

Université Djillali Bounaama Khemis Miliana

Faculté de science et de la technologie

Niveau: Master II

Filière: Génie civil

Spécialité: Structure

Module: Ouvrages Spéciaux

Responsable du Module: BENYAMINA Smain

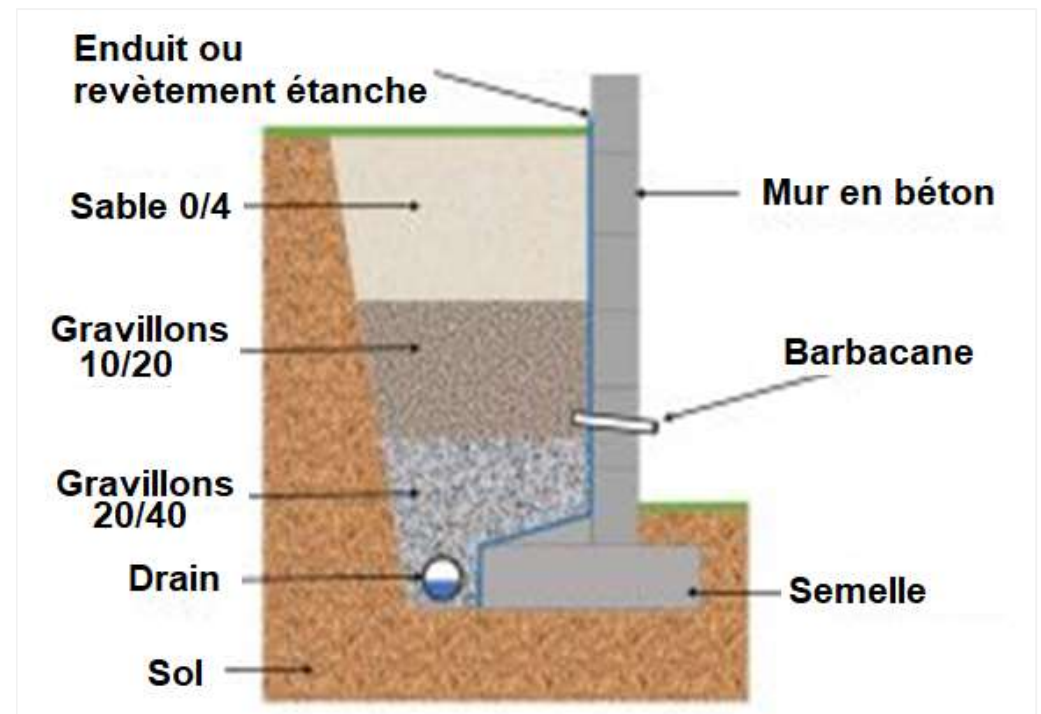
Chapitre I: Murs de Soutènement



AU:2021/2022

1.1. Définition

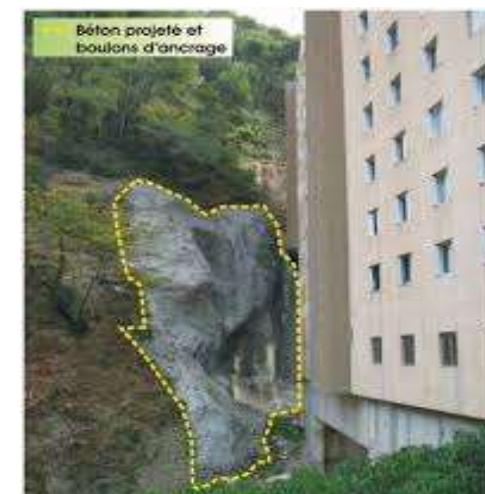
Les murs de soutènement sont des ouvrages permettant de retenir une masse de terre ou une paroi verticale par une masse stabilisatrice. Ils sont réalisés dans le but de stabiliser un talus instable utilisant leurs poids propres ou leurs rigidités.



1.1. Définition

Un ouvrage de **soutènement** comprend tous les types de murs **subissant** des **forces imposées** par le **talus** soutenu. Il est essentiellement employé :

- ✓ En site **montagneux** pour **protéger** tous types de **voies** (**chaussées routières**, **voies ferrées**, **pistes**,.....etc.) vis-à-vis le risque de **glissement**.
- ✓ En site **urbain** pour **réduire** l'**emprise** d'un talus naturel, en vue de la **construction** d'un bâtiment ou l'aménagement d'un **espace vert ou de jeu**.



1.2. Types d'ouvrages de soutènement:

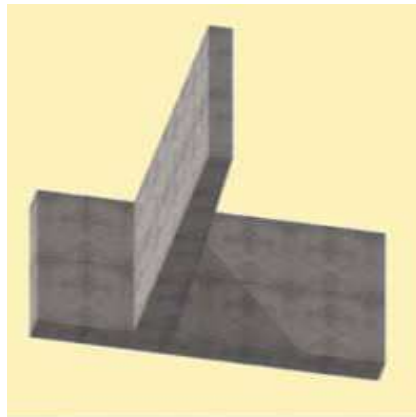
En général, **trois principaux** types d'ouvrages de soutènement sont **distingués**:

1.2.1. Mur-poids

C'est le type de soutènement le plus **classique**, le plus **anciens** et le plus **couramment** mise en **œuvre**. Il comprend les murs en **pierre**, en **béton** ou en **béton armé**. La **particularité** de ce type de mur est que **son poids** est une **force stabilisatrice** dans le soutènement du **sol retenu**. Selon le matériau **utilisé** les figures suivantes illustrent quelques **types de murs de soutènement**.



Mur en béton armé en L et en T renversé



Mur en béton _Atalus



Mur en pierres (Gabions)

1.2. Types d'ouvrages de soutènement:

1.2.2. Ecrans de soutènement

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 alors que leur poids a un rôle insignifiant. On peut citer par exemple les rideaux de palplanches formés de profilés métalliques emboîtés les uns dans les autres.



Rideaux de palplanches en profilés métalliques

Cours_Murs de soutènement_M2_Structures_UDBKM_BENYAMINA S

1.2. Types d'ouvrages de soutènement:

1.2.3. Ouvrages de soutènement composites

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 batardeaux constitués de deux rideaux de palplanches des géotextiles ou les ouvrages en terre renforcés par des ancrages ou des clous.



**(02) Rideaux de palplanches (batardeaux)
Pour réaliser une pile d'un Pont**



**Ouvrages en terre renforcés par
géotextiles**



Talus maintenu avec des clou

1.3. Pathologie des murs de soutènements

Un mur de soutènement peut **périr** par rupture d'équilibre (**glissement**, **renversement**, **poinçonnement**); par rupture d'un **ancrage**, rupture du **matériau** constituant l'écran. Les causes peuvent être dues à:

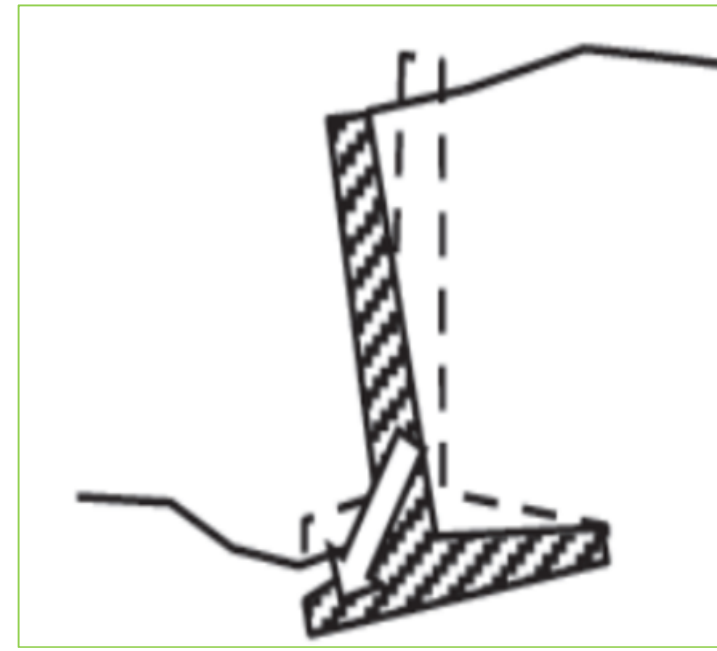
- ✓ Une mauvaise **appréciation** des **caractéristiques du sol**;
- ✓ La **présence d'eau** derrière l'écran **non prévue** dans les **calculs**.



Glissement

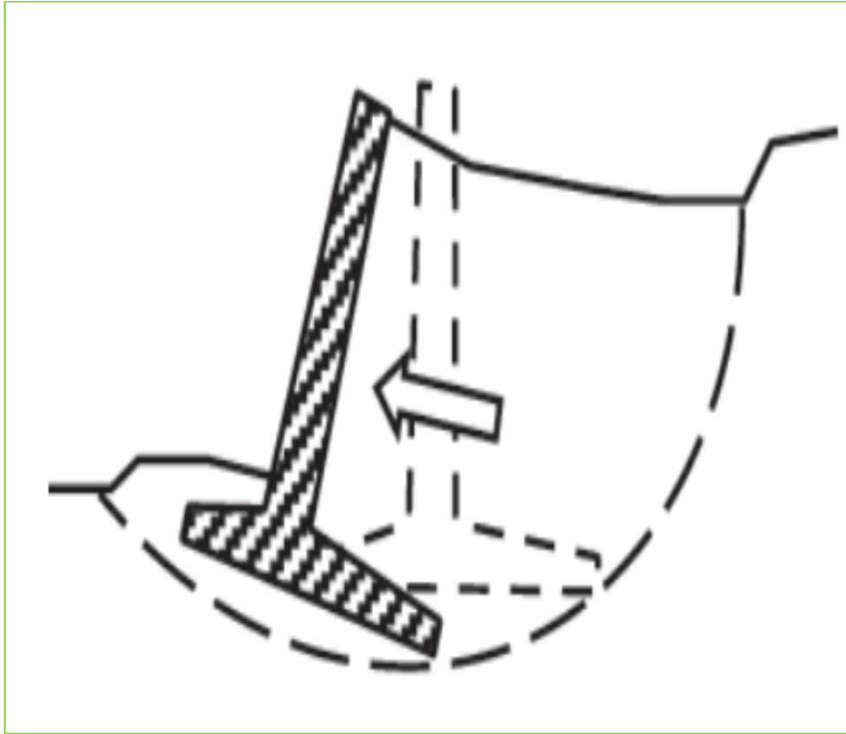


Renversement

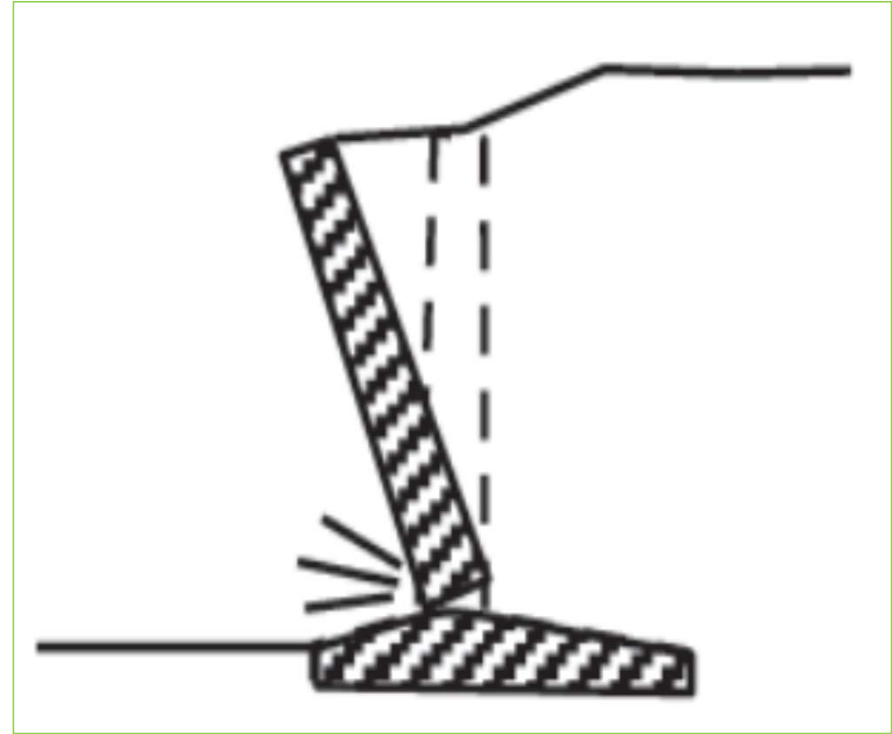


Poinçonnement

1.3. Pathologie des murs de soutènements



Instabilité d'ensemble



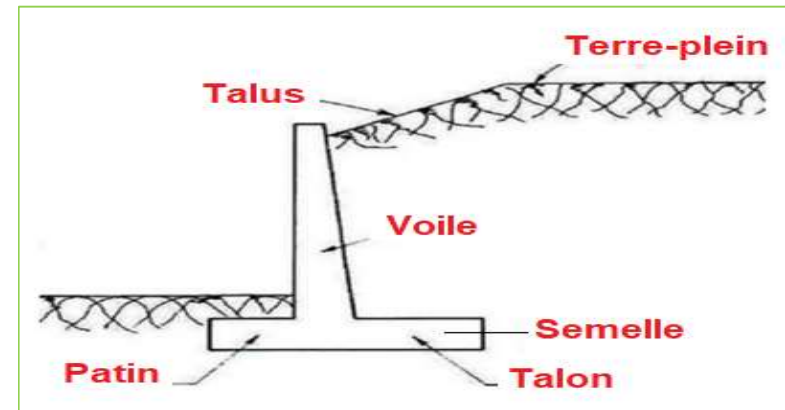
Rupture de mur

1.4. Les murs en béton armé de forme T.

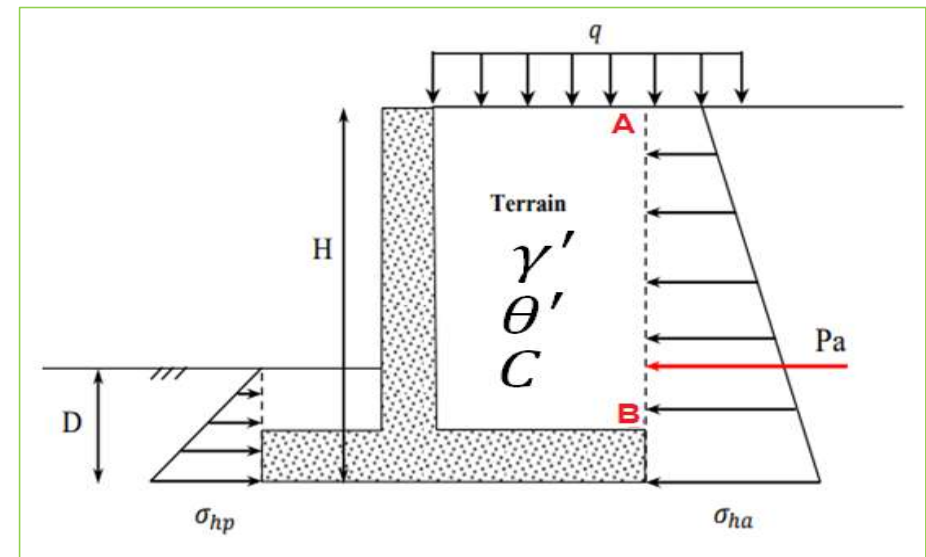
1.4.1. Introduction.

Soit un mur en BA de soutènement en **T renversé** supportant un **massif de sols** représenté sur la figure suivante. L'expérience montre que lors de **renversement** du mur, un coin de sol reste solidaire au mur. Ce coin est délimité par le **plan AB** qui passe par **l'arête du talon**. L'ensemble des forces en présence dans ce mur sont :

- ✓ **Les forces motrices** : **poussée des terres** derrière le mur, et les forces **extérieures (surcharges)**;
- ✓ **Les forces résistantes** : **poids du mur**, **poids du terrain mort**.

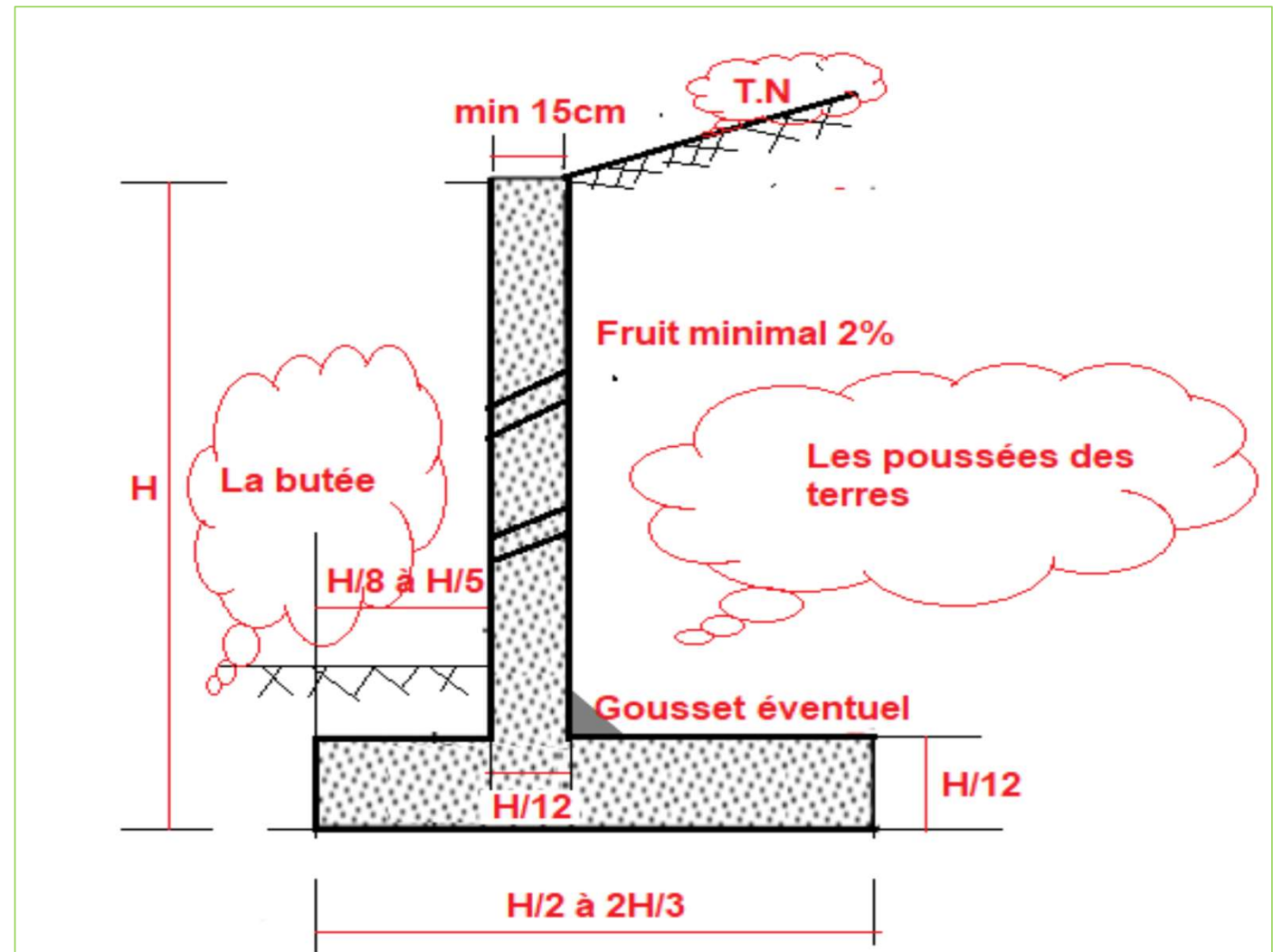


Mur de soutènement en T



Sollicitations exercées sur un mur de soutènement

1.4.2. Prédimensionnement



1.4.3. Calcul des efforts de poussée et de butée

1.3.4.1. Notations

W: angle de la surface avec l'horizontal;

α : angle de la résultante de poussée avec la normale de l'écran;

β : angle de la face de l'écran au contact du sol avec la verticale;

α_0 : angle de la charge répartie sur la surface libre avec la normale à cette surface;

φ : angle de frottement interne du sol en (degré);

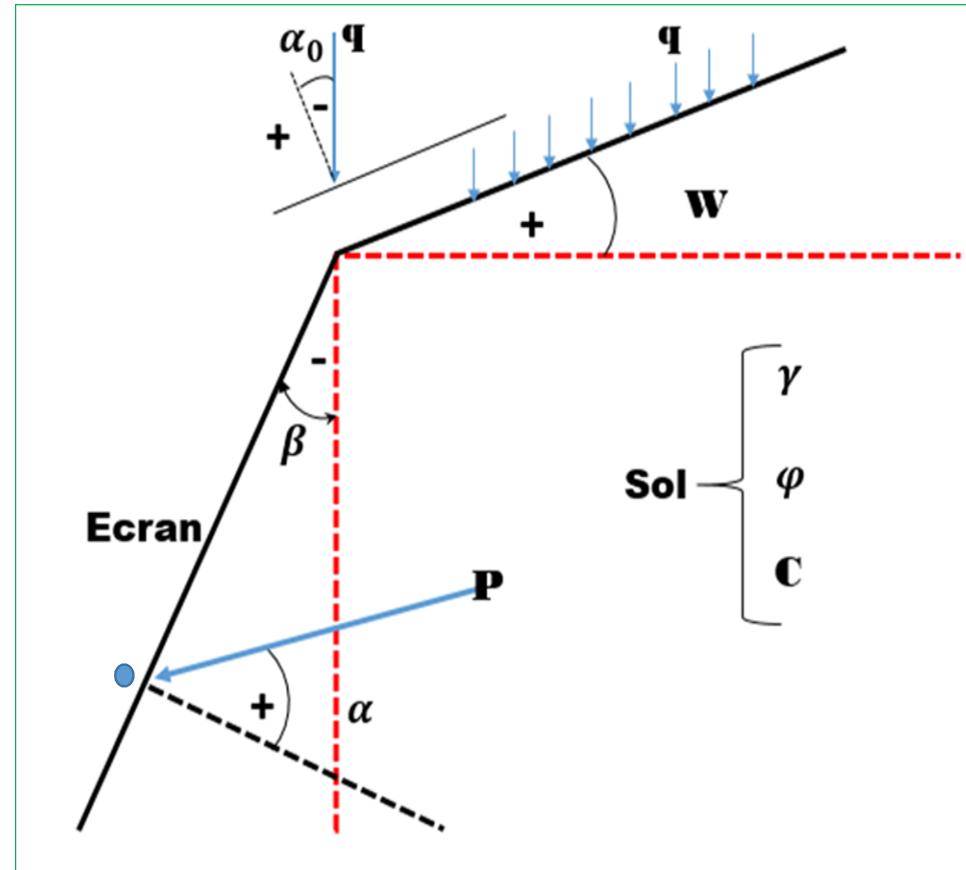
γ : poids volumique du sol en (kN/m^3);

C: cohésion du sol.

Selon la nature du terrain (marne, argile, sable), on peut tirer les valeurs **φ** , **γ** , **C**.

Angles de la résultante de poussée avec la normale de l'écran

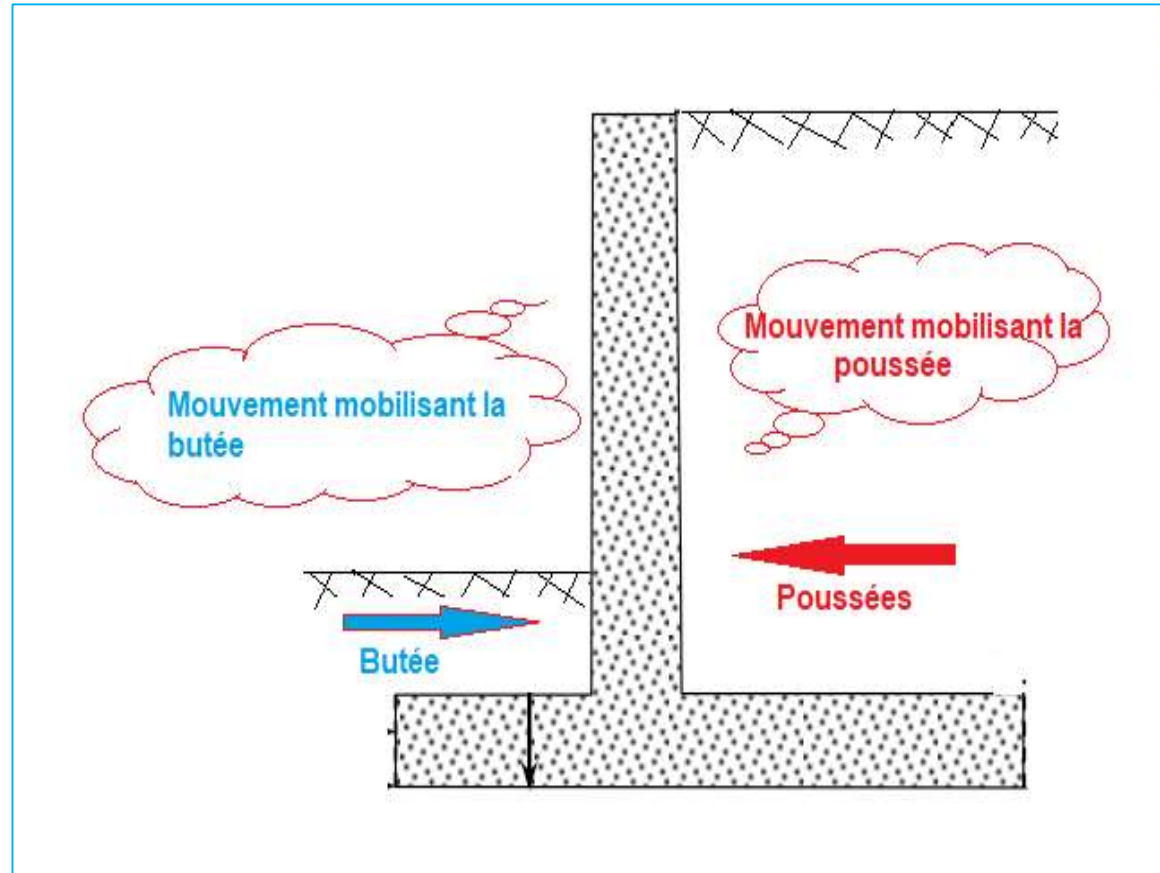
$\alpha=0$	Ecran très lisse (Acier de palplanche)
$\alpha = \left(\frac{1}{4}\right)\varphi$	Ecran lisse (Béton à parement)
$\alpha = \left(\frac{1}{2} \text{ à } \frac{2}{3}\right)\varphi$	Ecran rugueux (Béton coulé à pleine fouille, béton rugueux)
$\alpha = \varphi$	Ecran très rugueux où l'on peut considérer un frottement sol-sol



Notations et signes des angles

1.4.3. Calcul des efforts de poussée et de butée

1.3.4.2. Poussées et de Butées



Poussées et de Butées

1.4.3. Calcul des efforts de poussée et de butée

1.3.4.3. Coefficient de Poussées et de Butées

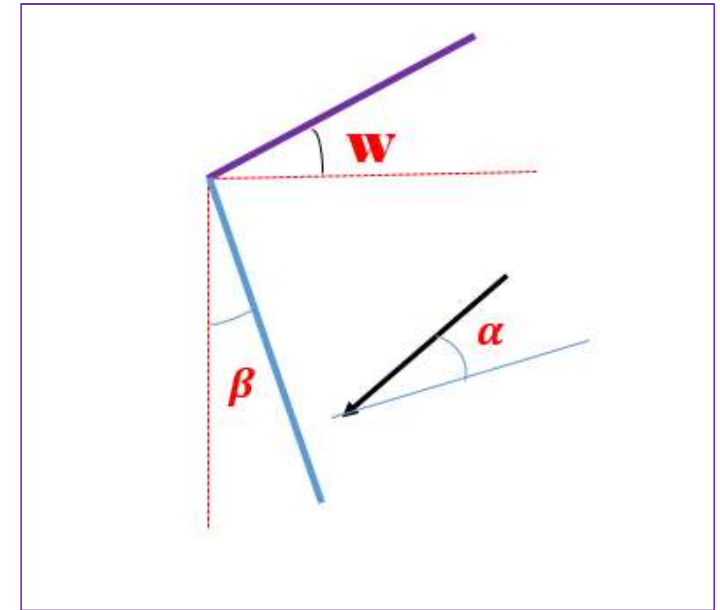
La poussée exercée par le terrain est due :

- ✓ Au poids propre du terrain de poids volumique γ ;
- ✓ Aux charges appliquées sur la surface du terrain q pour une charge uniforme sur toute la surface libre;
- ✓ À la cohésion C du terrain .

Action d'un sol pulvérant de poids volumique γ

Poncelet , en 1840 a donné une formule pour:

- ✓ Un écran incliné d'angle β sur la verticale;
- ✓ Un talus incliné d'angle W sur l'horizontal;
- ✓ Une inclinaison α de la poussée par rapport à la normale de l'écran.



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

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

1.4.3. Calcul des efforts de poussée et de butée

La formule Coulomb (pour $w = \beta = \alpha$)

$$K_a = \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)$$

B- Action de la surcharge q

- Poussée

$$q_a = \frac{K_a \cdot q}{\cos(\beta - w)}$$

- Poussée

$$q_p = \frac{K_p \cdot q}{\cos(\beta - w)}$$

La pression de poussée

$$P_a = K_a \cdot \gamma \cdot H$$

La pression de butée

$$P_p = K_p \cdot \gamma \cdot H$$

La poussée

$$F_a = \frac{1}{2} K_a \cdot \gamma \cdot H^2$$

La butée

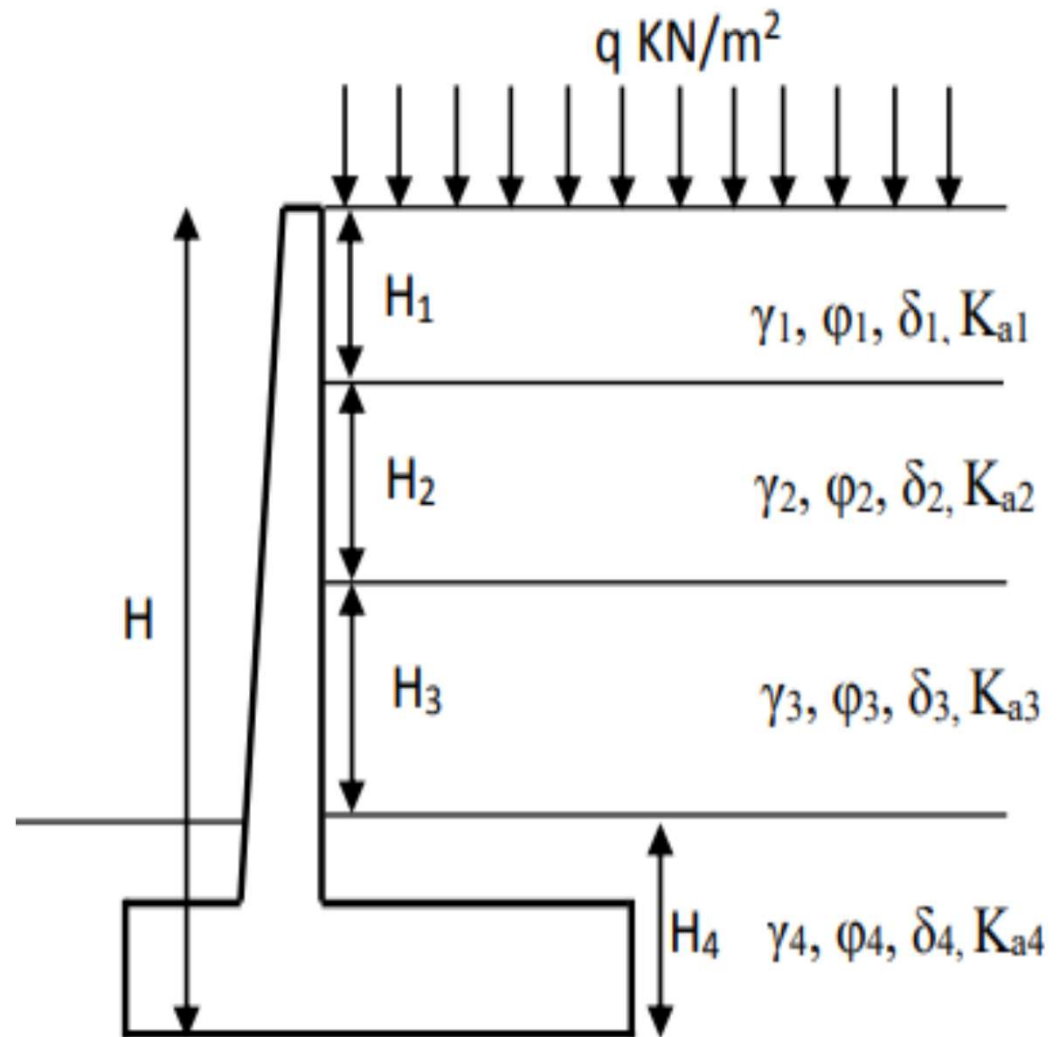
$$F_p = \frac{1}{2} K_p \cdot \gamma \cdot H^2$$

1.4.3. Calcul des efforts de poussée et de butée

Cas des massifs stratifiés:

Les terres situées au-dessus de la couche dans laquelle la pression des terres doit être calculée sont supposées agir comme une surcharge. La surcharge Q à la couche considérée est :

$$Q = q + \sum_1^{i-1} \gamma_i \cdot H_i$$



1.5. Vérification de la stabilité des murs de soutènement

Le principe de calcul pour la vérification des murs de soutènement commence par l'identification de toutes les forces extérieures agissant sur l'ouvrage. Selon l'Eurocode 7, la justification de la stabilité externe de mur de soutènement consiste à vérifier :

- a) La stabilité au renversement à l'ELU et l'ELS ;
- b) La stabilité au glissement à l'ELU;
- c) La stabilité au poinçonnement (défaut de capacité portante) à l'ELU et l'ELS.

1.5.1. Stabilité au renversement

La poussée totale tend à faire basculer le mur par rotation autour du point A.

Le poids du mur et de la terre au-dessus du talon tend à s'opposer à cette rotation.

Moment stabilisateur M_s : moment de poussée active verticale, poids du mur et poids du remblai au dessus du talon par rapport à A.

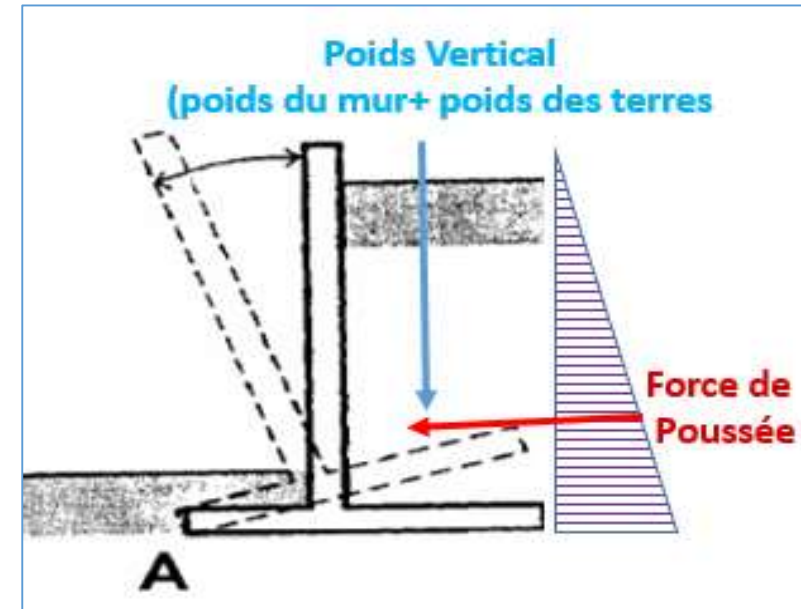
Moment de renversement M_r : moment de poussée active horizontale par rapport à A.

F_r coefficient de sécurité vis à vis du renversement pris supérieur ou égal à 1,5.

$$F_s = \frac{M_s}{M_r} \geq 1.5$$

NB:

- La charge q n'est pas considérée comme **moment stabilisateur** car elle est souvent favorable mais pas **toujours présente**;
- Le **poids des terres** sur le **patin avant** de la fondation du mur est toujours **négligé**.

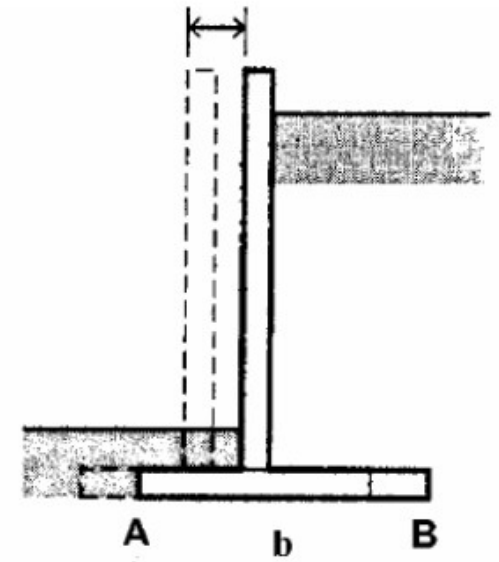


Mecanisme de renversement

1.5.2. Stabilité vis-à-vis du glissement

La composante horizontale de la poussée tend à provoquer le glissement suivant la base du mur. Si l'on néglige la butée, la seule force s'opposant au glissement est la résistance au cisaillement sous la base de la semelle. Soit :

- δ_g : L'angle de frottement sur la base (interface sol/semelle du mur),
- B : largeur de la semelle
- a : L'adhérence (liée à cohésion du sol, c'est-à-dire à C , et à la rugosité δ du mur),
- R : La réaction sous l'ouvrage, avec :
- N : Composante verticale de R
- T : Composante horizontale de R
- F_g : Coefficient de sécurité vis à vis du glissement.



Mecanisme de glissement

$$F_g = \frac{a \cdot B + N \cdot \text{tg} \delta_g}{T} \geq 1.5$$

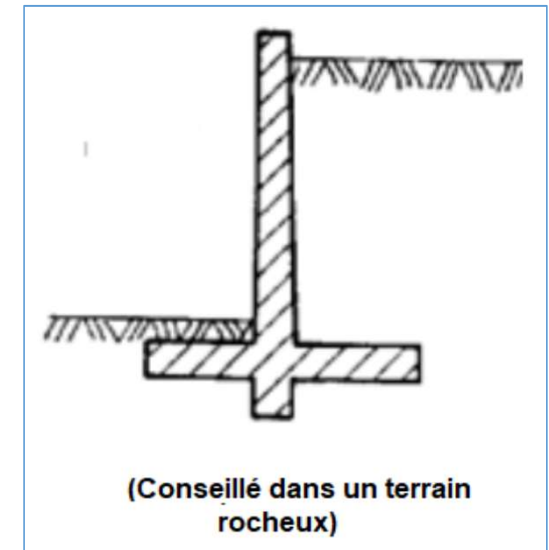
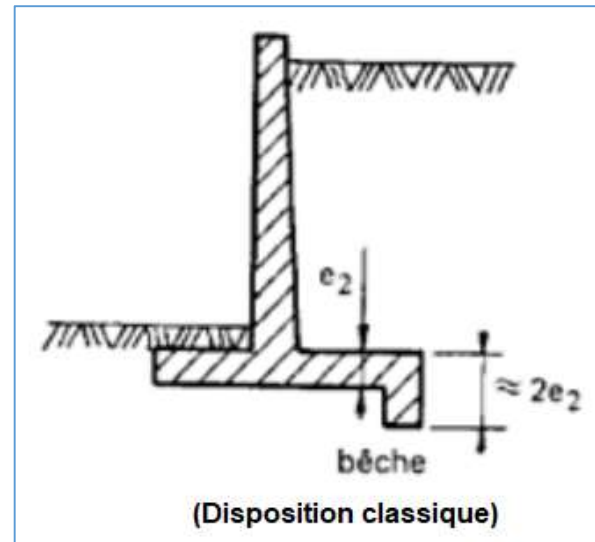
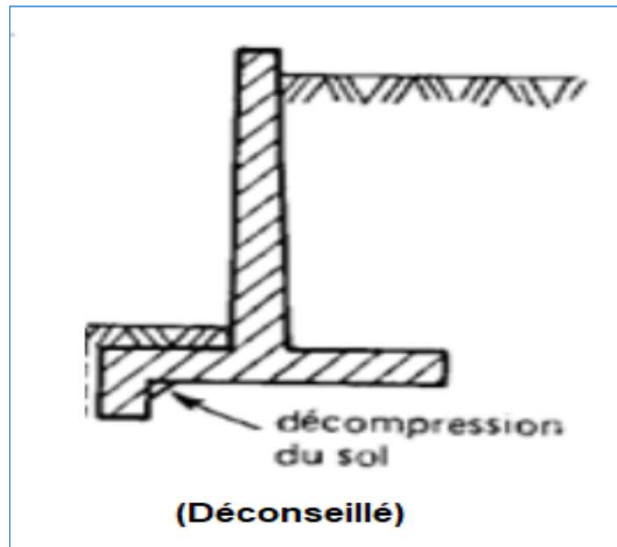
Remarque: En butée :
 $\delta_p = 1/3\phi$ si l'angle de frottement du sol $\phi \leq 30^\circ$
 $\delta_p = 2/3\phi$ si l'angle de frottement du sol $\phi > 30^\circ$

1.5.2. Stabilité vis-à-vis du glissement

NB:

1- Dans le cas des murs en béton, le coefficient de frottement "sol/ béton de fondation" est donné par : $\text{tg}\delta_g = 2/3 \text{tg}\varphi$: Avec φ : l'angle de frottement interne du sol sous la fondation,

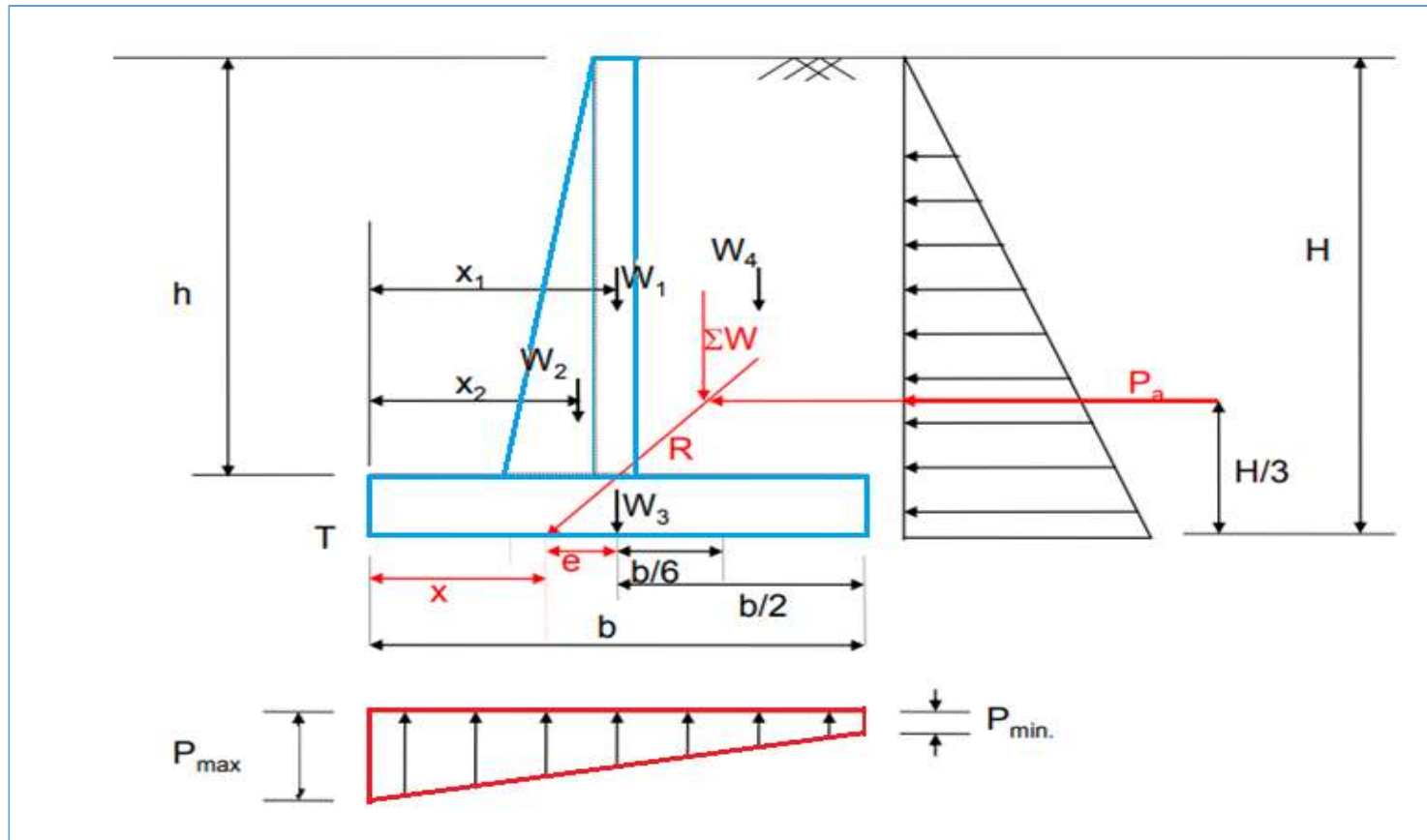
2- Dans certains cas, la stabilité au glissement du mur nécessite de prévoir une **bêche** sous la semelle. Soit, à l'avant ou à l'arrière de la semelle, ou parfois en prolongement du voile. Elle est toujours coulée en pleine fouille (sans coffrage) et sa hauteur égale à 2 fois l'épaisseur du talon.



Différentes dispositions de la bêche

1.5.3. La stabilité au poinçonnement (défaut de capacité portante)

L'action des différentes forces conduit à une **résultante oblique R** au niveau de la **fondation** et le plus souvent **excentrée**. Il s'agit ici d'un calcul classique de **fondation superficielle** de type **semelle continue** soumise à une charge **incliné et excentré** ou pas.



1.5.3. La stabilité au poinçonnement (défaut de capacité portante)

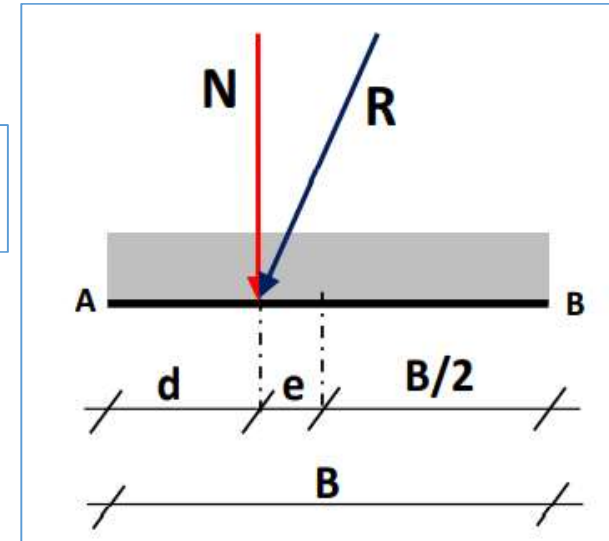
Les calculs sont conduits comme suit :

1- Calcul de l'excentricité:

$$d = \frac{M_s - M_r}{N} \quad \text{et:} \quad e = \frac{B}{2} - d$$

2. Calcul des contraintes max et min:

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{N}{B \cdot l} \left(1 + \frac{6 \cdot e}{B} \right) \\ \sigma_2 = \frac{N}{B \cdot l} \left(1 - \frac{6 \cdot e}{B} \right) \end{cases}$$



3. Calcul de la contrainte moyenne

Si: $e < B/6$, la résultante est dans le tiers central. On vérifie que σ_{moy} est telle que :

$$\sigma_{moy} = \frac{3\sigma_1 + \sigma_2}{4}$$

Si: $e \geq B/6$, la résultante est hors le tiers central. On vérifie que σ_{moy} est telle que :

$$\sigma_{moy} = \frac{3\sigma_1}{4}$$

1.5.3. La stabilité au poinçonnement (défaut de capacité portante)

Les calculs sont conduits comme suit :

1- Calcul de l'excentricité:

$$d = \frac{M_s - M_r}{N} \quad \text{et:} \quad e = \frac{B}{2} - d$$

2. Calcul des contraintes max et min:

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{N}{B \cdot l} \left(1 + \frac{6 \cdot e}{B}\right) \\ \sigma_2 = \frac{N}{B \cdot l} \left(1 - \frac{6 \cdot e}{B}\right) \end{cases}$$

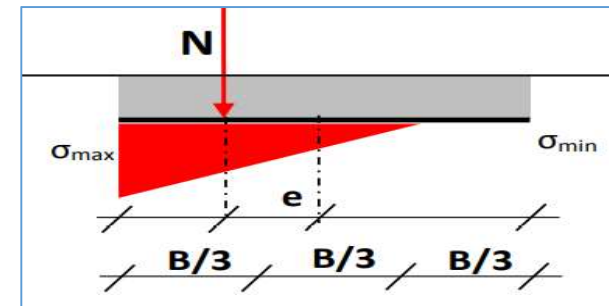
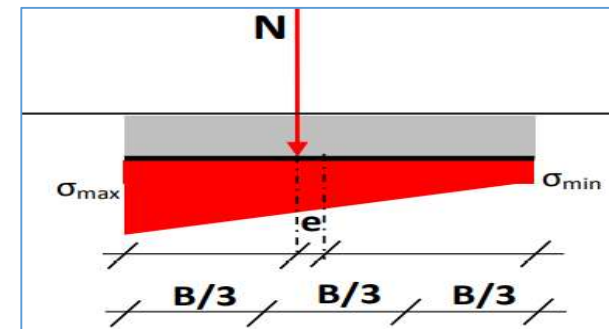
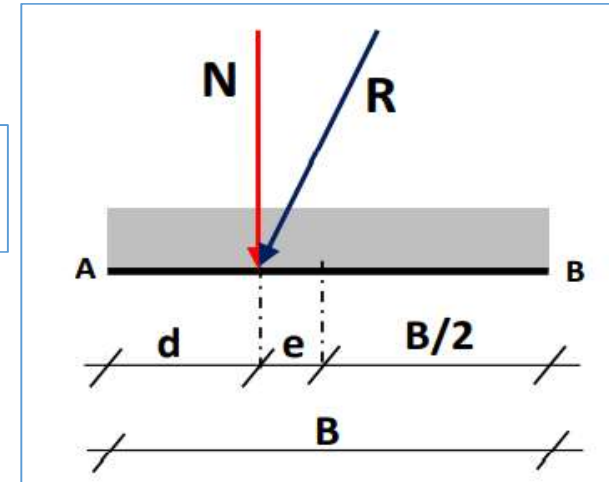
3. Calcul de la contrainte moyenne

- Si: $e < B/6$, la résultante est dans le tiers central. On vérifie que σ_{moy} est telle que :

$$\sigma_{moy} = \frac{3\sigma_1 + \sigma_2}{4}$$

- Si: $e \geq B/6$, la résultante est hors le tiers central. On vérifie que σ_{moy} est telle que :

$$\sigma_{moy} = \frac{3\sigma_1}{4}$$



1.6. Mur de soutènement totalement ou partiellement imm

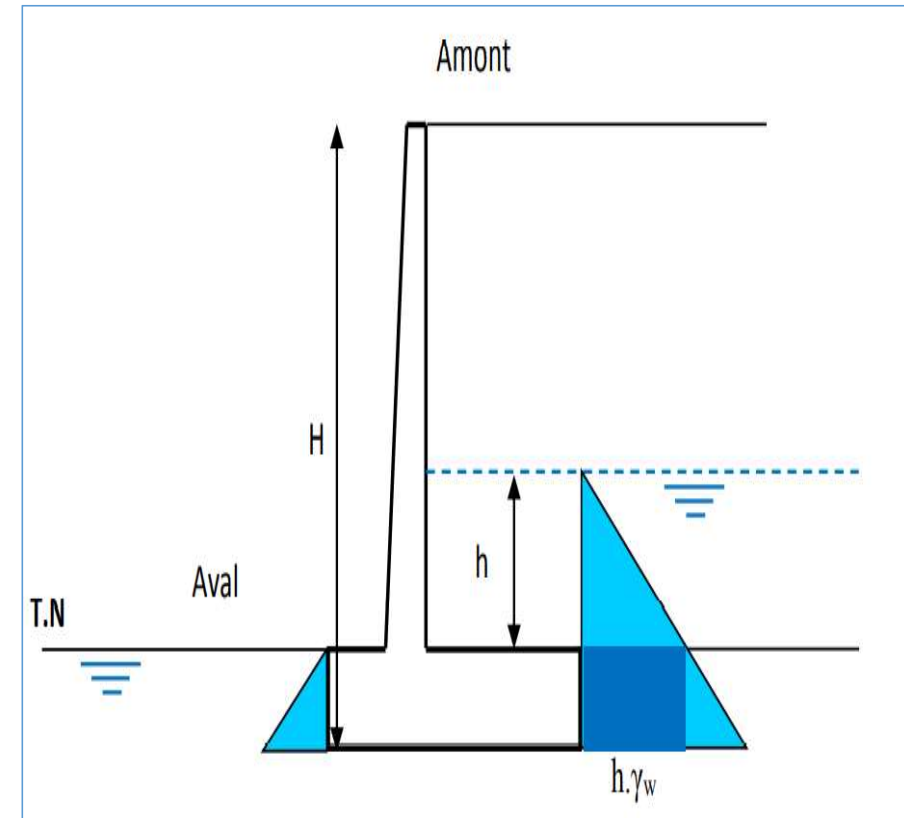
- Dans la couche saturée d'eau, la pression exercée par le poids volumique du sol γ_{sat} est décomposé en deux:

1- Pression due au poids volumique déjaugé γ' ($\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$).

2- la pression **hydrostatique agissant** à partir de niveau de la nappe.

On pourra avoir, une nappe côté aval et amont de l'écran, la poussée hydrostatique est constante et égale à $h \cdot \gamma_w$ en dessous du niveau de la nappe avale.

- La poussée hydrostatique est considérable, pour cette raison, on prévoit des systèmes de **drainage** et des **barbacanes**.



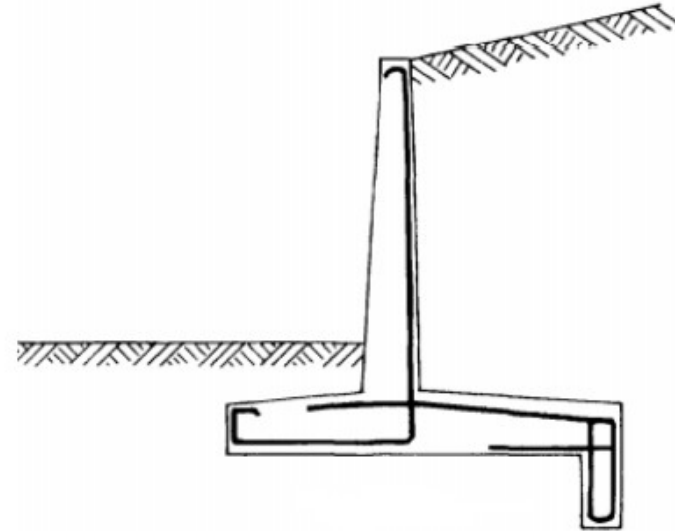
Murs de soutènement partiellement immergés

1.7. Ferrailage du mur

1.7.1. Les combinaisons d'actions

Les combinaisons d'actions pour les divers états limites sont l'état limite ultime, l'état limite de service et l'état limite accidentel, pour ce dernier état limite y a lieu de consulter le règlement parasismique algérien R.P.A 99 (version 2003) chapitre 10.

1.7.2. Principe de ferrailage principal des murs



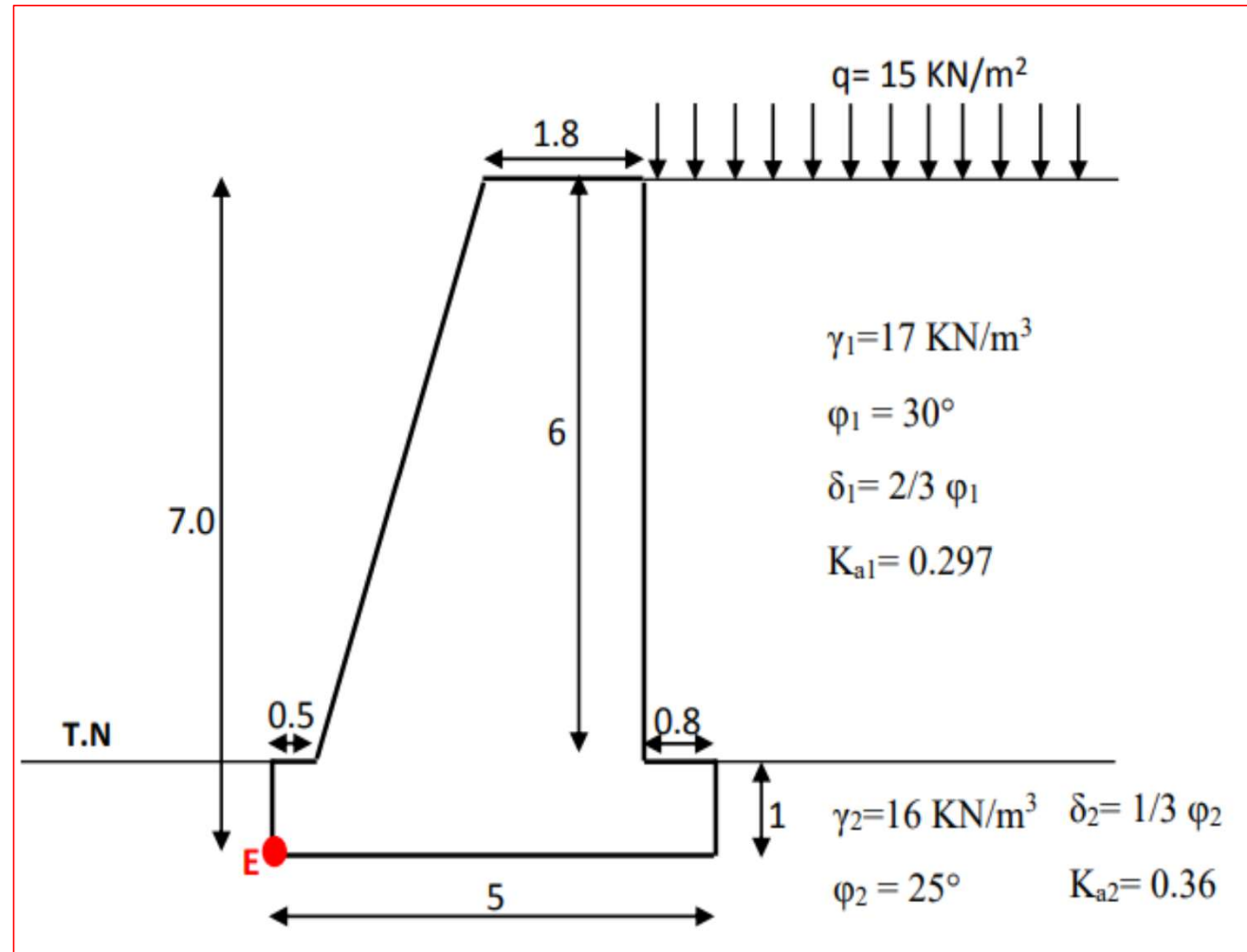
Ferrailage principale du mur de soutènement

1.8.Série d'exercices

Exercice N°:01

Soit un mur poids en béton, tel que indiqué sur la figure :

- 1- Calculer les pressions exercées;
- 2- Calculer les résultantes des pressions exercées et les forces intervenant dans l'équilibre;
- 3- Déterminer l'ensemble des moments renversants et stabilisants du mur.
- 4- Vérifier la stabilité du mur au glissement et renversement.

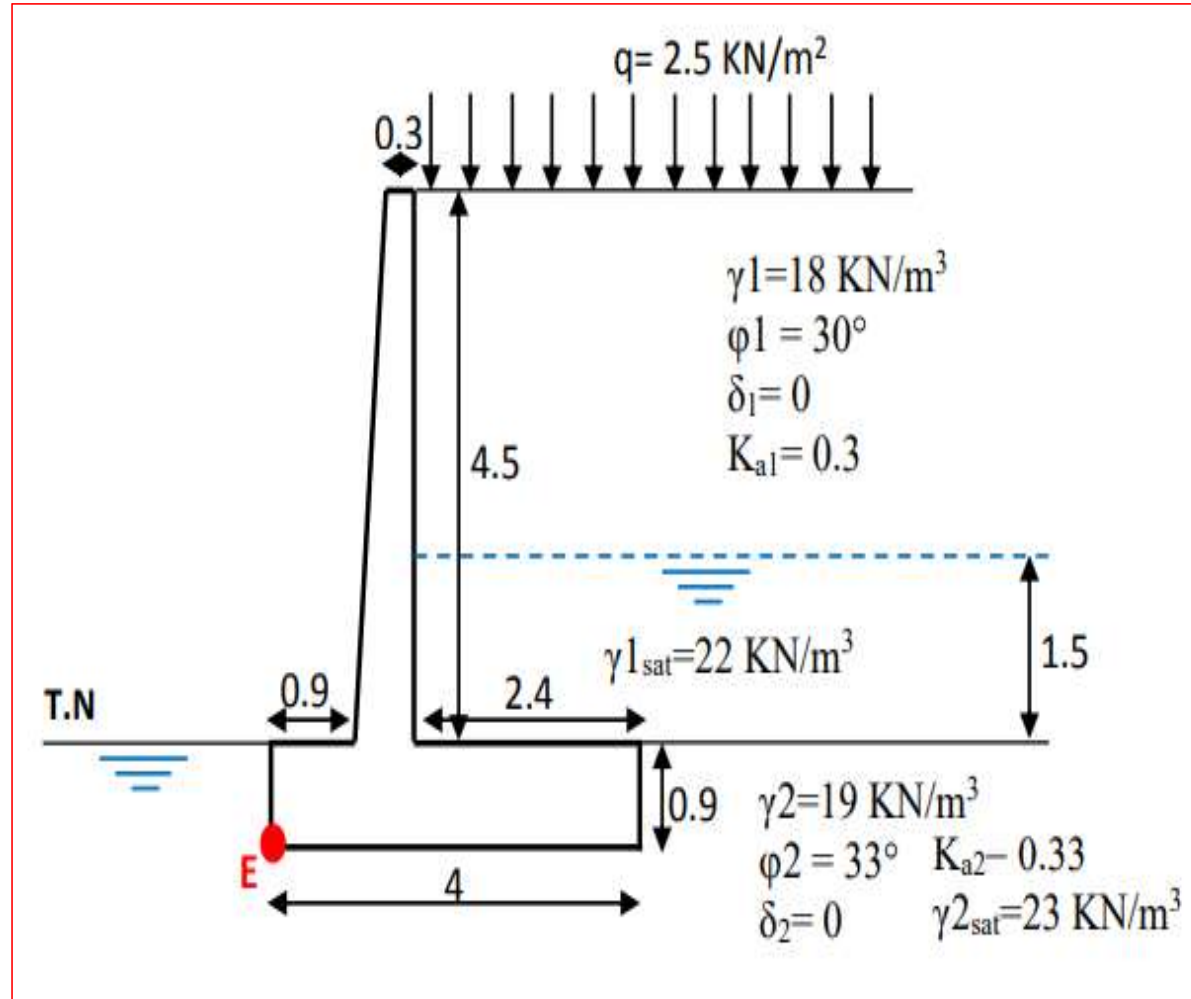


N.B: Angle d'inclinaison du talus $\beta = 0$, Angle d'inclinaison du mur $\alpha = 0$, la paroi est considérée très rugueuse, la cohésion $C = 0$.

Exercice N°:02

Soit un mur poids en béton armé, présenté sur la figure suivante:

- 1- Donner les résultantes des pressions exercées et les forces intervenant dans l'équilibre.
- 2- Vérifier la stabilité du mur au glissement et au renversement et la capacité du sol à reprendre les charges. $\sigma_{sol} = 1.50$ bars.
- 3- Calculer le ferrailage du fut du mur et de sa fondation.



N.B: Angle d'inclinaison du talus $w = 0$, Angle d'inclinaison du mur $\alpha = 0$, la paroi est considérée lisse, la cohésion $C = 0$.

Exercice N°:03

Soit un mur de soutènement en forme de "L", en BA, représenté selon la figure suivante. Le poids des usagés est assimilé à une surcharge équivalente à 1 KN/m^2 . Les propriétés du sol sont les suivantes :

- 1- Vérifier la stabilité du mur vis-à-vis du glissement.
2. Calculer le ferrailage principal du fut au niveau de l'encastrement.
3. Schématiser sur un dessin le choix et la disposition du ferrailage principal.

$f_{c28}=25 \text{ MPa}$, $f_e=400 \text{ MPa}$, enrobage= 2 cm

N.B: Angle d'inclinaison du talus $w=0$, Angle d'inclinaison du mur $\alpha=0$, la paroi est considérée lisse, la cohésion $C=0$.

