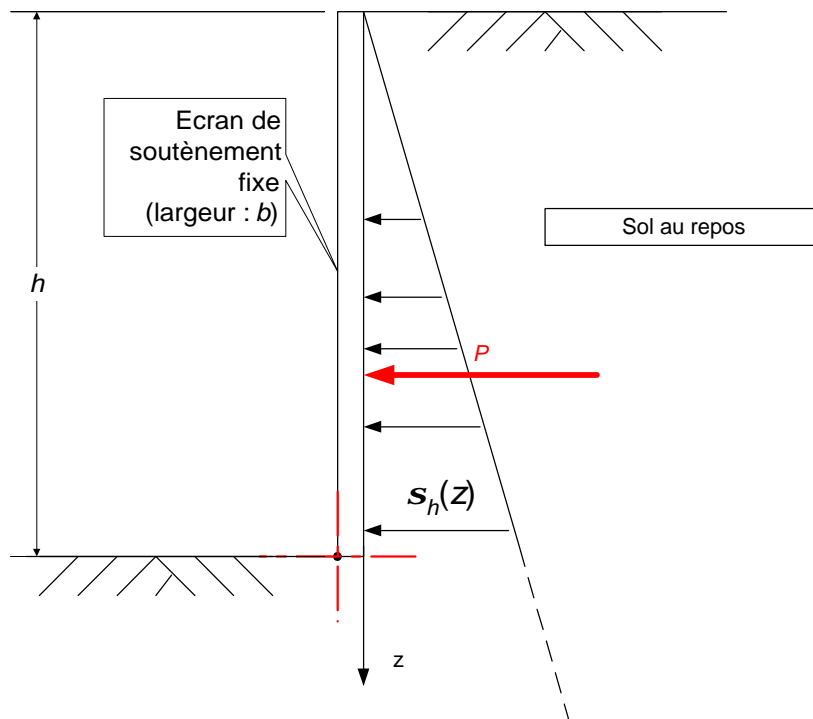
Deux théories similaires sont présentées : l'équilibre de Rankine et l'équilibre de Caquot Kérisel.

### 1. Equilibre de Rankine

Au cours des paragraphes qui suivent, vont être détaillés les 3 états possibles des terres situées derrière l'écran selon la théorie de Rankine. La répartition des contraintes horizontales ainsi que la valeur de la résultante en seront déduites.

Selon Rankine, cette résultante est toujours perpendiculaire à l'écran : autrement dit, le frottement sol-écran n'est jamais mobilisé au niveau de la paroi verticale.

#### a. Sol au repos



## Stabilité des murs de soutènement

Le cas du sol au repos se rencontre lorsque l'écran est réputé fixe ou supposé très rigide : c'est l'équilibre de Rankine.

La contrainte horizontale  $s_h$  est supposée proportionnelle à  $s_v$ , elle-même proportionnelle à la profondeur  $z$  (voir la section précédente).

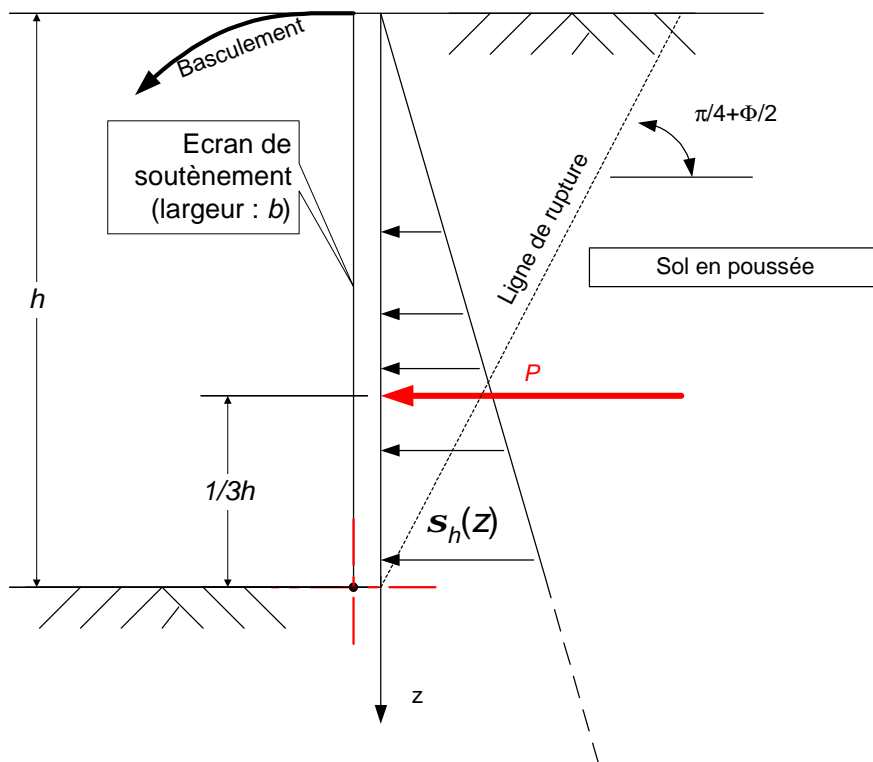
On obtient donc une répartition de contrainte croissante le long du mur de soutènement telle que :

$$\Rightarrow s_h = K_0 \cdot s_v = K_0 \cdot g \cdot z \text{ avec } K_0 \text{ coefficient des terres au repos.}$$

L'effort résultant  $P$  est situé au  $1/3 - 2/3$  de la hauteur de l'écran. Sa valeur – pour une largeur d'écran  $b$  - est :

$$\Rightarrow P = \frac{1}{2} s_h(h) \cdot hb = \frac{1}{2} K_0 \cdot g \cdot h^2 b$$

### b. Etat de poussée



Le cas du sol en état de poussée est le cas le plus fréquent : il suffit que l'écran se soit légèrement avancé (déplacement de  $1/1000$  de la hauteur  $h$  suffit !) réduisant ainsi les contraintes horizontales appliquées par le sol. Un tel cas est très courant puisque une légère déformation de l'écran vers l'extérieur suffit à mobiliser cet état de poussée.

La contrainte horizontale  $s_h$  reste malgré tout proportionnelle à  $s_v$ , elle-même toujours proportionnelle à la profondeur  $z$  (voir la section précédente).

On obtient donc une répartition de contrainte croissante le long du mur de soutènement sous la forme :

$$\Rightarrow s_h(z) = K_a \cdot s_v(z) = K_a \cdot g \cdot z \text{ avec } K_a \text{ coefficient de poussée (l'indice « a » signifie « actif » : le massif de terre est actif et pousse l'écran de soutènement).}$$

$$\triangleright K_a = \tan^2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\Phi}{2} \right). \Phi \text{ est appelé l'angle interne de frottement.}$$

$\triangleright$  La contrainte en poussée est inférieure que dans la situation de repos, en conséquence :  $K_a < K_0$

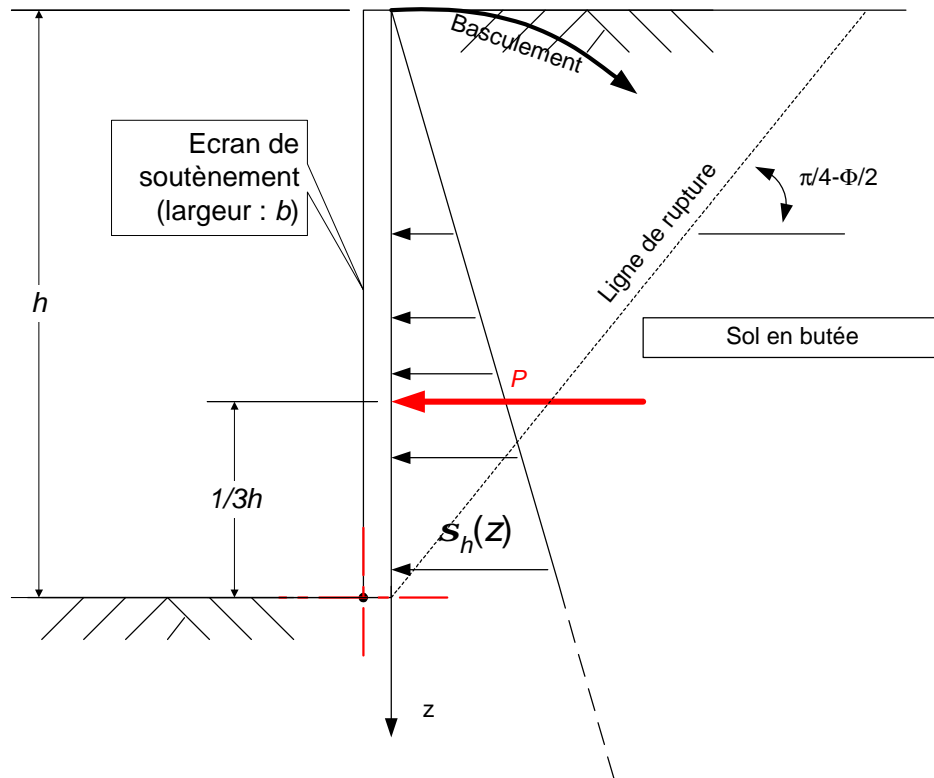
L'effort résultant  $P$  est donc toujours situé au  $1/3 - 2/3$  de la hauteur de l'écran. Sa valeur – pour une largeur d'écran  $b$  - est :

$$\Rightarrow P = \frac{1}{2} s_h(h) \cdot hb = \frac{1}{2} K_a \cdot g \cdot h^2 b$$

## Stabilité des murs de soutènement

A l'extrême (si le mur avance de manière très importante ou est détruit), le massif de sol ne sera plus soutenu et, dans le cas d'un sol pulvérulent, se rompra suivant une ligne de rupture caractéristique (toujours suivant Rankine) orientée de  $\frac{p}{4} + \frac{\Phi}{2}$  par rapport à l'horizontal.  $\Phi$  est appelé l'angle interne de frottement.

### c. Etat de butée



Le cas du sol en état de butée est plus difficile à obtenir : il faudrait que l'écran se soit sensiblement reculé augmentant ainsi les contraintes horizontales appliquées par le sol. Pour solliciter un sol en butée, le déplacement doit être assez grand (10 fois plus que pour l'état de poussée), cas peu probable dans le cas d'un écran ayant plutôt tendance à se déplacer vers l'extérieur.

La contrainte horizontale  $s_h$  reste malgré tout proportionnelle à  $s_v$ , elle-même proportionnelle à la profondeur  $z$ .

On obtient donc une répartition de contrainte croissante le long du mur de soutènement telle que :

⇒  $s_h(z) = K_p \cdot s_v(z) = K_p \cdot g \cdot z$  avec  $K_p$  coefficient de butée (l'indice « p » signifie « passif » : le massif de terre est passif et s'oppose au recul de l'écran de soutènement).

➤  $K_p = \tan^2\left(\frac{p}{4} + \frac{\Phi}{2}\right)$ .  $\Phi$  est appelé l'angle interne de frottement.

➤ La contrainte en butée est supérieure que dans la situation de repos, en conséquence :  $K_p > K_0$

L'effort résultant  $P$  est donc toujours situé au  $1/3 - 2/3$  de la hauteur de l'écran. Sa valeur – pour une largeur d'écran  $b$  – est :

$$\Rightarrow P = \frac{1}{2} s_h(h) \cdot hb = \frac{1}{2} K_p \cdot g \cdot h^2 b$$

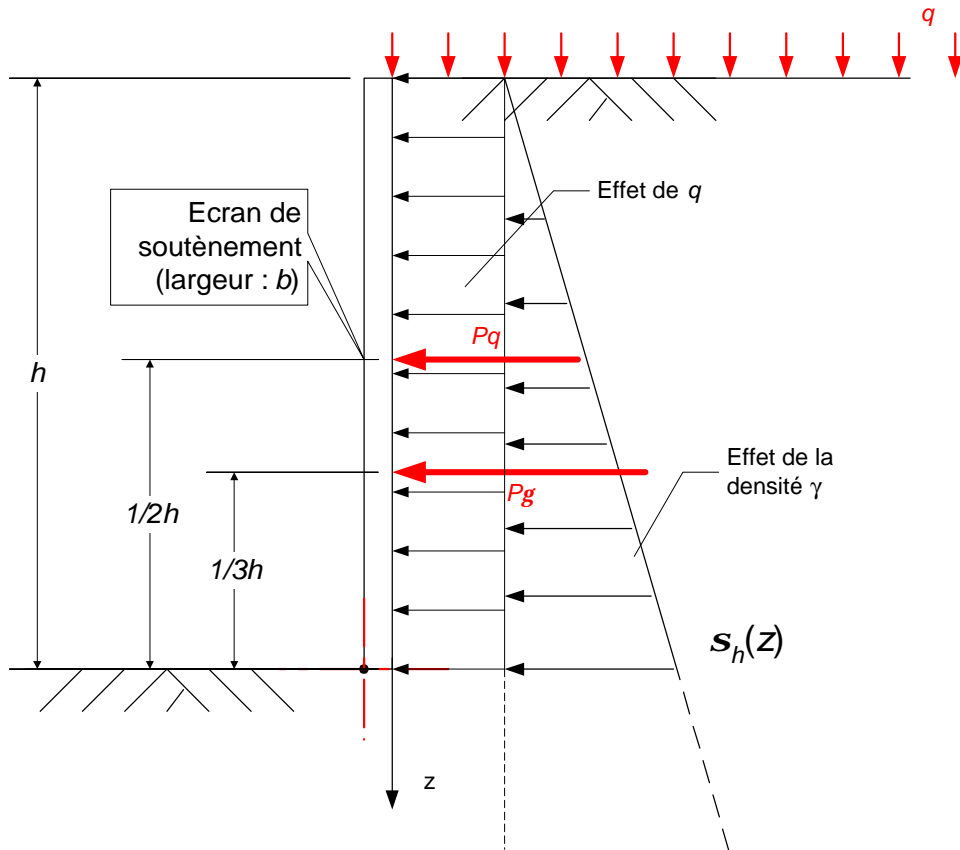
A l'extrême (si le mur recule de manière très importante : cas extrêmement peu probable), le massif de sol sera fortement sollicité et finira par se rompre suivant une ligne de rupture caractéristique orientée de  $\frac{p}{4} - \frac{\Phi}{2}$  par rapport à l'horizontal.

## 2. Cas d'une surcharge sur le terrain

Une surcharge  $q$  sur le terrain induit une augmentation de la contrainte verticale  $s_v$  telle que  $s_v(z) = g \cdot z + q$  à toute profondeur  $z$ .

Il vient en conséquence pour la contrainte horizontale :  $s_h(z) = (K_a \text{ ou } K_p) \cdot s_v(z) = (K_a \text{ ou } K_p) \cdot g \cdot z + (K_a \text{ ou } K_p) \cdot q$

Tout se passe comme s'il y avait superposition sur la contrainte horizontale des effets de la densité du sol (répartition triangulaire) et de la surcharge  $q$  (répartition rectangulaire). Le schéma illustre cette superposition des effets sur la contrainte  $s_h$ .



L'effort résultant  $P$  est donc décomposé aussi en 2 parties telle que  $P = P_g + P_q$  :

- Une première résultante  $P_g$  toujours située au  $1/3 - 2/3$  de la hauteur de l'écran. Sa valeur – pour une largeur d'écran

$$b \text{ - est } P_g = \frac{1}{2} (K_a \text{ ou } K_p) \cdot g \cdot h^2 b$$

- Une deuxième résultante  $P_q$  située en  $h/2$ . Sa valeur – pour une largeur d'écran  $b$  – est  $P_q = (K_a \text{ ou } K_p) \cdot q \cdot hb$

## 3. Equilibre de Caquot – Kérisel

Messieurs Caquot et Kérisel ont introduit un élément supplémentaire non pris en compte par Rankine : le frottement sol-écran. En effet, le sol en particulier sous l'effet du tassement va frotter contre la paroi interne de l'écran et générer un effort vertical descendant non négligeable.

L'effort  $P$  décrit précédemment subsiste mais fait maintenant un angle  $d$  avec la perpendiculaire à la surface de l'écran.  $d$  est l'angle de frottement sol-écran. Par contre, les coefficients de poussée  $K_a$  et de butée  $K_p$  fournis par Rankine sous forme d'équation ne sont plus valables et doivent être remplacés par les tables de Caquot et Kérisel (voir Figure 1).

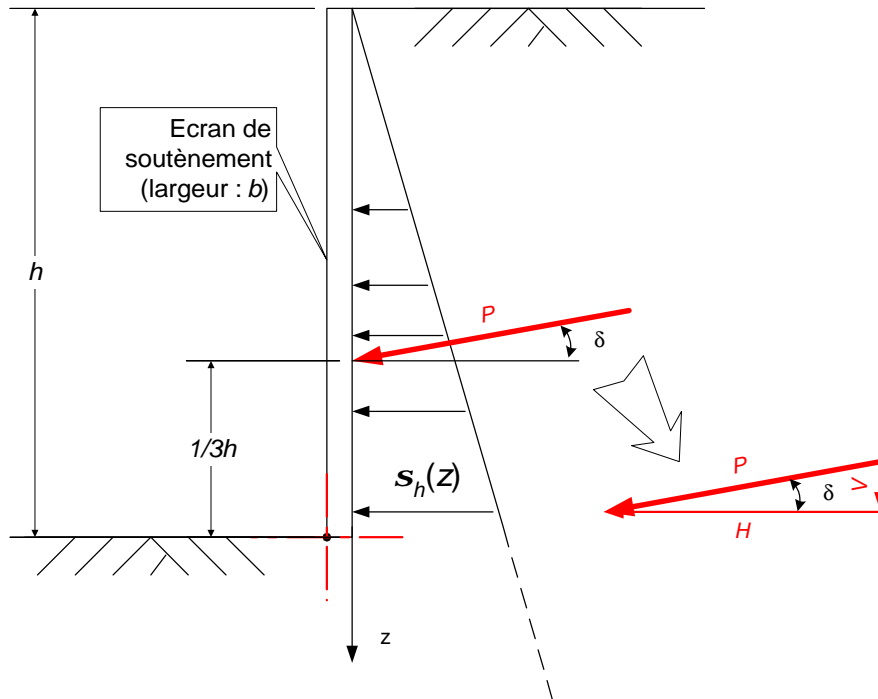
Dans le cas général, on prend :  $d = \frac{2}{3} \Phi$  (avec  $\Phi$  : angle interne de frottement)

Compte tenu de la figure suivante, la décomposition de  $P$  en deux efforts l'un perpendiculaire l'autre parallèle à l'écran est :

$$\square H = P \cos(d)$$

## Stabilité des murs de soutènement

$$\square V = P \sin(\delta)$$



POUSSÉE ET BUTÉE DES TERRES		valeurs de $\phi$									
		5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
ÉQUILIBRE DE CAQUOT-KÉRISEL	$\frac{\delta}{\phi} = 1 \dots$	0,81 0,99	0,65 0,98	0,53 0,97	0,44 0,95	0,37 0,93	0,31 0,90	0,26 0,86	0,22 0,80	0,185 0,73	0,155 0,64
	$\frac{\delta}{\phi} = \frac{2}{3} \dots$	0,81 1,08	0,66 1,16	0,54 1,24	0,44 1,33	0,36 1,44	0,30 1,56	0,25 1,68	0,20 1,8	0,16 1,7	0,13 1,6
	$\frac{\delta}{\phi} = \frac{1}{3} \dots$	0,82 1,15	0,67 1,30	0,56 1,49	0,45 1,70	0,37 1,93	0,30 2,20	0,25 2,5	0,20 2,8	0,16 3,2	0,13 3,6
	$\frac{\delta}{\phi} = 0 \dots$	0,84 1,19	0,70 1,42	0,59 1,70	0,49 2,04	0,41 2,46	0,33 3	0,27 3,7	0,22 4,6	0,17 5,8	0,13 7,5
	$\frac{\delta}{\phi} = \frac{1}{3} \dots$	0,88 1,22	0,75 1,52	0,64 1,89	0,52 2,38	0,46 3,03	0,39 4,02	0,32 5,55	0,26 8,1	0,20 12	0,16 19
	$\frac{\delta}{\phi} = \frac{2}{3} \dots$	0,94 1,24	0,81 1,59	0,72 2,06	0,64 2,72	0,56 3,61	0,48 5,25	0,40 8,0	0,34 12,8	0,27 21	0,22 41
	$\frac{\delta}{\phi} = -1 \dots$	1,04 1,26	1,06 1,66	1,05 2,20	1,04 3,04	1,02 4,26	0,98 6,56	0,94 10,7	0,88 18,2	0,82 35	0,75 75

Figure 1 - Tables des coefficients  $K_a$  et  $K_p$  de Caquot - Kérisel (extrait Mémotech - Génie Civil)

## 4. Conclusion

Lorsque le mur de soutènement est en forme de L (semelle arrière), les calculs sont généralement menés avec la théorie de Rankine qui néglige le frottement sol-écran.

Dans le cas contraire (pas de semelle arrière), on utilisera les extensions de la théorie de Caquot ainsi que les tables des coefficients de butée et poussée.

### III. Stabilité des murs de soutènement

Les écrans de soutènement peuvent être classés en deux catégories fondamentales :

- ❑ les murs rigides : mur poids, mur cantilever en BA.
- ❑ les murs souples : rideau de palplanche, parois moulées de grande hauteur.

Compte tenu de la difficulté de calcul des soutènements souples, ce chapitre ne s'intéressera qu'aux soutènements rigides. La Figure 2 donne un aperçu des deux types de murs rigides les plus courants.

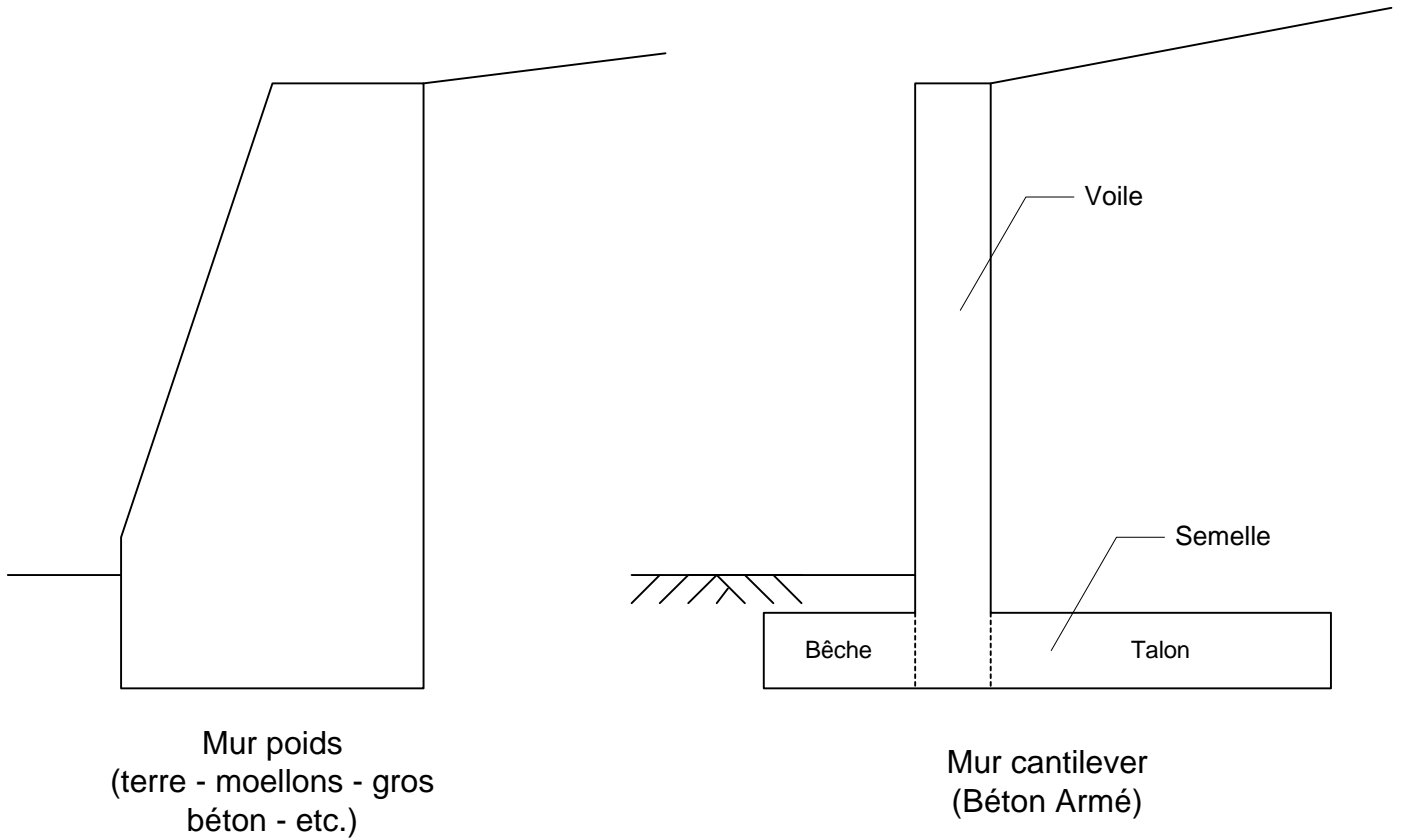


Figure 2 - Mur poids & mur cantilever

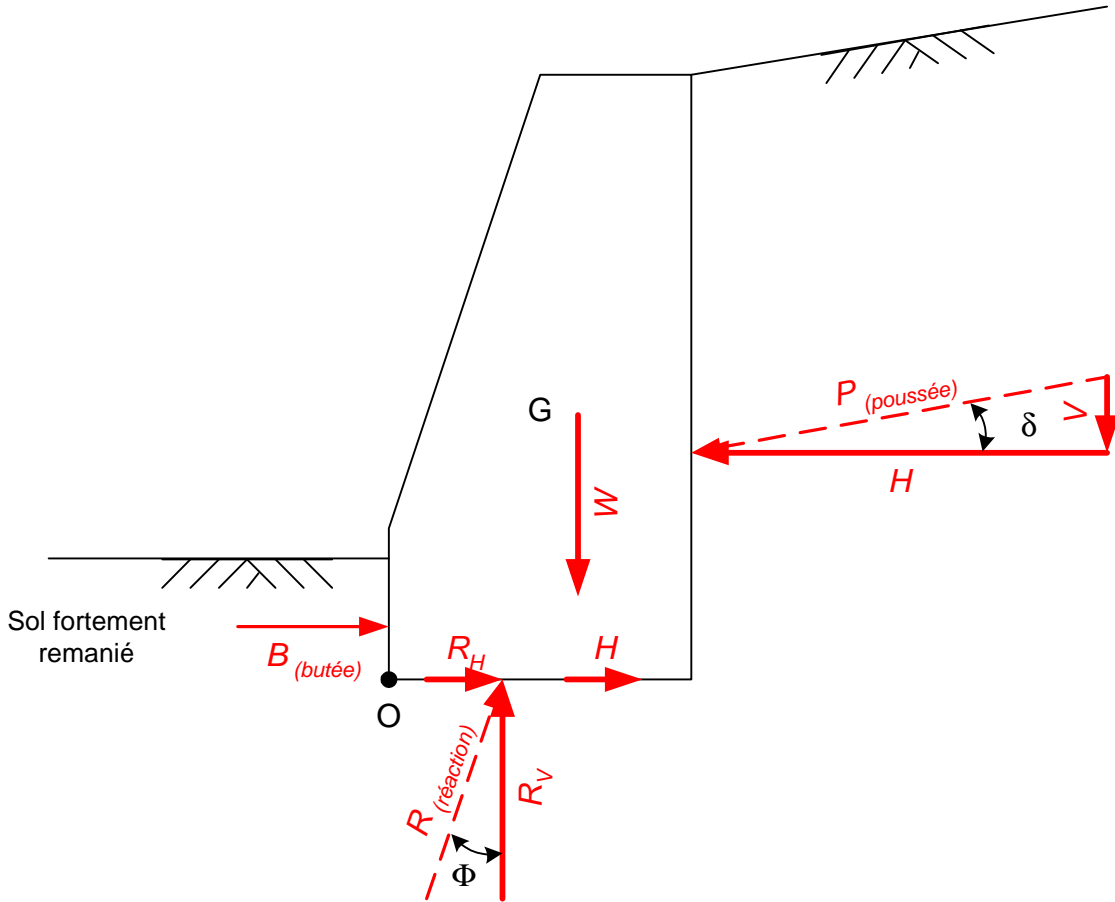
La capacité d'un écran de soutènement à reprendre les charges qui lui sont appliquées se décline sous 2 aspects :

- ❑ la résistance intrinsèque du mur → par exemple si mur en béton armé : calcul de béton armé (non traité dans cette partie) en considérant généralement le mur comme une poutre verticale.
- ❑ la stabilité du mur → un mur est stable si le terrain environnant est capable de maintenir celui ci compte tenu des charges qui lui sont appliquées. C'est ce deuxième aspect qui fait l'objet des sections qui suivent.

Les critères de stabilité sont :

- ❑ non glissement du mur,
- ❑ non renversement du mur,
- ❑ non poinçonnement du sol sous la base du mur.

**1. Bilan des efforts extérieurs appliqués à un mur**



La section précédente a permis de déterminer l'effort  $P$  due à la poussée des terres (pas de mobilisation de butée dans ce cas là). Mais le bilan complet des efforts extérieurs appliqués au mur de soutènement fait aussi apparaître :

- ❑ le poids propre du mur  $W$ .
- ❑ l'effort de butée  $B$  généré par la terre devant le mur. Mais compte tenu de la difficulté de mobiliser un tel effort (déplacement important nécessaire et sol souvent peu compacté),  $B$  est souvent négligé.
- ❑ l'apport de la cohésion  $C$  sous la forme d'un effort  $H$ . (effet de collage) :  $H = C \cdot b$
- ❑ la réaction d'appui du sol sur le mur  $R$ .

Le seul effort qui ne peut pas être calculé directement est  $R$ . Mais la somme des forces suivant la verticale permet de le déterminer aisément :

- ❑  $R_V = W + P_V$
- ❑  $R_H = R_V \tan \Phi = (W + P_V) \tan \Phi$

**2. Stabilité au glissement**

La stabilité au glissement est assurée lorsque :  $\frac{\sum \text{des efforts horizontaux retenant l'ouvrage}}{\sum \text{des efforts horizontaux faisant glisser l'ouvrage}} \geq 1.5$

Il vient alors ( $B$  négligé) :  $\frac{R_H + C \cdot b}{P_H} \geq 1.5$  avec  $R_H = (W + P_V) \tan \Phi$ .

**3. Stabilité au renversement**

La stabilité au glissement est assurée lorsque :  $\frac{\sum \text{des moments retenant l'ouvrage} / \text{pt o}}{\sum \text{des moments faisant renverser l'ouvrage} / \text{pt o}} \geq 1.5$



## Stabilité des murs de soutènement

Il vient alors ( $B$  négligé) :  $\frac{M_{/o}(W + P_V)}{M_{/o}(P_H)} \geq 1.5$

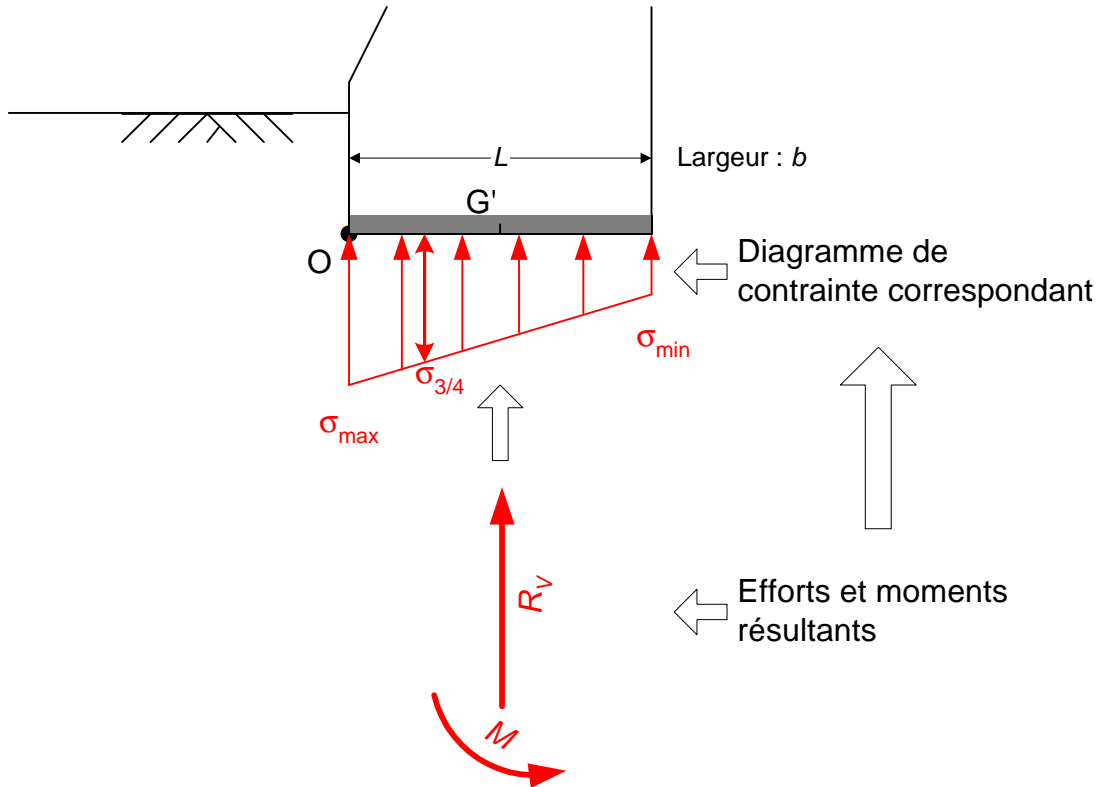
Remarques :

- Attention : dans le bilan, l'effet de  $R_H$  n'apparaît pas puisque dès que le mur se soulève,  $R_H$  devient nul.
- Ce critère n'a véritablement de valeur que sur un sol capable de supporter une telle rotation autour d'un point comme le rocher ou d'autres sols très résistants.

## 4. Stabilité au poinçonnement

Le sol sous la semelle subit des contraintes normales. La répartition est triangulaire.

Réglementairement, on détermine une contrainte  $s_{3/4}$  qui devra rester inférieure ou égale à la contrainte de calcul de portance du sol  $q$ .



Il vient :  $s_{3/4} = \frac{3s_{max} + s_{min}}{4} \leq q$  (simple règle de 3) avec :

- $R_V = W + P_V$  (équation déjà obtenue précédemment)
- $M = \sum \text{des moments retenant l'ouvrage} / \text{pt } o - \sum \text{des moments faisant renverser l'ouvrage} / \text{pt } o$  soit plus précisément  $M = M_{/o}(W + P_V) - M_{/o}(P_H)$
- On peut aussi ne fournir que  $R_V$  associé à un bras de levier  $e$ . Il vient alors :  $M = e \cdot R_V$ .
- $s_{max} = \frac{N}{S} + \frac{M}{I} \frac{L}{2}$  et  $s_{min} = \frac{N}{S} - \frac{M}{I} \frac{L}{2}$  où  $I = \frac{bL^3}{12}$  (voir cours de RdM)