

MECANIQUE DES SOLS

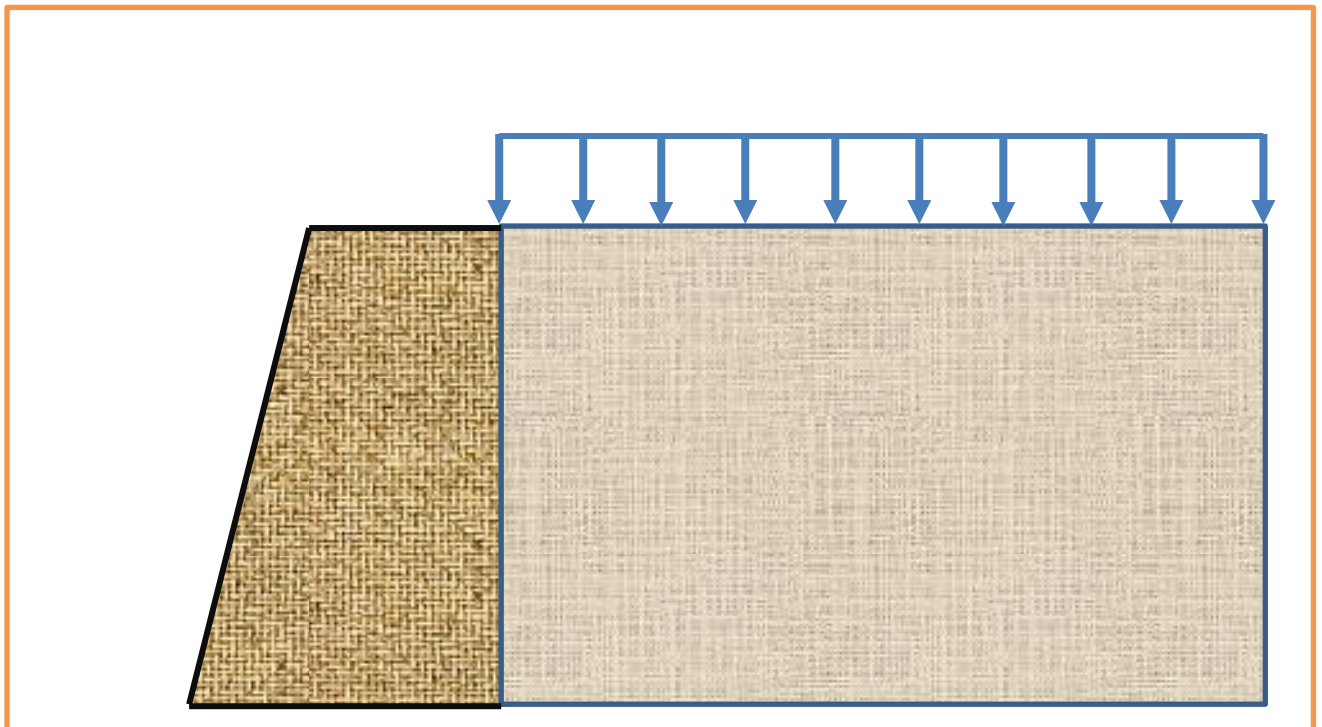
ETUDE DE LA STABILITE TOTALE DES MURS

- Stabilité au renversement
- Stabilité au glissement
- Résistance à l'écrasement des matériaux
- Résistance au poinçonnement

Filières : Génie Civil option Travaux publics

COURS & EXERCICES CORRIGES

METHODES SIMPLES AVEC FICHES DE CALCUL



Première édition

Par :Mr ELKHADARY Mohamed

Ingénieur formateur à l'OFPPT

Mécanique des sols

RESUME DU COURS ET EXERCICES CORRIGES

J'ai le plaisir de recevoir vos remarques, suggestions et vos questions sur mon adresse : Moham85@gmail.com

Mr ELKHADARY Mohamed

Sommaire

Sommaire	3
A) Chapitre 0 : Introduction à la mécanique des sols :	8
I. Définition de la géotechnique :	8
II. Projet type géotechnique	8
III. Domaine d'application de la géotechnique :	9
B) Chapitre 01 : Étude de la stabilité au renversement et au glissement : cas général	11
I. Introduction	11
II. Les différents types de stabilité :	11
III. Etude de stabilité des murs au renversement (à la rotation)	13
1) Pose du problème :	13
2) Etude de stabilité au renversement	13
a) le moment stabilisant M_s (ou Moment Résistant)	13
b) le moment de renversement M_r	14
c) La condition de stabilité au renversement.	14
d) Exemple 01 : Vérification de la stabilité d'un mur au renversement	15
IV. Etude de la stabilité des murs au glissement	16
1) Pose du problème	16
2) Equations d'équilibre au glissement	17
3) Exemple 02 : Vérification de la stabilité au glissement	19
V. Fiche de calcul pour étudier la stabilité:	21
C) Chapitre 02 : Application sur les murs de clôture : Vérification et dimensionnement	23
I. Application N°1 : Etude de stabilité d'un mur de clôture en maçonnerie	23
II. Application N°2 : Calcul de la poussée maximale du vent que peut supporter un mur :	24
III. Application N°3 : Projet mur de clôture d'une commune rurale :	25
IV. Solution Exercice 01 :	27
V. Solution Exercice 02 :	33
D) Chapitre 03 : Calcul de la poussée des terres	36
I. Définition d'un mur de soutènement :	36
II. Types des murs de soutènement	37
a) Mur Poids	37
b) mur en béton armé	39
c) Mur à consoles	39
d) Mur à contreforts	39

e)	Murs à bêche	40
III.	Caractéristiques fondamentales d'un sol	41
1)	Le poids volumique :	41
2)	Portance du sol q = la pression que peut supporter un sol= Résistance maximale d'un sol.	42
3)	Angle de talus naturel ϕ	42
4)	La cohésion C	43
IV.	Calcul de la Poussée des terres :	43
1)	Introduction	43
2)	Cas N°1 : Cas d'une seule couche de terre sans surcharge.	44
a)	Calcul des pressions.....	44
b)	Diagramme des pressions	45
c)	Calcul de la poussée totale des terres P_{terre}	45
d)	Exemple d'application 01 :Etude de stabilité d'un mur de soutènement en maçonnerie.	46
e)	Cas d'un mur de soutènement en béton armé	48
3)	Cas N°2 : cas d'une surcharge sur les terres à soutenir	50
4)	Cas N°3 : cas de deux couches de terres de caractéristiques différentes.....	57
5)	Cas N°4 : Calcul de la butée des terres.....	65
6)	Cas N°5 : Calcul de la poussée des terres : cas d'un sol cohérent.....	68
7)	Cas N°6 : Calcul de la poussée des terres : Présence de la nappe.	72
E)	Chapitre 04 : Vérification du non écrasement des matériaux.....	79
I.	Objectif du chapitre :	79
II.	Principe de vérification :	79
III.	Exemple d'application :	80
IV.	Fiche de vérification du non-écrasement des matériaux	89
F)	Chapitre 05 : Vérification du non-poinçonnement dans le sol	92
I.	Objectif du chapitre :	92
II.	Principe de vérification :	92
III.	Exemple d'application :	94
G)	Chapitre 06 : Exercices d'application sur l'étude de la stabilité des murs de soutènement	97
I.	Exercice corrigé N° 01 : Vérification de la stabilité d'un mur en BA.....	97
II.	Exercice corrigé N° 02 : Etude de la stabilité d'un mur de soutènement en briques.	100
III.	Exercice corrigé N° 03 : Vérification de la stabilité d'un mur en béton armé.(Cas d'une surcharge)	106
IV.	Exercice corrigé N° 04 : Dimensionnement d'un mur en BA	108
V.	Exercice corrigé N° 05 : Calcul de la surcharge maximale	111
VI.	Exercice corrigé N° 06 : Vérification et dimensionnement d'un mur de soutènement.	114

VII. Exercice corrigé N° 07 : Vérification de la stabilité d'un mur (cas de deux couches différentes).....	120
VIII. Exercice corrigé N° 08 : Dimensionnement d'un mur en BA.....	124
IX. Exercice corrigé N° 09 : Calcul du poids volumique d'un mur	127
X. Exercice corrigé N° 10 : Vérification de la stabilité d'un mur(Cas d'une butée).....	130
XI. Exercice corrigé N° 11 : Calcul des poussées appliquées sur un mur (3 couches avec présence de la nappe)	133
XII. Evaluation N°1	138
XIII. Evaluation N°2	139
XIV. Evaluation N°3	140
Bibliographie :.....	141

Notations :

M_s : Moment stabilisant

M_r : moment de renversement

K : Coefficient de sécurité au renversement

K_1 : Coefficient de sécurité au glissement

P_{mur} : Poids d'un mur

P_{sem} : Poids d'une semelle

PT/S : Poids des terres sur le talon d'une semelle

Q/S : Surcharge sur le talon d'une semelle

Δ : Poids volumique d'un sol

φ : Angle de talus naturel d'un sol

C : cohésion d'un sol

ρ : Poids volumique d'un matériau

f : coefficient de frottement

$\overline{\sigma}_{sol}$: Contrainte admissible d'un sol

K_p : Coefficient de la poussée des terres (p vient du mot « Poussée »)

K_B : coefficient de la butée (B vient du mot « Butée »)

IGX : moment d'inertie d'une section par rapport à l'axe neutre horizontal

Y_{max} : Ordonnée de la fibre la plus éloignée du centre de gravité d'une section

Ω : surface portante d'un mur ou d'une semelle.

P_{terre} : Résultante de la poussée des terres (Force concentrée)

B_{terre} : Résultante de la butée des terres (Force Concentrée)

PQ : Poussée engendrée par une surcharge q sur les terres à retenir

$PQ_{1/2}$: Poussée engendrée par le poids surfacique d'une couche 1 sur

CHAPITRE 0 : INTRODUCTION A LA MECANIQUE DES SOLS

A) Chapitre 0 : Introduction à la mécanique des sols :

I. Définition de la géotechnique :

La mécanique des sols ,appelée aussi « géotechnique », est l'ensemble des activités liées aux applications :

- i. De la mécanique des sols,
- ii. De la mécanique des roches
- iii. Et de la géologie de l'ingénieur.

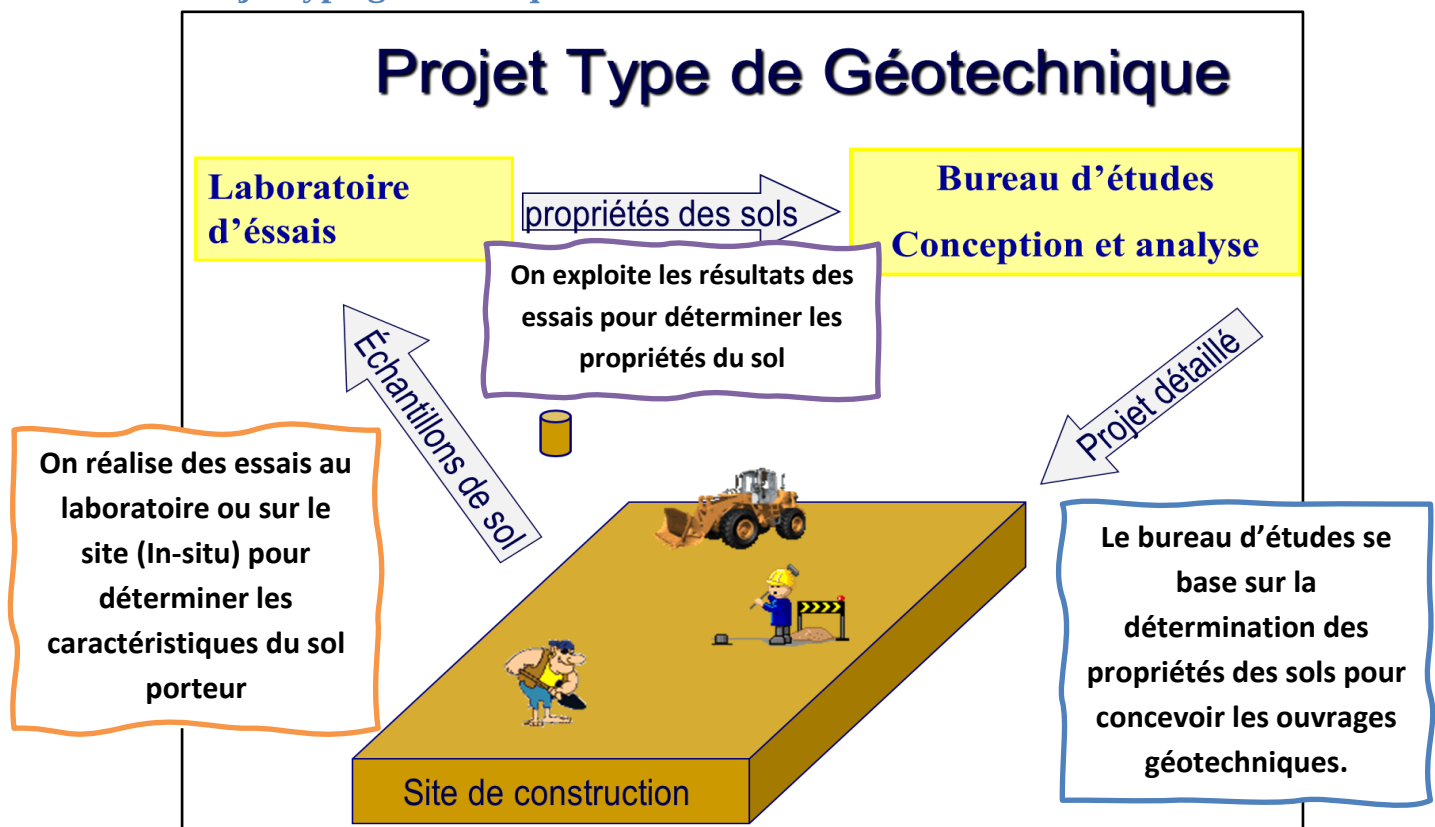
La géotechnique s'appuie principalement sur deux sciences :

- **La géologie** qui retrace l'histoire de la terre, précise la nature et la structure des matériaux et leur évolution dans le temps,
- **La mécanique des sols et des roches** qui modélise leur comportement en tant que déformabilité et résistance des matériaux.

En bref, la mécanique des sols s'occupe de :

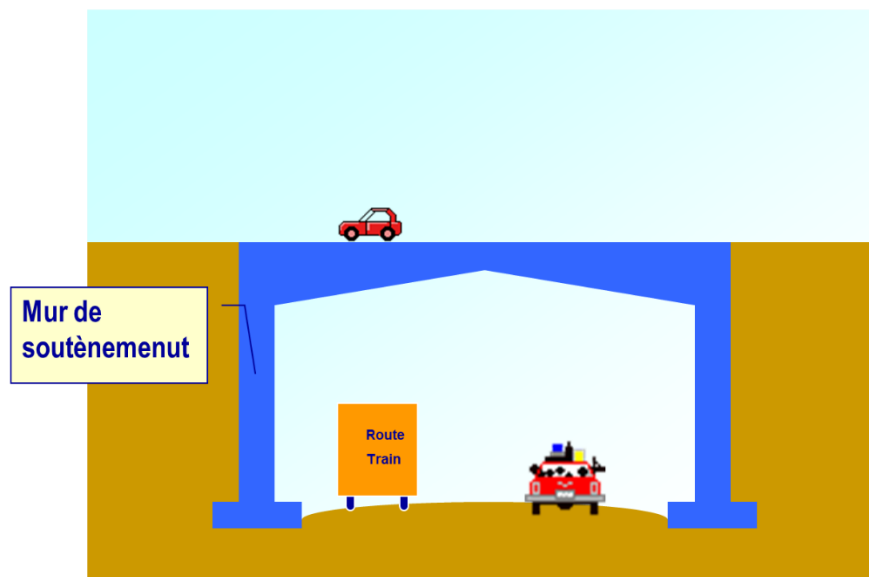
- L'étude des sols porteurs qui reçoivent les ouvrages.
- L'étude des ouvrages géotechniques qui sont généralement en contact avec le sol porteur (Murs de soutènement, tunnels...). L'étude de ces ouvrages ne peut pas se faire sans prendre en considération les caractéristiques physiques et mécaniques du sol porteur.

II. Projet type géotechnique



III. Domaine d'application de la géotechnique :

- La mécanique des sols joue un rôle essentiel dans l'acte de construire pour tous les travaux de bâtiment, de génie civil et d'aménagements. On peut citer :
- Les fondations des ouvrages : bâtiments, ponts, usines, silos...
- Les ouvrages de soutènement



- La stabilité des pentes naturelles et des talus
- Les terrassements : routes, autoroutes, voies ferrées...
- Les V.R.D. et chaussées
- Les tunnels et travaux souterrains
- Les barrages et notamment digues et barrages en terre
- Les ouvrages fluviaux, portuaires et maritimes
- L'hydrogéologie et la protection de l'environnement

Dans ce module, on traitera l'exemple de l'étude de stabilité des murs afin d'illustrer les étapes de vérification ou de dimensionnement d'un ouvrage géotechnique.

Chapitre 01 : Étude de la stabilité au renversement et au glissement : cas général

B) Chapitre 01 : Étude de la stabilité au renversement et au glissement : cas général

I. Introduction

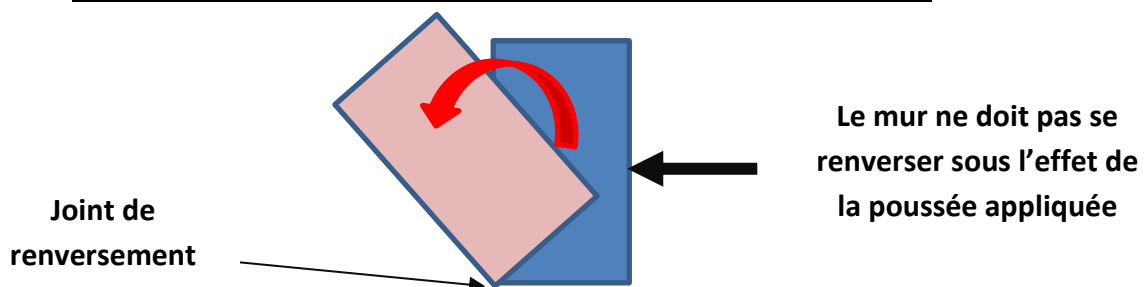
- La stabilité d'un ouvrage **doit être totale**.
- L'instabilité des ouvrages causera des dégâts matériels et humains = perte d'argent et /ou perte de vie.
- La stabilité = équilibre statique = pas de mouvements = pas de déplacement + pas de rotation.

L'instabilité est causée principalement par :

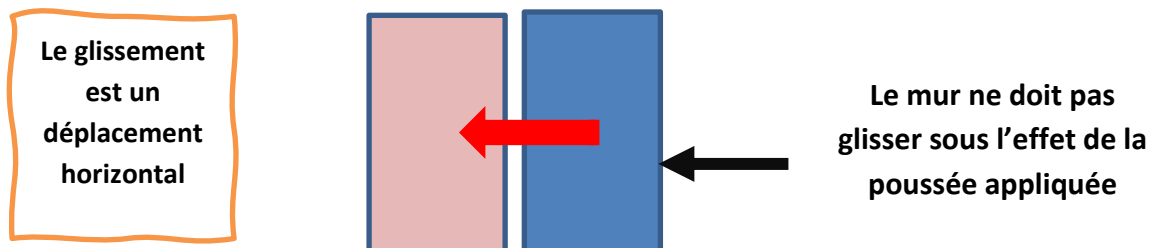
- Les matériaux mis en œuvre sont défectueux (**Manque de résistance**)
- Les formes et les dimensions des éléments de la construction sont mal étudiées. (**Erreurs de dimensionnement**)

II. Les différents types de stabilité :

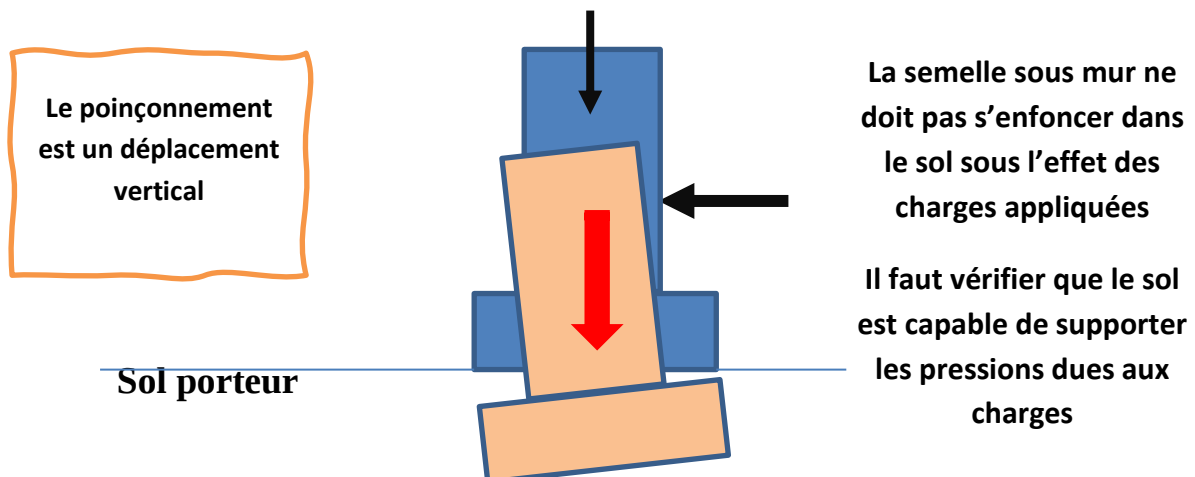
a) Stabilité au renversement (à la rotation ou au basculement)



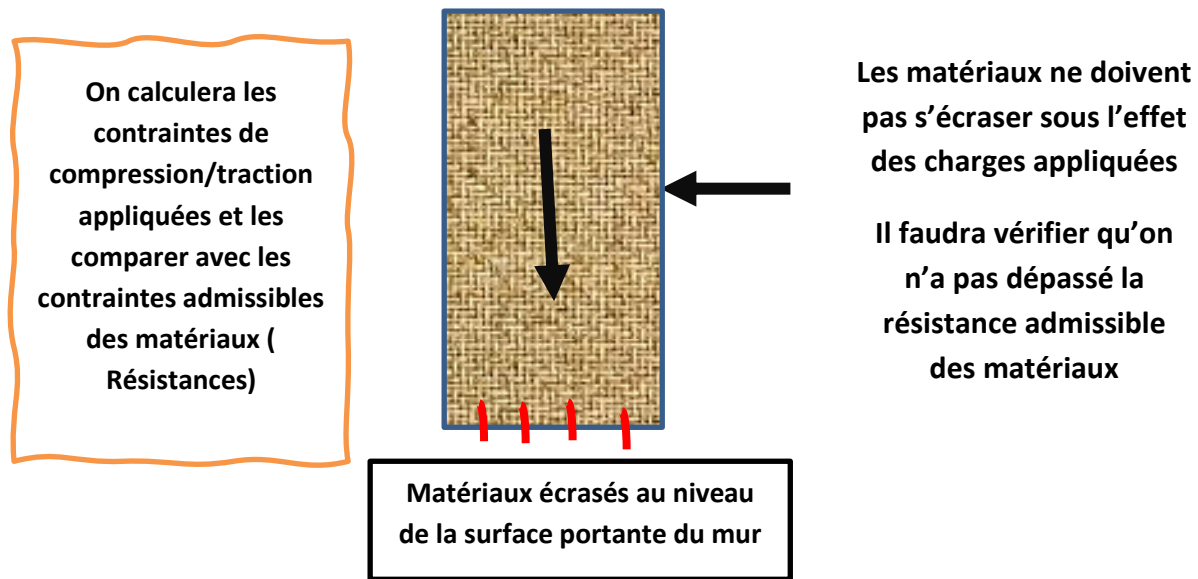
b) Stabilité au glissement :



c) Stabilité au poinçonnement : résistance du sol



d) Stabilité au non-écrasement des matériaux (Résistance des matériaux) :



Récapitulation :

- Stabilité totale = Pas de « GREP » :
 - ✓ Pas de Glissement (G)
 - ✓ Pas de Renversement (R)
 - ✓ Pas d'Ecrasement des matériaux (E)
 - ✓ Pas de Poinçonnement (P)
- Un ouvrage peut satisfaire des conditions de stabilité et ne pas satisfaire d'autres. (Par exemple, il peut être stable au renversement et instable au glissement et vice-versa.
- L'ouvrage doit vérifier toutes les conditions de stabilité.
- Si l'ouvrage n'est pas stable, on doit le redimensionner (recalculer ses dimensions) , changer sa forme, ou changer le matériau de construction.

III. Etude de stabilité des murs au renversement (à la rotation)

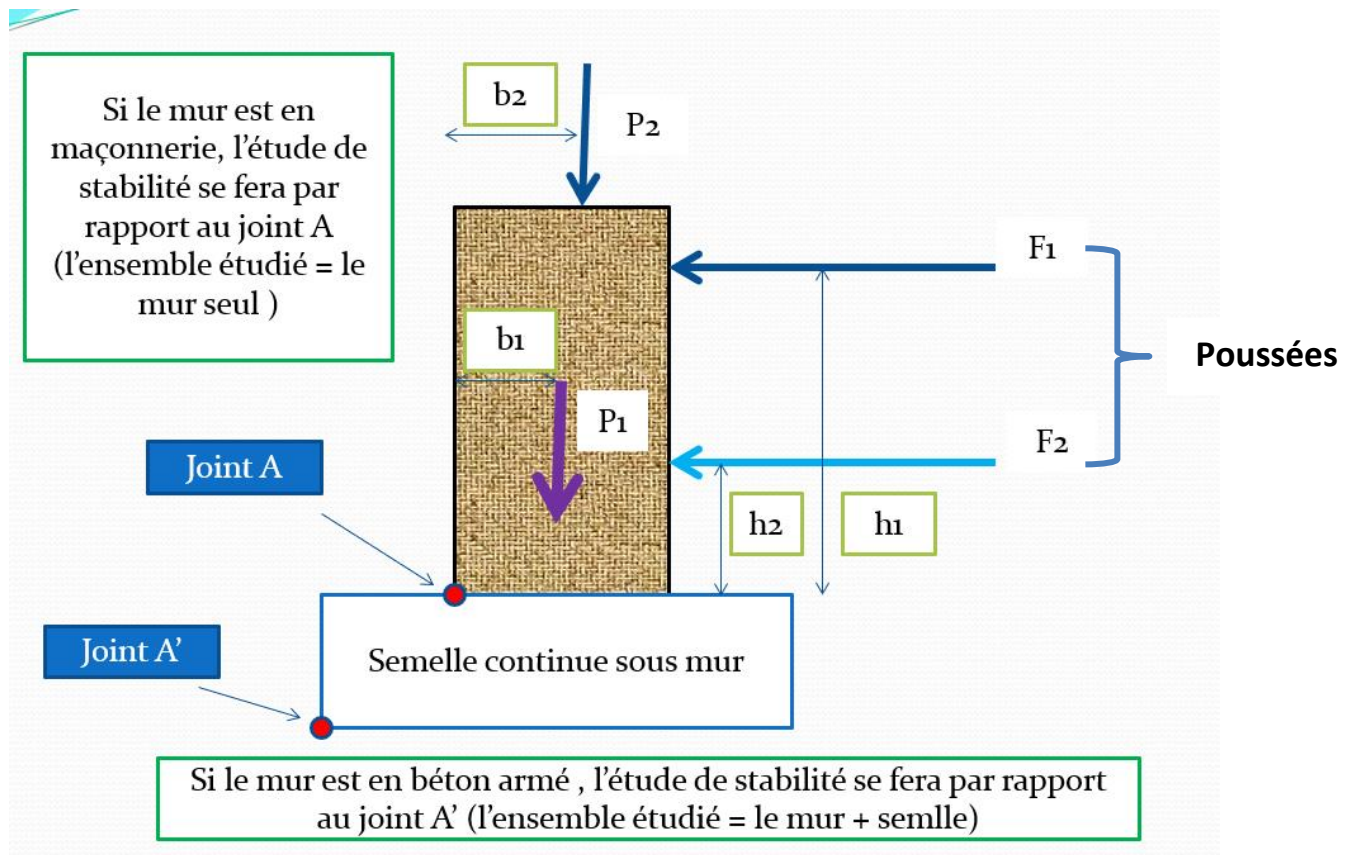
1) Pose du problème :

Soit à étudier la stabilité au renversement d'un mur soumis à des charges verticales et à des charges horizontales exprimées en Kg.

Les charges verticales peuvent être le poids du mur ou une charge appliquée sur le mur (couronnement par exemple).

Les charges horizontales peuvent être la poussée du vent (cas du mur de clôture) ou la poussée des terres (cas des murs de soutènement).

NB : on fera tous les calculs pour un mètre de longueur de mur. ($L=1m$)



NB : On suppose par la suite que le mur est en maçonnerie (Ensemble étudié = Mur)

2) Etude de stabilité au renversement.

La stabilité au renversement (au basculement) se fera en raisonnant sur les moments des charges.

Une charge peut être soit **stabilisatrice** (favorise la stabilité) ou **motrice** (favorise l'instabilité).

a) le moment stabilisant M_s (ou Moment Résistant)

C'est la somme des moments ,par rapport au joint A, des charges qui contribuent (participent) à la stabilité du mur , c'est-à-dire les charges verticales (P_1 et P_2).

➤ On appelle ces charges : charges stabilisatrices. (ou charges résistantes)

- On trouve :

$$M_s = M(P_1/A) + M(P_2/A)$$

$$M_s = P_1 \times b_1 + P_2 \times b_2$$

Moment = Force x distance

b) le moment de renversement M_r

C'est la somme des moments ,par rapport au joint A, des charges qui causent le renversement du mur , c'est-à-dire les charges horizontales F_1 et F_2 :

- Ces charges sont appelées : charges motrices

On trouve :

$$M_r = M(F_1/A) + M(F_2/A)$$

$$M_r = F_1 \times h_1 + F_2 \times h_2$$

Le moment dépend de la charge et du bras de levier (Distance/joint)

- Les moments M_s et M_r sont exprimés en Kg.m

c) La condition de stabilité au renversement.

Pour que le mur soit stable au renversement, il faut que :

$$M_s \geq M_r$$

C'est-à-dire :

$$M_s / M_r \geq 1$$

Pour des raisons de sécurité, on doit surdimensionner le mur en majorant le moment de renversement M_r par un coefficient de sécurité K (Le M_r devient $K.M_r$)

- Cette majoration est faite pour prendre en compte les charges non prévues ou accidentelles.
- la condition de résistance devient :

$$M_s \geq K \times M_r$$

C'est-à-dire :

$$\frac{M_s}{M_r} \geq K$$

- Avec : K : coefficient de sécurité au renversement (il dépend du degré de sécurité souhaité par le maître d'ouvrage)
- En génie civil , on prend souvent : $1,25 \leq K \leq 1,5$

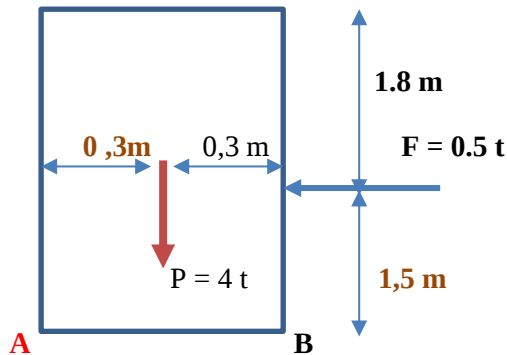
Le coût global du projet dépendra du coefficient de sécurité K

Si on prend en considération la butée dans les calculs de la stabilité, K doit être supérieur à 2.

- Si : $M_s / M_r \geq K$, on dit que le mur est stable au renversement.
- Si : $M_s / M_r < K$, on dit que le mur n'est pas stable au renversement. Il faut le redimensionner (recalculer son épaisseur minimale) pour qu'il le soit.

d) Exemple 01 : Vérification de la stabilité d'un mur au renversement

Soit à étudier la stabilité au renversement du mur représenté sur la figure suivante :



On donne :

$K=1,3$: coefficient de sécurité au renversement

On fera les calculs pour 1m linéaire du mur

➤ **Etape 01 : L'inventaire des charges :**

- a) Charge stabilisatrice : $P = 4 \text{ t} = 4 \times 1000 = 4000 \text{ Kg}$
- b) Charge motrice : $F = 0,5 \text{ t} = 0,5 \times 1000 = 500 \text{ Kg}$

➤ **Etape 02 : Calcul des moments M_s et M_r :**

a) Moment stabilisant :

On a : $M_s = M(P/A) = P \times d = 4000 \times 0,3 = 1200 \text{ Kg.m}$

b) Moment de renversement :

On a : $M_r = M(F/A) = F \times h = 500 \times 1,5 = 750 \text{ Kg.m}$

➤ **Etape 03 : Vérification de la stabilité au renversement :**

On a : $M_s / M_r = 1200 / 750 = 1,6 > K = 1,3$, donc le mur est stable au renversement.

Conclusion : La stabilité au renversement se fait en comparant le moment produit par les charges stabilisatrices à celui produit par les charges motrices tout en prenant en considération le coefficient de sécurité K.

Si une charge F est inclinée, on peut la décomposer en deux composantes, une verticale F_x et l'autre horizontale F_y :

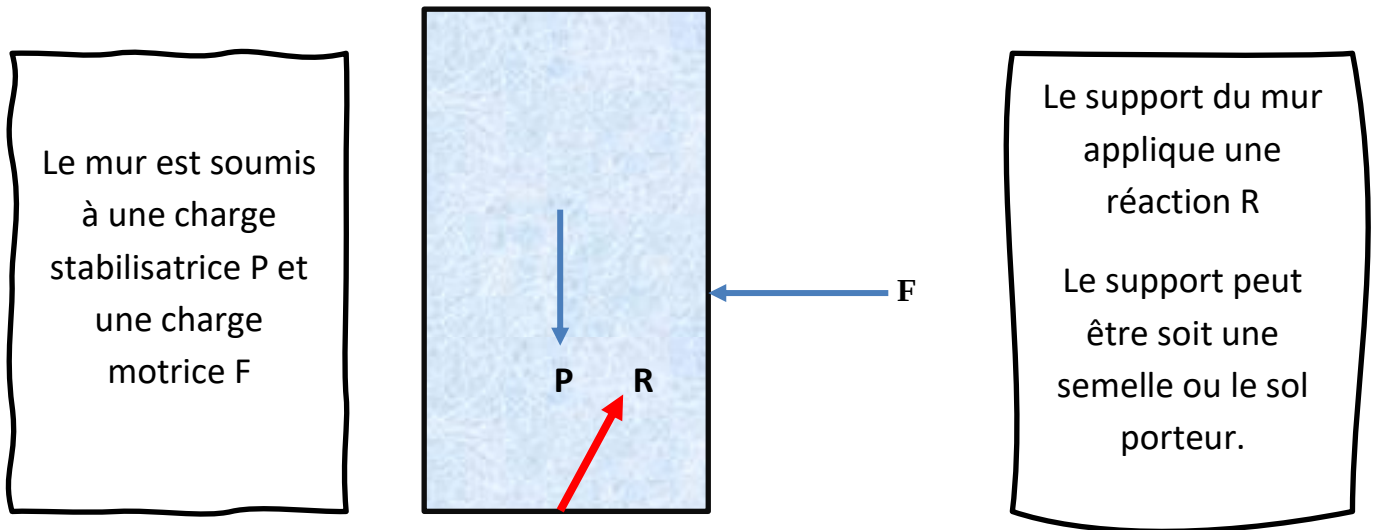
- ❖ $F_x = F \cos(\text{Angle d'inclinaison})$
- ❖ $F_y = F \sin(\text{Angle d'inclinaison})$

IV. Etude de la stabilité des murs au glissement

1) Pose du problème

Soit à étudier la stabilité au glissement du mur représenté sur la figure suivante :

On suppose que le mur est en maçonnerie.

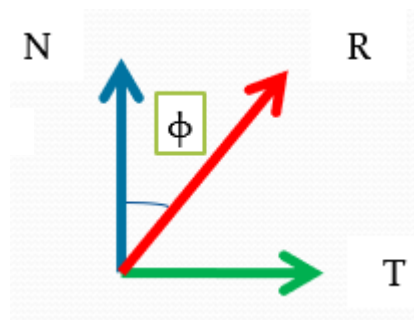


La stabilité au glissement dépendra :

- ✓ des charges verticales stabilisatrices.
- ✓ des charges horizontales motrices.
- ✓ Elle dépend aussi de **la nature de contact entre le mur et son support** (entre la semelle et le sol porteur en cas d'un mur en béton armé),

Le contact entre le mur et son support se traduit par des forces de frottement qui résistent au mouvement du mur.

- Cette réaction mère R peut être décomposée en deux composantes filles :
 - Composante normale N
 - Composante tangentielle T



- On définit le coefficient de frottement :

$$f = \tan(\phi) = T / N$$

$$T = N \times f$$

2) Equations d'équilibre au glissement

Le schéma de calcul deviendra en remplaçant la réaction R par N et T :

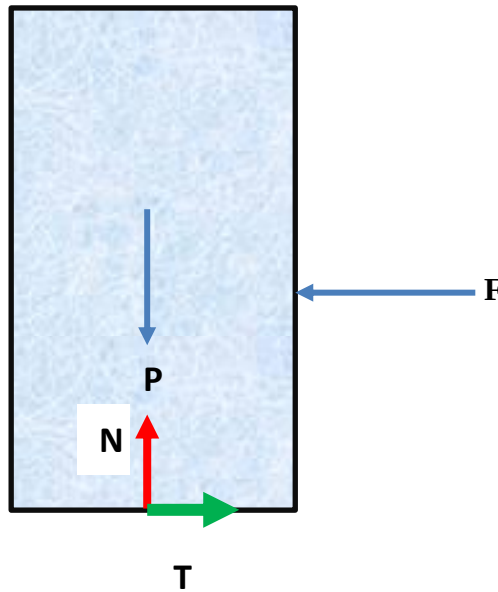
Si $P > N$, le mur va s'enfoncer dans son support.

Pour qu'il y ait stabilité, il faut que :

$$N \geq P$$

On prend par la condition minimale : $N = P$

Equation 01



Pour que le mur ne glisse pas sous l'effet de la force F , il faut que :

$$T \geq F$$

Equation 02

- Donc, pour que le mur soit stable au glissement et ne s'enfonce pas dans le mur, il faut que :

$$N = P \text{ et } T \geq F.$$

On a aussi : $T = N \times f$

- On remplace T par sa valeur dans l'équation 02, on trouve :

$$N \times f \geq F$$

- Or : $N = P$ d'après l'équation 01 :

L'équation devient :

$$P \times f \geq F$$

Pour des raisons de sécurité, on majore les charges motrices par un coefficient de sécurité au glissement K_1 (Différent du coefficient de sécurité au renversement K)

En génie civil, on prendra : $1,5 \leq K_1 \leq 2$

L'équation de stabilité devient à nouveau :

$$P \times f \geq K_1 \times F$$

Cette équation peut s'écrire :

$$(P \times f)/F \geq K_1$$

Avec :

P : représente la somme des charges stabilisatrices

F : représente la somme des charges motrices

f : représente le coefficient de frottement entre le mur et son support.

Nature des matériaux	f	φ
Fondation sur rocher	0,75	37°
sur gravier	0,60	31°
sur sol naturel sec	0,60	31°
sur argile sèche	0,51	27°
sur sable	0,40	22°
sur argile humide	0,34	19°
Matériaux entre eux (minima)	0,60	31°

Conclusion :

Pour que le mur soit stable au glissement , il faut que :

$$\frac{(\text{la somme des charges verticales}) \times (\text{le coefficient de frottement})}{\text{la somme des charges horizontales}} \geq K_1$$

$$\frac{\sum P \downarrow \times f}{\sum F \leftarrow} \geq K_1$$

$\sum P \downarrow$: Somme des charges verticales stabilisatrices.

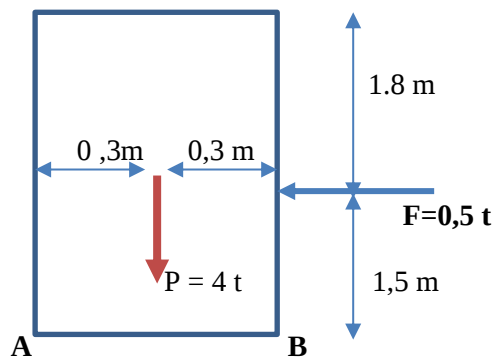
$\sum F \leftarrow$: Somme des charges horizontales motrices.

Si on prend en considération la butée dans les calculs de la stabilité, K_1 doit être supérieur à 2.

3) Exemple 02 : Vérification de la stabilité au glissement

Reprenons l'exemple 01 et vérifions la stabilité du mur au glissement.

Exemple 01 : Soit à étudier la stabilité du mur représenté sur la figure suivante :



On donne :

$K_1 = 2$: coefficient de sécurité au glissement

$f = 0.6$: coefficient de frottement

Solution :

a) L'inventaire des charges :

c) Charge stabilisatrice : $P = 4 \text{ t} = 4000 \text{ Kg}$

d) Charges motrices : $F = 0.5 \text{ t} = 500 \text{ Kg}$

$\sum P \downarrow$: Somme des charges verticales stabilisatrices = 4000 Kg

$\sum F \leftarrow$: Somme des charges horizontales motrices = 500 Kg

$f = 0.6$

On a :

$$\frac{\sum P \downarrow \times f}{\sum F \leftarrow} \geq \frac{4000 \times 0.6}{500} = 4.8 \geq K_1 = 2$$

Donc, le mur est stable au glissement

Conclusion

Démarches à suivre pour vérifier la stabilité d'un mur au renversement et au glissement :

1) Faire l'inventaire de toutes les charges appliquées sur le mur.

2) Dessiner le schéma de calcul en représentant les charges calculées et les bras de levier (distances qui séparent les forces au joint d'étude).

3) Calculer le moment stabilisant M_s et le moment de renversement M_r .

4) Vérifier la condition de stabilité du mur au renversement : Vérifier que :

$$\frac{M_s}{M_r} \geq K$$

5) Vérifier sa stabilité au glissement : Vérifier que :

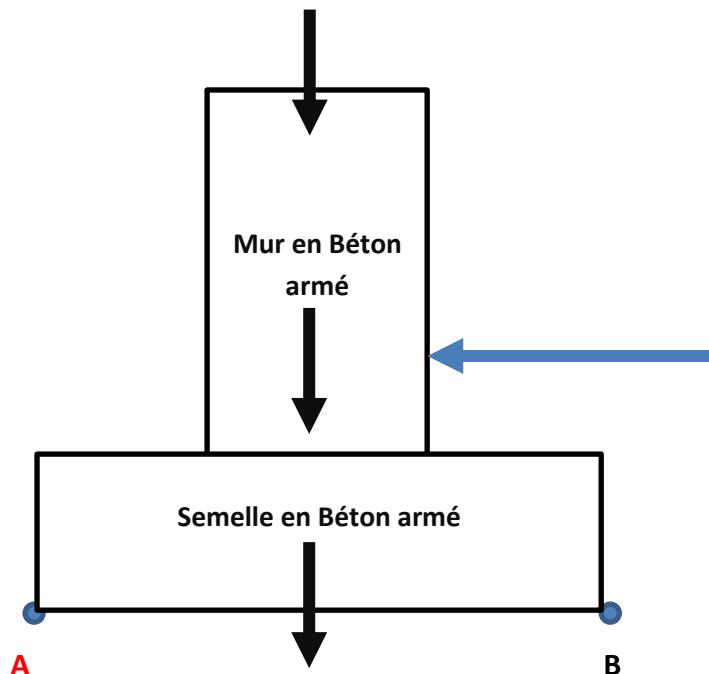
$$\frac{\sum P \downarrow x f}{\sum F \leftarrow} \geq K1$$

- Si le mur n'est pas stable, il faut le redimensionner en recalculant son épaisseur minimale pour qu'il soit stable au renversement et au glissement

Remarque importante : Cas d'un mur en béton armé

Si le mur est en béton armé, l'ensemble à étudier sera « le mur + la semelle », car le mur est encastré dans la semelle. Ils constituent une seule pièce.

Le joint d'étude de la stabilité au renversement sera **le joint de la semelle**.



L'inventaire des charges doit se faire sur le mur et sur la semelle.

V. Fiche de calcul pour étudier la stabilité:

Afin de faciliter et organiser les calculs, on utilisera cette fiche de calcul pour étudier la stabilité d'un ouvrage :

Projet :					
Type de charge	Désignation de la charge	Formule de calcul	Valeur (Kg)	Distance /Joint (m)	Moment/Joint (Kg.m)
Charges Stabilisatrices					
		Somme des charges stabilisatrices		Moment stabilisant Ms	
Charges motrices					
		Somme des charges motrices		Moment de renversement Mr	
Vérification de la stabilité au renversement: $M_s/M_r = \dots\dots\dots$					
.....					
.....					
Vérification de la stabilité au glissement:.....					
.....					
.....					
.....					
.....					

Chapitre 02 : Application sur les murs de clôture. Vérification et dimensionnement

C) Chapitre 02 : Application sur les murs de clôture : Vérification et dimensionnement

Les murs de clôture sont soumis à la poussée du vent. Ils sont généralement en maçonnerie.

Le vent qui souffle sur une surface produit une poussée (p) en kg/m^2 , normale à sa direction.

- Cette poussée est fonction de la vitesse à laquelle souffle le vent. Cette vitesse est exprimée en km/h
- Grâce à la physique, il est aisé de transformer la vitesse du vent en poussée par m^2

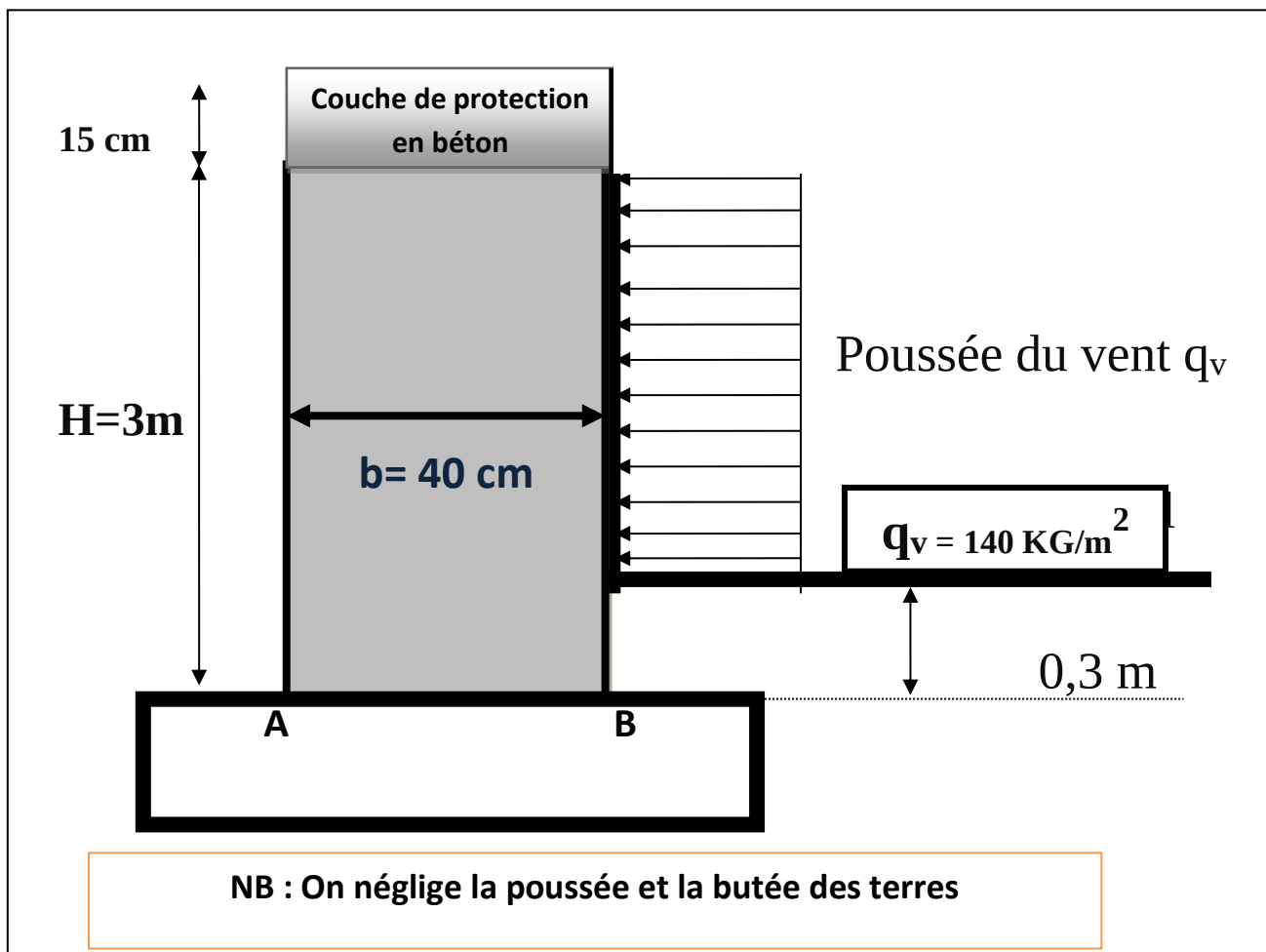
suivant la formule
$$p = \frac{v^2}{16} \quad (v \text{ en m/sec}).$$

- Si nous ignorons la vitesse du vent nous ne retiendrons dans nos calculs que le cas extrême, soit : $p = 150 \text{ kg/m}^2$.

Dans les applications suivantes, la poussée (pression) du vent sera donnée en Kg/m^2

I. Application N°1 : Etude de stabilité d'un mur de clôture en maçonnerie

Il s'agit de vérifier la stabilité d'un mur de clôture en moellons, d'une caserne militaire (située dans une zone montagneuse), (Voir la figure suivante) :



On donne :

Le poids spécifique des moellons : $m_{\text{moellons}} = 2300 \text{ kg/m}^3$

Coefficient de sécurité au renversement : $K_1 = 1,5$

Coefficient de sécurité au glissement : $K_2 = 2$

Coefficient de frottement : $f = 0,55$

La poussée du vent $q_v = 140 \text{ Kg/m}^2$

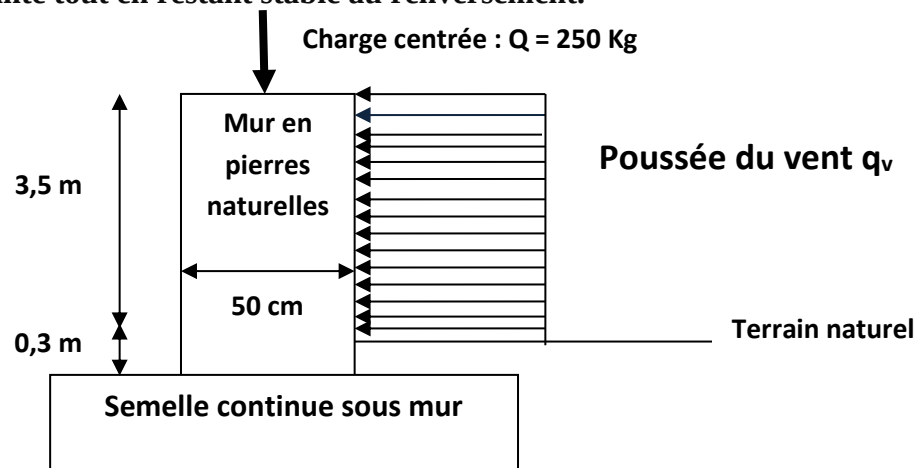
Le poids spécifique du béton $\rho_B = 2400 \text{ Kg/m}^3$

Remarque : On fera tous les calculs pour un mètre (1 m) de longueur du mur

- 1) Faire l'inventaire de toutes les charges appliquées sur le mur.
- 2) Dessiner le schéma de calcul du mur en représentant les charges concentrées calculées.
- 3) Calculer le moment stabilisant M_s .
- 4) Calculer le moment de renversement M_r .
- 5) Vérifier la stabilité du mur au renversement.
- 6) Vérifier la stabilité du mur au glissement.
- 7) En cas d'instabilité du mur, calculer son épaisseur minimale pour qu'il soit acceptable au renversement et au glissement.

II. Application N°2 : Calcul de la poussée maximale du vent que peut supporter un mur :

Calculer la poussée du vent maximale que peut supporter le mur de clôture représenté sur la figure suivante tout en restant stable au renversement.



Coefficient de sécurité au renversement : $K = 1,45$

Le poids spécifique des pierres naturelles $\rho_P = 2600 \text{ Kg/m}^3$

III. Application N°3 : Projet mur de clôture d'une commune rurale :

Il s'agit d'un projet de construction d'un mur de clôture du siège d'une commune rurale située dans une zone isolée.

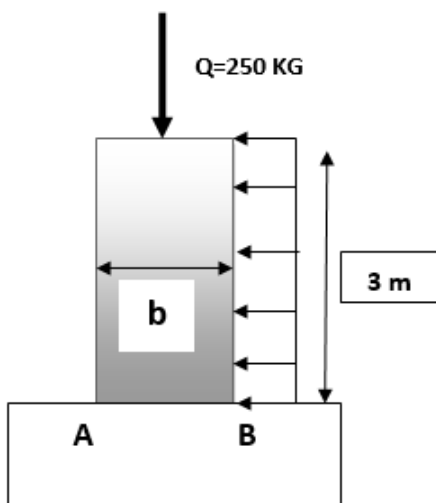
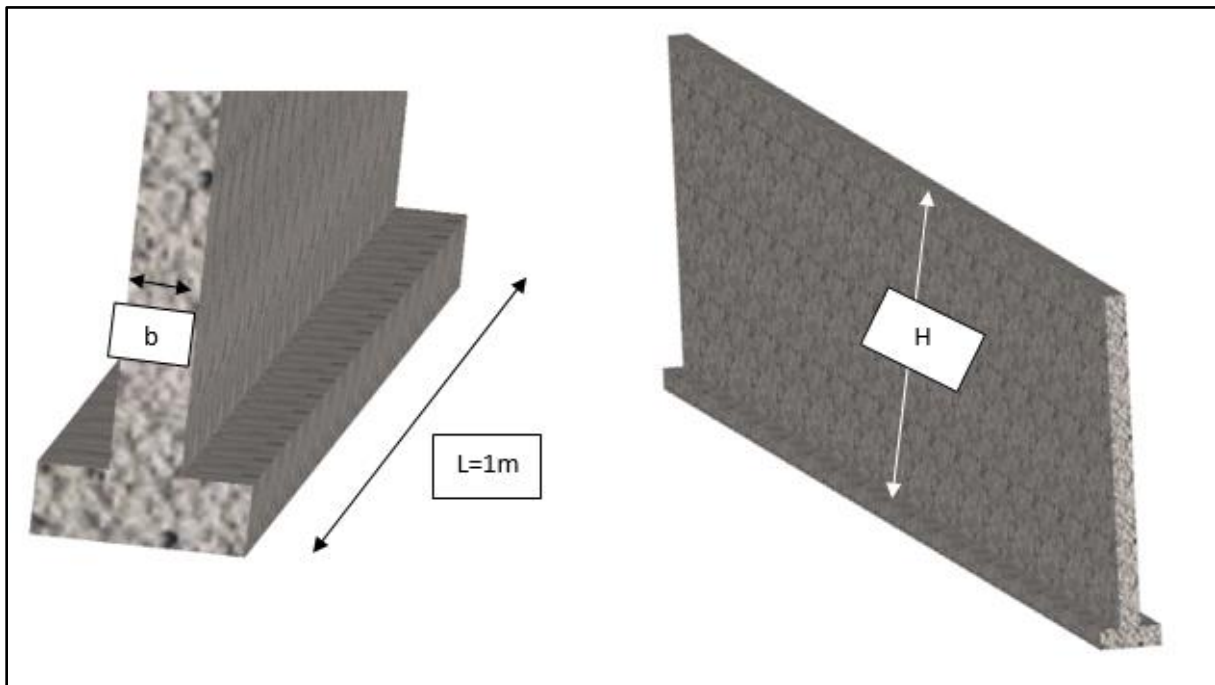
Le projet consiste à construire un mur en moellons de **3 m** de hauteur

Le mur sera soumis à la poussée du vent $q_v = 100 \text{ Kg/ m}^2$ de surface

NB : On fera tous les calculs pour un mètre de longueur du mur

Ce mur sera protégé par un couronnement prémoulé en béton à une pente

On considère la charge appliquée sur le mur par le couronnement comme une charge concentrée égale à **200 KG**



Les données du projet :

Le poids spécifique des moellons $\rho = 2200 \text{ KG/m}^3$

Coefficient de sécurité au renversement $k = 1,5$

Coefficient de sécurité au glissement $k = 2$

Coefficient de frottement $f = 0,55$

Le poids spécifique des briques pleines $= 1900 \text{ KG/m}^3$

Questions :

Partie 01 :

- 1) Quelle sera l'épaisseur minimale du mur pour qu'il soit acceptable au renversement. (Dimensionner le mur au renversement)
- 2) Vérifier la stabilité du mur au glissement.

Partie 02 :

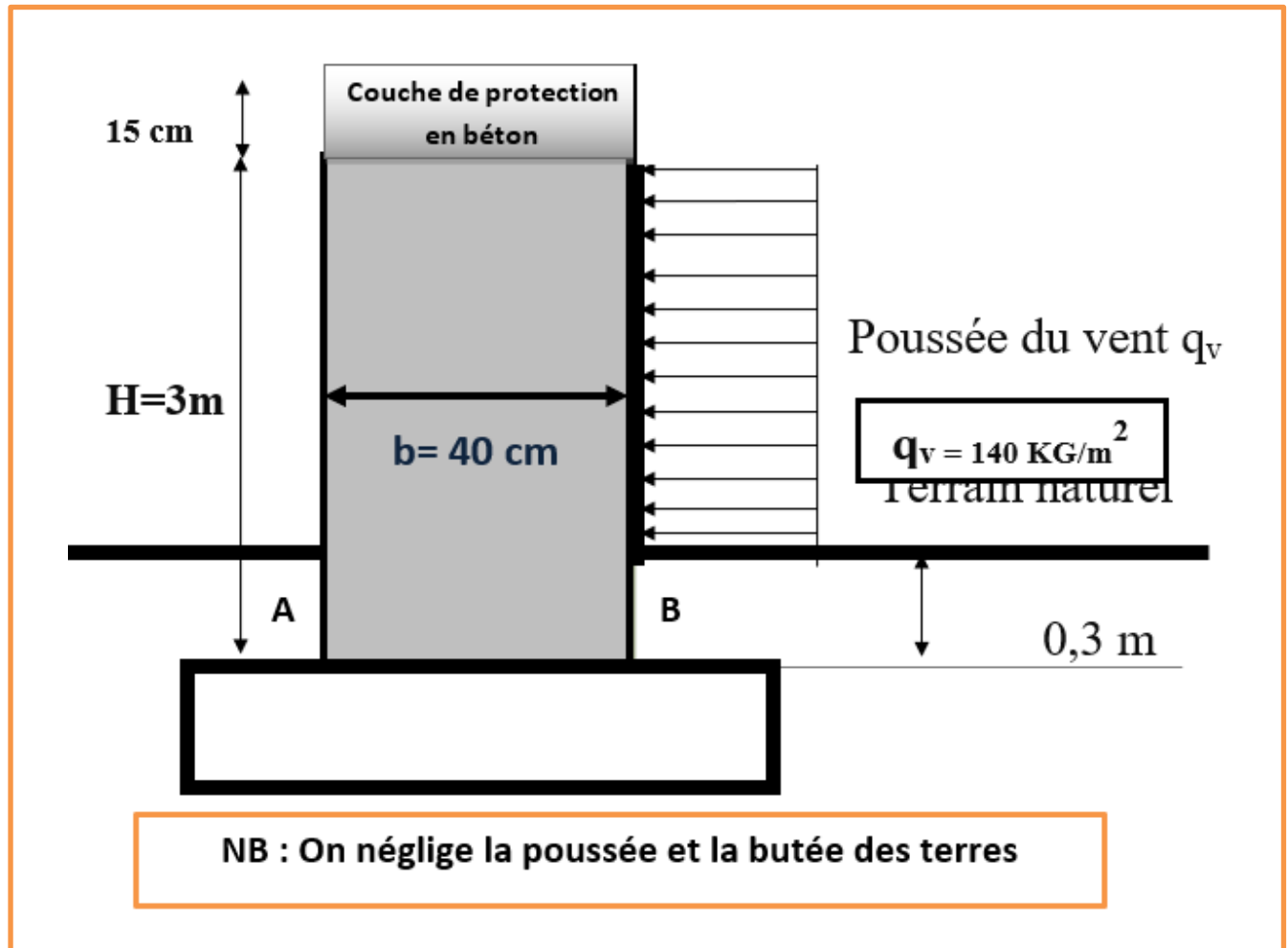
Après la construction du mur, et pour des raisons de sécurité, la commune a décidé d'augmenter la hauteur du mur par 1 m de briques pleines, la hauteur deviendra $H = 4$ m.

- 3) Revérifier la stabilité du mur au renversement en prenant un coefficient de sécurité $K=1,25$
- 4) Revérifier la stabilité du mur au glissement en prenant un coefficient de sécurité au glissement $K_1=1,75$
- 5) Peut-on augmenter la hauteur du mur sans faire dommage à la stabilité du mur ?

Partie 03

- 6) Calculer la hauteur maximale en briques pleines qu'on peut ajouter au mur sans faire dommage à sa stabilité.

IV. Solution Exercice 01 :



1) Inventaire des charges appliquées sur le mur :

a) Charges stabilisatrices (Charges verticales)

i) Poids de la couche de protection sur le mur : P_{couche}

Les poids sont calculés en utilisant la formule suivante :

Poids volumique = Poids / Volume ; Donc : **Poids = Poids volumique x Volume**

Application numérique : $P_{\text{couche}} = 2400 \times 0,4 \times 0,15 \times 1 = 144 \text{ Kg}$

j) Poids du mur.

On a : Poids = Poids volumique x Volume

Application numérique : $P_{\text{mur}} = 2300 \times 0,4 \times 3 \times 1 = 2760 \text{ Kg}$

a) Charges motrices (Charges horizontales)

La seule charge motrice sera la résultante des pressions du vent = Force du vent

On a :

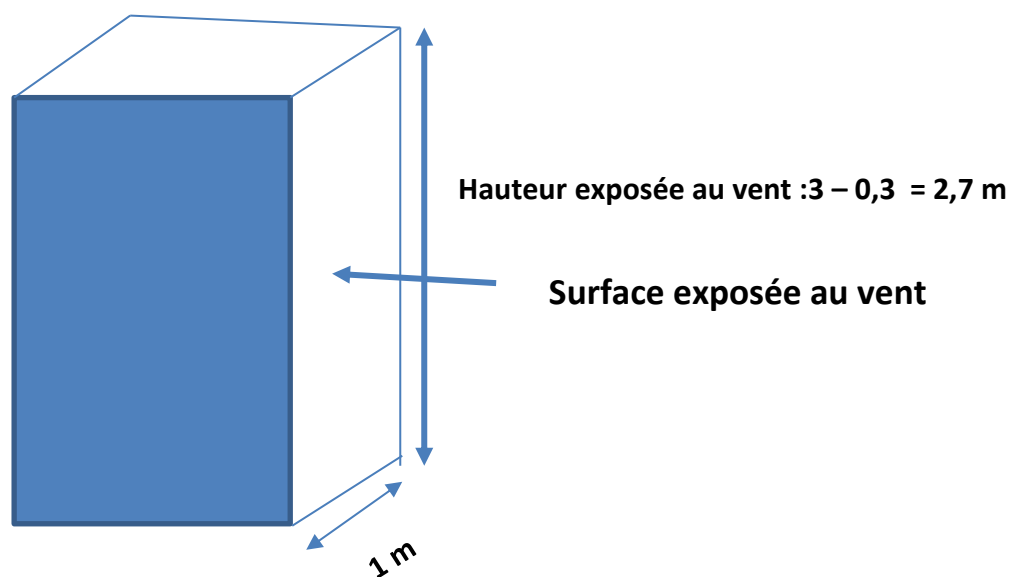
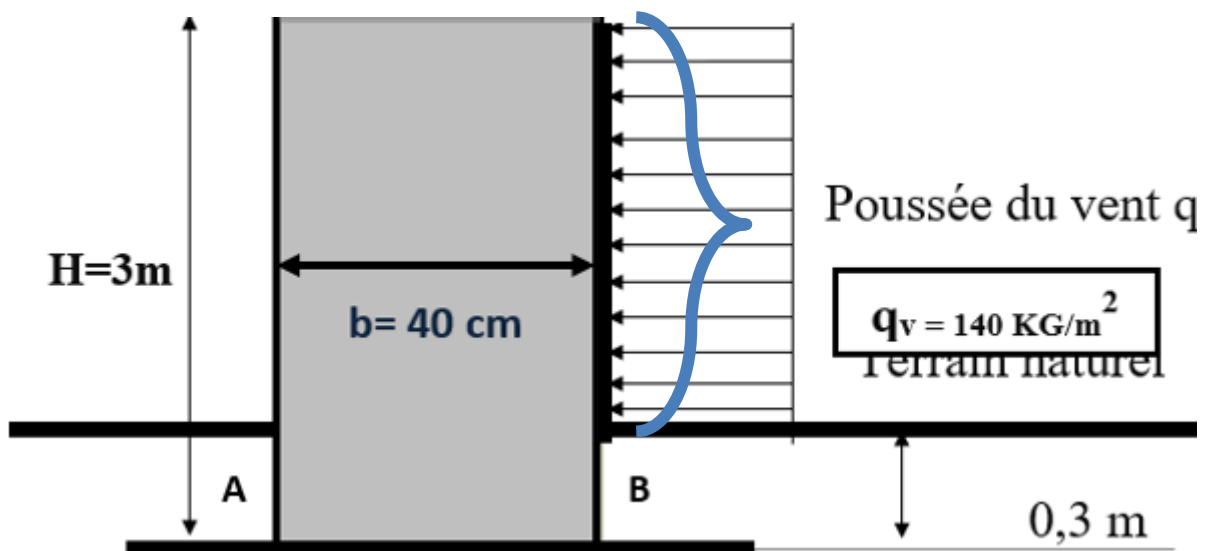
Pression = Force / Surface , Donc :

$$\text{Force} = \text{Pression} \times \text{surface}$$

D'où la force résultante des pressions du vent sera calculée par :

$$\text{Force du vent} = \text{Pression du vent} \times \text{surface exposée au vent}$$

Dans ce cas, seule la partie au-dessus du niveau du terrain naturel est soumise à la poussée du vent :

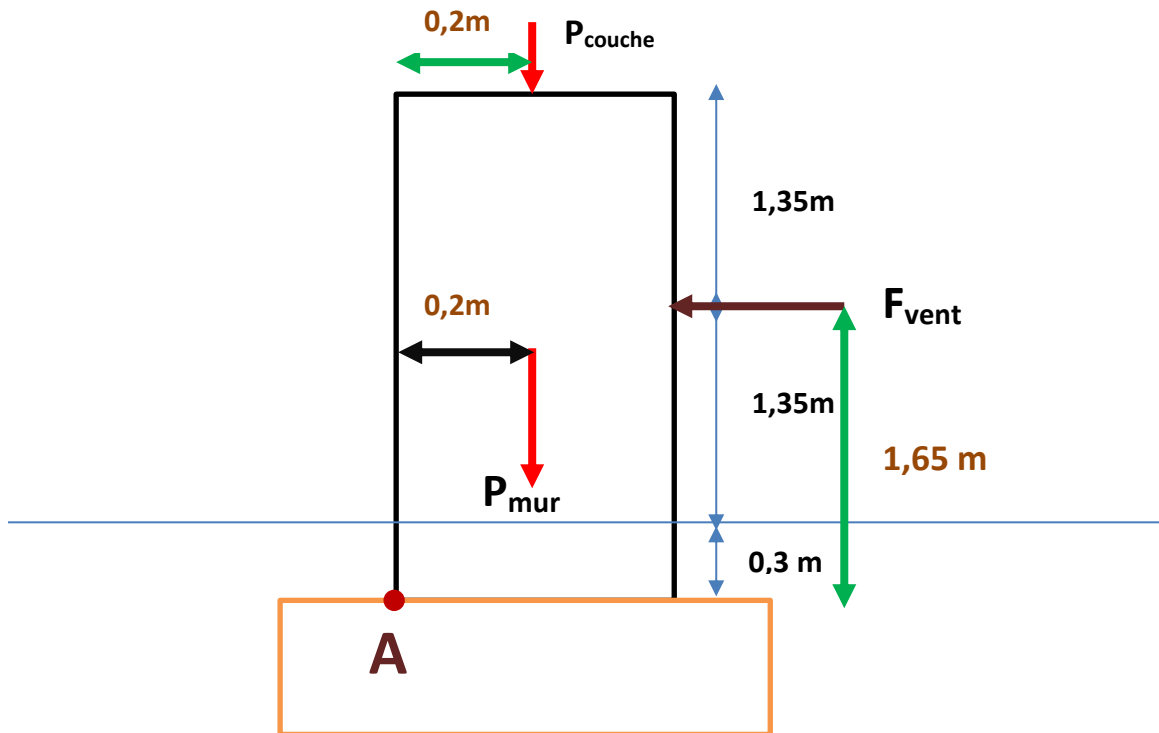


$$\text{Application numérique : } F_{\text{vent}} = q_v \times S_v = 140\text{ Kg/m}^2 \times 2,7\text{m} \times 1\text{m} = 378\text{ Kg}$$

Point d'application de F_{vent} :

Elle est appliquée au centre de gravité de la surface exposée au vent: $a = b = 2.7/2 = 1,35m$

- 2) Schéma de calcul (Représentation des charges calculée ainsi que les bras de levier = distances / joint) :



- 3) Calcul du moment stabilisant M_s = Moment des charges stabilisatrices :

On a : $M_s = M (P_{couche}/A) + M(P_{mur} /A) = P_{couche} \times 0,20 + P_{mur} \times 0,20$

Application numérique : $M_s = 144 \times 0,20 + 2760 \times 0.20$

Donc : $M_s = 580,8 \text{ Kg.m}$

- 4) Calcul du moment de renversement M_r = Moment des charges motrices :

On a : $M_r = M (F_{vent}/A) = F_{vent} \times 1,65$

Application numérique : $M_r = 378 \times 1,65$

Donc : $M_r = 623,7 \text{ Kg.m}$

- 5) Vérification de la stabilité du mur au renversement :

On a :

$$\frac{M_s}{M_r} = \frac{580,8}{623,7} = 0,93 \leq K = 1,5$$

Donc, le mur n'est pas stable au renversement

7) Vérifier la stabilité du mur au glissement

On a :

$$\frac{\sum P \downarrow x f}{\sum F \leftarrow} = \frac{(P_{couche} + P_{mur}) x f}{F_{vent}} = \frac{(144 + 2760) x 0,55}{378} = 4,22 \geq K1 = 2$$

Donc, le mur est stable au glissement.

6) Calculons l'épaisseur minimale du mur pour qu'il soit stable au renversement (Redimensionnement du mur au renversement)

Le dimensionnement se fait en suivant les mêmes étapes que la vérification.

Soit b l'épaisseur minimale du mur qui assure la stabilité du mur.

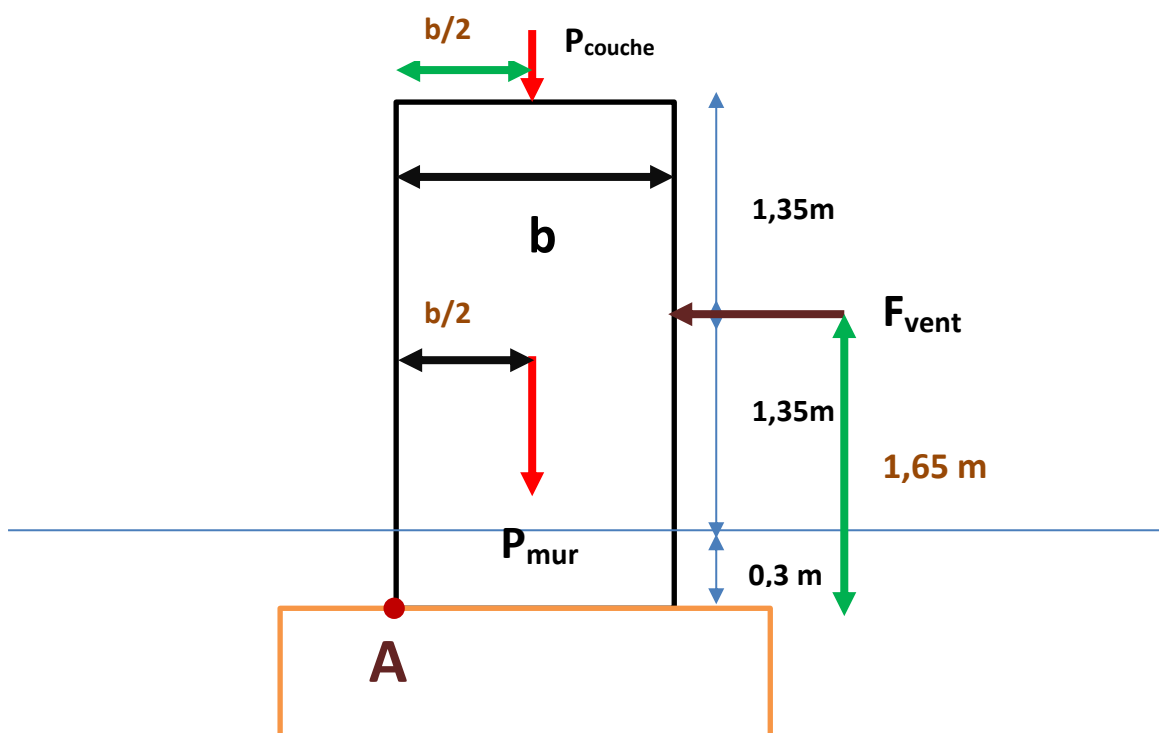
a) Inventaire des charges

$$\text{Poids} = \text{Poids volumique} \times \text{Volume}$$

- $P_{couche} = 2400 \times b \times 0,15 \times 1 = 360b$ (en Kg)
- $P_{mur} = 2300 \times b \times 3 \times 1 = 6900b$ (en Kg)
- $F_{vent} = q_v \times S_v = 140 \text{ Kg/m}^2 \times 2,7\text{m} \times 1\text{m} = 378 \text{ Kg}$

La force du vent ne changera pas car elle ne dépend pas de b.

b) Schéma de calcul



c) Calcul du moment stabilisant M_s = Moment des charges stabilisatrices :

On a : $M_s = M (P_{\text{couche}}/A) + M(P_{\text{mur}}/A) = P_{\text{couche}} \times 0,5 b + P_{\text{mur}} \times 0,5 b$

Application numérique : $M_s = 360 b \times 0,5 b + 6900 b \times 0,5 b = 180 b^2 + 3450 b^2$

Donc : $M_s = 3630 b^2$ (en Kg.m)

d) Calcul du moment de renversement M_r = Moment des charges motrices :

On a : $M_r = M (F_{\text{vent}}/A) = F_{\text{vent}} \times 1,65$

Application numérique : $M_r = 378 \times 1,65$

Donc : $M_r = 623,7 \text{ Kg.m}$ (Il n'a pas changé car il ne dépend pas de b)

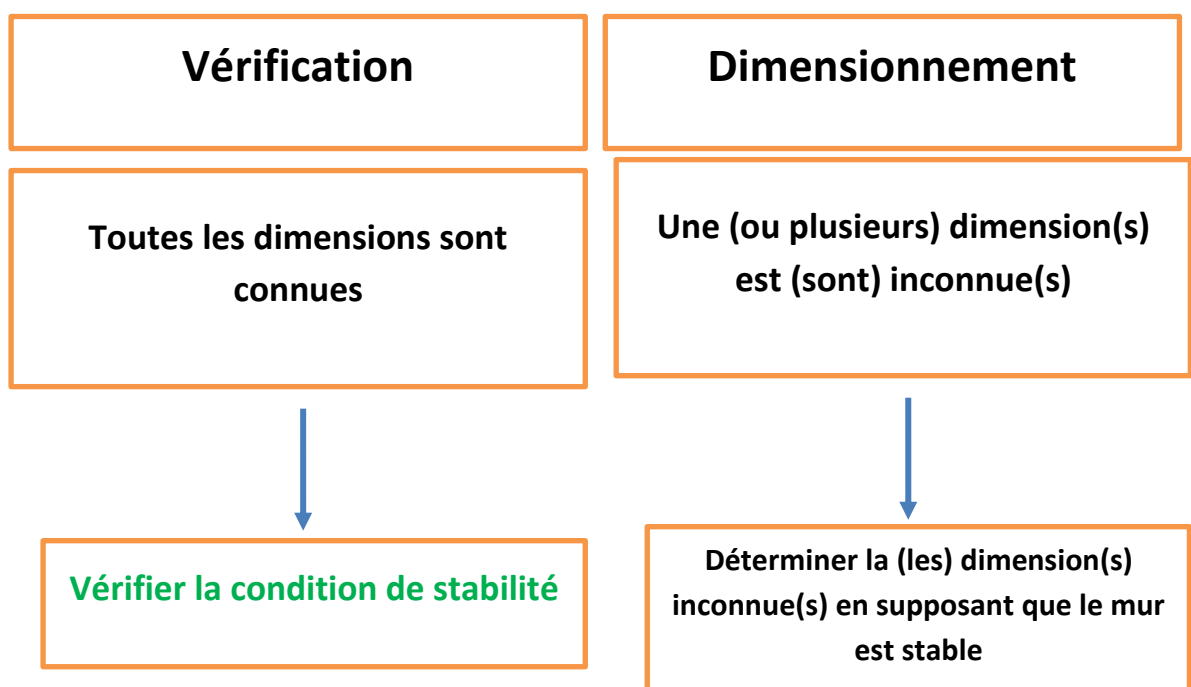
e) Calcul de l'épaisseur minimale du mur pour qu'il soit stable au renversement :

On écrit la condition de stabilité : Pour que le mur soit stable au renversement, il faut , au moins, que :

$$\frac{M_s}{M_r} = \frac{3630 b^2}{623,7} = K = 1,5$$

Donc : $b^2 = \frac{1,5 \times 623,7}{3630}$ C'est-à-dire : $b = \sqrt{\frac{1,5 \times 623,7}{3630}} = 0,51 \text{ m} = 51 \text{ cm}$

Conclusion : pour le mur soit stable au renversement , son épaisseur doit être supérieure ou égale à 51 cm



On peut faire l'exercice précédent en utilisant la fiche de calcul suivante :

Projet : Etude de stabilité du mur de clôture exercice 01-Questions 01-06

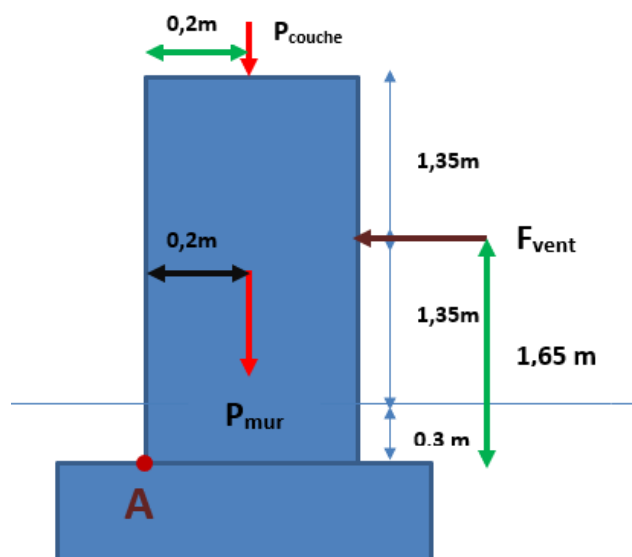
Type de charge	Désignation de la charge	Formule de calcul	Valeur (Kg)	Distance /Joint (m)	Moment/Joint (Kg.m)
Stabilisatrices	Poids couche béton	$P_{couche}=2400 \times 0,4 \times 0,15 \times 1$	144	0,20	28,80
	Poids mur	$P_{mur}=2300 \times 0,4 \times 3 \times 1$	2760	0,20	552,00
	Somme des charges stabilisatrices : $\Sigma P \downarrow$		2904	Moment stabilisant M_s	580,8
Charges motrices	Force Vent	$F_{vent}=140 \times 2,7 \times 1$	378	1,65	623,70
	Somme des charges motrices : $\Sigma F \leftarrow$		378	Moment de renversement M_r	623,7

Vérification de la stabilité au renversement: $M_s/M_r = 0,93$

Donc, le mur n'est stable pas au renversement

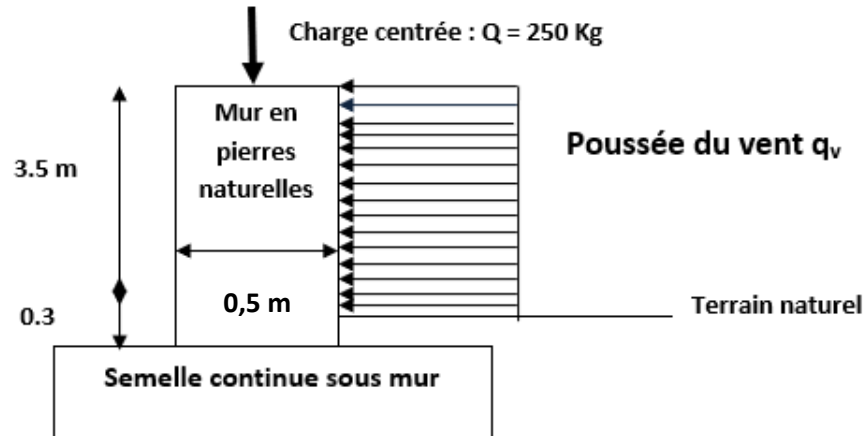
Vérification de la stabilité au glissement: $(\Sigma P \downarrow \times f) / (\Sigma F \leftarrow) = 4,23$

Donc, le mur est stable au renversement



V. Solution Exercice 02 :

Calculer la poussée du vent maximale que peut supporter le mur de clôture représenté sur la figure suivante tout en restant stable au renversement.



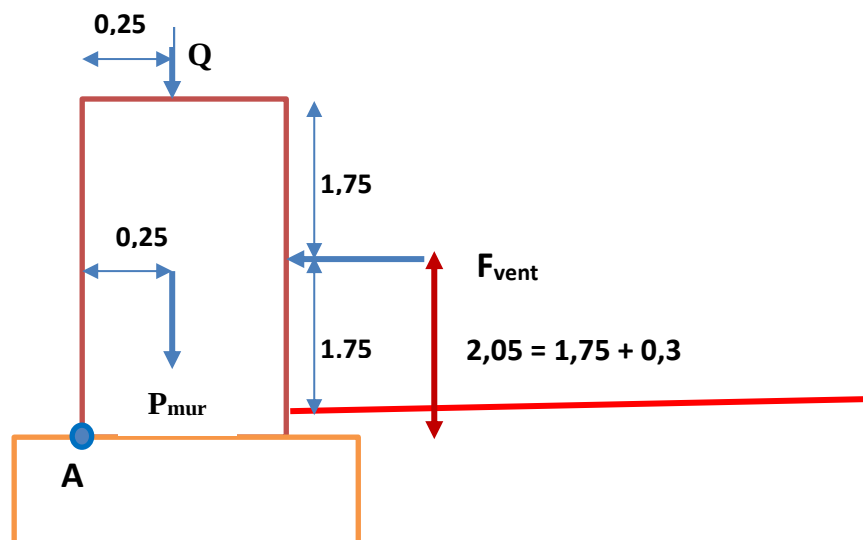
Coefficient de sécurité au renversement : $K = 1,45$

Le poids spécifique des pierres naturelles $p_p = 2600 \text{ Kg/m}^3$

a) Inventaire des charges :

- $Q = 250 \text{ Kg}$
- $P_{\text{mur}} = 2600 \times 0,5 \times 3,8 \times 1 = 4940 \text{ Kg}$
- $F_{\text{vent}} = q_v \times S_v = q_v \times 3,5 \text{ m} \times 1 \text{ m} = 3,5 q_v \text{ (} q_v \text{ en kg/m}^2 \text{)}$

b) Schéma de calcul :



Pour calculer la poussée maximale du vent, on suit les mêmes étapes de dimensionnement.

L'idée est de trouver l'inconnue en écrivant les conditions de stabilité.

c) Calcul du moment stabilisant M_s = Moment des charges stabilisatrices :

On a : $M_s = M (Q/A) + M(P_{\text{mur}} /A) = Q \times 0,25 + P_{\text{mur}} \times 0,25$

Application numérique : $M_s = 250 \times 0,25 + 4940 \times 0,25$

Donc : $M_s = 1297,5 \text{ Kg.m}$

d) Calcul du moment de renversement M_r = Moment des charges motrices :

On a : $M_r = M (F_{\text{vent}}/A) = F_{\text{vent}} \times 2,05$

Application numérique : $M_r = 3,5 \text{ qv} \times 2,05$

Donc : $M_r = 7,175 \text{ qv}$ (kg.m)

e) Calcul de la poussée maximale que peut supporter le mur :

On écrit la condition de stabilité : Pour que le mur soit stable au renversement, il faut , au moins, que :

$$\frac{M_s}{M_r} = \frac{1297,5}{7,175 \text{ qv}} = K = 1,45$$

Donc : $qv = \frac{1297,5}{1,45 \times 7,175}$ C'est-à-dire : $qv = 124,7 \text{ kg/m}^2$

Conclusion : pour le mur soit stable au renversement , la poussée du vent ne doit pas dépasser

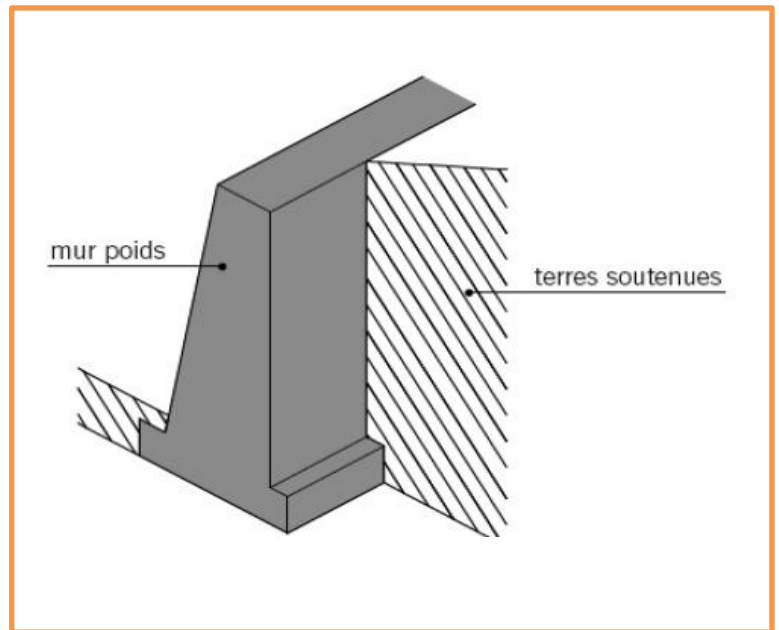
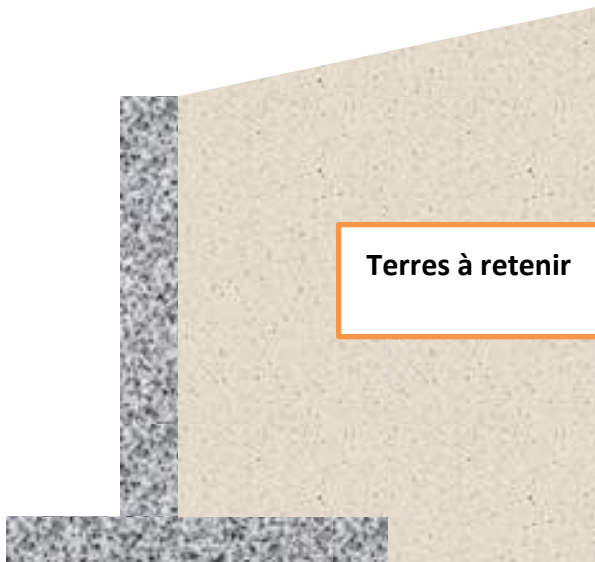
$qv_{\text{max}} = 124,7 \text{ kg/m}^2$

Chapitre 03 : Calcul de la poussée des terres

D) Chapitre 03 : Calcul de la poussée des terres

I. Définition d'un mur de soutènement :

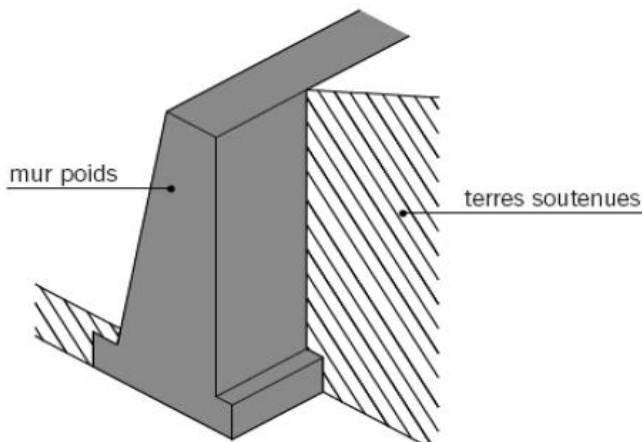
Un mur de soutènement est un ouvrage chargé de retenir des terres meubles qui ne tiennent pas en place afin d'éviter leur glissement (éboulement).



II. Types des murs de soutènement

- Il existe différents types de murs de soutènement :

a) Mur Poids



Le mur poids résiste à la poussée des terres avec son poids propre.

- La seule charge stabilisatrice est le poids du mur.
- Le moment stabilisant (résistant) = Poids du mur x bras de levier
- Ce moment doit équilibrer le moment de renversement M_r causé par la poussée des terres.

Selon le matériau de construction utilisé, un mur poids peut être :

- En maçonnerie ;
- En béton ;
- En béton légèrement armé.

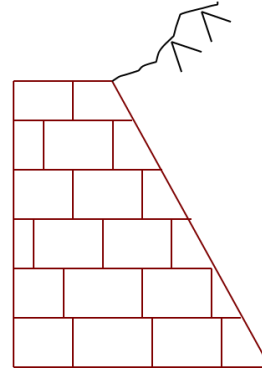
Les matériaux sont caractérisés par leurs poids propres (poids spécifiques) :

- ✓ 2400 (kg/m³) = béton non armé
- ✓ 2500 = béton armé
- ✓ 2300 = maçonnerie de moellons
- ✓ 1900 = maçonnerie de briques pleines
- ✓ 1350 = maçonnerie de briques perforées
- ✓ 1300 = maçonnerie d'agglos

Murs poids en maçonnerie :

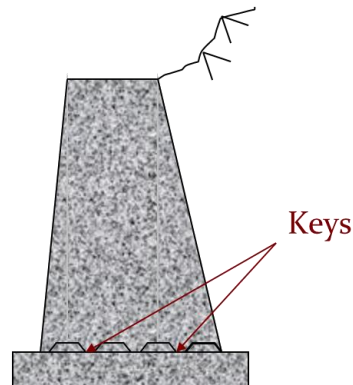


- Utilisables lorsque le sol de fondation est bon
- Économiques jusqu'à une hauteur de 4m



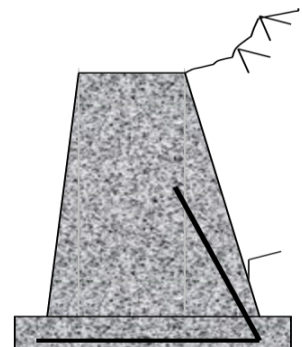
Murs poids en béton

- Utilisables lorsque le sol de fondation est bon
- Peuvent être envisagés jusqu'à des hauteurs de 7 à 8 m

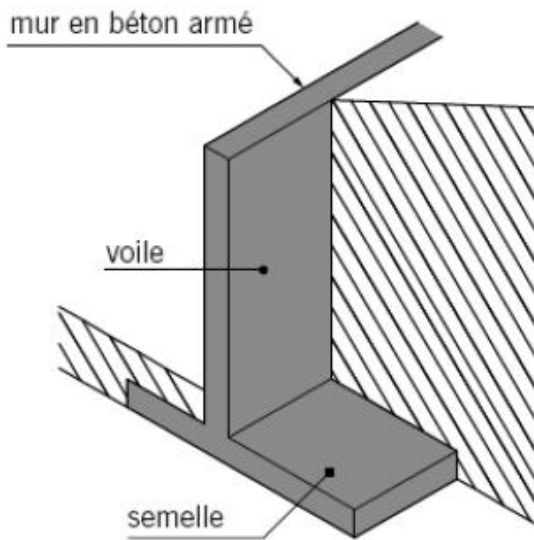


Murs poids légèrement armés

- Utilisables lorsque le sol de fondation est de bonne portance et / ou le patin-semelle peut mobiliser une butée sure.
- Économiques pour les hauteurs comprises entre 4 à 7 m
- Dépense moindre de matière
- Contraintes moindres sur le sol de fondation.



b) mur en béton armé



Dans ce type de murs, on utilise l'ancrage d'une partie de l'ouvrage de soutènement dans la terre retenue.

On aura donc une charge stabilisatrice qui s'ajoute au poids du mur.

Cette charge est le poids de la terre hachurée sur le talon de la semelle du mur.

Cette charge favorise la stabilité du mur et elle sera calculée par la suite.

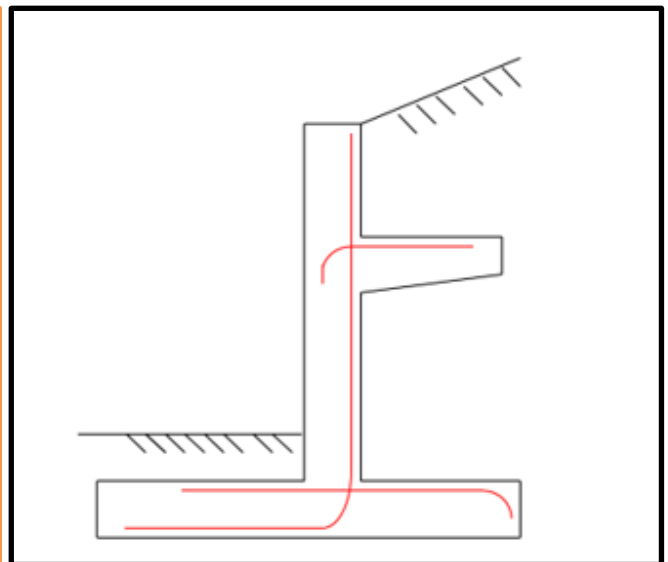
c) Mur à consoles

Avantages :

- ✓ Le poids des terres sur la console joue un rôle stabilisateur
- ✓ La séparation du massif en deux parties distinctes réduit les efforts de la poussée des terres

Inconvénients :

- ✓ Les travaux de terrassement et de compactage sont difficiles
- ✓ L'encastrement de la console constitue un point faible de la structure



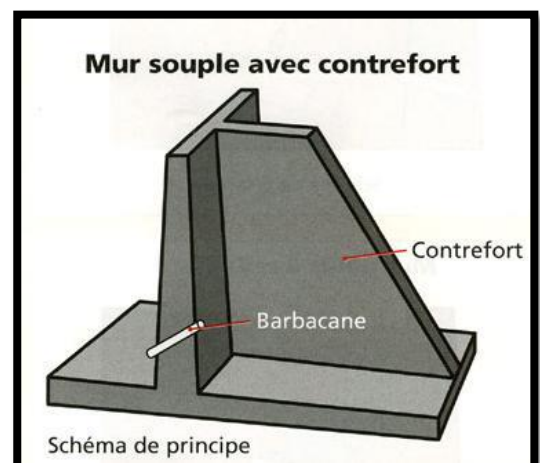
d) Mur à contreforts

Avantages :

- ✓ Adapté comme solution quand la hauteur des terres à soutenir est importante.
- ✓ Les contreforts soulagent le voile en le reliant à la semelle

Inconvénients :

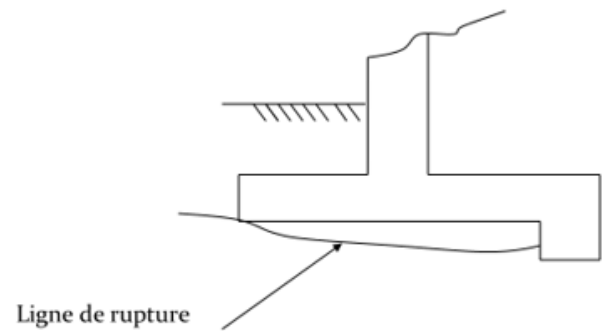
- ✓ Très coûteux à cause des complications du calcul de ferrailage et d'exécution des travaux.



e) Murs à bêche

La bêche se situe à l'avant, au milieu ou à l'arrière de la semelle.

Elle joue un rôle stabilisateur vis-à-vis au glissement



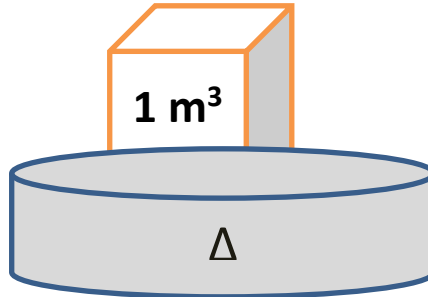
III. Caractéristiques fondamentales d'un sol

1) Le poids volumique :

- C'est le poids d'un mètre cube du sol.
- Ce poids est noté Δ et exprimé en Kg/m^3 ou en t/m^3

On prend par la suite :

$$1\text{Kg} = 1\text{daN} = 10\text{ N}$$



NATURE DES TERRES	Δ (daN/m ³)	C (KdaN/m ²)	φ (degrés)
Terre végétal			
sèche.....	1 400	0	35 - 40°
humide.....	1 600	0	40 - 45°
saturée d'eau.....	1 800	0	30 - 35°
pilonnée et humide.....	1 900-2 000	0	35°
Terre forte très compacte.	1 900	0,200	40 - 45°
Remblais anciens stabilisés	1 700-1 800	0	35°
Argile			
sèche.....	1 600	0,200	40 - 45°
humide.....	2 000	0,300	15 - 25°
plastique.....	1 800	2 à 6	12 - 15°
sèche, sableuse.....	1 800	0,250	30 - 40°
molle.....	1 000	0	0 - 15°
graveleuse, humide.....	2 000	0,300	25 - 40°
sèche, compacte.....	1 800	0,250	40 - 45°
à blocs très compacts	2 300	1,000	35°
Sable			
sec ou noyé.....	1 400-1 600	0	30 - 35°
humide.....	1 800	0	35 - 40°
à granulométrie complexe,			
compact et sec.....	1 900	0	35°
compact et humide.....	2 150	0,100	35°
Gravier			
sec ou noyé.....	1 800	0	35 - 40°
humide.....	1 900	0	25 - 35°
Éboulis			
anguleux.....	1 800	0	40 - 45°
arrondis.....	1 800	0	30°
Marne			
sèche.....	1 500	0,300	40 - 45°
humide.....	1 900	0,400 à 0,900	25 - 45°
très compacte.....	2 100	1 à 1,500	25 - 30°

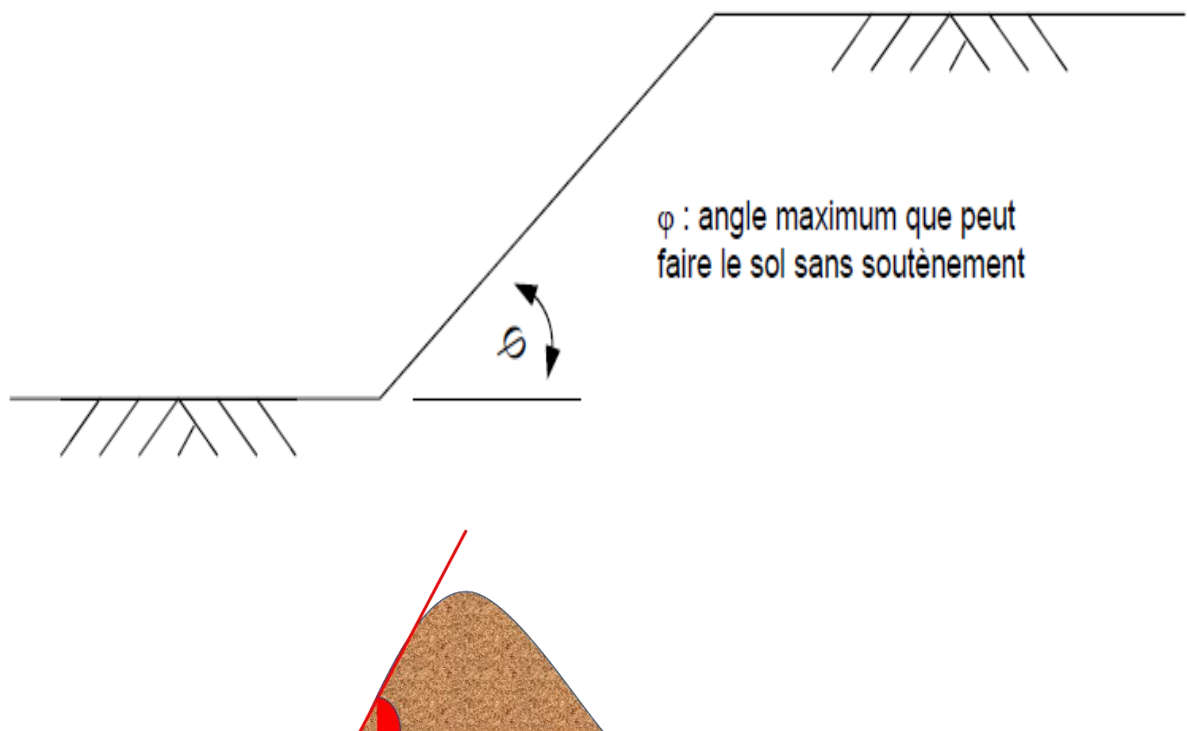
2) Portance du sol q = la pression que peut supporter un sol = Résistance maximale d'un sol.

- 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

3) Angle de talus naturel ϕ

- L'angle de talus naturel ϕ 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.
- Il traduit la partie du sol qui reste stable sans soutènement (naturellement) .



4) La cohésion C

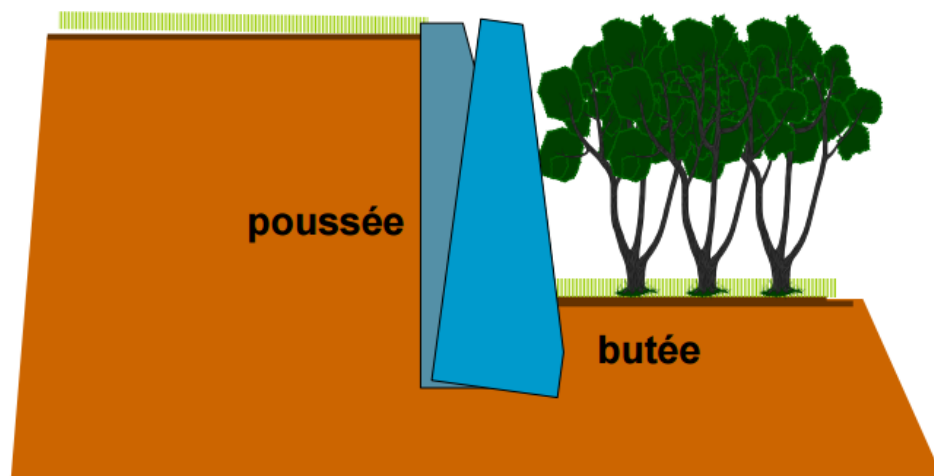
- La cohésion C caractérise la capacité qu'a un sol à s'amalgamer (coller).
- Typiquement, le sable sec ou le gravier n'ont aucune cohésion ($C=0$) : on dit alors qu'ils sont pulvérulents.
- A l'opposé, un sable humide ou des argiles ont une cohésion non nulle. C est exprimée en Pa.

Nature du sol	C (kPa)	ϕ (°)
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

IV. Calcul de la Poussée des terres :

1) Introduction

- Intéressons-nous maintenant au cas d'un écran ou mur de soutènement.
- Dans cette partie, on se propose de déterminer la pression qu'exerce le sol sur un mur de soutènement en examinant les différents cas de figure . Cette pression est appelée poussée (ou butée) des terres.
- C'est la première étape pour dimensionner ou vérifier la stabilité de tels murs.
- Les formules utilisées sont celles de **Mr Rankine**.



Hypothèses de base :

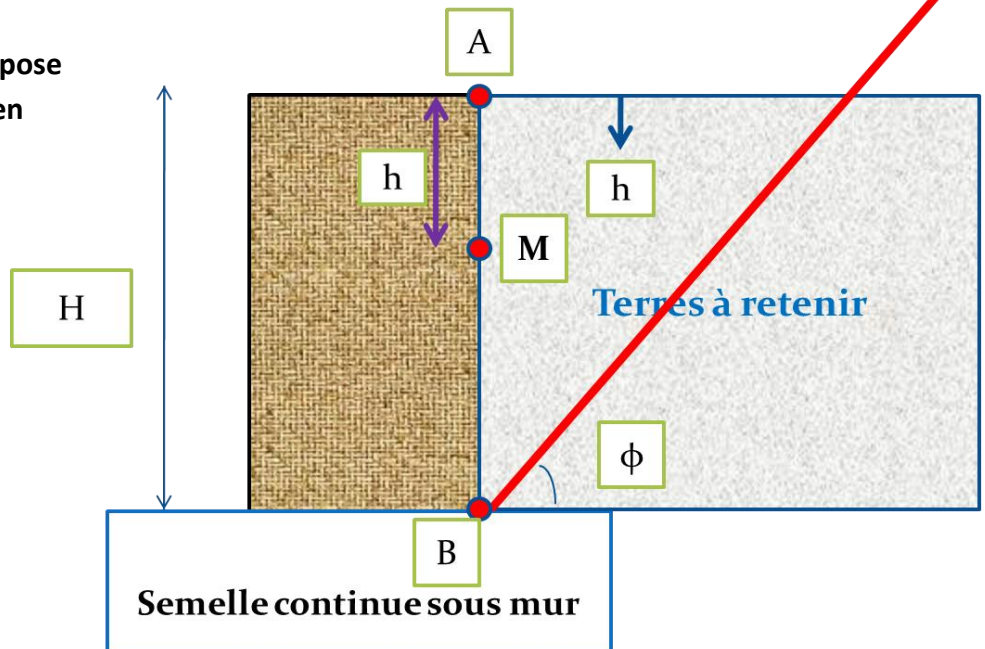
- Sol pulvérulent (non cohérent)
- Ecran vertical et lisse.
- surface du sol horizontale

2) Cas N°1 : Cas d'une seule couche de terre sans surcharge.

a) Calcul des pressions

On se propose de calculer la poussée appliquée par des terres sur le mur de soutènement représenté sur la figure suivante

Important : On suppose que le mur est en maçonnerie



La pression des terres dépend de:

- Δ : poids volumique de la terre à soutenir (en kg/m^3)
- H : hauteur des terres à retenir (en m)
- ϕ : Angle de talus naturel en degrés

D'après la théorie de RANKINE, la pression (contrainte horizontale) en un point M de profondeur h est exprimée par la relation suivante :

$$P(M) = K_p \times \Delta \times h \quad (h \text{ profondeur du point M})$$

- Avec :

➤ $\Delta \times h$: Contrainte verticale au point M

➤ K_p coefficient de la poussée des terres qui dépend de ϕ .

$$K_p = \tan^2 (45 - \phi/2) \quad (\phi \text{ en degrés})$$

Valeurs de ϕ	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°
Valeurs de K	0.704	0.589	0.490	0.406	0.333	0.271	0.217	0.172

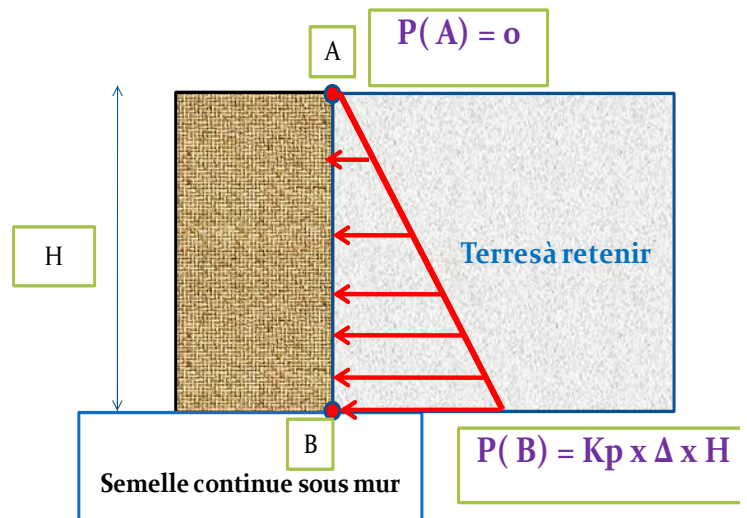
b) Diagramme des pressions

- $P(M) = Kp \times \Delta \times h$
- $P(A) = Kp \times \Delta \times 0 = 0$
- $P(B) = Kp \times \Delta \times H$

Le diagramme des pressions est triangulaire.

Les pressions sont exprimées en Kg/m²

Diagramme des pressions



NB : L'indice p qui figure sur le coefficient Kp vient du mot « poussée »

c) Calcul de la poussée totale des terres P_{terre}

C'est la résultante des pressions = Force équivalente aux pressions triangulaires calculées :

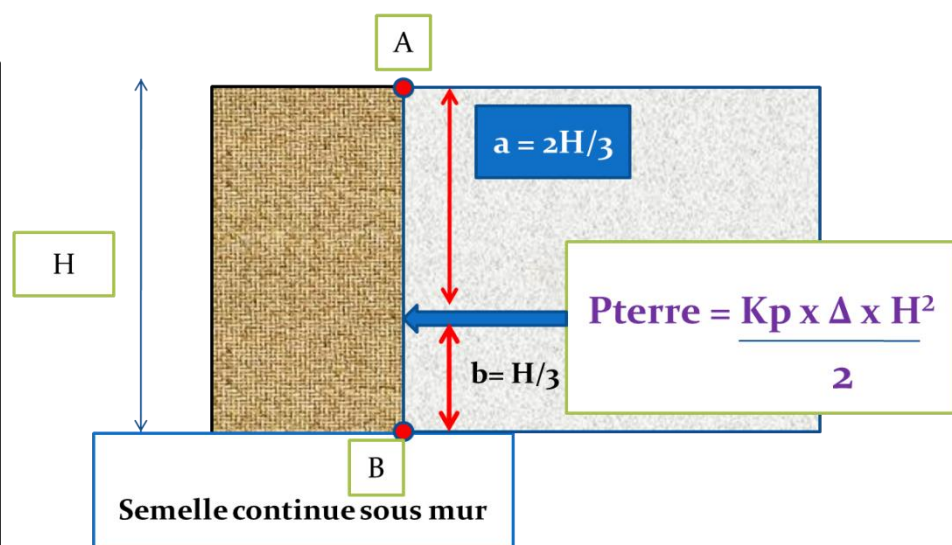
$$\text{La Force} = \text{pression triangulaire} \times \text{surface} = P(B) \times H \times 1/2 = (Kp \Delta H \times H \times 1) / 2 = \frac{Kp \Delta H^2}{2} \times 1$$

P_{terre} est une charge concentrée exprimée en Kg

Son point d'application est le centre de gravité du triangle des pressions :

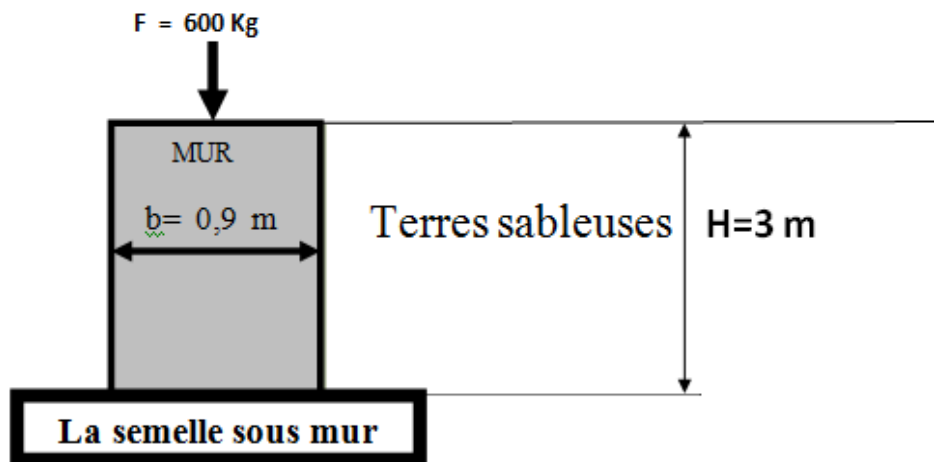
$$a = 2H/3$$

$$b = H/3$$



d) Exemple d'application 01 : Etude de stabilité d'un mur de soutènement en maçonnerie.

On veut vérifier la stabilité d'un mur de soutènement **en briques pleines**, représenté sur la figure suivante, et qui est conçu pour soutenir des terres sableuses sèches.



ON DONNE :

Le poids spécifique des terres sableuses sèches : $\Delta = 1,6 \text{ t/m}^3$

Le poids spécifique des briques pleines : $\rho = 1900 \text{ Kg/m}^3$

Angle du talus naturel des terres sableuses sèches : $\phi = 35^\circ$

Coefficient de sécurité au renversement : $K = 1,30$

Coefficient de sécurité au glissement : $K_1 = 1,55$

Coefficient de frottement : $f = 0,6$

Questions :

- 1) Calculer le coefficient de la poussée des terres K_p .
- 2) Calculer et représenter les pressions des terres appliquées sur l'écran du mur.
- 3) Calculer et représenter la poussée totale des terres P_{terre} appliquée sur le mur.
- 4) Calculer le moment de renversement M_r .
- 5) Calculer le moment stabilisant M_s .
- 6) Vérifier la stabilité du mur au renversement .
- 7) Vérifier la stabilité du mur au glissement.

Solution :

- 1) Calcul du coefficient de la poussée des terres K_p .

$$\text{On a : } K_p = \tan^2 (45 - \phi/2)$$

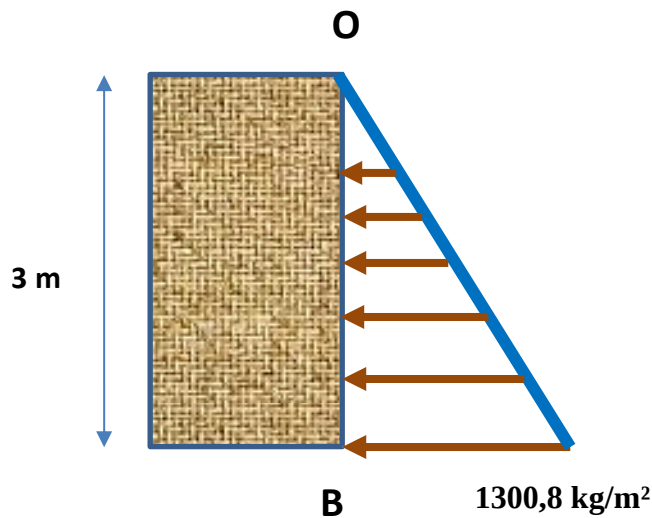
$$\text{Application numérique : } K_p = \tan^2 (45 - 35/2) = 0,271$$

Attention : la calculatrice doit être réglée en degrés.

- 2) Calcul des pressions des terres appliquées sur l'écran du mur.

- $P(O) = K_p \times \Delta \times 0 = 0$
- $P(B) = K_p \times \Delta \times H = 0,271 \times 1600 \times 3 = 1300,8 \text{ kg/m}^2$

Diagramme des pressions :



3) Calcul de la poussée totale des terres P_{terre} appliquée sur le mur (Résultante des pressions)

On a :

$$P_{\text{terre}} = \frac{K_p \Delta H^2}{2} \times 1 = \frac{0,271 \times 1600 \times 3^2}{2} \times 1$$

Donc :

$$P_{\text{terre}} = 1951,2 \text{ Kg}$$

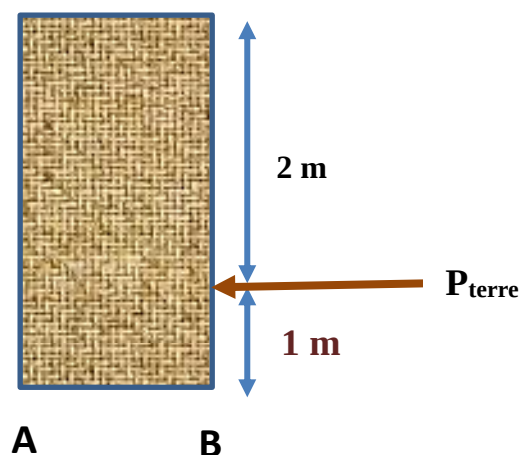
Point d'application de P_{terre} :

$$a = 2H/3 = 2 \times 3/3 = 2 \text{ m} \quad \text{et} \quad b = H/3 = 1 \text{ m}$$

4) Calcul du moment de renversement M_r .

On a : $M_r = P_{\text{terre}} \times 1$

$M_r = 1951,2 \text{ kg.m}$



5) Calcul du moment stabilisant M_s .

Les charges stabilisatrices sont :

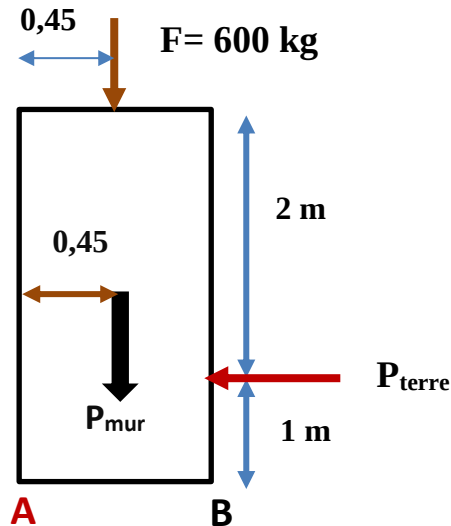
$$F = 600 \text{ Kg}$$

$$P_{\text{mur}} = 1900 \times 0,9 \times 3 \times 1 = 5130 \text{ Kg}$$

On a :

$$M_s = P_{\text{mur}} \times 0,45 + F \times 0,45$$

$$M_s = 2578,5 \text{ kg.m}$$



6) Vérification de la stabilité du mur au renversement .

On a :

$$\frac{M_s}{M_r} = \frac{2578,5}{1951,2} = 1,32 \geq K = 1,30$$

Donc, le mur est stable au renversement

7) Vérification de la stabilité du mur au glissement.

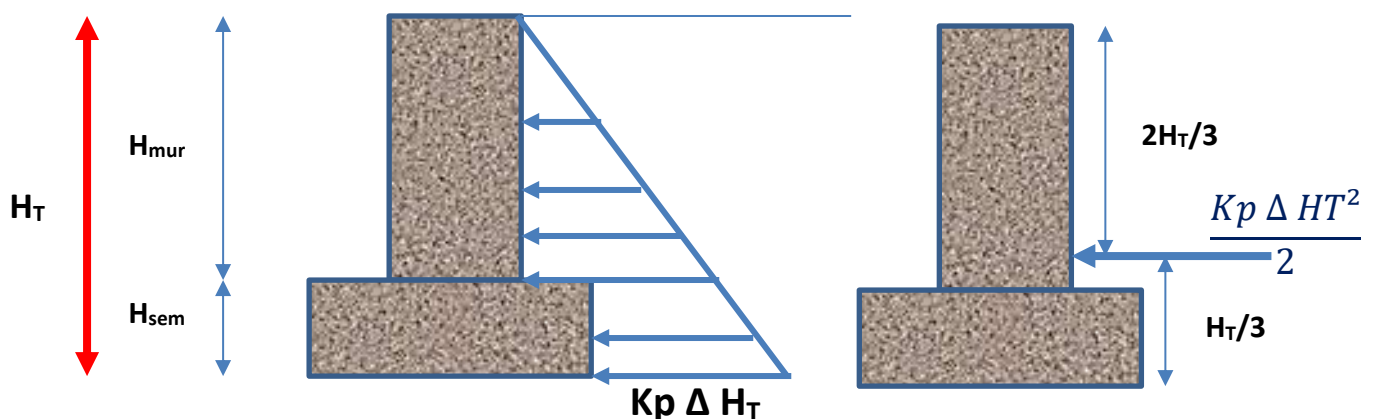
On a :

$$\frac{\sum P \downarrow \times f}{\sum F \leftarrow} = \frac{(F + P_{\text{mur}}) \times f}{P_{\text{terre}}} = \frac{(600 + 5130) \times 0,6}{1951,2} = 1,76 \geq K_1 = 1,55$$

Donc, le mur est stable au glissement.

e) Cas d'un mur de soutènement en béton armé

Si le mur est en béton armé , la poussée sera calculée par les mêmes formules exposées précédemment en prenant la hauteur totale de l'ensemble (Mur + semelle)



On peut faire l'exercice précédent en utilisant la fiche de calcul :

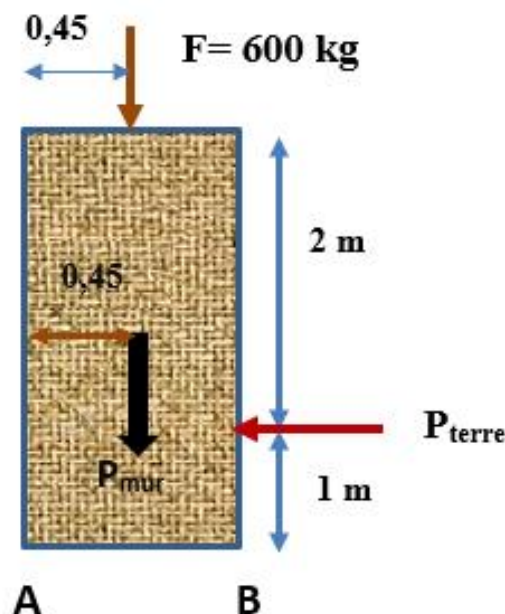
Projet : Etude de stabilité du mur de soutènement

Type de charge	Désignation de la charge	Formule de calcul	Valeur (Kg)	Distance /Joint (m)	Moment/Joint (Kg.m)
Charges Stabilisatrices	Charge F		600	0,45	270,00
	Poids mur	$1900 \times 0,9 \times 3 \times 1$	5130	0,45	2 308,50
	Somme des charges stabilisatrices : $\sum P \downarrow$		5730	Moment stabilisant M_s	2578,5
Charges motrices	Force Vent	$0,271 \times 1600 \times 3^2 / 2$	1951,2	1,00	1 951,20
	Somme des charges motrices : $\sum F \leftarrow$		1951,2	Moment de renversement M_r	1951,2

Vérification de la stabilité au renversement: $M_s/M_r = 1,32 > K=1,3$

Donc, le mur est stable au renversement

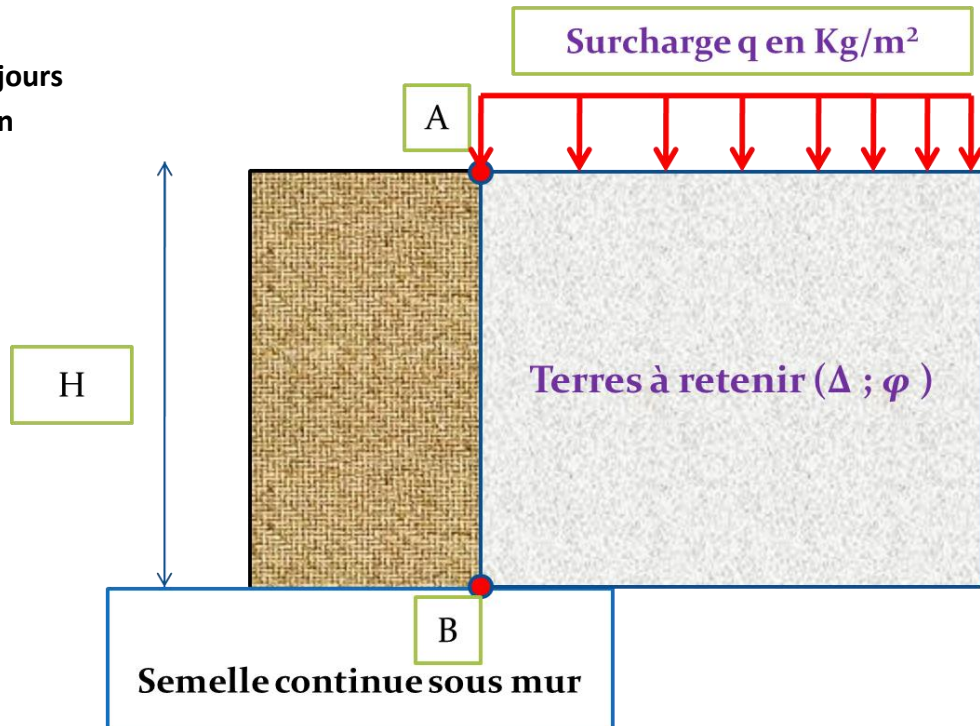
Vérification de la stabilité au glissement: $(\sum P \downarrow \times f) / (\sum F \leftarrow) = 1,76 > K_1=1,5$



3) Cas N°2 : cas d'une surcharge sur les terres à soutenir

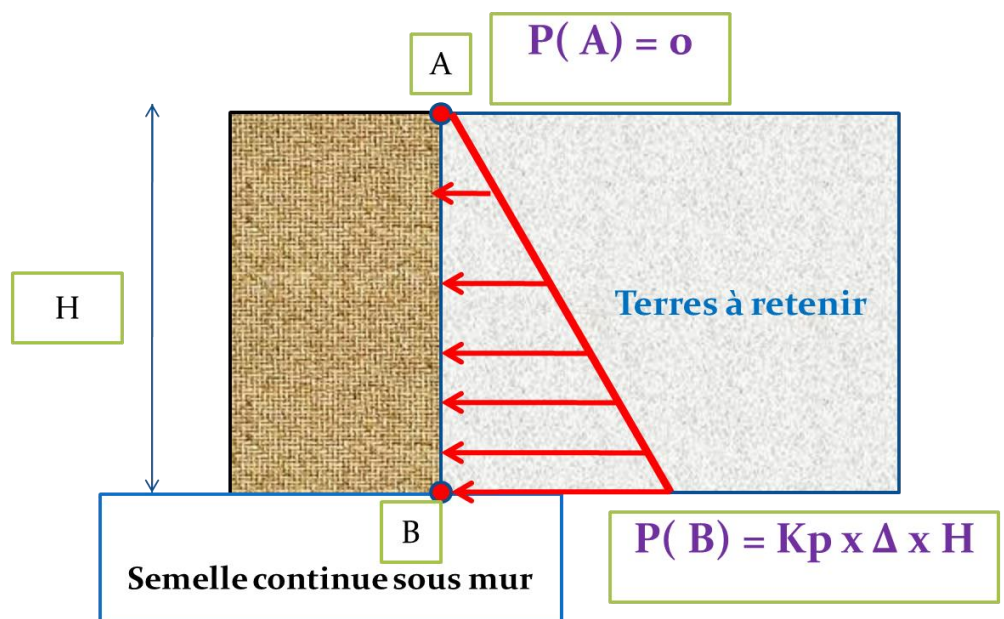
On se propose de calculer les poussées appliquées par des terres sur le mur de soutènement représenté sur la figure suivante

NB : On suppose toujours que le mur est en maçonnerie

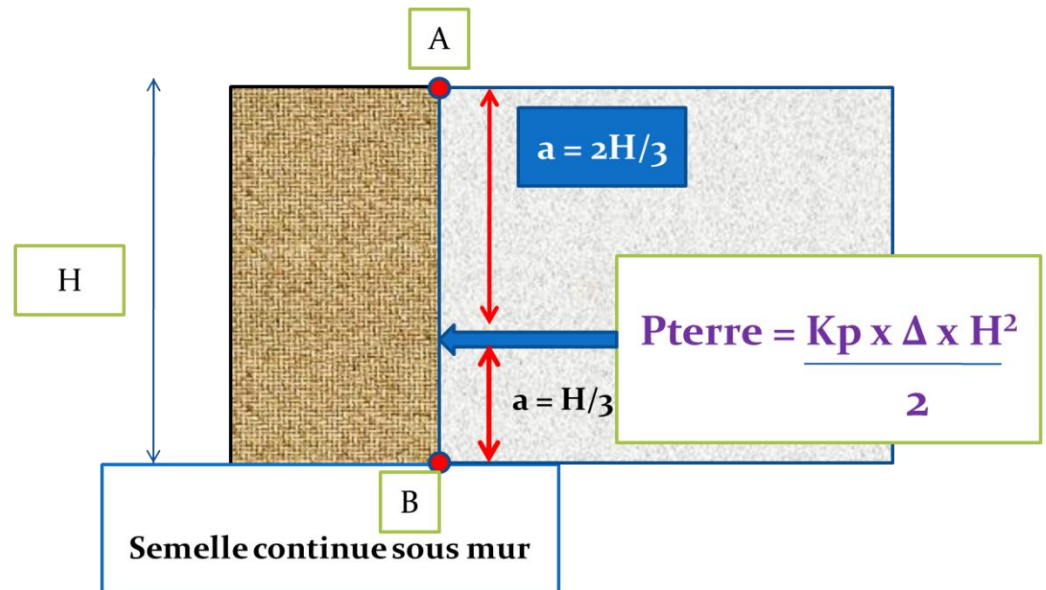


Dans ce cas, on aura deux types de poussées appliquées sur le mur de soutènement :

a) Poussée des terres (déjà vue) en paragraphe précédent



Ces pressions engendrent une résultante P_{terre} appliquée à $H/3$ du point B



b) Poussée engendrée par la surcharge q (Nouvelle poussée)

La surcharge applique une pression sur les terres = q

Mécanisme de transfert des charges



Les terres vont transmettre cette pression au mur de soutènement = Q

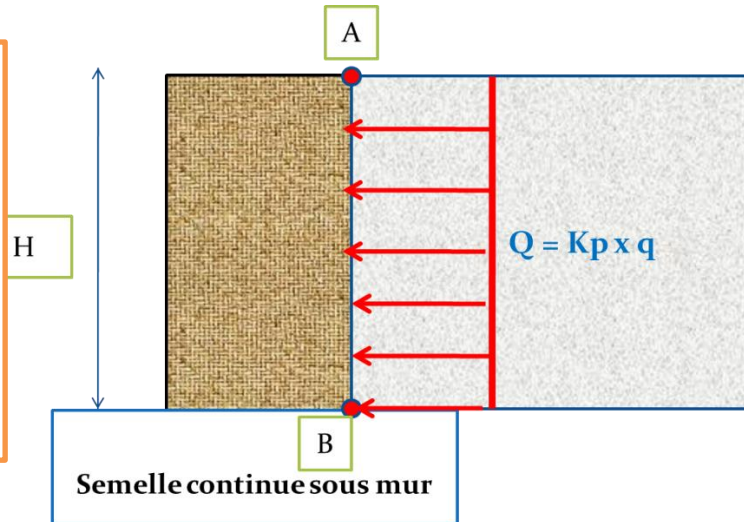
- Cette pression horizontale Q dépend de la surcharge q et de la nature des terres et se calcule par la formule suivante:

$$Q = K_p \times q$$

- Avec : $K_p = \tan^2 (45 - \varphi/2)$

Le diagramme des pressions est rectangulaire.(uniforme)

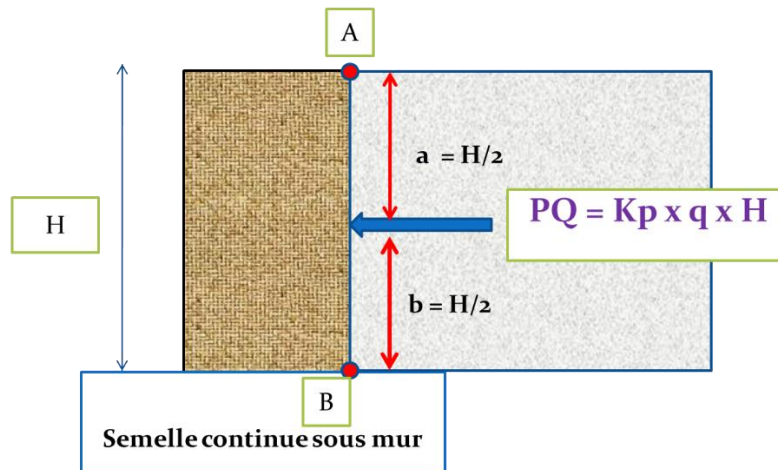
Les pressions Q sont exprimées en Kg/m^2



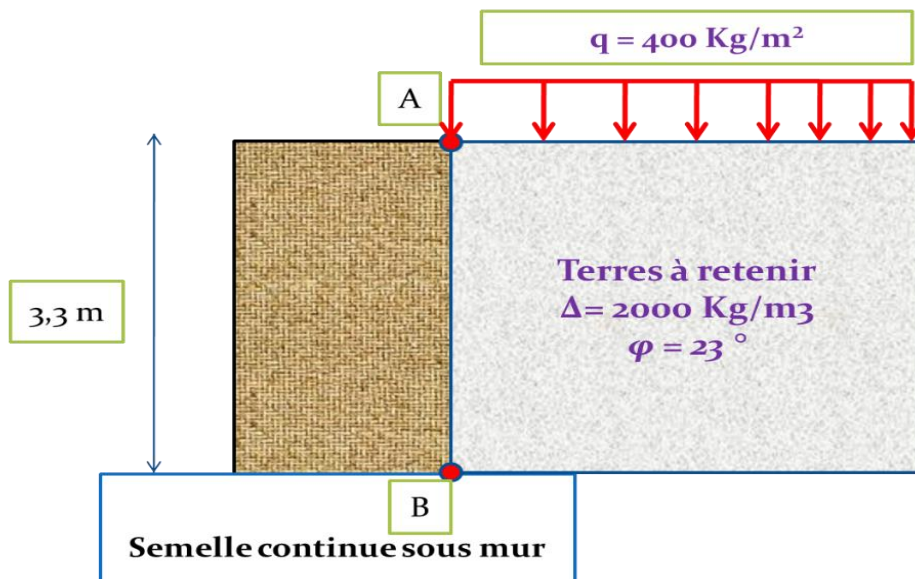
La poussee totale engendrée par q

P_Q est une charge concentrée exprimée en Kg

Son point d'application est le centre de gravité du rectangle des pressions (càd au milieu)



Exemple : Calculer les poussées appliquées par des terres sur le mur de soutènement représenté sur la figure suivante



Questions :

- 1) Calculer le coefficient de la poussée des terres K_p .
- 2) Calculer et représenter les pressions des terres appliquées sur l'écran du mur.
- 3) Calculer et représenter les poussées totales des terres P_{terre} et P_Q appliquées sur le mur.
- 4) Calculer le moment de renversement M_r .

Solution :

- 1) Calcul du coefficient de la poussée des terres K_p .

On a : $K_p = \tan^2 (45 - \varphi/2)$

Application numérique : $K_p = \tan^2 (45 - 23/2) = 0,439$

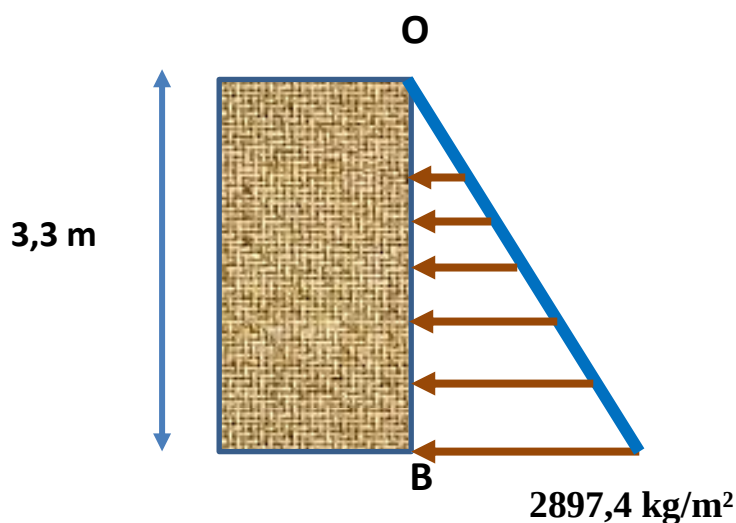
Attention : la calculatrice doit être réglée en degrés.

- 2) Calcul des pressions des terres appliquées sur l'écran du mur.

a) Pressions des terres (diagramme triangulaire)

- $P(O) = K_p \times \Delta \times 0 = 0$
- $P(B) = K_p \times \Delta \times H = 0,439 \times 2000 \times 3,3 = 2897,4 \text{ kg/m}^2$

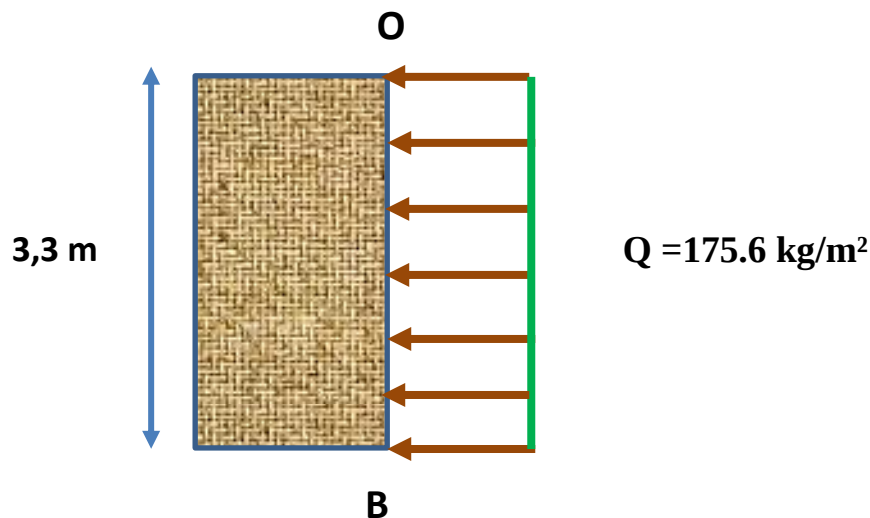
Diagramme des pressions :



b) Poussée engendrée par q (diagramme rectangulaire uniforme)

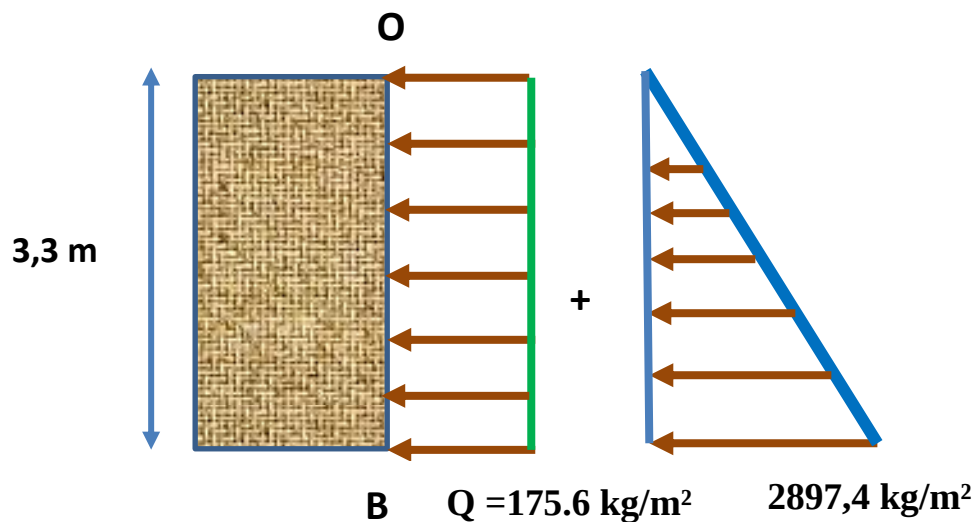
- $Q = K_p \times q = 0,439 \times 400 = 175.6 \text{ kg/m}^2$

Diagramme des pressions :



On représente les deux diagrammes dans un seul schéma :

Diagramme des pressions :



3) Calcul des poussées totales des terres P_{terre} et PQ .

a) Poussée totale des terres P_{terre}

On a :

$$P_{\text{terre}} = \frac{K_p \Delta H^2}{2} \times 1 = \frac{0,439 \times 2000 \times 3,3^2}{2} \times 1$$

Donc :

$$P_{\text{terre}} = 4780,71 \text{ Kg}$$

Point d'application :

$$a = 2H/3 = (2 \times 3,3) / 3 = 2,2 \text{ m} \quad \text{et} \quad b = H/3 = 3,3/3 = 1,1 \text{ m}$$

b) Poussée totale engendrée par q P_Q

On a :

$$P_Q = K_p q H \times 1 = 0,439 \times 400 \times 3,3 \times 1$$

Donc :

$$P_{\text{terre}} = 580 \text{ Kg}$$

Point d'application :

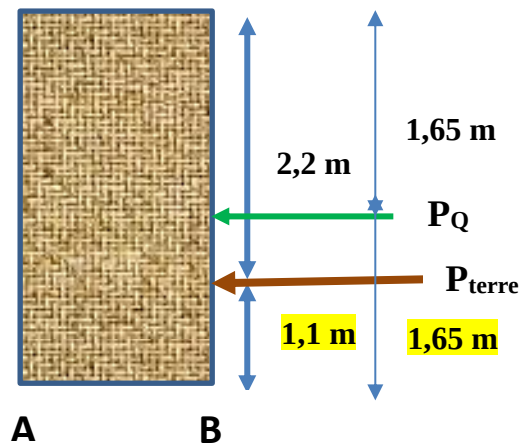
$$a' = b' = 3,3/2 = 1,65 \text{ m}$$

Présentation des poussées

4) Calcul du moment de renversement M_r .

$$\text{On a : } M_r = P_{\text{terre}} \times 1,1 + P_Q \times 1,65$$

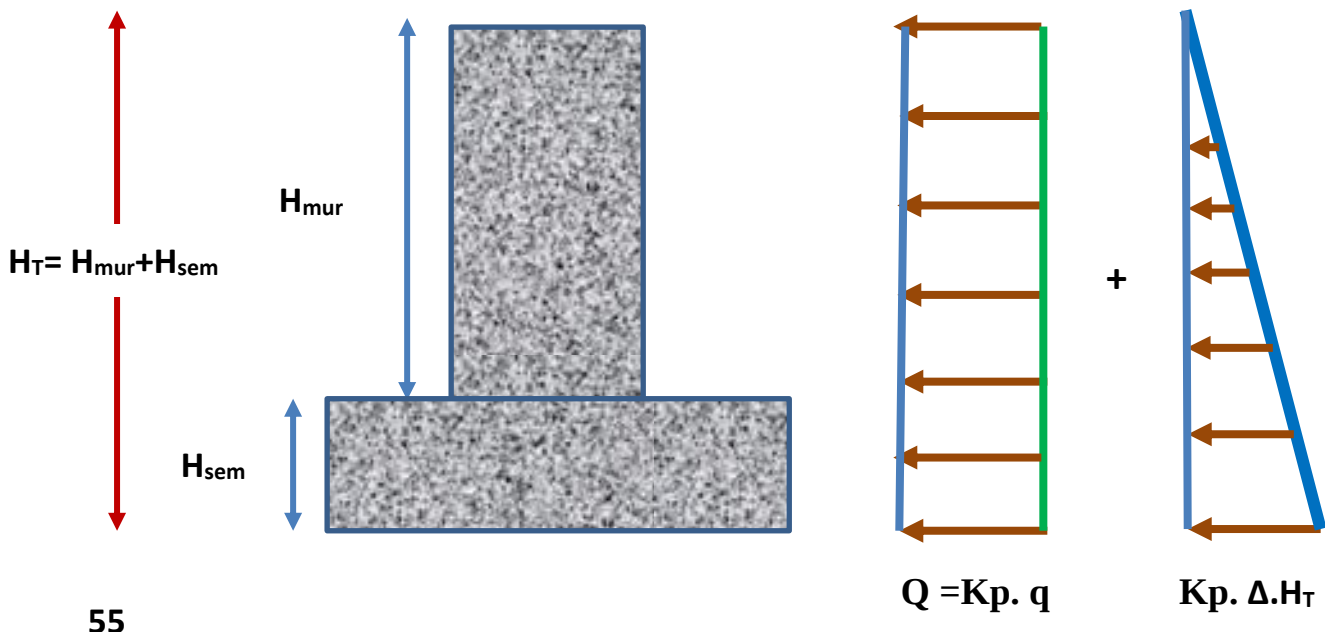
$$M_r = 6216 \text{ kg.m}$$



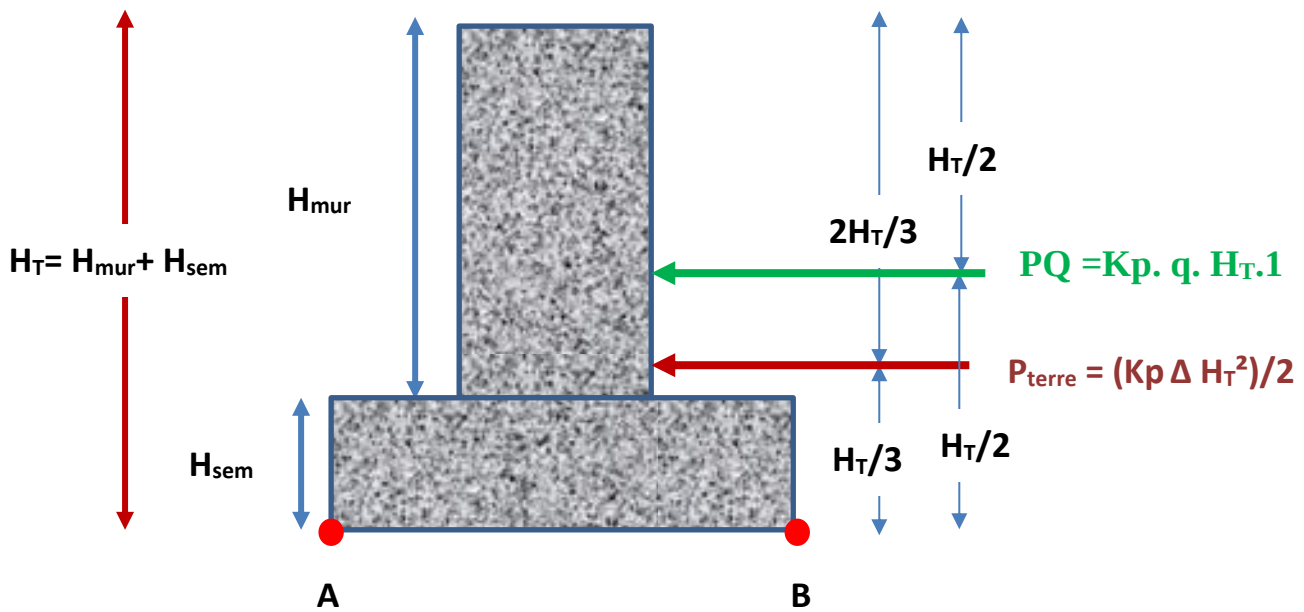
Remarque : Mur en béton armé :

Si le mur est en béton armé , la poussée sera calculée par les mêmes formules exposées précédemment en prenant la hauteur totale de l'ensemble (Mur + semelle)

Diagramme des pressions :



Présentation des poussées totales :

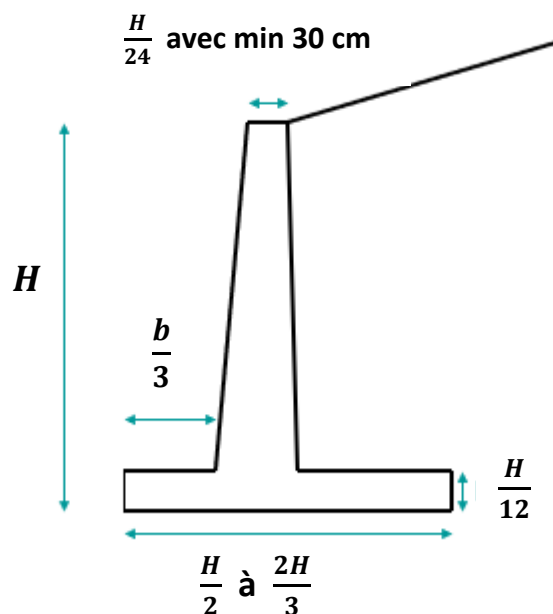


L'étude de stabilité au renversement se fera par rapport au joint de la semelle.

L'étude de stabilité au glissement se fera au niveau de la surface de contact entre la semelle et le sol porteur

Prédimensionnement d'un mur de soutènement :

Dimensions usuelles d'un mur de soutènement en béton armé:

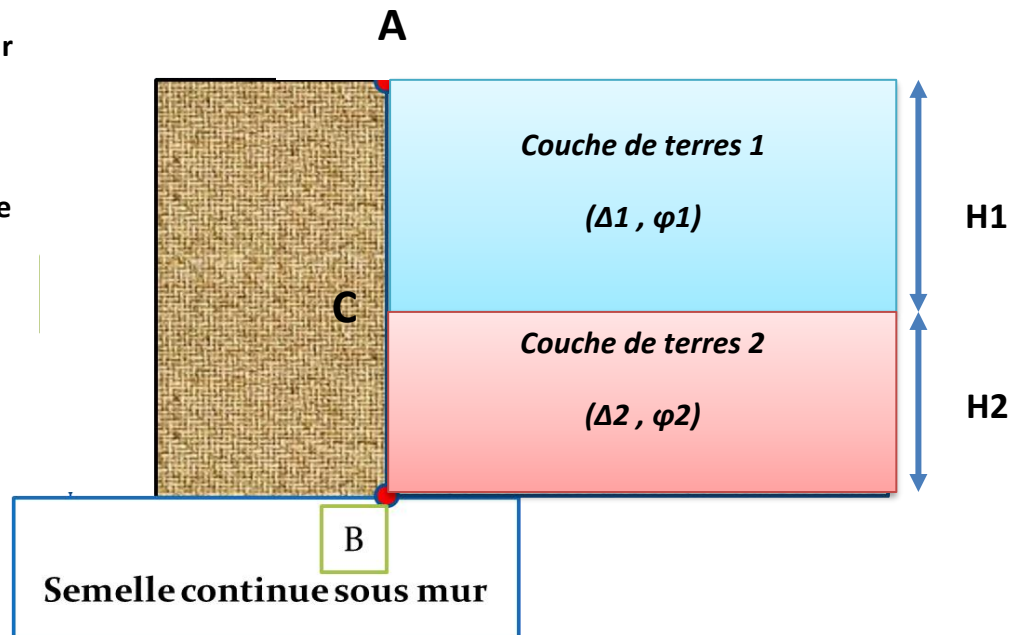


4) Cas N°3 : cas de deux couches de terres de caractéristiques différentes

On se propose de calculer les poussées appliquées par des terres sur le mur de soutènement représenté sur la figure suivante

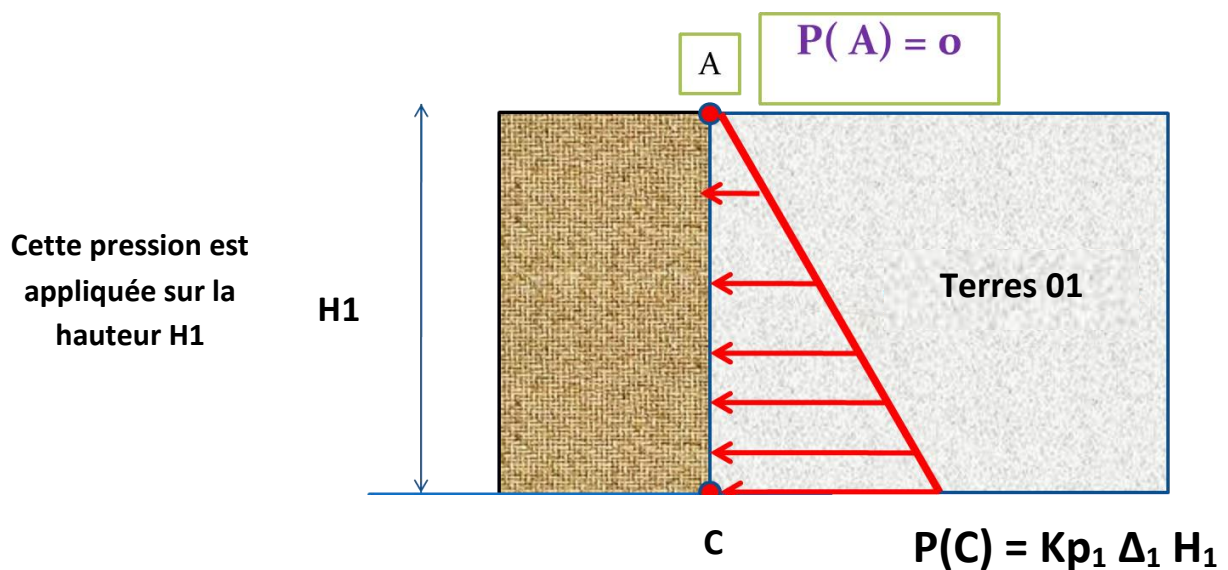
Le mur est conçu pour retenir deux couches de terres de caractéristiques différentes

NB : On suppose toujours que le mur est en maçonnerie

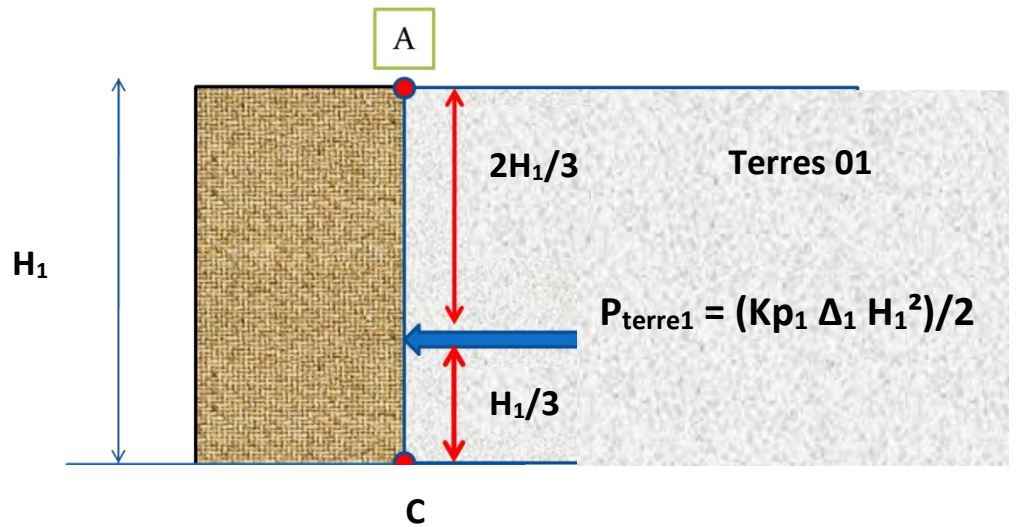


Dans ce cas, on aura trois poussées appliquées sur le mur de soutènement :

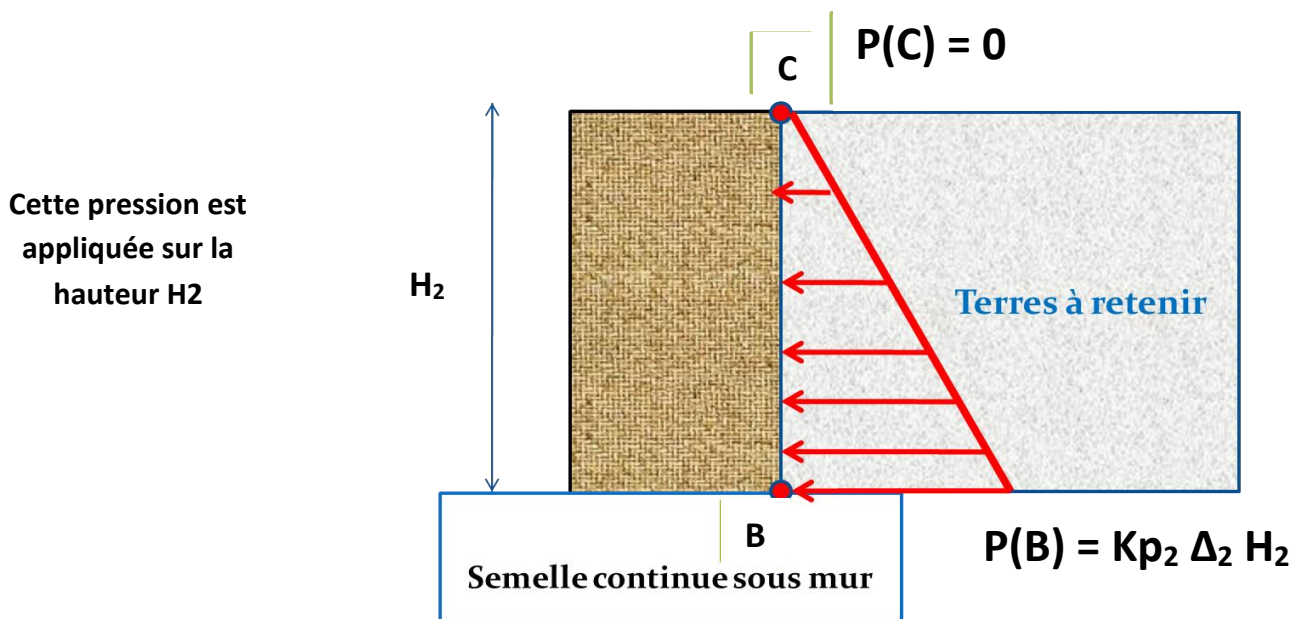
1- Poussée des terres 01 appliquée sur la hauteur H1



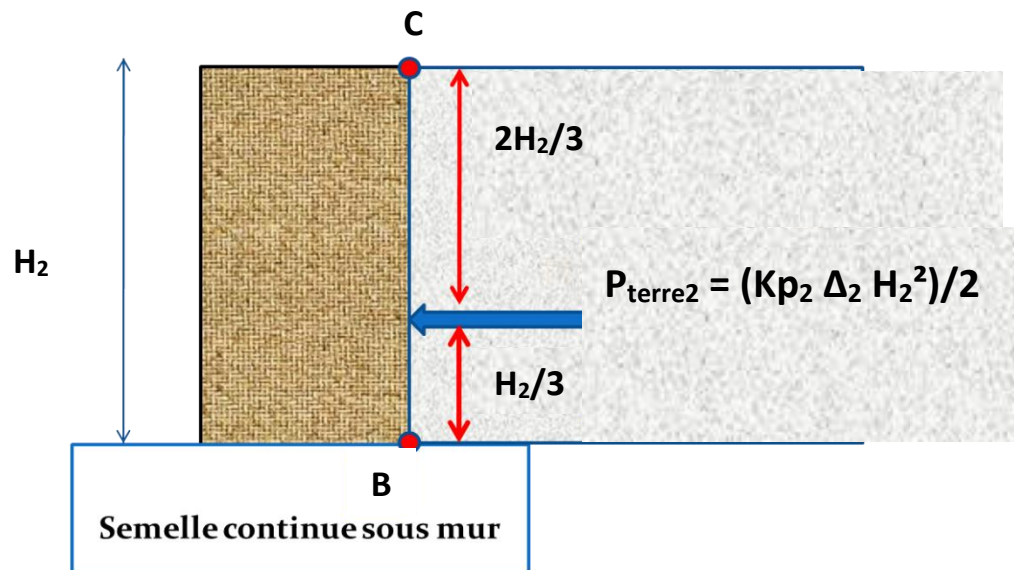
**Poussée totale appliquée par la couche 01=résultante
des pressions de la couche 01**



2- Poussée des terres 02 appliquée sur la hauteur H2



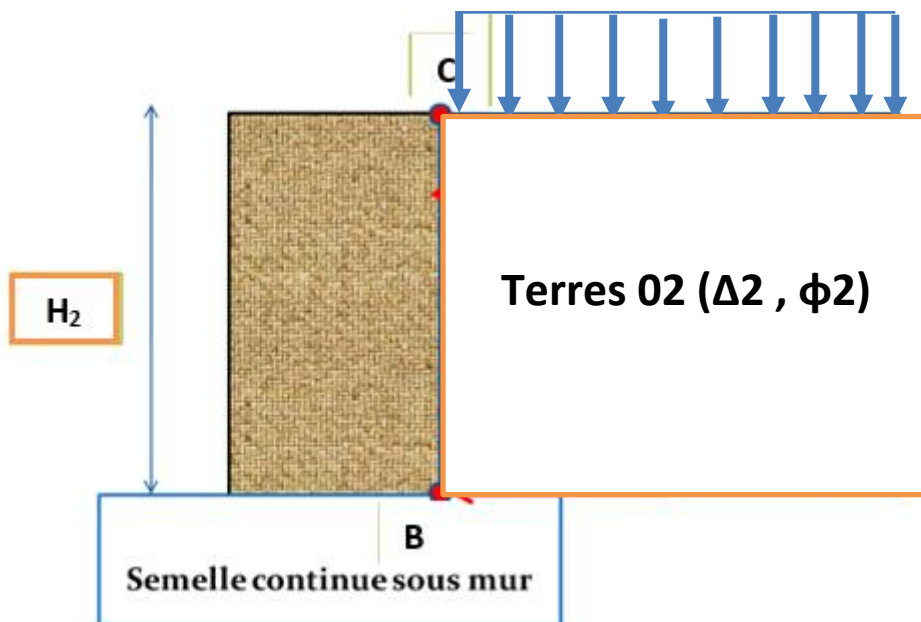
Poussée totale appliquée par la couche 02 = Résultante des pressions de la couche 2



3-Poussée engendrée par la surcharge de la couche 01 sur la couche 2

- La couche 01 applique un poids surfacique sur la couche 02
- Ce poids surfacique est considéré comme une surcharge qui vaut $q_{1/2} = \Delta_1 \times H_1$
- En remplaçant la couche 01 par la surcharge $q_{1/2}$, on obtient le schéma suivant :

Surcharge de la terre 01 sur la terre 02 : $q_{1/2} = \Delta_1 \times H_1$

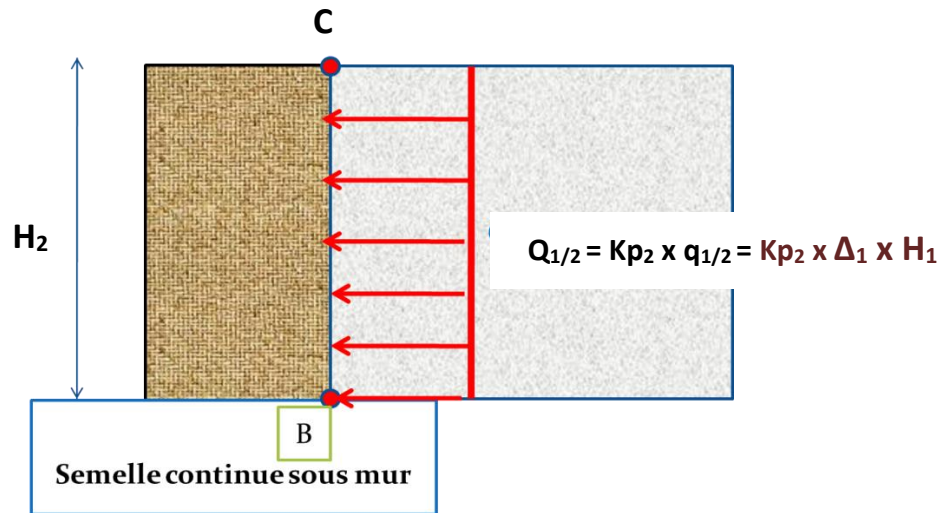


Cette surcharge va nous engendrer une 3^{ème} poussée appelée : **Poussée engendrée par la surcharge $q_{1/2}$ calculée en utilisant le 2^{ème} cas.**

Le diagramme de pression correspondant à cette poussée est un diagramme rectangulaire :

Le diagramme des pressions est rectangulaire.(uniforme)

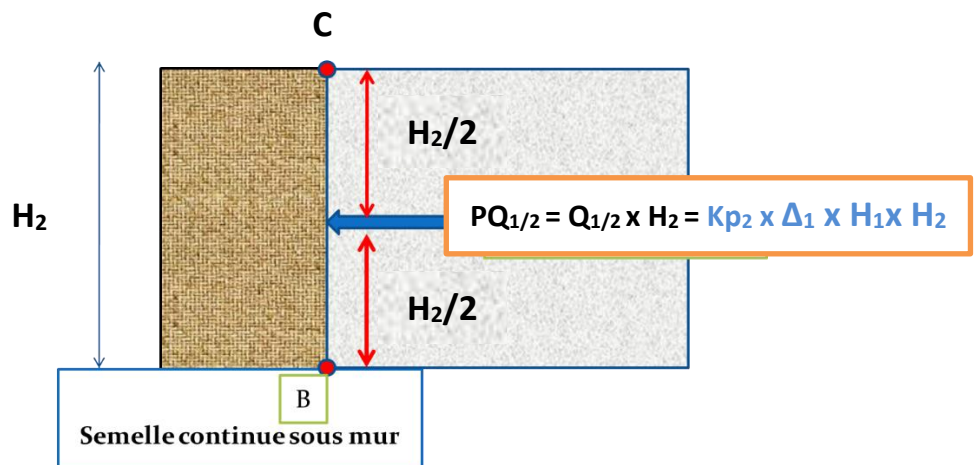
Les pressions $Q_{1/2}$ sont exprimées en Kg/m^2



La pousse totale engendrée par $q_{1/2}$

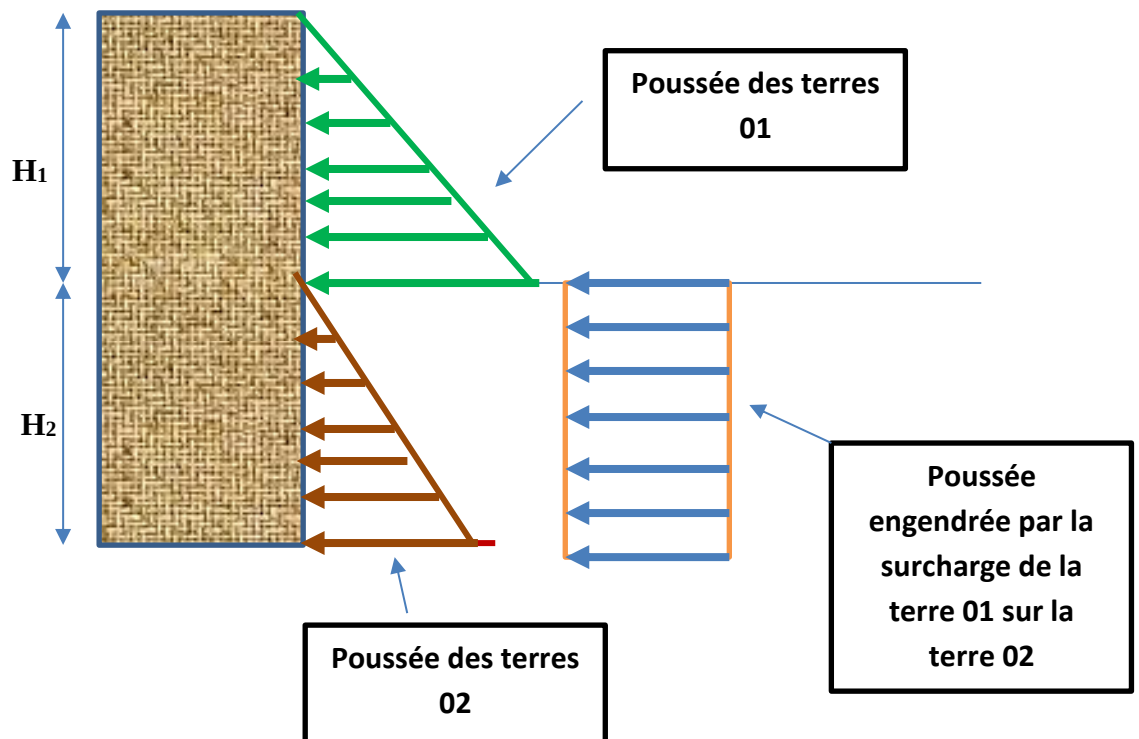
$P_{Q1/2}$ est une charge concentrée exprimée en Kg

Son point d'application est le centre de gravité du rectangle des pressions (càd au milieu de H)

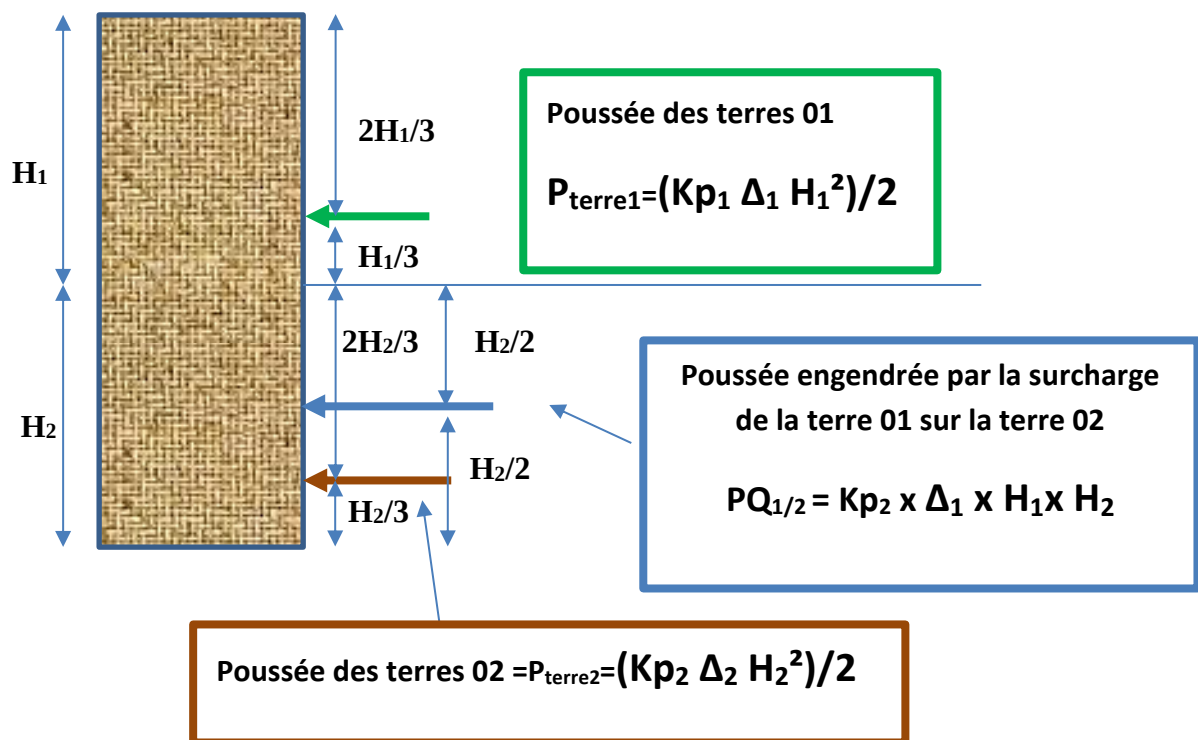


Schémas finaux :

a) Schéma final des pressions :

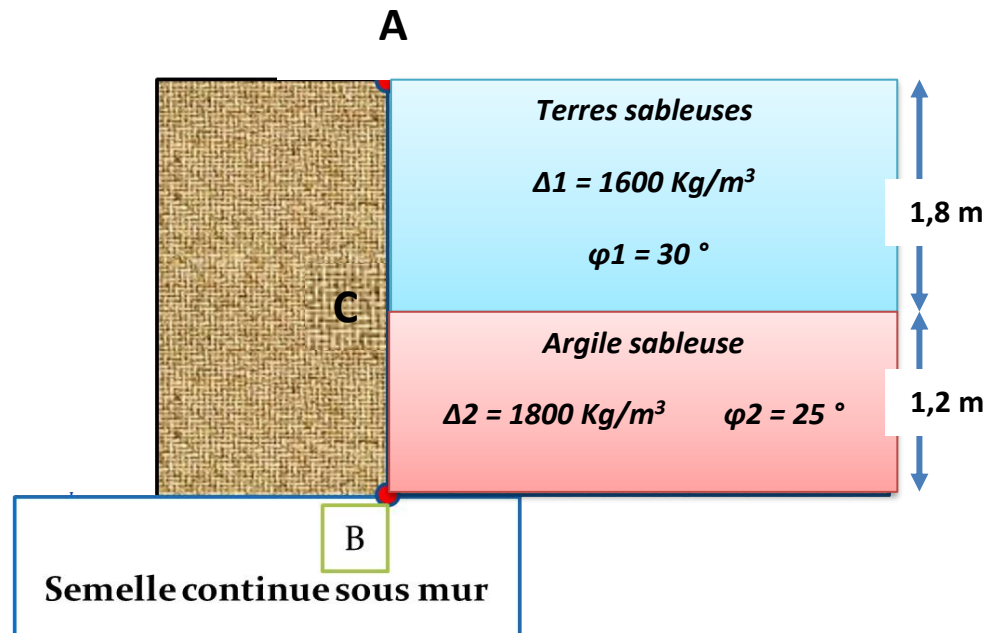


b) Schéma final des poussées totales (Résultantes des pressions)



Exemple d'application :

On se propose de calculer les poussées appliquées par des terres sur le mur de soutènement représenté sur la figure suivante



Solution :

1) Calcul des coefficients des poussées :

$$Kp_1 = \tan^2 (45 - \varphi_1/2) = \tan (45 - 30/2) = 0,334 \text{ (On majore le 3^{ème} chiffre)}$$

$$Kp_2 = \tan^2 (45 - \varphi_2/2) = \tan (45 - 25/2) = 0,406 \text{ (On majore le 3^{ème} chiffre)}$$

2) Calcul des pressions et poussées:

a) Pressions et poussée de la couche 01

➤ Pression :

$$P(A) = 0 \text{ et } P(C) = Kp_1 \Delta_1 H_1 = 0,334 \times 1600 \times 1,8 = 962 \text{ Kg/m}^2$$

➤ Poussée totale de la couche 1 :

$$P_{\text{terre1}} = \frac{Kp_1 \Delta_1 H_1^2}{2} \times 1\text{m} = \frac{0,334 \times 1600 \times 1,8^2}{2} \times 1\text{m} = 866 \text{ Kg}$$

$$\text{Point d'application : } a_1 = \frac{2 \times 1,8}{3} = 1,2 \text{ m et } b_1 = \frac{1,8}{3} = 0,6 \text{ m}$$

b) Pressions et poussée de la couche 02

➤ Pressions :

$$P(C) = 0 \text{ et } P(B) = Kp_2 \Delta_2 H_2 = 0,406 \times 1800 \times 1,2 = 877 \text{ Kg/m}^2$$

➤ Poussée totale de la couche 02 :

$$P_{\text{terre1}} = \frac{Kp_2 \Delta_2 H_2^2}{2} \times 1\text{m} = \frac{0.406 \times 1800 \times 1,2^2}{2} \times 1\text{m} = 526,2 \text{ Kg}$$

$$\text{Point d'application : } a_2 = \frac{2 \times 1,2}{3} = 0,8 \text{ m et } b_2 = \frac{1,2}{3} = 0,4 \text{ m}$$

c) Pressions et poussée engendrées par la surcharge de la couche 01 sur la couche 02

➤ Surcharge de la terre 01 sur la terre 02 :

$$q_{1/2} = \Delta_1 \times H_1 = 1600 \times 1,8 = 2880 \text{ Kg/m}^2$$

➤ Pressions :

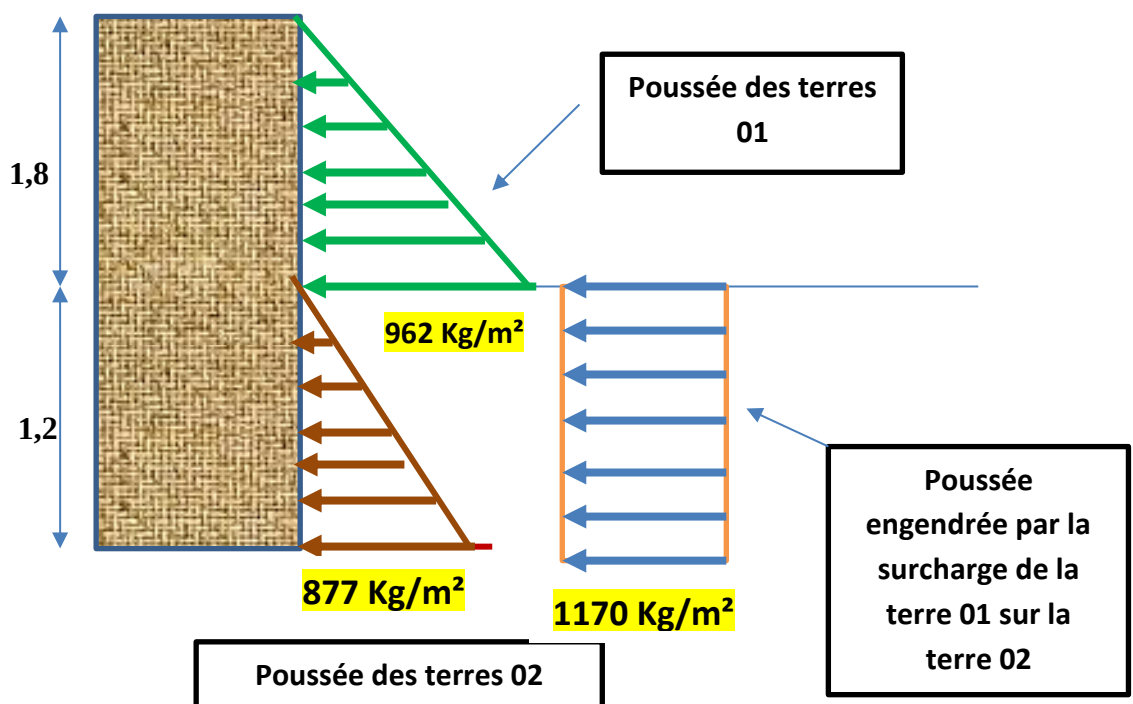
$$P(C) = P(B) = Kp_2 \times q_{1/2} = 0,406 \times 2880 = 1170 \text{ Kg/m}^2$$

➤ Poussée totale engendrée par $q_{1/2}$:

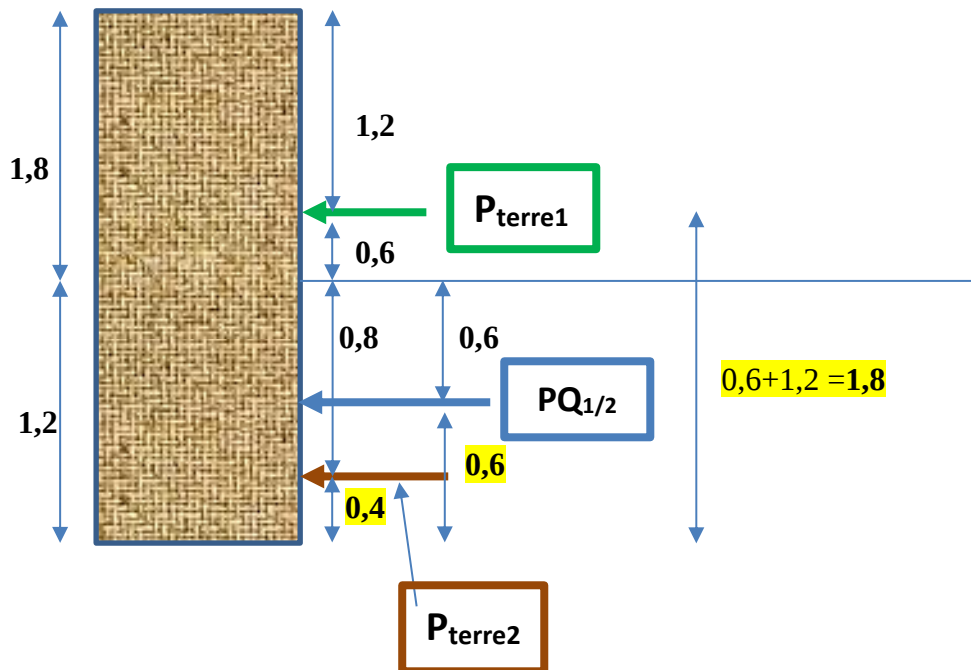
$$P_{Q1/2} = Kp_2 \times q_{1/2} \times H_2 = Kp_2 \times \Delta_1 \times H_1 \times H_2 \times 1 = 0,406 \times 1600 \times 1,8 \times 1,2 \times 1 = 1404 \text{ Kg}$$

$$\text{Point d'application : } a_3 = b_3 = \frac{1,2}{2} = 0,6 \text{ m}$$

c) Schéma final des pressions :



d) Schéma final des poussées totales (Résultantes des pressions)

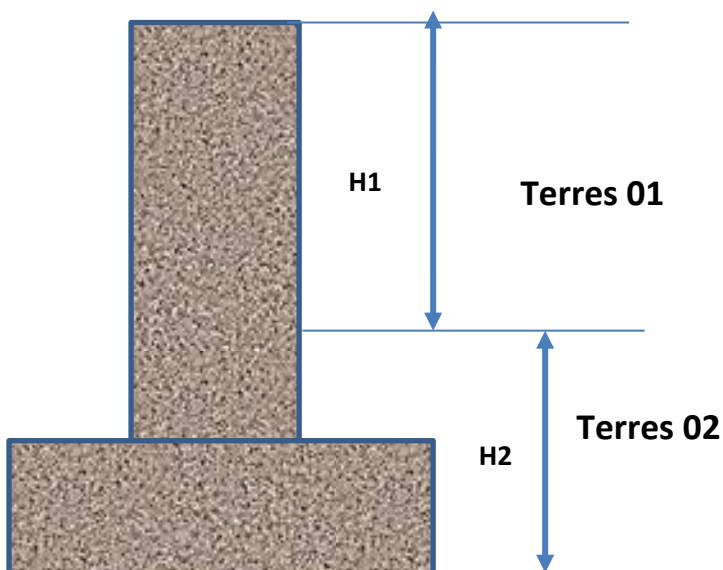


Calcul du moment de renversement :

$$M_r = P_{\text{terre1}} \times 1,8 + P_{\text{terre2}} \times 0,4 + P_{Q1/2} \times 0,6 = 2612 \text{ Kg.m}$$

Remarque : Cas d'un mur en béton armé :

La hauteur de la semelle est comptabilisée avec la 2^{ème} couche :



Dans ce cas , on aura 3 poussées :

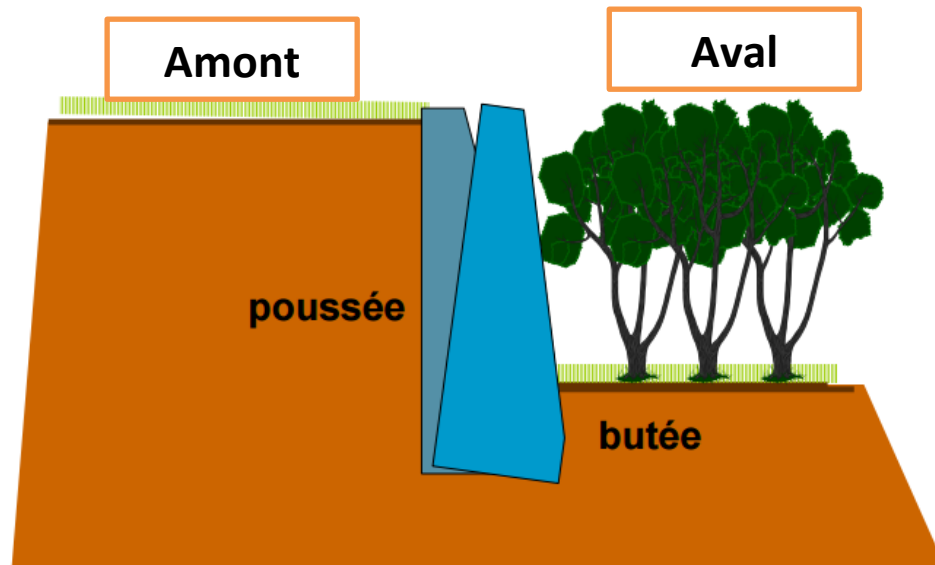
$$P_{\text{terre1}} = \frac{Kp1.\Delta1.H1^2}{2} \times 1\text{m}$$

$$P_{\text{terre2}} = \frac{Kp2.\Delta2.H2^2}{2} \times 1\text{m}$$

$$P_{Q1/2} = Kp_2 \times \Delta1 \times H1 \times H2 \times 1$$

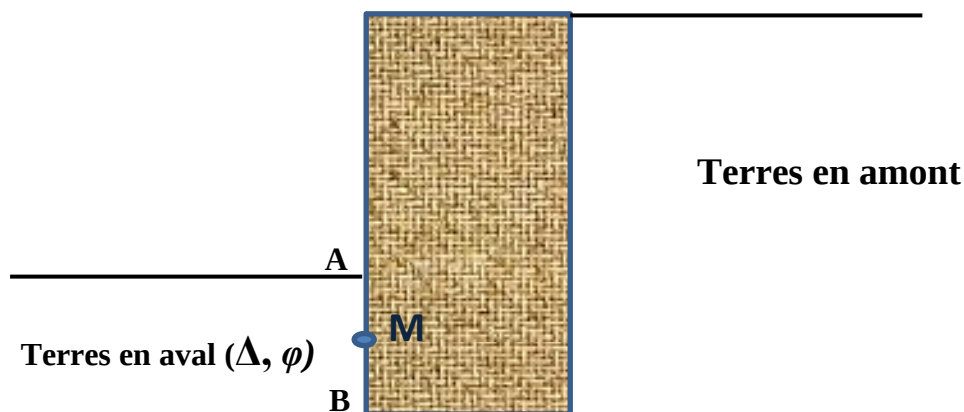
5) Cas N°4 : Calcul de la butée des terres

La butée, appelée aussi poussée passive, est calculée de la même manière que la poussée active.



La butée est une charge stabilisatrice favorisant la stabilité des murs.

La prise en compte de la butée dans les calculs de stabilité représente un risque en cas de toute modification du terrain en aval du mur (éventuels travaux de terrassement)



Les terres en aval appliquent des pressions passives sur le mur.

Ces pressions se calculent par la formule suivante :

$$P(M) = K_B \times \Delta \times h$$

- Avec : K_B coefficient de la butée des terres qui dépend de φ .
- $K_B = \tan^2 (45 + \varphi/2) = 1/K_p$

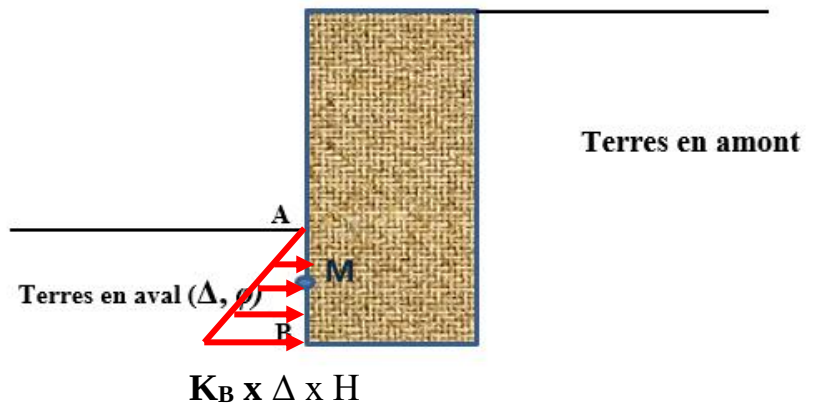
NB : L'indice B vient du mot « Butée »

Pression en points A et B

- $P(M) = K_B \times \Delta \times h$
- $P(A) = K_B \times \Delta \times 0 = 0$
- $P(B) = K_B \times \Delta \times H$

Le diagramme des pressions est triangulaire.

Les pressions sont exprimées en Kg/m²



$$K_B = \tan^2 (45 + \phi/2)$$

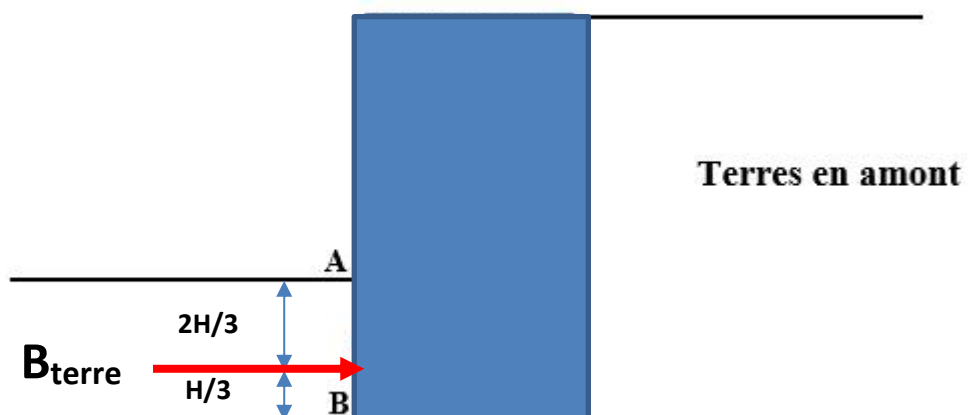
Calcul de la butée totale des terres B_{terre}

C'est la résultante des pressions = Force équivalente aux pressions passives calculées

La Force = pression triangulaire * surface = $P(B) * H * 1/2 = K_B \Delta H * H * 1/2 = \frac{K_B \Delta H^2}{2} \times 1$

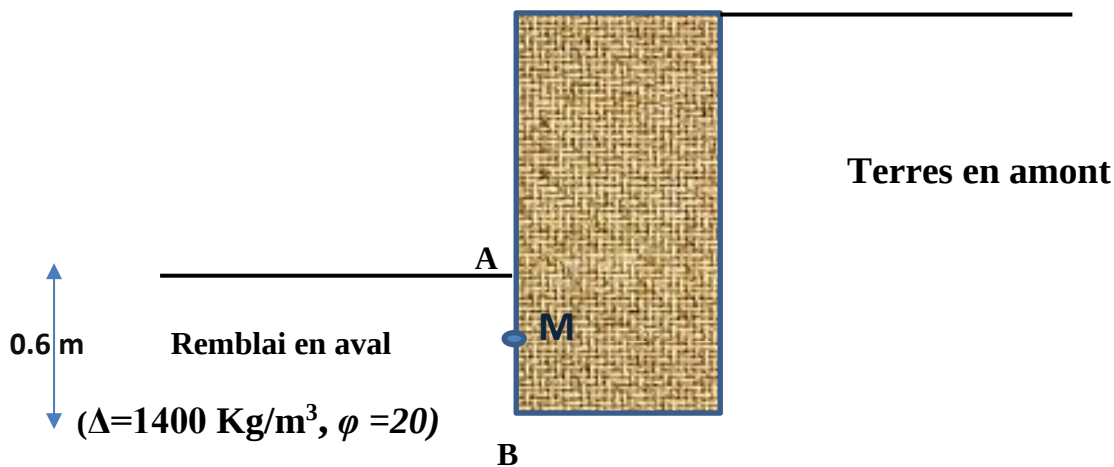
B_{terre} est une charge concentrée exprimée en Kg

Son point d'application est le centre de gravité du triangle des pressions (Dernier tiers)



Exemple :

Soit à calculer la butée appliquée sur le mur de soutènement par le remblai en aval.

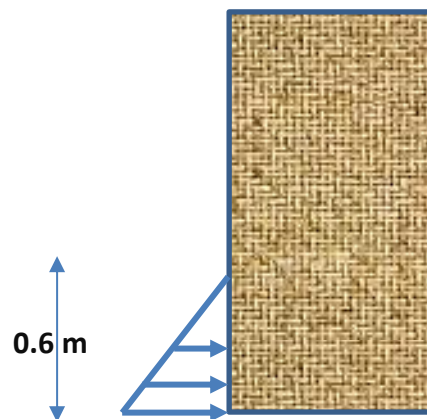


Les terres en aval appliquent des pressions passives sur le mur.

Pressions passives :

On a : $K_B = \tan^2 (45 + 20/2) = 2.04$

- $P(M) = K_B \times \Delta \times h$
- $P(A) = K_B \times \Delta \times 0 = 0$
- $P(B) = K_B \times \Delta \times H = 2,04 \times 1400 \times 0,6 = 1713,6 \text{ Kg/m}^2$



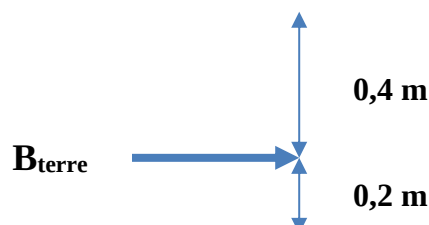
Butée totale :

$1713,6 \text{ Kg/m}^2$

$$B_{\text{terre}} = \frac{K_B \Delta H^2}{2} \times 1 = \frac{2,04 \times 1400 \times 0,6^2}{2} \times 1 = 514 \text{ Kg}$$

Point d'application :

$a = 2H/3 = 0.4 \text{ m}$ $b = H/3 = 0.2 \text{ m}$

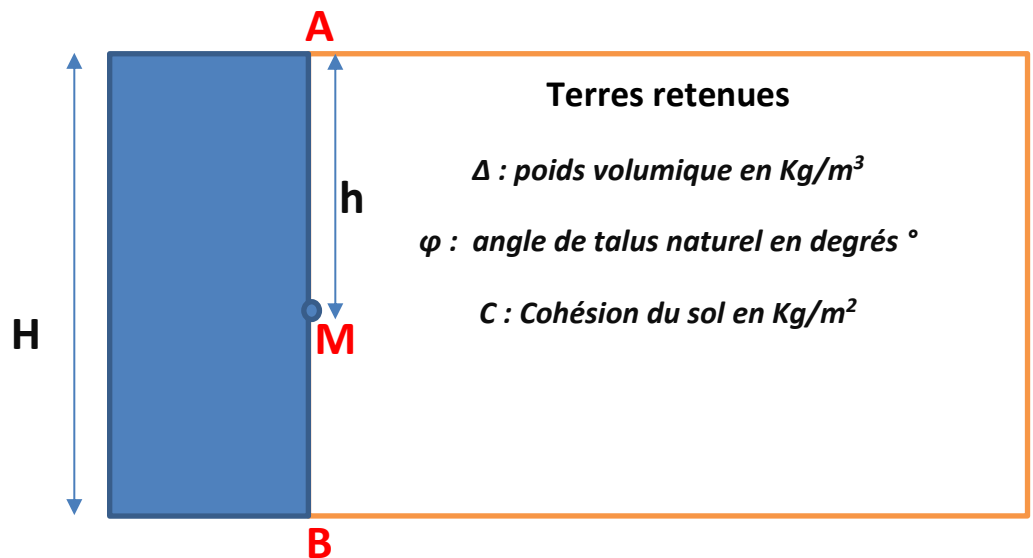


6) Cas N°5 : Calcul de la poussée des terres : cas d'un sol cohérent

Dans les parties précédentes, nous avons traité tous les cas avec un sol supposé non cohérent. ($C = 0$). C'est le cas le plus défavorable et le plus sécuritaire. (La cohésion d'un sol est une caractéristique qui peut changer avec le temps)

Dans cette partie, on traitera le cas d'un sol cohérent.

Soit à calculer les pressions appliquées sur le mur de soutènement représenté sur la figure suivante.



la pression en point M du est exprimé par la formule suivante :

$$P(M) = Kp \cdot \Delta \cdot h - 2C \sqrt{Kp}$$

Remarque : La poussée d'un sol cohérent est inférieure à la poussée d'un sol non cohérent.

Cette différence est due aux forces d'attraction entre les grains du sol cohérent.

Cette différence est traduite par le terme : $-2C \sqrt{Kp}$ dans la formule ci-dessus.

- Avec : Kp coefficient de la poussée des terres qui dépend de φ .

$$\text{Avec : } Kp = \tan^2 (45 - \varphi/2)$$

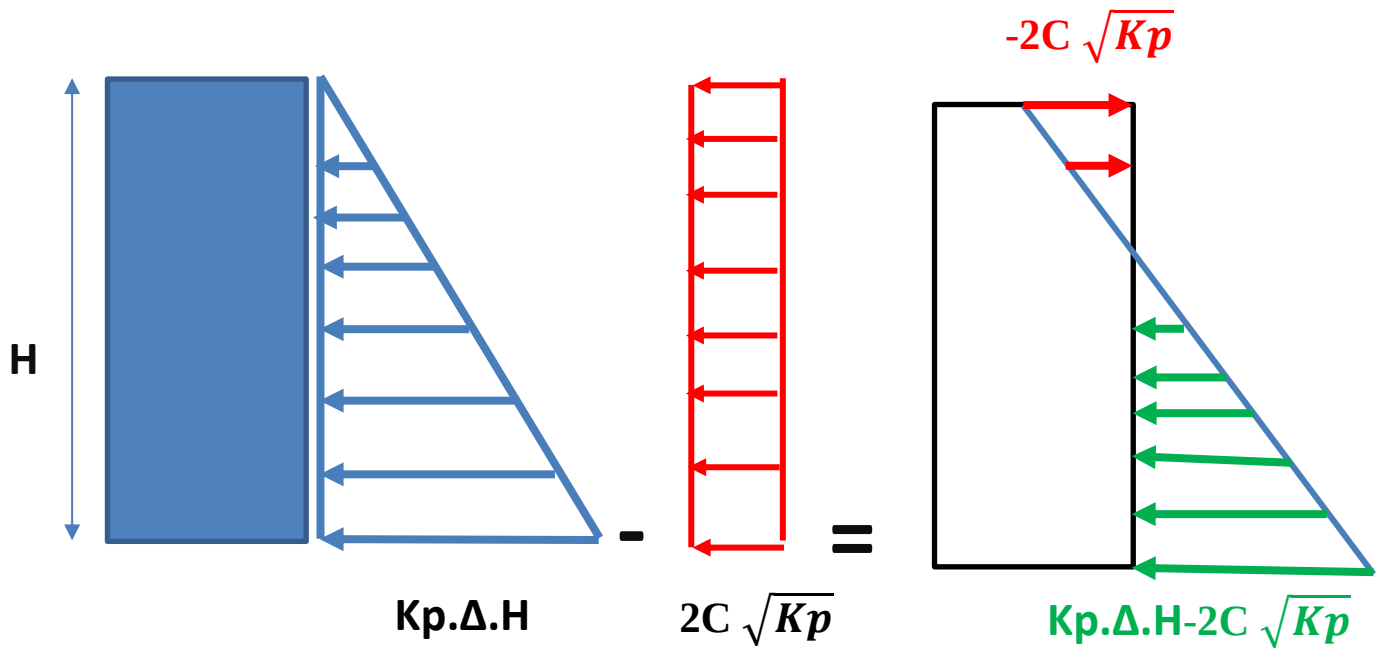
- C : cohésion du sol à retenir

Pression en points A et B :

$$\text{➤ } P(A) = Kp \cdot \Delta \cdot 0 - 2C \sqrt{Kp} = -2C \sqrt{Kp} < 0$$

$$\text{➤ } P(B) = P(M) = Kp \cdot \Delta \cdot H - 2C \sqrt{Kp}$$

Diagramme des pressions :



Calcul des poussées totales (Résultantes des pressions) :

Les poussées totales sont calculées en multipliant les pressions par les surfaces exposées à ces pressions (Surface de l'écran vertical du mur)

La poussée équivalente au diagramme triangulaire ($K_p \cdot \Delta \cdot H$) est égale à :

$$(K_p \cdot \Delta \cdot H \cdot H) / 2 = \frac{K_p \cdot \Delta \cdot H^2}{2} \cdot 1 \text{ (Appliquée au dernier tiers)}$$

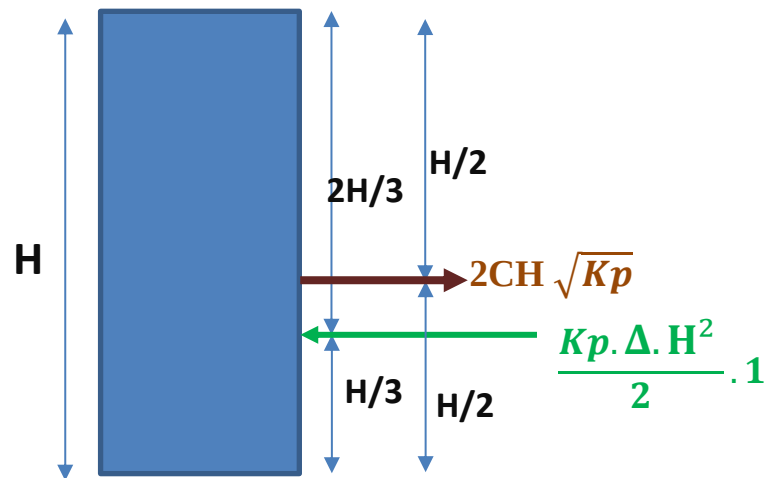
La poussée équivalente au diagramme rectangulaire $2C \sqrt{K_p}$ est égale à :

$$(2C \sqrt{K_p} \cdot H) \times 1 \text{ (Appliquée au milieu)}$$

La charge totale est calculée par :

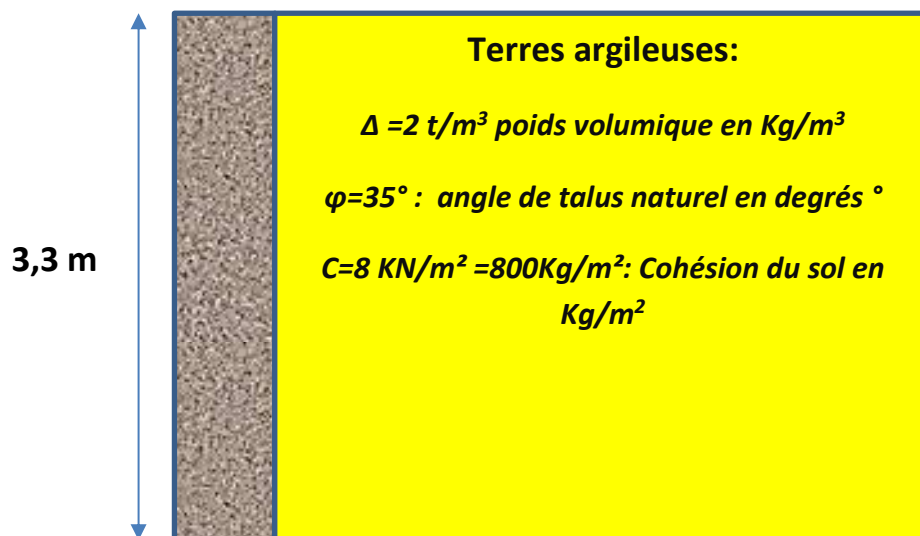
$$\frac{K_p \cdot \Delta \cdot H^2}{2} \cdot 1 - 2C \sqrt{K_p} \cdot H \cdot 1$$

Représentation des poussées totales :



Exemple :

Soit à calculer les pressions appliquées sur le mur de soutènement représenté sur la figure suivante :



On a :

$$P(M) = Kp \cdot \Delta \cdot h - 2C \sqrt{Kp} \text{ avec } Kp = \tan^2 (45 - \varphi/2) = 0,271$$

$$P(0) = -2C \sqrt{Kp} = -2 \times 800 \times \sqrt{0,271} = -833 \text{ Kg/m}^2$$

$$P(3,3) = Kp \cdot \Delta \cdot H - 2C \sqrt{Kp} = 0,271 \times 2000 \times 3,3 - 2 \times 800 \times \sqrt{0,271} = 956 \text{ Kg/m}^2$$

Calcul des poussées totales

Les poussées totales sont calculées en multipliant les pressions par les surfaces exposées à ces pressions (Surface de l'écran vertical du mur)

La poussée équivalente au diagramme triangulaire ($Kp \cdot \Delta \cdot H$) est égale à :

$$(Kp \cdot \Delta \cdot H) / 2 = \frac{Kp \cdot \Delta \cdot H^2}{2} \cdot 1 = \frac{0,271 \times 2000 \times 3,3^2}{2} \cdot 1 = 2952 \text{ Kg}$$

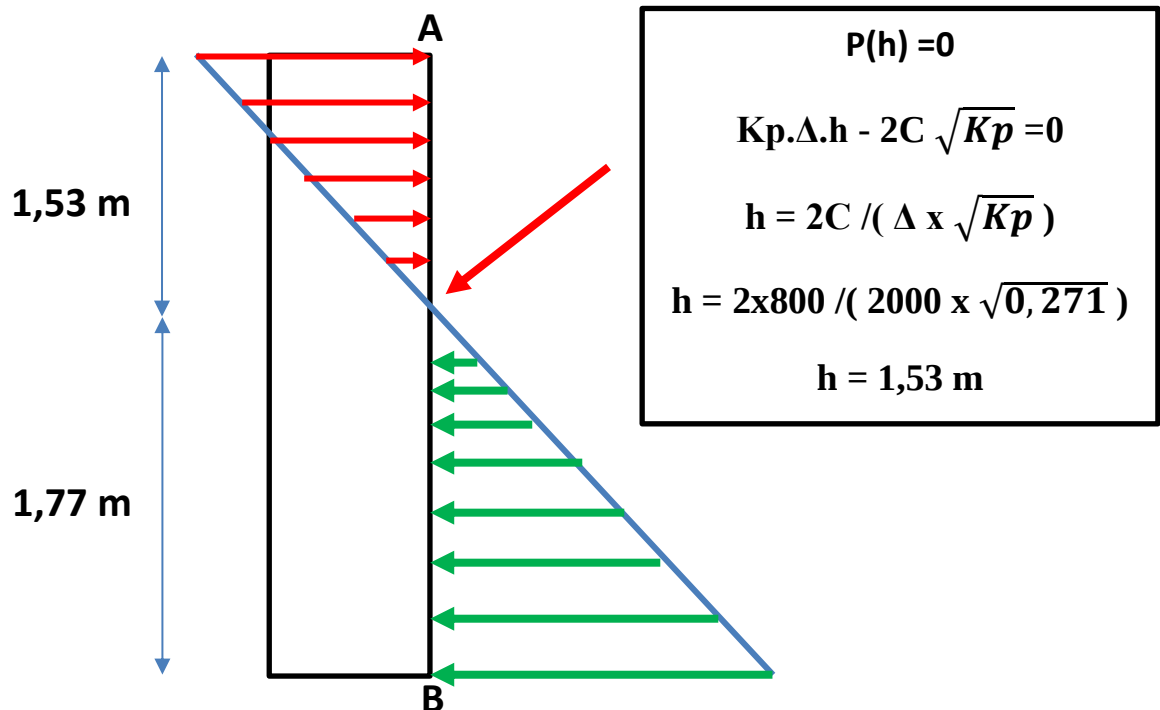
➤ Cette poussée est appliquée à $H/3$ soit à 1,1 m du point B

La poussée équivalente au diagramme rectangulaire $2C \sqrt{Kp}$ est égale à :

$$2CH \sqrt{Kp} = 2 \times 800 \times 3,3 \times \sqrt{0,271} \times 1 = 2749 \text{ KG}$$

➤ Cette poussée est appliquée à $H/2$ soit à 1,65 m du point B

Diagramme des pressions :

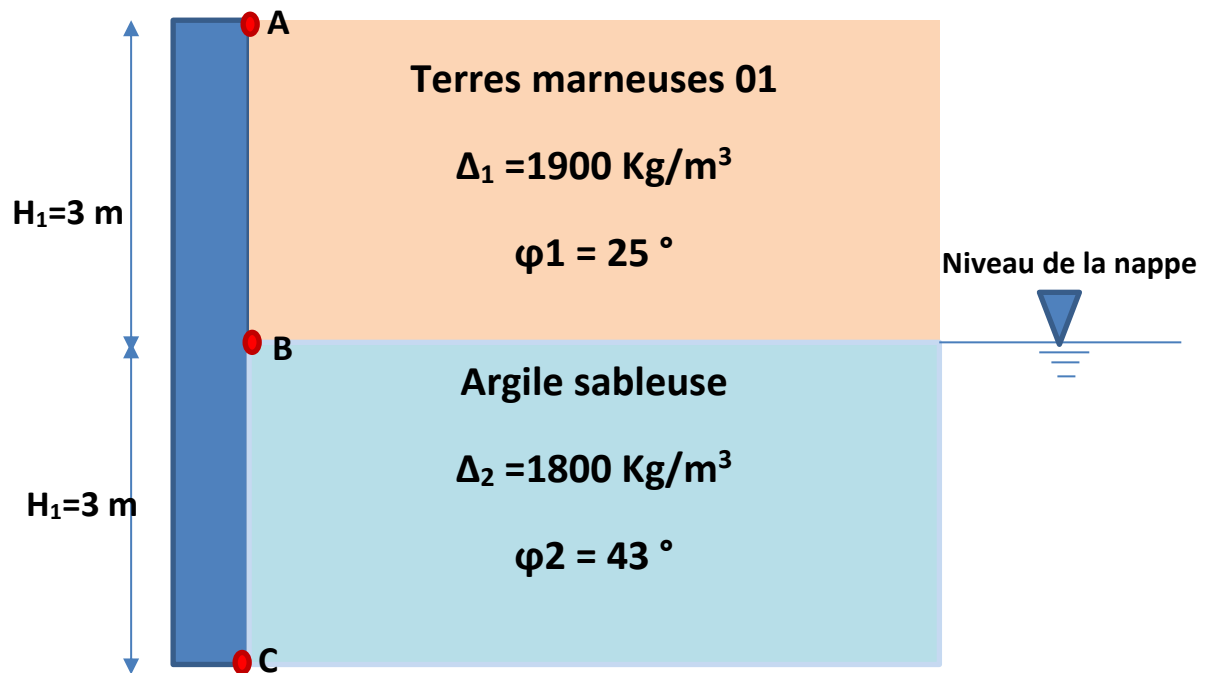


7) Cas N°6 : Calcul de la poussée des terres : Présence de la nappe.

Dans le cas de la présence d'une nappe phréatique, on doit prendre en considération la poussée hydrostatique qui s'ajoute à la poussée des terres.

Exemple :

On se propose de calculer les poussées appliquées sur l'écran vertical schématisé sur la figure ci-dessous :



Dans ce cas, on aura 4 poussées à calculer :

- a) Poussée des terres marneuses
- b) Poussée des terres argileuses
- c) Poussée engendrée par le poids surfacique de la terre 1 sur la terre 02
- d) Poussée hydrostatique

La pression hydrostatique est calculée en fonction de la hauteur par la formule suivante :

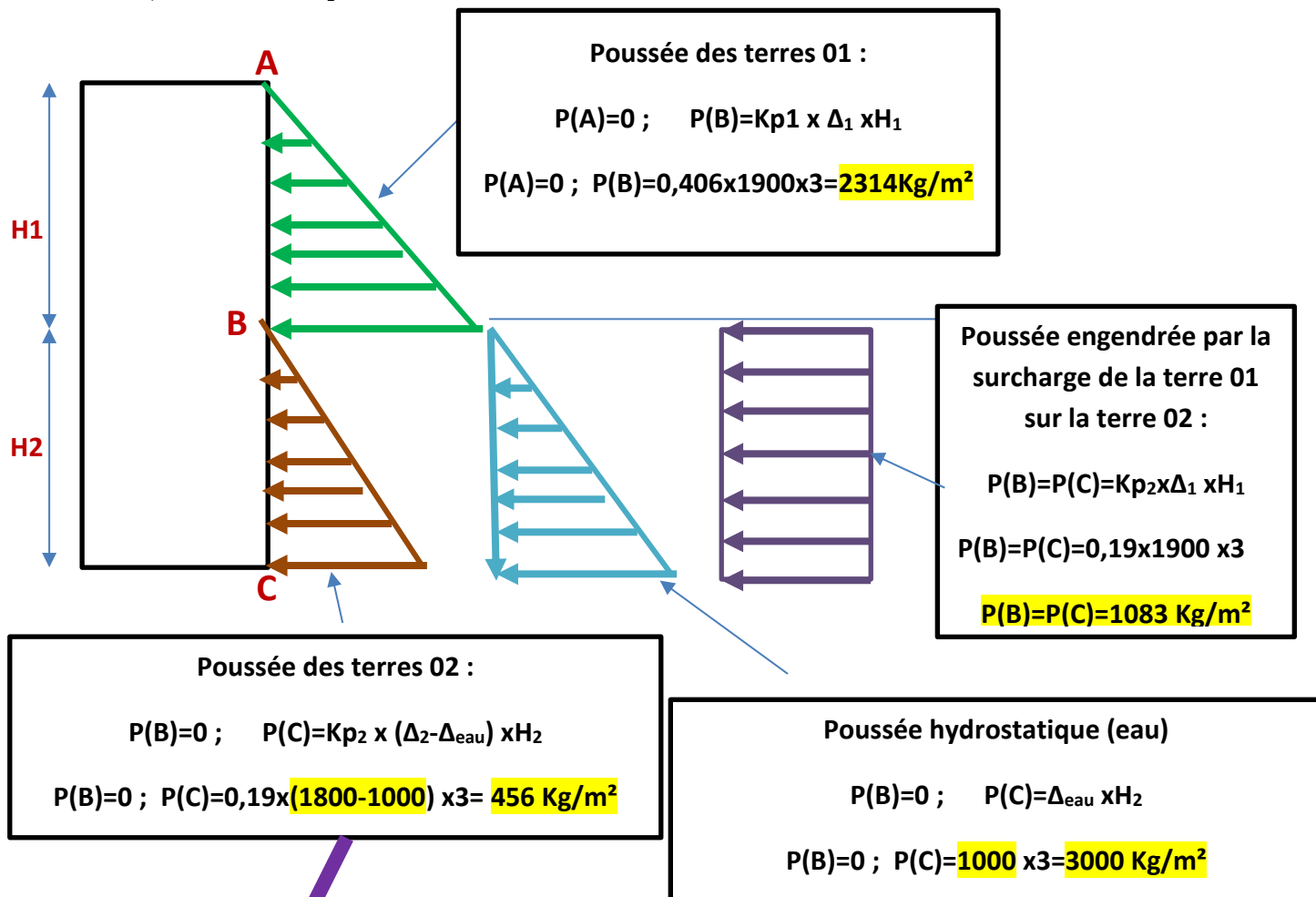
$$\Delta_{\text{eau}} \times h \quad \text{avec : } \Delta_{\text{eau}} = 1000 \text{ Kg/m}^3 \text{ (} 10 \text{ KN/m}^3 \text{)}$$

Cette pression engendre une résultante P_{eau} avec :

$$P_{\text{eau}} = (\Delta_{\text{eau}} \times H^2)/2$$

Les calculs des pressions et des poussées sont illustrés sur les schémas suivants :

a) Schéma des pressions :

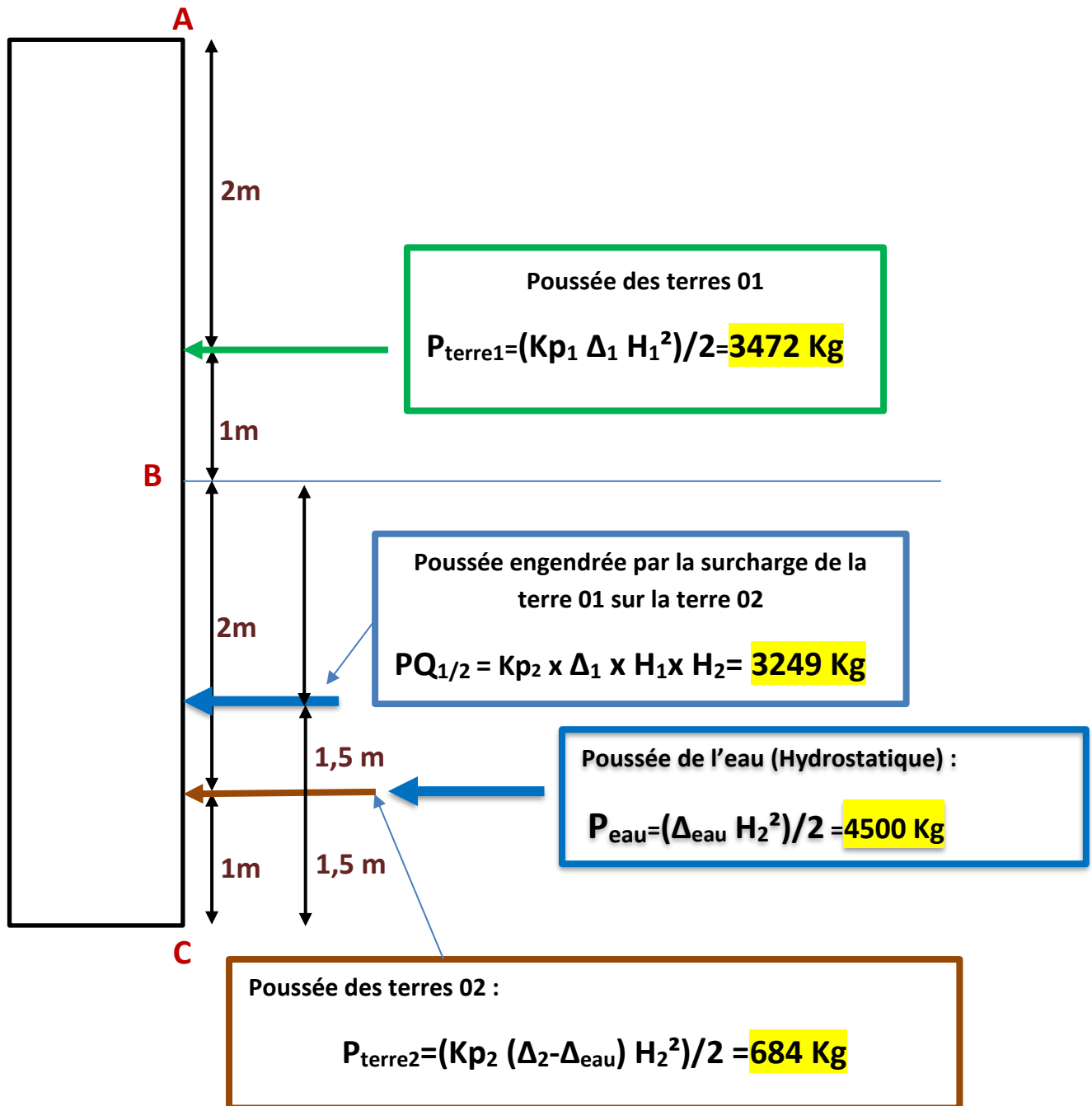


Le poids de l'eau sera déduit du poids des terres argileuses dans le calcul de la poussée des terres 02

Soit : $(1800 - 1000)$ (Poids déjaugé)

$$= 800 \text{ Kg/m}^3$$

a) Schéma final des poussées totales (Résultantes des pressions)



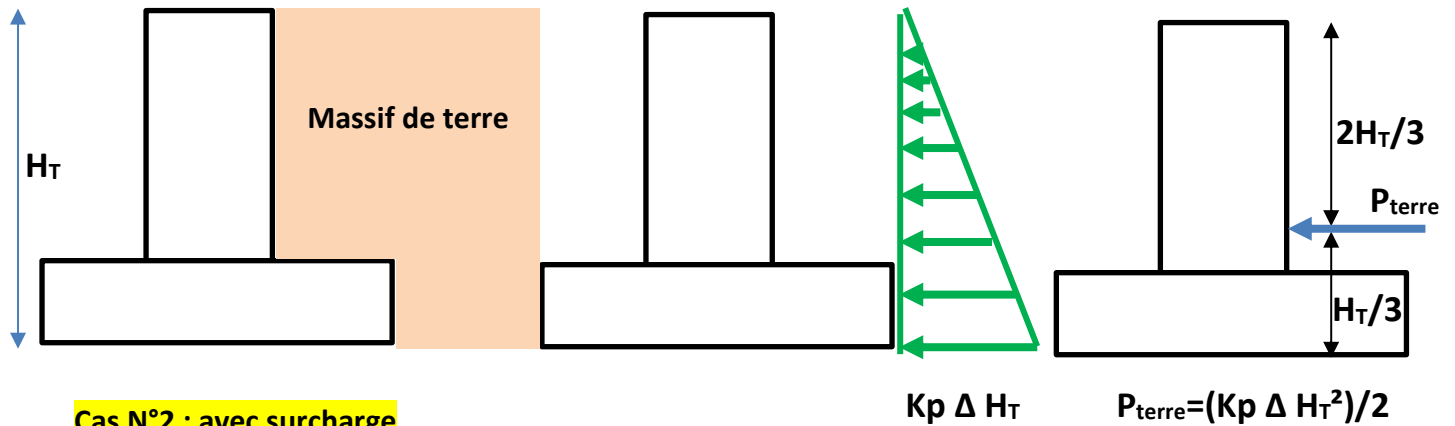
Les forces P_{terre2} et P_{eau} ont le même point d'application

Annexe 01 : Récapitulation des différents cas de calcul des poussées :

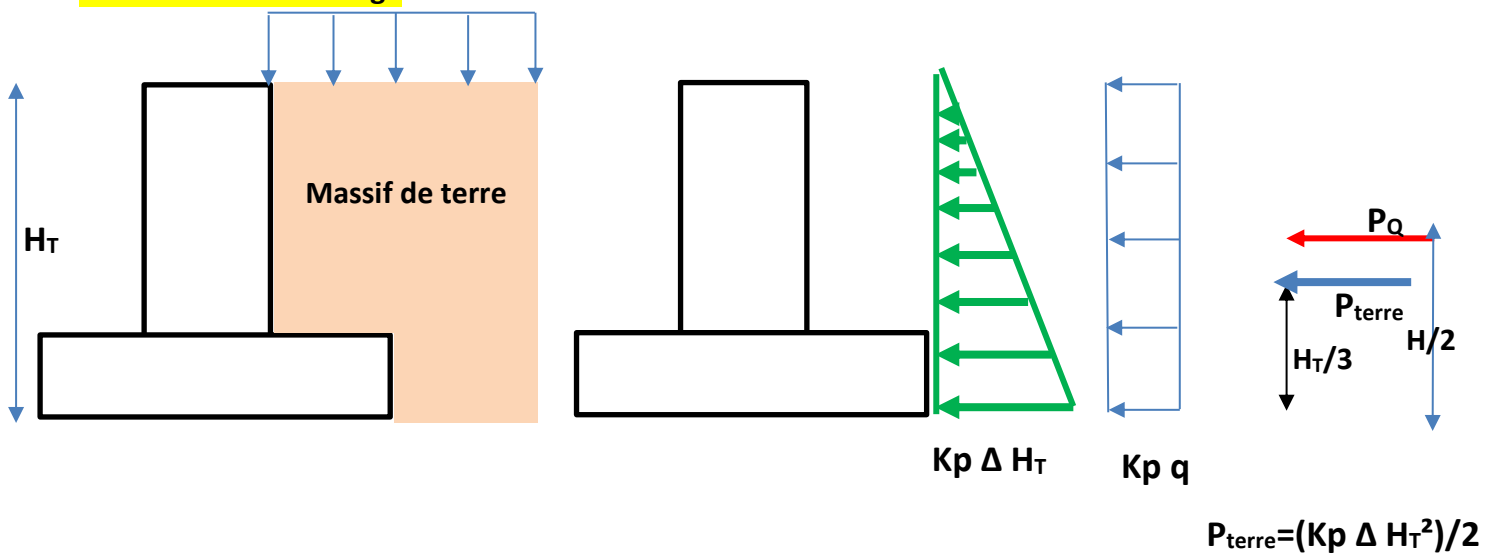
Cas N°1 : Sans surcharge

Pressions

Résultante=Force

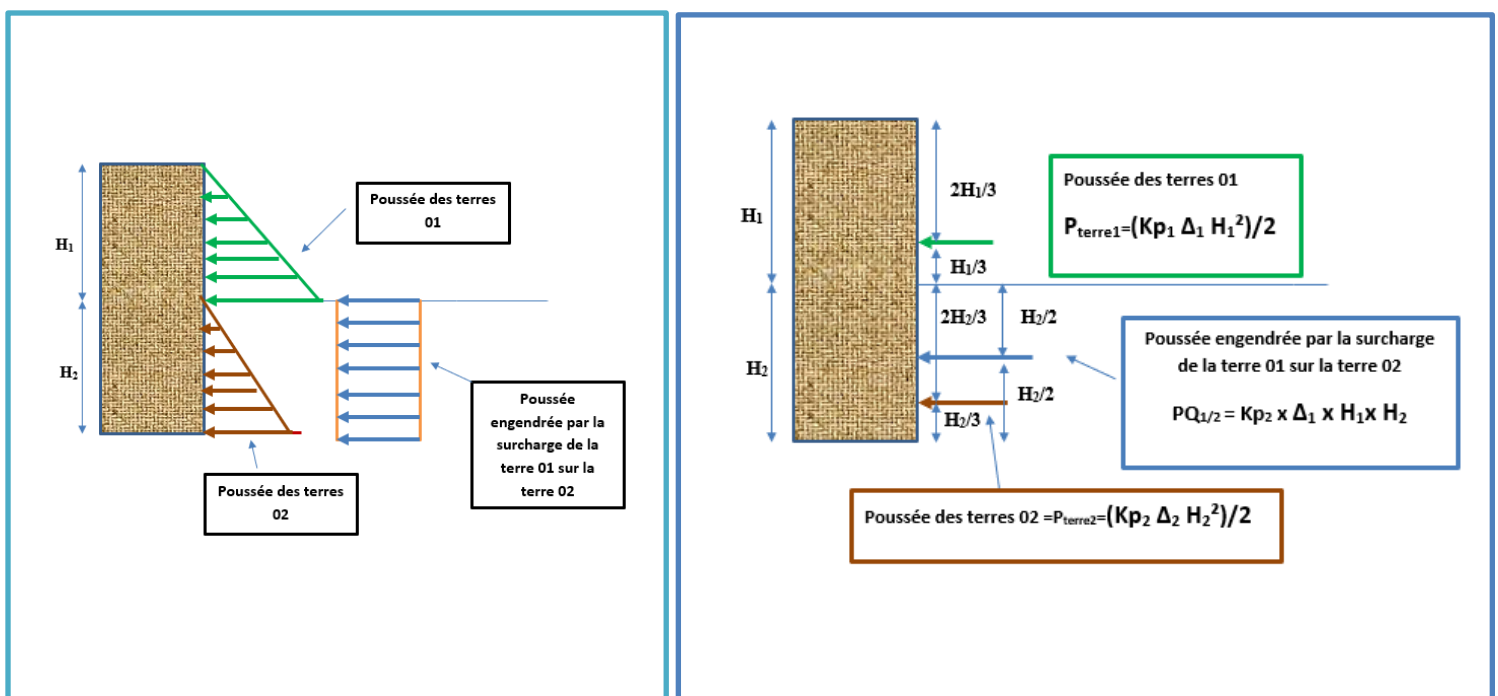


Cas N°2 : avec surcharge

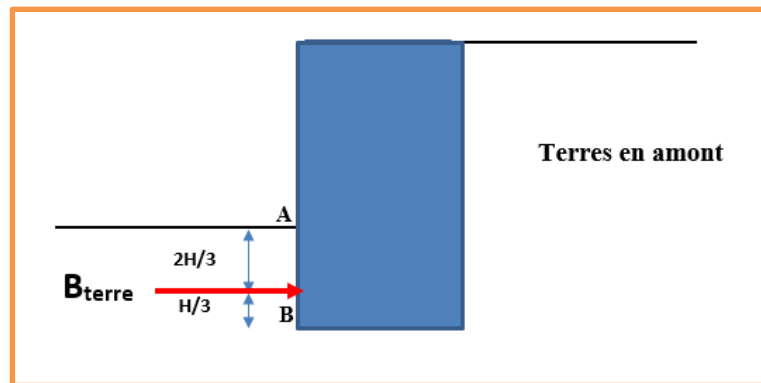
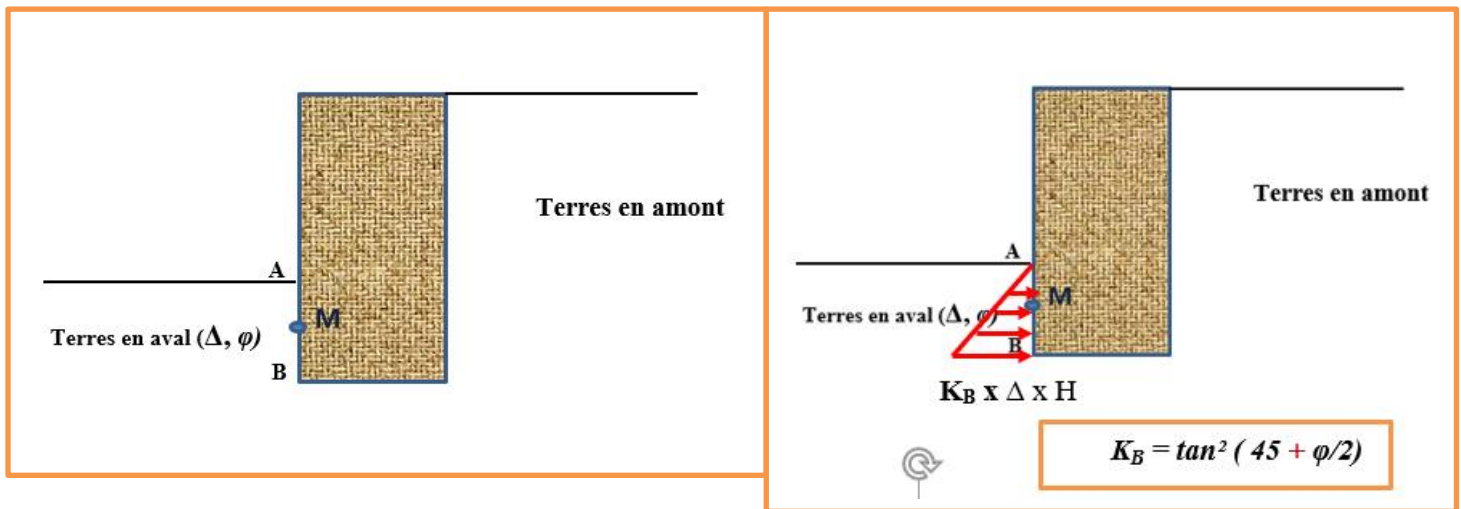


Cas N°3 : deux couches

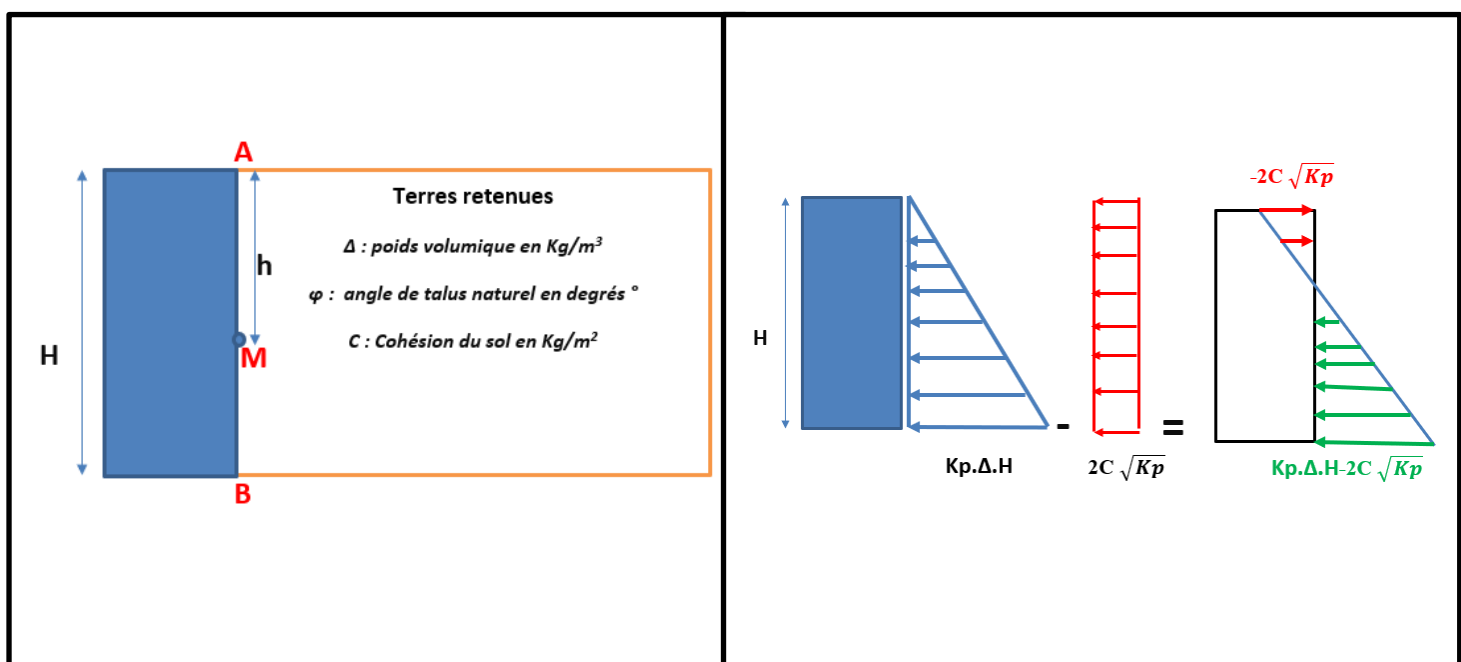
$PQ = Kp.q.H_T.1$



Cas N°4 : Calcul de la butée

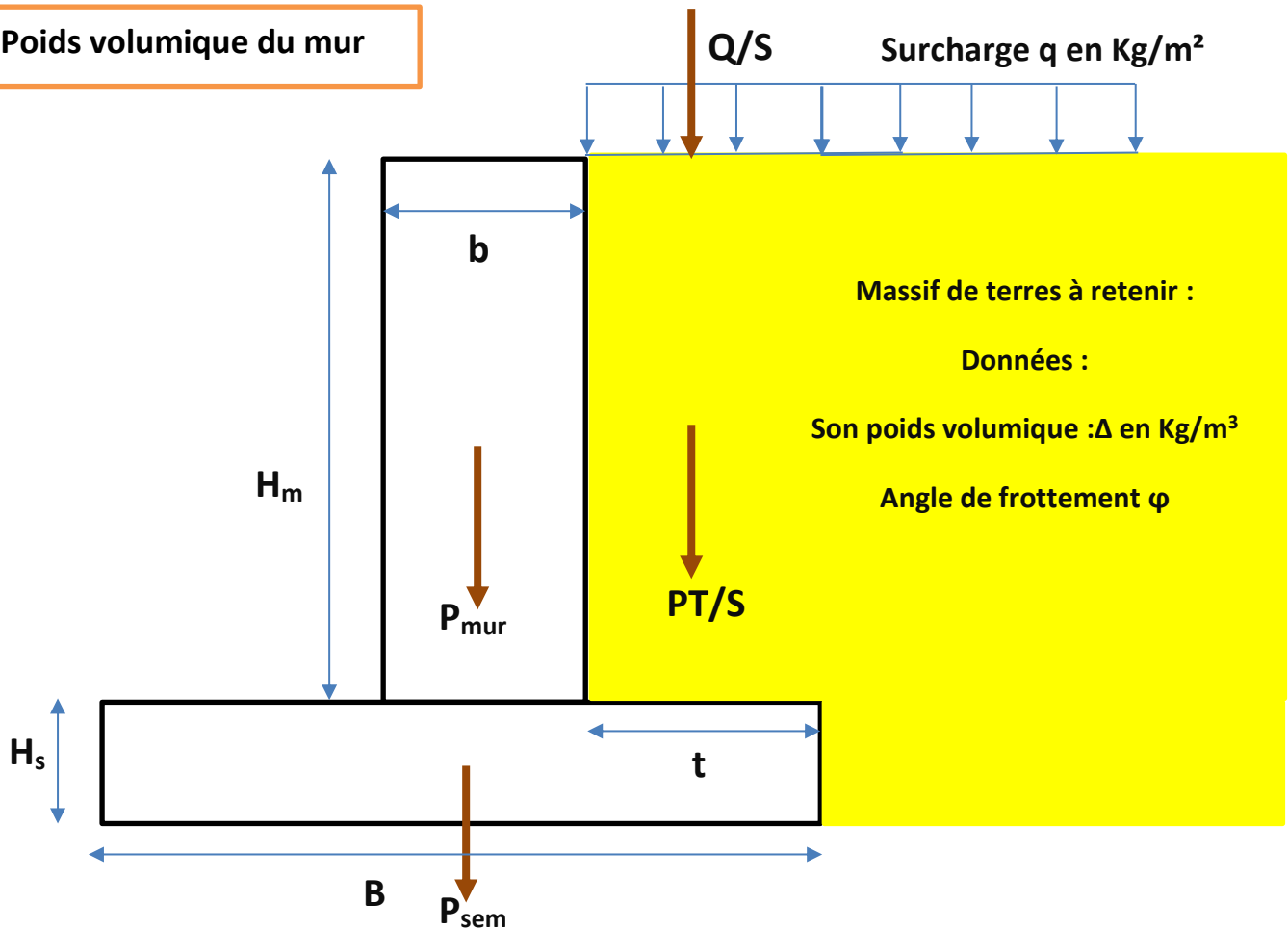


Cas N°5 : sol cohérent



Annexe 02 : Formulaire de calcul des poids : cas d'un mur en béton armé

ρ : Poids volumique du mur



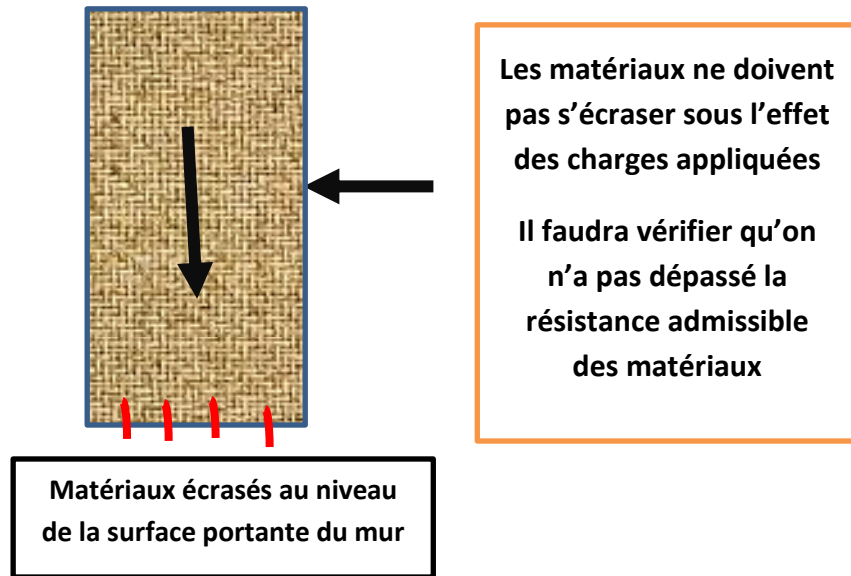
Charge	Formule de calcul
Poids du mur P_{mur}	Poids volumique béton armé x volume mur $= \rho \times b \times H_m \times 1$
Poids de la semelle P_{sem}	Poids volumique béton armé x volume semelle $= \rho \times B \times H_s \times 1$
Poids des terres sur le talon PT/S	Poids volumique des terres x volume terres sur semelle $= \Delta \times t \times H_m \times 1$
Surcharge sur la semelle Q/S	Surcharge x surface $= q \times t \times 1$

Chapitre 04 : Vérification du non-écrasement des matériaux

E) Chapitre 04 : Vérification du non écrasement des matériaux

I. Objectif du chapitre :

Le but de ce chapitre est de vérifier que les matériaux ne s'écrasent pas sous l'effet du poids du mur.



II. Principe de vérification :

- On calculera les **contraintes maximales** de compression/traction ($\sigma_{max.c}$ et $\sigma_{max.t}$) appliquées au niveau de la surface portante du mur.
- Comparer les contraintes maximales avec les **contraintes admissibles** des matériaux (Résistances)

➤ Chaque matériau est caractérisé par deux résistances caractéristiques :

- ✓ Résistance à la compression : limite à ne pas dépasser à la compression $\bar{\sigma}_c$
- ✓ Résistance à la traction : limite à ne pas dépasser en traction $\bar{\sigma}_t$

Ces résistances sont données par le fabricant du matériau en question.

La condition du non-écrasement des matériaux s'écrit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{max.c} \leq \bar{\sigma}_c \\ \sigma_{max.t} \leq \bar{\sigma}_t \end{array} \right.$$

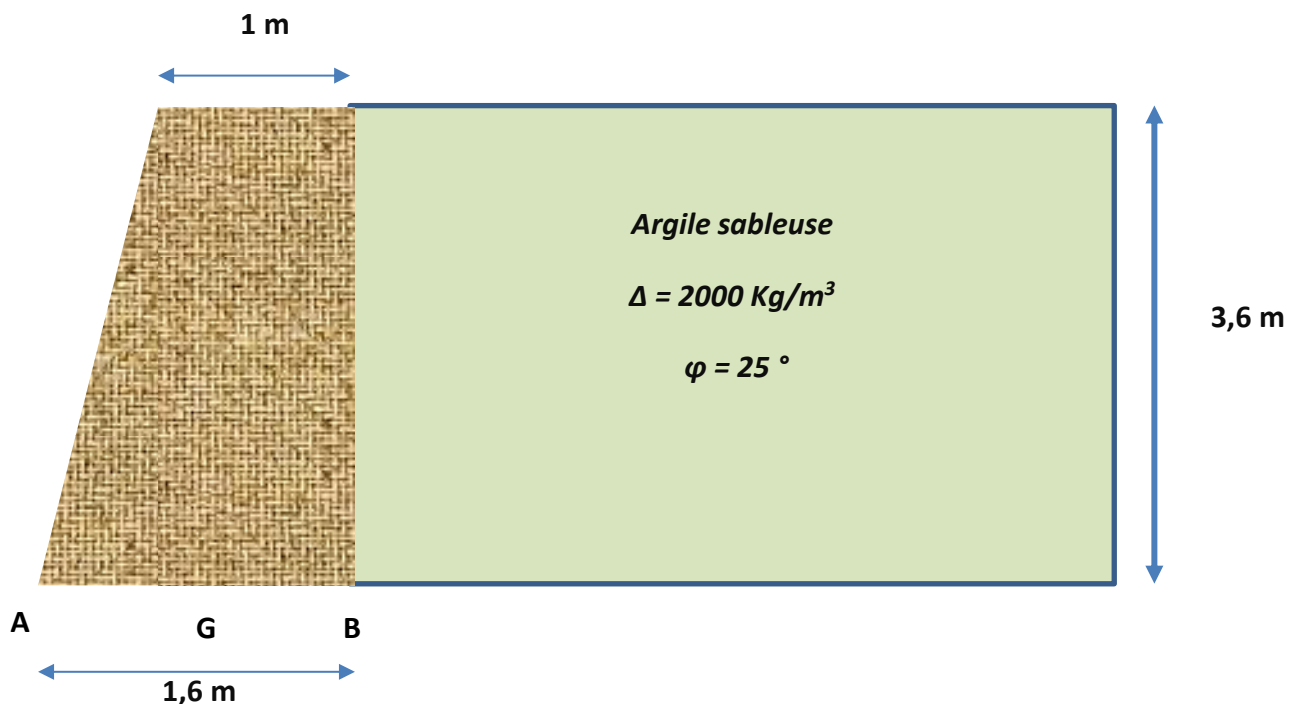
III. Exemple d'application :

On se propose de vérifier le non-écrasement des matériaux qui composent le mur de soutènement représenté sur la figure suivante :

Le mur est en maçonnerie et conçu pour retenir des terres argileuses

La maçonnerie a les résistances caractéristiques suivantes :

- ✓ Résistance à la compression : $\bar{\sigma}_c = 5 \text{ bars}$
- ✓ Résistance à la traction : $\bar{\sigma}_t = 3 \text{ bars}$



La maçonnerie a un poids volumique égal à : 1800 Kg/m^3

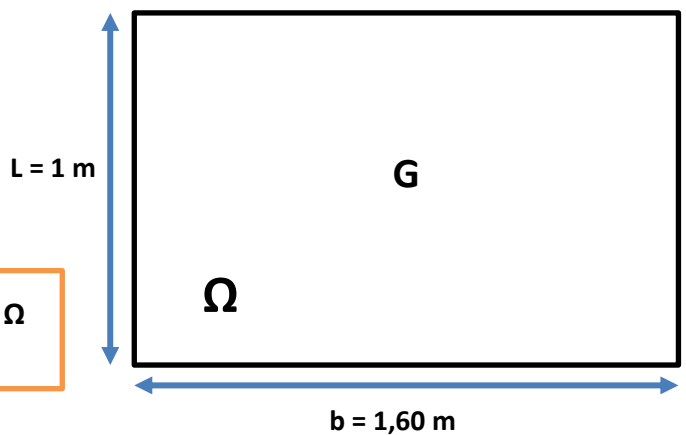
La vue de dessous met en évidence la surface portante du mur :

➤ Cette surface portante (Base du mur) a une forme rectangulaire

➤ On note G son centre de gravité.

➤ Cette section qui sera étudiée dans la suite du chapitre

Cette surface portante sera notée : Oméga : Ω



Etape 01 : Inventaire des charges

a) Poids de la partie rectangulaire du mur :

$$P_{\text{mur1}} = 1800 \times 1 \times 3,6 \times 1 = 6480 \text{ Kg}$$

b) Poids de la partie triangulaire du mur :

$$P_{\text{mur1}} = (1800 \times 0,6 \times 3,6 \times 1) / 2 = 1944 \text{ Kg}$$

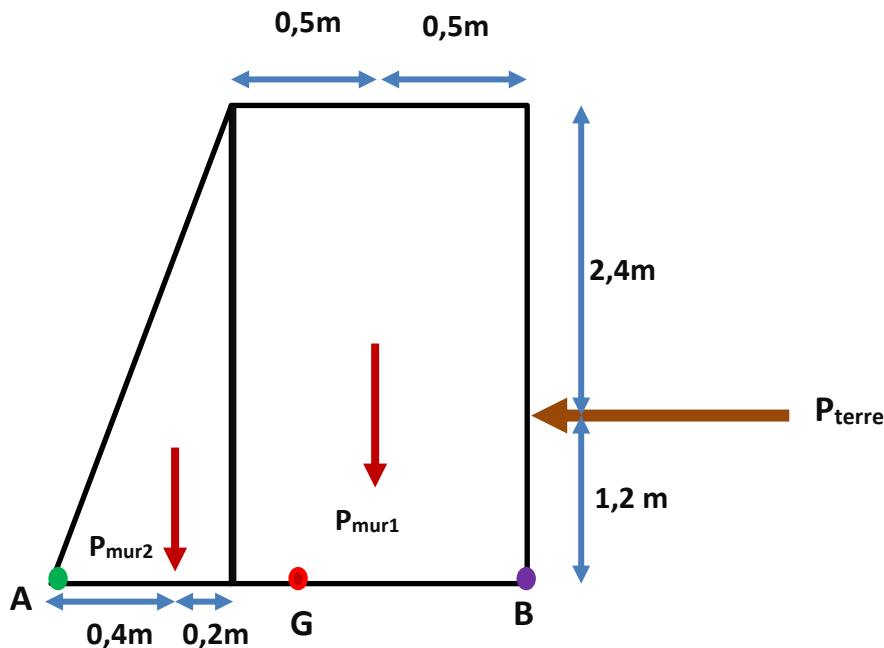
c) Poussée des terres :

$$K_p = \tan^2 (45 - \varphi/2) = 0,406$$

$$P_{\text{terre}} = (K_p \times \Delta \times H^2) / 2 = (0,406 \times 2000 \times 3,6^2) / 2 = 5262 \text{ Kg}$$

$$\text{Point d'application : } a = 2 \times 3,6 / 3 = 2,4 \text{ m} \quad \text{et} \quad b = 3,6 / 3 = 1,3 \text{ m}$$

Schéma de calcul :



Le mur est soumis à des charges verticales et à des charges horizontales :

Il sera ,alors, soumis à deux types de contraintes :

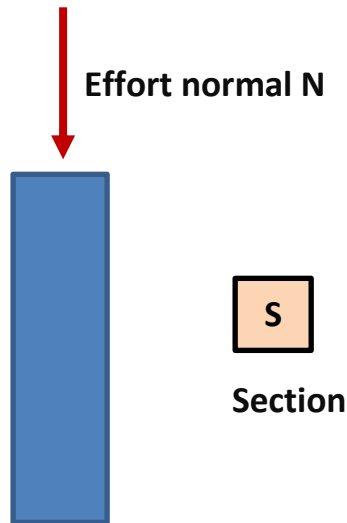
- Contraintes de compression dues aux charges verticales (Cas d'un poteau)
- Contraintes de Flexion dues à un moment de flexion (Cas d'une poutre)

Les contraintes maximales seront calculées au niveau de la surface portante du mur (Base du mur)

La surface portante est caractérisée par son centre de gravité G.

Etape 02 : Calcul des contraintes de compressions dues aux charges verticales :

La contrainte de compression dans une section soumise à un effort normal est calculée par la formule suivante :



Contrainte de compression = Effort/Section

$$\sigma = \frac{N}{S}$$

Ces contraintes sont uniformes au niveau de toute la section

En appliquant la formule ci-dessus, on calcule les contraintes de compression dues aux charges verticales, soient :

$$\sigma_{\text{compression}} = \frac{\text{Somme de charges verticales}}{\text{surface portante du mur}} = \frac{\sum P \downarrow}{\Omega}$$

On note :

Ω : Oméga : surface portante du mur.

$\sum P \downarrow$ = somme des charges verticales.

Ces contraintes de compression sont **uniformes** dans toute la surface portante Ω

Ces contraintes seront exprimées en $\text{Kg/cm}^2 = \text{bar} = 0,1 \text{ MPa}$

$(\text{Kg/cm}^2 = 10 \text{ N} / (10^{-4} \text{ m}^2) = 10 \times 10^4 \text{ N/m}^2 = 10^5 \text{ N/m}^2 = 10^5 \text{ Pa} = 1 \text{ bar})$

Donc : Ω sera exprimée en cm^2 et $\sum P \downarrow$ en Kg

On calcule les contraintes aux points A et B :

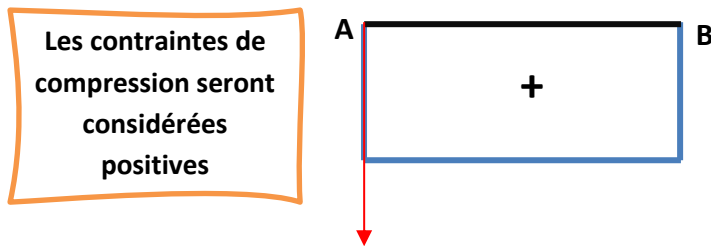
$$\sigma_{\text{A-compression}} = \sigma_{\text{B-compression}} = \frac{\sum P \downarrow}{\Omega}$$

Dans notre exercice, on a :

- $\Omega = 160 \text{ cm} \times 100 \text{ cm} = 16000 \text{ cm}^2$
- $\sum P \downarrow = P_{\text{mur1}} + P_{\text{mur2}} = 6480 \text{ Kg} + 1944 \text{ Kg} = 8424 \text{ Kg}$

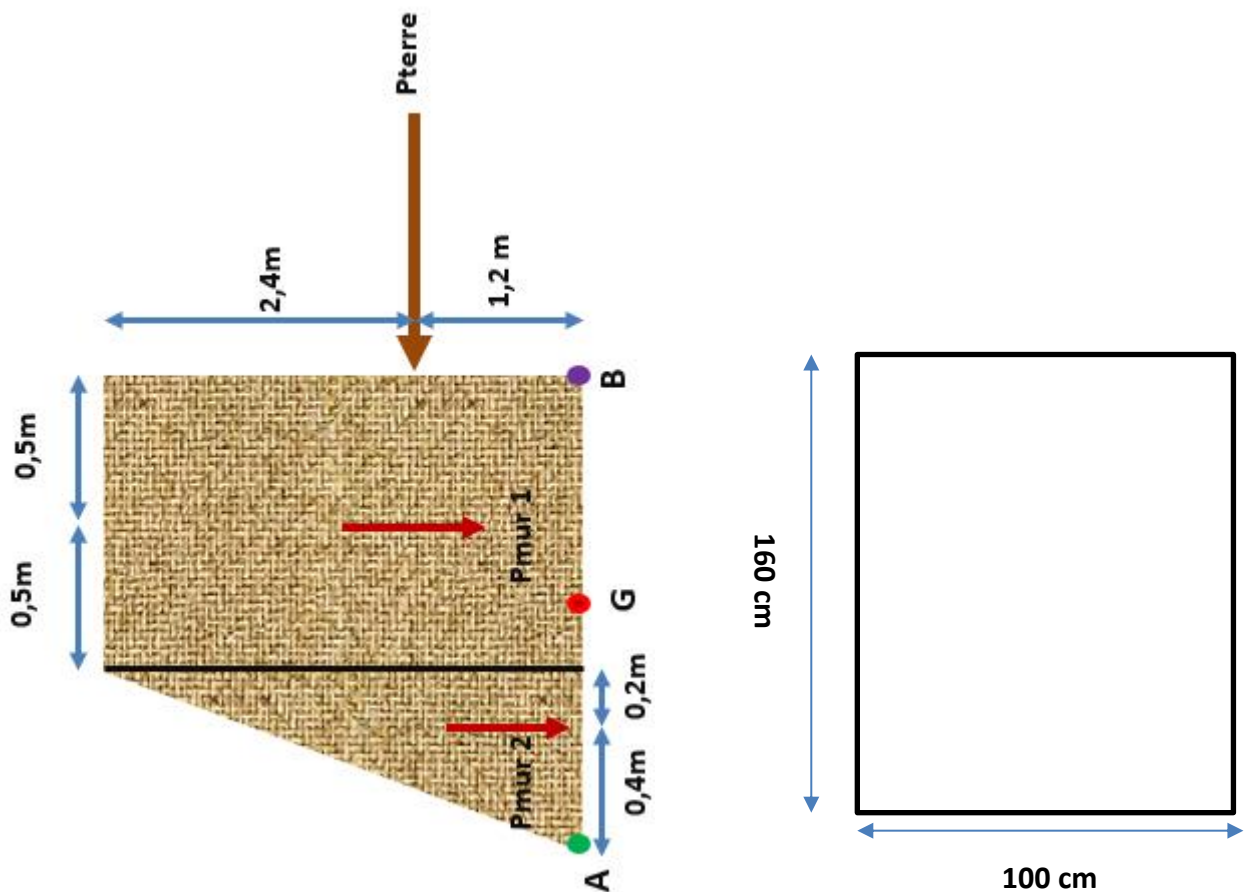
$$\sigma_{A\text{-compression}} = \sigma_{B\text{-compression}} = \frac{8424}{16000} = 0,53 \text{ bar}$$

Diagramme des contraintes :



Etape 03 : Calcul des contraintes de flexion dues au moment de flexion :

Dans cette partie, on considère le mur comme une poutre chargée :



La surface portante est soumise à un moment de flexion calculée par rapport à son centre de gravité G

Ce moment de flexion, noté M_f , engendre des contraintes de flexion.

Ces contraintes seront calculées en utilisant la formule utilisée en résistance des matériaux :

$$\sigma_{\text{flexion}} = \frac{\text{Moment de flexion} \times y}{\text{moment d'inertie de la section}} = \frac{M_f \times y}{IGx}$$

On note :

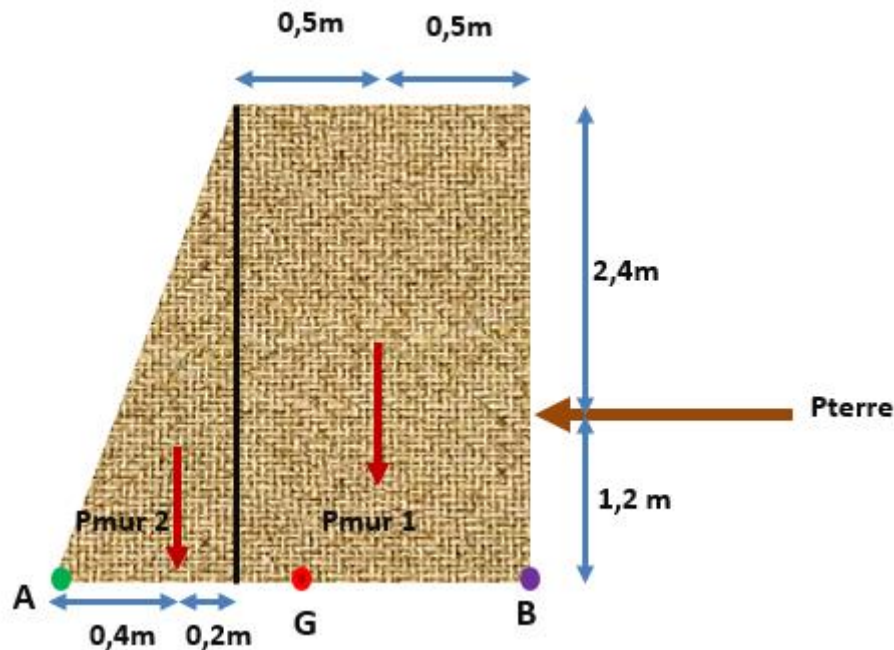
Mf: : moment de flexion de toutes les charges par rapport à G (Exprimé en Kg.cm)

y = distance du point par rapport à G (Exprimée en cm)

IGx = moment d'inertie de la surface portante par rapport à l'axe horizontal (Exprimé en cm⁴)

$$\text{Unité (} \sigma_{\text{flexion}} \text{)} = \frac{\text{Kg.cm} \times \text{cm}}{\text{cm}^4} = \frac{\text{Kg.cm} \times \text{cm}}{\text{cm}^4} = \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} = \text{bar}$$

Contraintes en A et B :



Sous l'effet des charges, le mur est comprimé en point A et tendu en point B

La contrainte de flexion en A sera prise positive (compression)

La contrainte de flexion en B sera considérée négative (Traction)

$$\sigma_{A\text{-flexion}} = + \frac{\text{Moment de flexion} \times y_{\max}}{\text{moment d'inertie de la section}} = + \frac{M_f \times y_{\max}}{IGx}$$

$$\sigma_{B\text{-flexion}} = - \frac{\text{Moment de flexion} \times y_{\max}}{\text{moment d'inertie de la section}} = - \frac{M_f \times y_{\max}}{IGx}$$

Avec : $y_{\max} = b/2$ (b = base du mur)

Application sur le cas étudié :

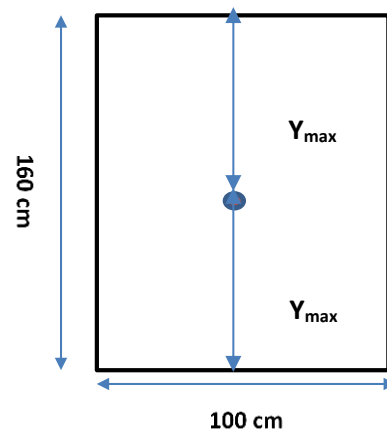
Calcul du $y_{\max}$:

$$Y_{\max} = b/2 = 160/2 = 80 \text{ cm}$$

Calcul du moment d'inertie IGx :

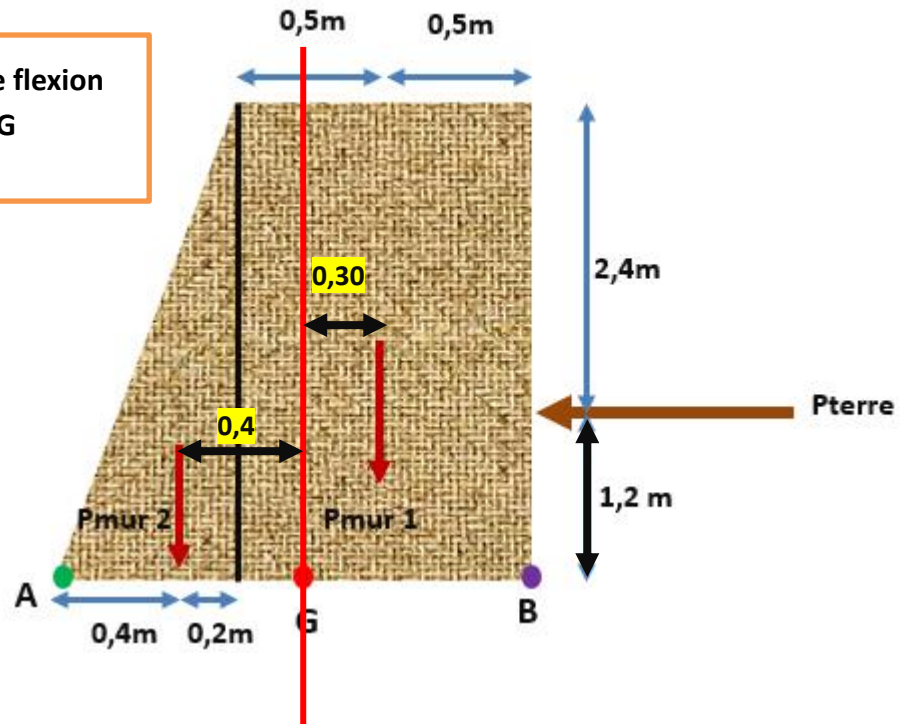
$$IGx = \frac{100 \times 160^3}{12}$$

$$IGx = 34.133.333,33 \text{ cm}^4$$



Calcul du moment de flexion
par rapport à G

Pour calculer ce
moment, on doit
déterminer les
distances par rapport
à G (et non pas par
rapport à A)



La convention de signe du moment en mécanique des sols (Eléments verticaux) est différente de la convention en résistance des matériaux (Eléments horizontaux) :

Le moment de la force est considéré positif si cette dernière (force) tend à faire tourner dans le sens inverse des aiguilles d'une montre (Contrairement à la RDM)

Le calcul du moment total de flexion est calculé dans le tableau suivant :

Force	Valeur en Kg	Distance /G en m	Moment /G en kg.m
Pmur 1	6480	0,3	-1944
Pmur 2	1944	0,4	+777 ,6
Pterre	5262	1,2	+6314,4
		Moment total Mf	+5148

Moment de flexion : $M_f = +5148 \text{ kg.m} = 514800 \text{ Kg.cm}$

$$\sigma_{A\text{-flexion}} = + \frac{\text{Moment de flexion} \times y_{\max}}{\text{moment d'inertie de la section}} = + \frac{514800 \text{ kg.cm} \times 80 \text{ cm}}{34.133.333,33 \text{ cm}^4} = 1,2 \text{ bar}$$

$$\sigma_{B\text{-flexion}} = - \frac{\text{Moment de flexion} \times y_{\max}}{\text{moment d'inertie de la section}} = - \frac{514800 \text{ kg.cm} \times 80 \text{ cm}}{34.133.333,33 \text{ cm}^4} = -1,2 \text{ bar}$$

Calcul des contraintes totales en point A et B

Les contraintes totales se calculent en sommant les contraintes de compression et les contraintes de flexion

Soient :

$$\sigma_A = \sigma_{A\text{-compression}} + \sigma_{A\text{-flexion}}$$

$$\sigma_B = \sigma_{B\text{-compression}} + \sigma_{B\text{-flexion}}$$

C'est-à-dire :

$$\sigma_A = \frac{\sum P \downarrow}{\Omega} + \frac{M_f \times y_{\max}}{IGx}$$

$$\sigma_B = \frac{\sum P \downarrow}{\Omega} - \frac{M_f \times y_{\max}}{IGx}$$

Avec :

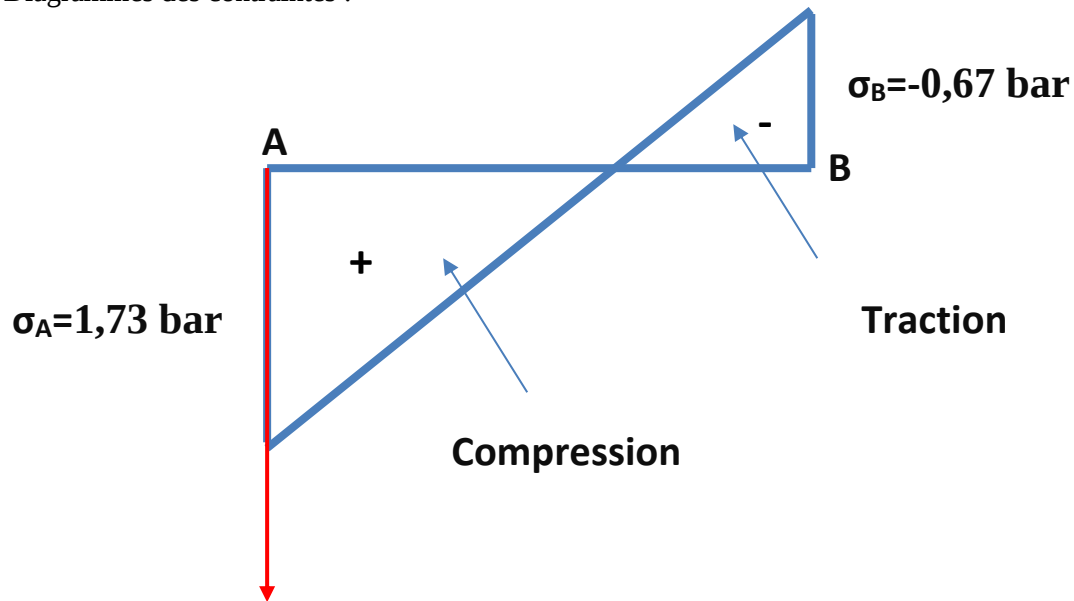
- $\sum P \downarrow$: somme des charges verticales en Kg
- Ω en cm^2 : surface portante du mur = $100 \times b$ (b : base du mur exprimée en cm)
- M_f : moment de flexion de toutes les charges par rapport à G (Exprimé en Kg.cm)
- $y_{\max} = b/2$: distance du point le plus éloigné par rapport à G (Exprimée en cm) (b : base du mur exprimée en cm)
- $IGx = \frac{100 \times b^3}{12}$: moment d'inertie de la surface portante par rapport à l'axe horizontal (Exprimé en cm^4) (b : base du mur exprimée en cm)

Application sur le cas étudié

$$\sigma_A = \frac{\sum P \downarrow}{\Omega} + \frac{M_f * y_{\max}}{IGx} = 0,53 + 1,2 = 1,73 \text{ bar}$$

$$\sigma_B = \frac{\sum P \downarrow}{\Omega} - \frac{M_f * y_{\max}}{IGx} = 0,53 - 1,2 = -0,67 \text{ bar}$$

Diagrammes des contraintes :



Contraintes maximales :

$$\sigma_{\text{max-compression}} = 1,73 \text{ bar}$$

$$\sigma_{\text{max-traction}} = 0,67 \text{ bar}$$

Vérification du non-écrasement :

On a :

$$\sigma_{\text{max.c}} = 1,73 \text{ bar} \leq \bar{\sigma}_c = 5 \text{ bars}$$

$$\sigma_{\text{max.t}} = 0,67 \text{ bar} \leq \bar{\sigma}_t = 3 \text{ bars}$$

Alors, la condition du non-écrasement est vérifiée

IV. Fiche de vérification du non-écrasement des matériaux

Pour bien organiser les calculs et vérifier le non-écrasement des matériaux, on peut utiliser la fiche de calcul suivante :

Vérification du non-écrasement des matériaux :

Désignation de la charge	Formule de calcul	Valeur (Kg)	Distance /G (m)	Moment/G(Kg.m)
Somme des charges Verticales				
		Moment de Flexion par rapport à G (Mf)		
Largeur de la surface portante b en cm				
Moment d'inertie (IGX) en cm ⁴ = (100 * b ³)/12				
ymax en cm = (b/2)				
Surface portante Ω en cm ² (100 * b)				
Somme des charges Verticales en Kg				
Moment de Flexion par rapport à G (Mf) en Kg.cm				
Contrainte en point A en bar :			$\frac{\sum P \downarrow}{\Omega} + \frac{M_f \times y_{\max}}{IGx}$	
Contrainte en point B en bar :			$\frac{\sum P \downarrow}{\Omega} - \frac{M_f \times y_{\max}}{IGx}$	

Diagramme des contraintes

Contrainte maximale de compression en bar	
Contrainte maximale de traction en bar	

Vérification :

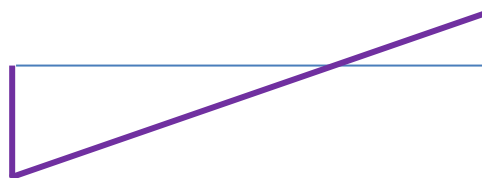
Reprenons l'exemple précédent et vérifions le non-écrasement des matériaux en utilisant la fiche de calcul suivante:

Vérification du non-écrasement du mur

Désignation de la charge	Formule de calcul	Valeur (Kg)	Distance /G (m)	Moment/G(Kg.m)
Poids mur partie rectangulaire	$P_{mur1}=1800 \times 1 \times 3,6 \times 1$	6 480,00	0,30	-1 944,00
Poids mur partie triangulaire	$P_{mur2}=(1800 \times 0,6 \times 3,6 \times 1)/2$	1 944,00	0,40	777,60
Somme des charges Verticales: $\Sigma P \downarrow$		8 424,00		
Poussée des terres	$P_{terre}= (0,406 \times 2000 \times 3,6^2)/2$	5261,76	1,20	6 314,11
		Moment de Flexion par rapport à G (MT)		5 147,71
Largeur de la surface portante b en cm			160	
Moment d'inertie (IGX) en $cm^4 = (100 * b^3)/12=(100 \times 160^3)/12$			34133333,33	
y_{max} en cm = $(b/2) = 160/2$			80	
Surface portante en cm^2 ($100 * b$) $=100 \times 160$			16000	
Somme des charges Verticales en Kg			8 424,00	
Moment de Flexion par rapport à G (MT) en Kg.cm			514771,2	
Contrainte en point A en bar : $(\Sigma P \downarrow)/\Omega + (M_f \times y_{max})/I_{gx}$			1,73	
Contrainte en point B en bar $(\Sigma P \downarrow)/\Omega - (M_f \times y_{max})/I_{gx}$			-0,68	

Diagramme des contraintes

1,73



-0,68

Contrainte maximale de compression en bar	1,73
Contrainte maximale de traction en bar	-0,68

Vérification :

$$\sigma(\max.c) = 1,73 \text{ bar} \leq \bar{\sigma}_c = 5 \text{ bars}$$

$$\sigma(\max.t) = 0,67 \text{ bar} \leq \bar{\sigma}_t = 3 \text{ bars}$$

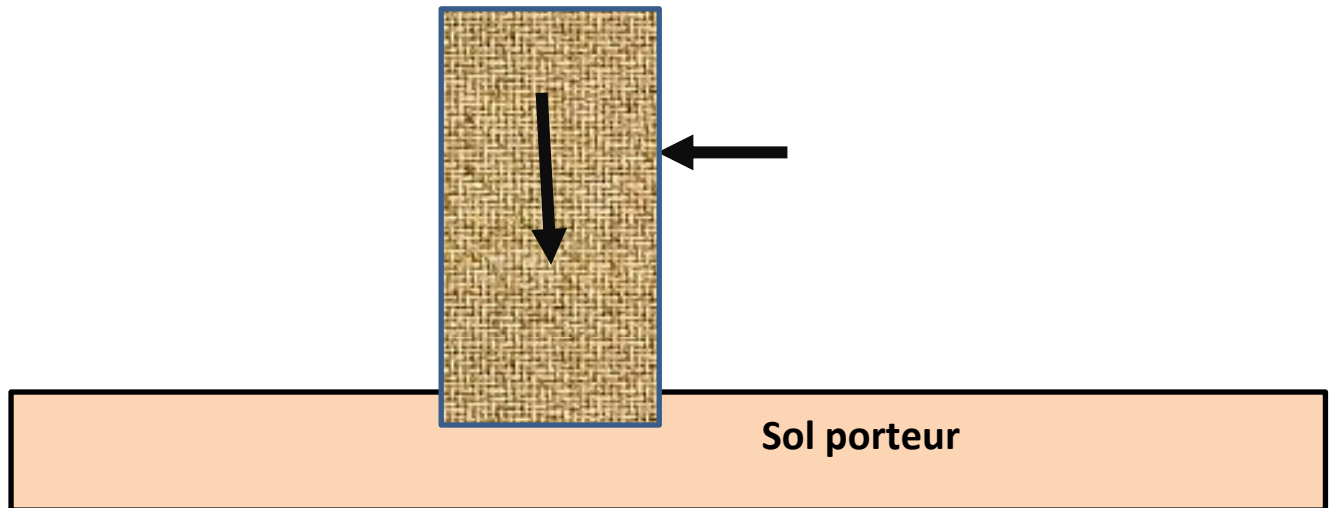
Vérifiée

Chapitre 05 : Vérification du non-poinçonnement dans le sol (Résistance du sol porteur)

F) Chapitre 05 : Vérification du non-poinçonnement dans le sol

I. Objectif du chapitre :

Le but de ce chapitre est de vérifier que le mur ne s'enfonce pas dans le sol porteur sous l'effet des charges (Résistance du sol) .



II. Principe de vérification :

- a. On calculera la contrainte maximale appliquée sur le sol porteur.
- b. Comparer la contrainte maximale avec la contrainte admissible du sol (Résistances)

➤ Le sol porteur a une contrainte admissible notée $\bar{\sigma}_{sol}$

Cette résistance du sol est donnée par le laboratoire d'essai soit en bar ou en MPa.

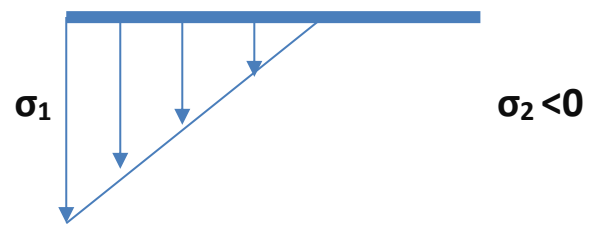
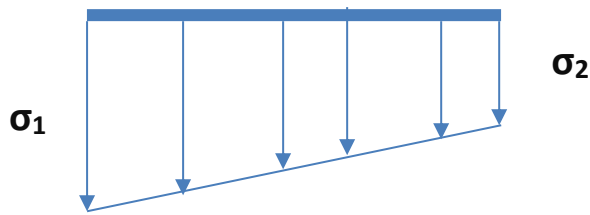
$$1\text{bar} = 0.1 \text{ MPa}$$

La condition du non-poinçonnement du mur dans le sol s'écrit :

$$\sigma_{max} \leq \bar{\sigma}_{sol}$$

- La contrainte maximale appliquée sur le sol est calculée en utilisant les formules du chapitre précédent , mais les contraintes doivent être calculées à la surface de contact entre le mur (ou sa semelle) et le sol.
- La contrainte maximale est appelée aussi $\bar{\sigma}_{3/4}$
- On ne prendra en considération que les contraintes de compression pour vérifier le taux de compression du sol $\bar{\sigma}_{sol}$

Une fois le diagramme des contraintes est tracé, on calculera la contrainte maximale en utilisant les formules suivantes (2 Cas à distinguer)



$$\sigma_{max} = \bar{\sigma}_{3/4} = \frac{3\sigma_1 + \sigma_2}{4}$$

$$\sigma_{max} = \bar{\sigma}_{3/4} = \frac{3\sigma_1}{4}$$

$$\sigma_1 = \frac{\sum P \downarrow}{\Omega} + \frac{Mf \times y_{max}}{IGx}$$

$$\sigma_2 = \frac{\sum P \downarrow}{\Omega} - \frac{Mf \times y_{max}}{IGx}$$

Avec :

- $\sum P \downarrow$: somme des charges verticales en Kg
- Ω en cm^2 : surface portante de l'ouvrage = $100 \times b$ (b exprimée en cm)
- Mf : moment de flexion de toutes les charges par rapport à G (Exprimé en Kg.cm)
- $y_{max} = b/2$: distance du point le plus éloigné par rapport à G (Exprimée en cm) (b : base de la semelle exprimée en cm)
- $IGx = \frac{100 \times b^3}{12}$: moment d'inertie de la surface portante par rapport à l'axe horizontal (Exprimé en cm^4) (b : exprimée en cm)

La condition de résistance au poinçonnement s'écrit :

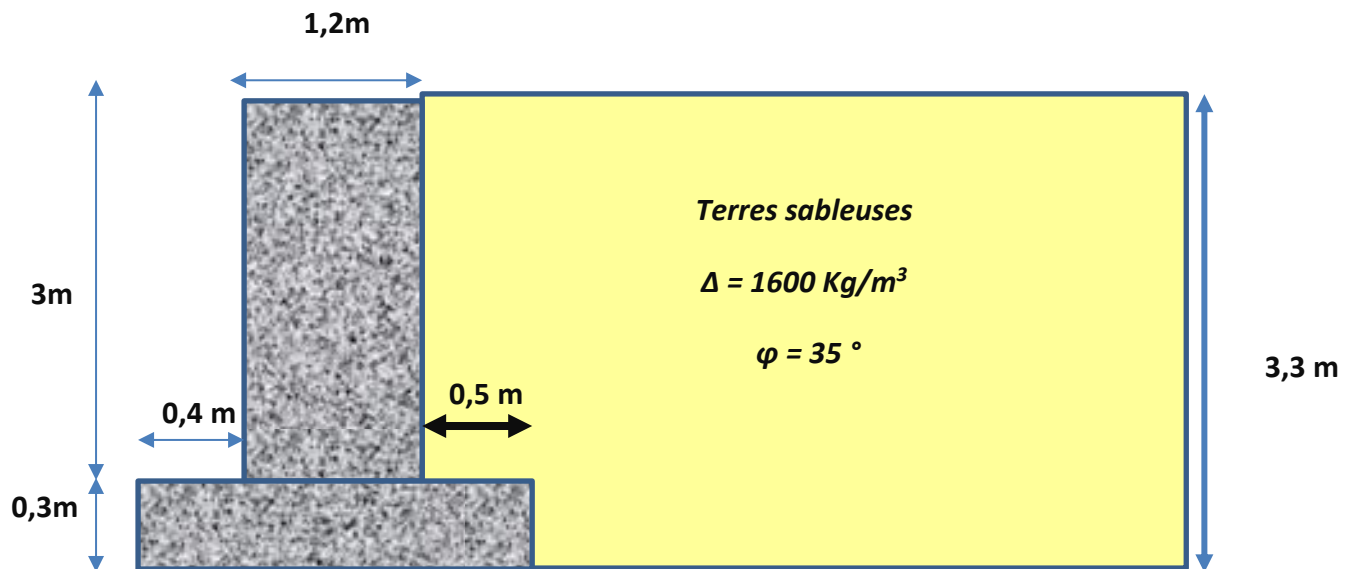
$$\sigma_{max} \leq \bar{\sigma}_{sol}$$

III. Exemple d'application :

On se propose de vérifier la résistance au poinçonnement du sol porteur qui reçoit le mur de soutènement représenté sur la figure suivante :

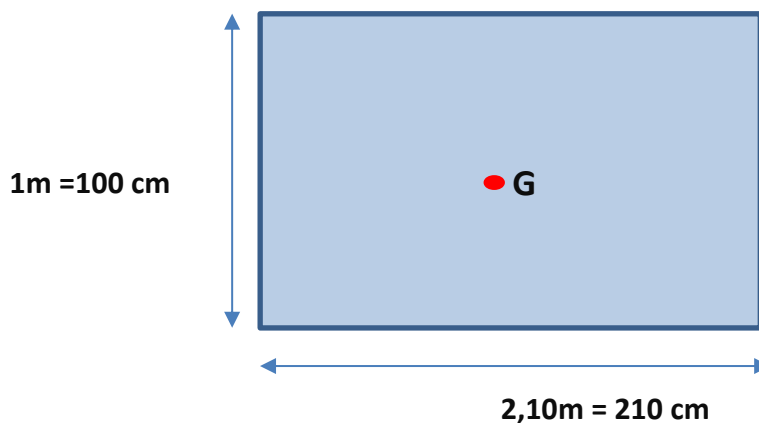
Le mur conçu pour retenir des terres sableuses est en **béton armé**

Le sol porteur a une contrainte admissible égale à 3 bars



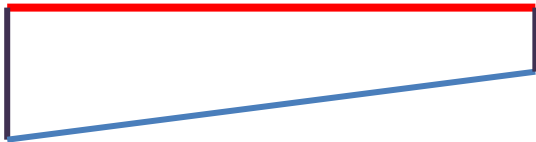
Le béton armé a un poids volumique égal à : 2500 Kg/m^3

Les contraintes seront calculées au niveau de la surface portante de la semelle (Surface de contact entre l'ouvrage de soutènement et le sol porteur)



L'ensemble à étudier = Mur + semelle

Vérification du non-poinçonnement dans le sol

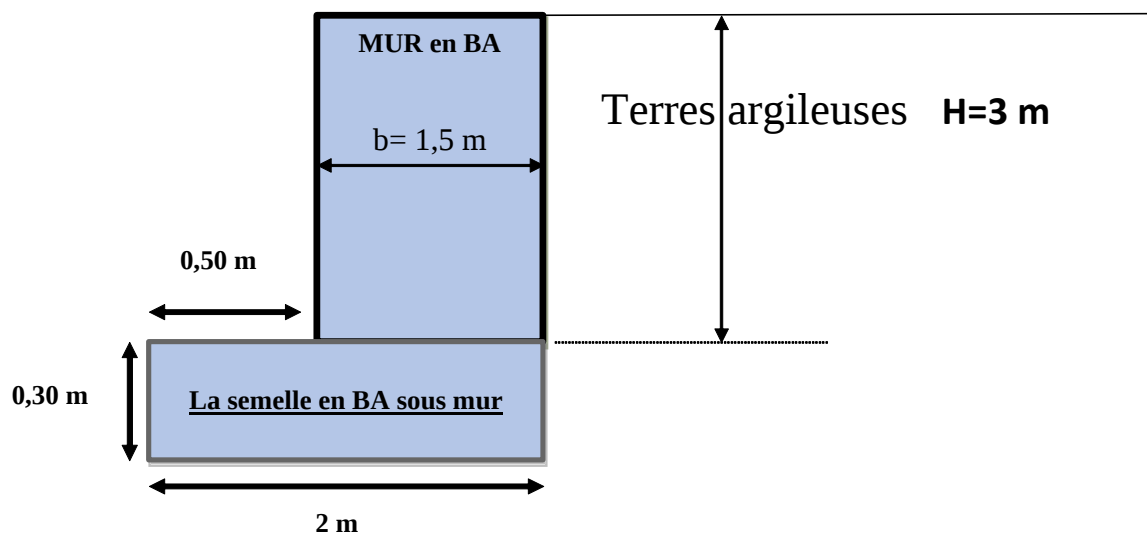
Désignation de la charge	Formule de calcul	Valeur (Kg)	Distance /G (m)	Moment/G(Kg)
Poids du mur	$P_{mur} = 2500 \times 1,2 \times 3 \times 1$	9000	0,05	450
Poids de la semelle	$P_{sem} = 2500 \times 2,1 \times 0,3 \times 1$	1575	0	0
Poids terres/Talon de la semelle	$PT/S = 1600 \times 0,5 \times 3 \times 1$	2400	0,8	-1920
Somme des charges Verticales		12975		
Poussées terres	$P_{terre} = (0,271 \times 1600 \times 3,3^2 \times 1) / 2$	2360,95	1,1	2597,05
		Moment de Flexion par rapport à G (Mf)		1 127,05
Largeur de la surface portante b en cm			210	
Moment d'inertie (IGX) en $cm^4 = (100 * b^3)/12 = (100 \times 210^4)/12$			77175000	
y_{max} en cm = $(b/2) = 210 / 2$			105	
Surface portante en cm^2 $(100 * b) = 100 \times 210$			21000	
Somme des charges Verticales en Kg			12975	
Moment de Flexion par rapport à G (MT) en Kg.cm			112704,72	
Contrainte en point A en bar : $\sigma_1 = (\sum P \downarrow) / \Omega + (M_f \times y_{max}) / I_{gx}$			0,77	
Contrainte en point B en bar : $\sigma_2 = (\sum P \downarrow) / \Omega - (M_f \times y_{max}) / I_{gx}$			0,46	
Diagramme des contraintes			0,77  0,46	
Contrainte maximale de compression en bar : $\sigma_{max} = (3\sigma_1 + \sigma_2) / 4$			0,69	
Vérification :				
On a : $\sigma_{max} = \sigma_{3/4} = 0.69 \text{ bar} \leq \bar{\sigma}_{sol} = 3 \text{ bars}$			Condition vérifiée	

Chapitre 06 : Exercices d'application sur l'étude de la stabilité des murs de soutènement

G) Chapitre 06 : Exercices d'application sur l'étude de la stabilité des murs de soutènement

I. Exercice corrigé N° 01 : Vérification de la stabilité d'un mur en BA

On veut vérifier la stabilité d'un mur de soutènement en béton armé, représenté sur la figure suivante, et qui est conçu pour soutenir des terres argileuses sèches.



ON DONNE :

Le poids spécifique des terres argileuses : $\Delta = 1,85 \text{ t/m}^3$

Le poids spécifique du béton armé : $\rho = 2500 \text{ Kg / m}^3$

Angle du talus naturel des terres argileuses sèches : $\varphi = 22^\circ$

Coefficient de sécurité au renversement : $K = 1,3$

Coefficient de sécurité au glissement : $K_1 = 1,6$

Coefficient de frottement : $f = 0,62$

- 1) Faire l'inventaire de toutes les charges appliquées au mur en remplissant le tableau suivant
- 2) Représenter sur le schéma du mur les charges calculées.
- 3) Calculer le moment stabilisant M_s et le moment de renversement M_r .
- 4) Vérifier la stabilité du mur au renversement.
- 5) Vérifier la stabilité du mur au glissement.
- 6) Calculer la contrainte maximale de compression appliquée sur le sol et vérifier sa résistance au poinçonnement (On donne : $\sigma_{\text{sol}} \text{ 2,5 bars}$).

Projet :Exercice 01/ Etude de stabilité du mur de soutènement

Questions 1-5

			Δ	ϕ	Kp
			1850	22	0,4556
Type de charge	Désignation de la charge	Formule de calcul	Valeur (Kg)	Distance /Joint (m)	Moment/Joint (Kg.m)
Charges Stabilisatrices	Poids du mur	$P_{\text{mur}}=2500 \times 1,5 \times 3 \times 1$	11250	1,25	14 062,50
	Poids de la semelle	$P_{\text{sem}}=2500 \times 0,3 \times 2 \times 1$	1500	1,00	1 500,00
	Somme des charges stabilisatrices : $\sum P \downarrow$		12750	Moment stabilisant Ms	15 562,50
Charges motrices	Poussée des terres	$P_{\text{terre}}=(Kp \times \Delta \times H^2)/2$	4589,197	1,10	5 048,12
	Somme des charges motrices : $\sum F \leftarrow$		4589,197	Moment de renversement Mr	5048,12

Vérification de la stabilité au renversement: $M_s/M_r =$

3,08

On a : $M_s/M_r = 3,08 > K = 1,3$

Donc, le mur est stable au renversement

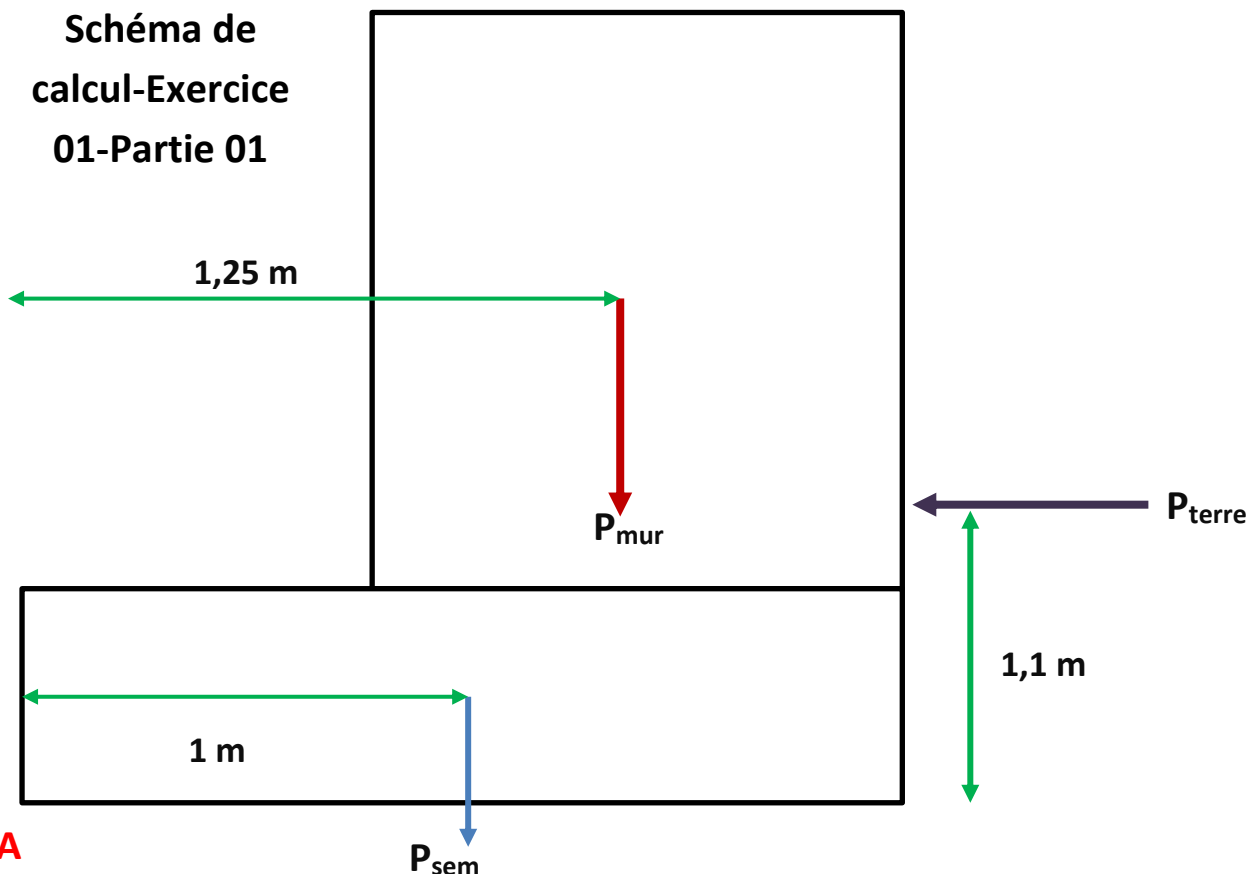
Vérification de la stabilité au glissement: $(\sum P \downarrow \times f)/(\sum F \leftarrow) =$

1,72

On a : $(\sum P \downarrow \times f)/(\sum F \leftarrow) = 1,72 > K_1 = 1,6$

Donc, le mur est stable au glissement

Schéma de calcul-Exercice 01-Partie 01



Vérification du non-poinçonnement

Question 06

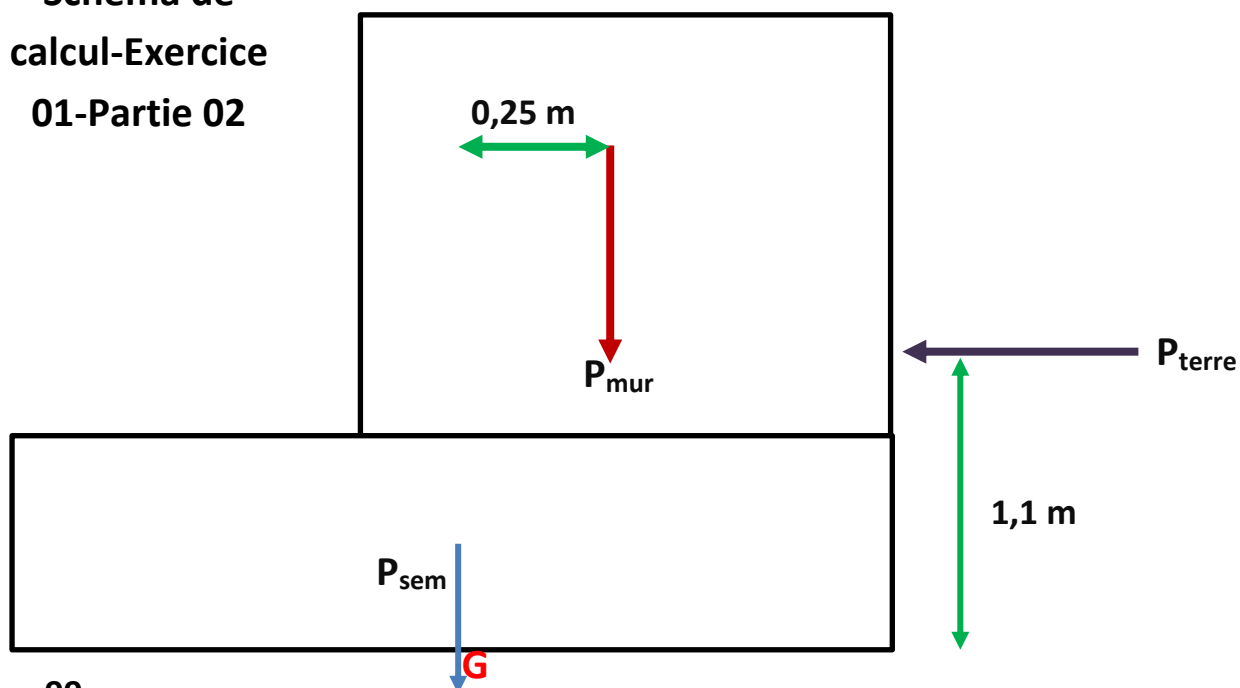
		Δ	φ	K_p
		1850	22	0,4556
Désignation de la charge	Formule de calcul	Valeur (Kg)	Distance /G (m)	Moment/G(Kg.m)
Poids du mur	$P_{\text{mur}}=2500 \times 1,5 \times 3 \times 1$	11250	0,25	-2 812,50
Poids de la semelle	$P_{\text{sem}}=2500 \times 0,3 \times 2 \times 1$	1500	0,00	0,00
Somme des charges Verticales: $\Sigma P \downarrow$		12 750,00		
Poussée des terres	$P_{\text{terre}}=(K_p \times \Delta \times H^2)/2$	4589,2	1,10	5 048,12
		Moment de Flexion par rapport à G (MT)		2 235,62
Largeur de la surface portante b en cm			200	
Moment d'inertie (IGX) en cm ⁴ = $(100 \times b^3)/12=100 \times 200^3/12$			66666666,67	
ymax en cm = $(b/2)=200/2$			100	
Surface portante en cm ² $(100 \times b)=100 \times 200$			20000	
Somme des charges Verticales en Kg			12 750,00	
Moment de Flexion par rapport à G (MT) en Kg.cm			223561,67	
Contrainte en point A en bar : $(\Sigma P \downarrow)/\Omega+(M_f \times y_{\text{max}})/I_{gx}$			0,97	
Contrainte en point B en bar $(\Sigma P \downarrow)/\Omega-(M_f \times y_{\text{max}})/I_{gx}$			0,30	
Contrainte maximale de compression appliquée sur le sol σ_{max} (en bar)			0,81	

Vérification :

$$\sigma_{\text{max}}=0,81 \text{ bar} \leq \bar{\sigma}_{\text{sol}}= 2,5 \text{ bars}$$

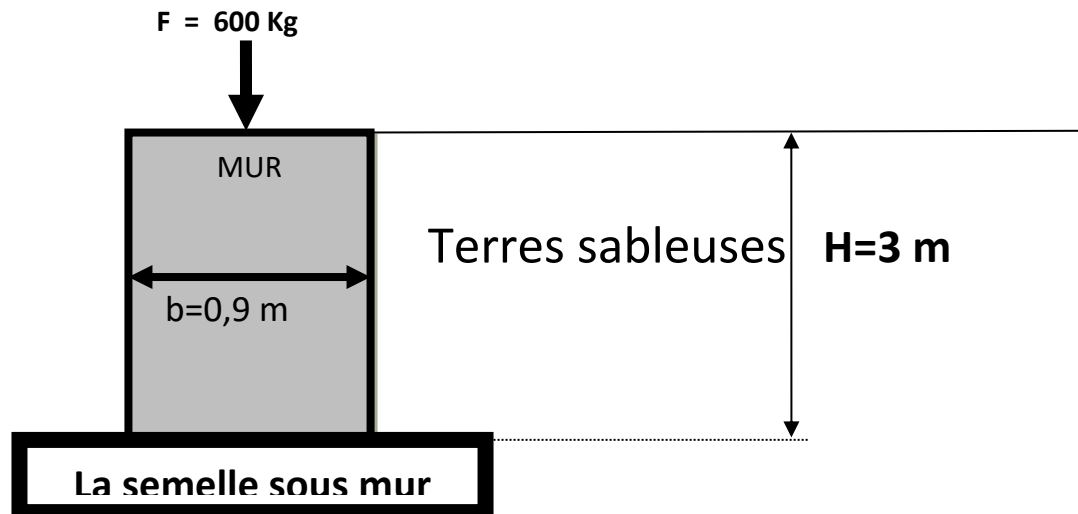
Vérifiée

Schéma de calcul-Exercice 01-Partie 02



II. Exercice corrigé N° 02 : Etude de la stabilité d'un mur de soutènement en briques.

On se propose d'étudier la stabilité d'un mur de soutènement en briques pleines, représenté sur la figure suivante, et qui est conçu pour soutenir des terres sableuses sèches.



ON DONNE :

Le poids spécifique des terres sableuses sèches : $\Delta = 1,6 \text{ t/m}^3$

Le poids spécifique des briques pleines : $\rho = 1900 \text{ Kg / m}^3$

Angle du talus naturel des terres sableuses sèches : $\varphi = 35^\circ$

Coefficient de sécurité au renversement : $K = 1,30$

Coefficient de sécurité au glissement : $K_1 = 1,55$

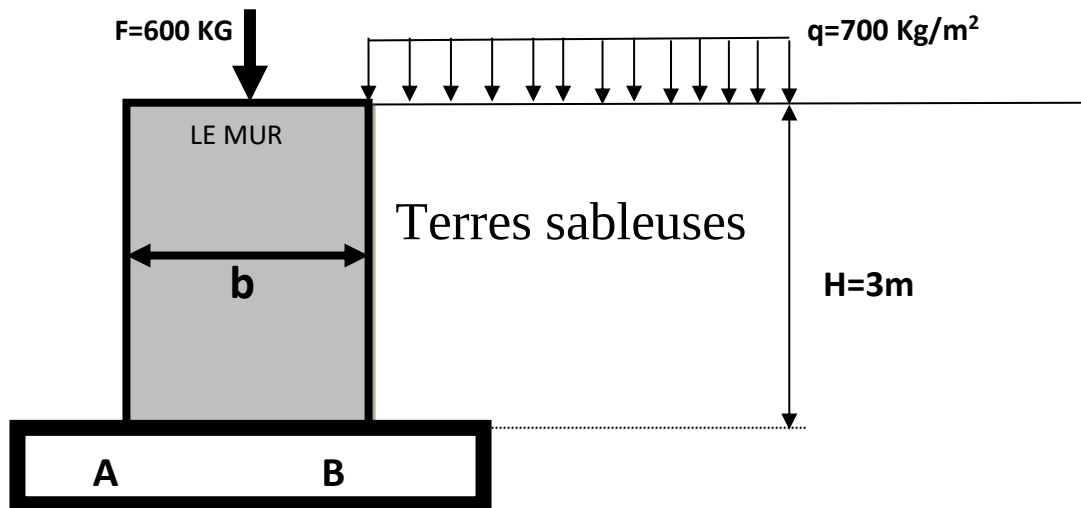
Coefficient de frottement : $f = 0,6$

Partie 01 :

- 1) Faire l'inventaire de toutes les charges appliquées sur le mur et dessiner le schéma du mur en représentant les charges calculées
- 2) Calculer le moment stabilisant M_s et le moment de renversement M_r
- 3) Vérifier la stabilité du mur au renversement ($K = 1,30$) et la stabilité du mur au glissement ($K = 1,55$)

Partie 02 :

Après la construction du mur, on projette construire une petite piste sur les terres sableuses, ce qui engendre une surcharge q sur le remblai (Voir la figure suivante)



- 4) Calculer la charge supplémentaire engendrée par la surcharge q
- 5) Le mur reste-t-il stable après la construction de la piste ?
- 6) En cas d'instabilité du mur, calculer son épaisseur minimale pour qu'il soit stable au renversement et au glissement
- 7) Calculer les contraintes aux points A et B et vérifier le non-écrasement des matériaux sachant que :
 - La contrainte admissible à la compression : **10 bars**
 - La contrainte admissible à la traction : **4 bars**

Projet :Exercice 02/ Etude de la stabilité d'un mur de soutènement

Partie 01 : Questions 1-2-3

Partie 01 : Questions 1-2-3			Δ	φ	Kp
			1600	35	0,2714
Type de charge	Désignation de la charge	Formule de calcul	Valeur (Kg)	Distance /Joint A(m)	Moment/Joint A (Kg.m)
Charges Stabilisatrices	Poids du mur	$P_{mur}=1900 \times 0,9 \times 3 \times 1$	5130	0,45	2 308,50
	Charge concentrée F	-	600	0,45	270,00
	Somme des charges stabilisatrices : $\sum P \downarrow$		5730	Moment stabilisant Ms	2 578,5
Charges motrices	Poussée des terres H = 3 m	$P_{terre}= (Kp \times \Delta \times H^2)/2$	1954,14192	1,00	1 954,14
	Somme des charges motrices : $\sum F \leftarrow$		1954,15	Moment de renversement Mr	1954,14
Vérification de la stabilité au reversement: Ms/Mr =					1,32

On a : $M_s/M_r = 1,32 > K = 1,3$

Donc, le mur est stable au renversement

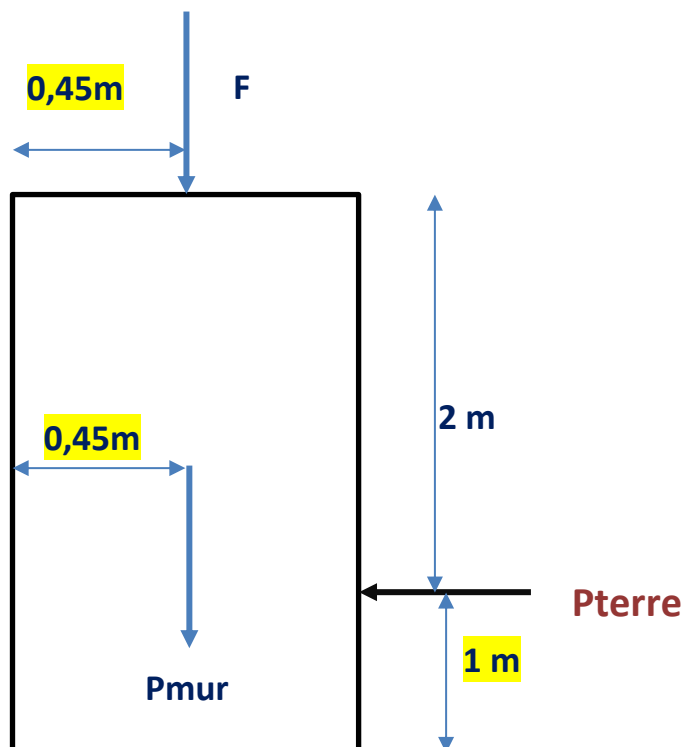
Vérification de la stabilité au glissement: $(\sum P \downarrow \times f) / (\sum F \leftarrow) =$

On a : $(\sum P \downarrow \times f) / (\sum F \leftarrow) = 1,76 > K_1 = 1,55$

Donc, le mur est stable au glissement

1,76

Schéma de calcul-Ex2-Part1



Projet :Exercice 01/ Etude de la stabilité d'un mur de soutènement

Partie 02 : Questions 4-5

Partie 02 : Questions 4-5			Δ	φ	Kp
			1600	35	0,2714
Type de charge	Désignation de la charge	Formule de calcul	Valeur (Kg)	Distance /Joint A(m)	Moment/Joint A (Kg.m)
Charges stabilisatrices	Poids du mur	$P_{mur} = 1900 \times 0,9 \times 3 \times 1$	5130	0,45	2 308,50
	Charge concentrée F	-	600	0,45	270,00
	Somme des charges stabilisatrices : $\sum P \downarrow$		5730	Moment stabilisant M_s	2 578,5
Charges motrices	Poussée des terres	$P_{terre} = (K_p \times \Delta \times H^2) / 2$	1954,15	1,00	1 954,14
	Poussée engendrée par q	$PQ = (K_p \times q \times H \times 1)$	569,96	1,50	854,94
	Somme des charges motrices : $\sum F \leftarrow$		2524,10	Moment de renversement M_r	2809,08
Vérification de la stabilité au reversement: $M_s/M_r =$					0,92

On a : $M_s/M_r = 0,92 < K = 1,3$

Donc, le mur devient instable au renversement

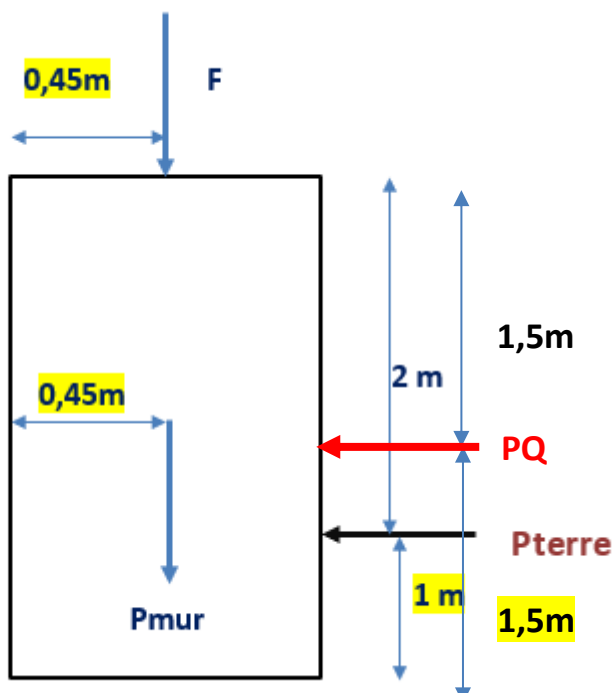
Vérification de la stabilité au glissement: $(\sum P \downarrow \times f) / (\sum F \leftarrow) =$

On a : $(\sum P \downarrow \times f) / (\sum F \leftarrow) = 1,36 < K_1 = 1,55$

Donc, le mur devient instable au glissement

5) Le mur deviendra instable après la construction de la piste

Schéma de calcul-Ex2-Part2



Projet :Exercice 01/ Etude de stabilité du mur de soutènement

Partie 02 : Questions 6 :

			Δ	φ	K_p
			1600	35	0,2714
Type de charge	Désignation de la charge	Formule de calcul	Valeur (Kg)	Distance /Joint A(m)	Moment/Joint A (Kg.m)
Charges Stabilisatrices	Poids du mur	$P_{mur}=1900 \times b \times 3 \times 1$	5700 b	0,5 b	$2850 b^2$
	Charge concentrée F	-	600	0,5 b	300 b
	Somme des charges stabilisatrices : $\sum P \downarrow$		5700 b + 600	Moment stabilisant M_s	$2850 b^2 + 300b$
Charges motrices	Poussée des terres H=3 m	$P_{terre} = (K_p \times \Delta \times H^2) / 2$	1954,15	1,00	1 954,14
	Poussée engendrée par q H = 3m	$PQ = (K_p \times q \times H \times 1)$	569,96	1,50	854,94
	Somme des charges motrices : $\sum F \leftarrow$		2524,10	Moment de renversement M_r	2809,08

Redimensionnement du mur au renversement:

Pour que le mur soit stable au renversement, il faut, au moins, que $M_s/M_r = K$

C'est-à-dire : $(2850 b^2 + 300b)/(2809,08) = 1,3$

Donc : $2850 b^2 + 300 b - 3651,8 = 0$ (Equation 2ème degré)

La résolution de cette équation nous donne : $b_r = 1,09 \text{ m} = 1,10 \text{ m}$

Redimensionnement du mur au glissement:

Pour que le mur soit stable au glissement, il faut, au moins, que: $(\sum P \downarrow \times f) / (\sum F \leftarrow) = K_1$

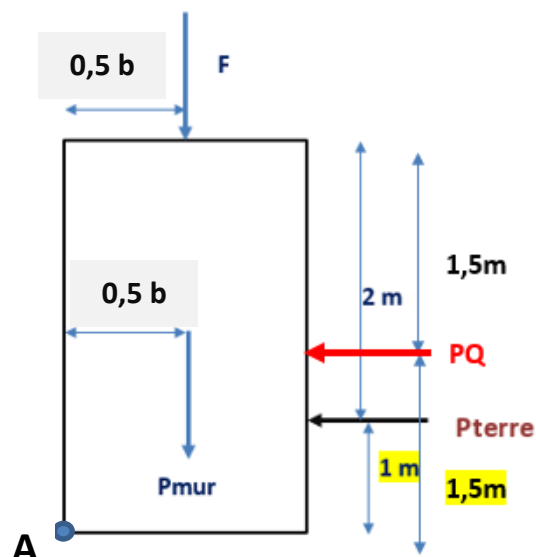
C'est-à-dire : $((5700b + 600) \times 0,6) / (2524,1) = 1,55$

Donc : $b = (((1,55 \times 2524,1) / 0,6) - 600) / 5700$ (Equation 1er degré)

La résolution de cette équation nous donne : $b_g = 1 \text{ m} = 1 \text{ m}$

On prendra : $b = \sup (b_r, b_g) = 1,10 \text{ m} = 110 \text{ cm}$

Schéma de calcul-Ex2-Part3



Vérification du non-écrasement-exercice 02

Question 07

Question 07		Δ	φ	Kp
		1600	35	0,2714
Désignation de la charge	Formule de calcul	Valeur (Kg)	Distance /G (m)	Moment/G(Kg.m)
Poids du mur	Pmur= 1900 x 1,1 x 3 x 1	6270	0,00	0,00
Charge concentrée F	-	600	0,00	0,00
Somme des charges Verticales: $\Sigma P \downarrow$		6 870		
Poussée des terres	Pterre = (Kp x Δ x H ²)/2	1954,15	1,00	1 954,14
Poussée engendrée par q	PQ = (Kp x q x Hx1)	569,96	1,50	854,94
		Moment de Flexion par rapport à G (MT)		2 809,08
Largeur de la surface portante b en cm			110	
Moment d'inertie (IGX) en cm ⁴ = (100 * b3)/12			11091666,67	
ymax en cm = (b/2)			55	
Surface portante en cm ² (100 * b)			11000	
Somme des charges Verticales en Kg			6 870,00	
Moment de Flexion par rapport à G (MT) en Kg.cm			280907,90	
Contrainte en point A en bar : ($\Sigma P \downarrow$)/ Ω +(Mf x ymax)/Igx			2,02	
Contrainte en point B en bar ($\Sigma P \downarrow$)/ Ω -(Mf x ymax)/IGx			-0,77	
Contrainte maximale de compression en bar		2,02		
Contrainte maximale de traction en bar				
		0,77		

$\sigma(\max.c) = 2,02 \text{ bar} \leq \bar{\sigma}c = 10 \text{ bars}$

$\sigma(\max.t) = 0,77 \text{ bar} \leq \bar{\sigma}t = 4 \text{ bars}$

Vérifiée

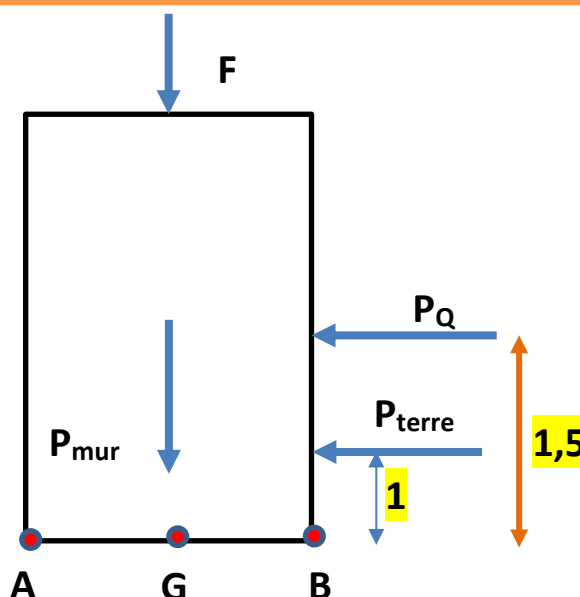
Vérifiée

La condition du non-écrasement est vérifiée

Schéma de
calcul-Ex2-Part 4

Les supports des forces F
et P_{mur} passent par G

Leurs moments sont nuls
par rapport au point G

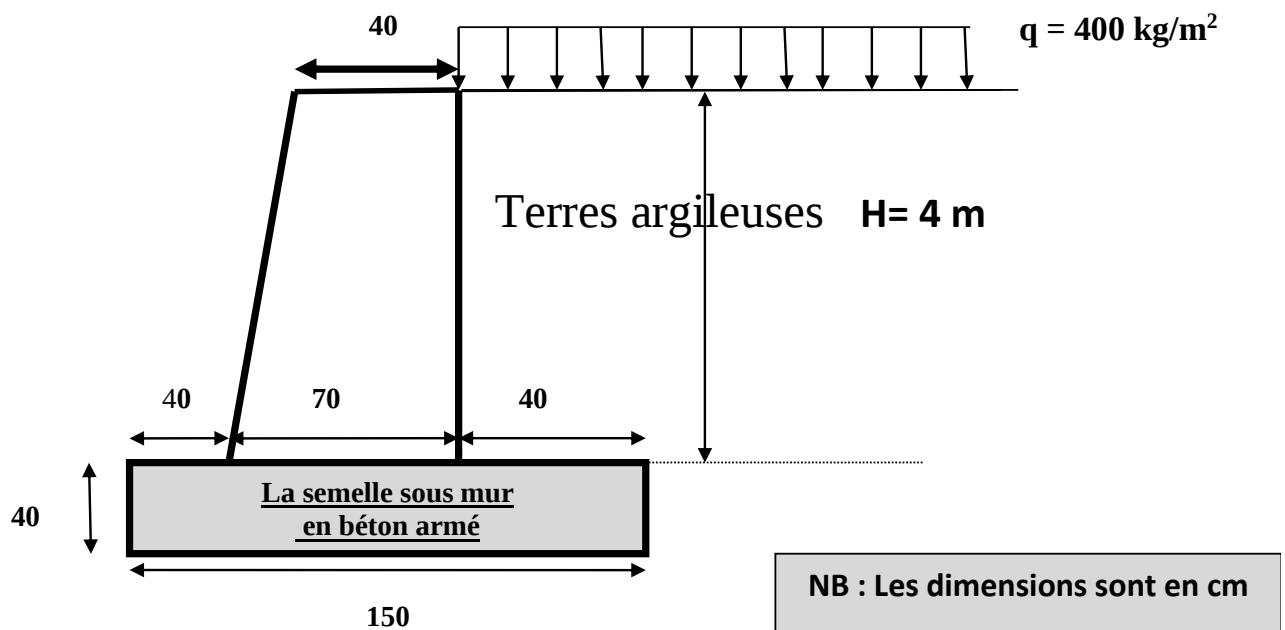


III. Exercice corrigé N° 03 : Vérification de la stabilité d'un mur en béton armé.(Cas d'une surcharge)

Lors de la construction d'une route, on a rencontré un obstacle, l'ingénieur responsable propose d'y franchir avec un pont

Ce pont sera constitué d'un tablier reposant sur deux murs de soutènement.

On se propose d'étudier la stabilité de ce mur de soutènement conçu pour soutenir des terres sableuses (voir figure ci-dessous)



ON DONNE :

Le poids spécifique des terres argileuses : $\Delta = 2 \text{ t/m}^3$

Le poids spécifique du béton armé: $\rho = 2500 \text{ Kg / m}^3$

Angle du talus naturel des terres argileuses sèches : $\phi = 24^\circ$

Coefficient de sécurité au renversement : $K = 1,25$

Coefficient de sécurité au glissement : $K_1 = 1,5$

Coefficient de frottement : $f = 0,63$

- Faire l'inventaire de toutes les charges appliquées au mur.
- Dessiner le schéma du mur en représentant les charges calculées.
- Calculer le moment stabilisant M_s et le moment de renversement M_r .
- Vérifier la stabilité du mur au renversement et la stabilité du mur au glissement.

Projet :Exercice 03/ Etude de stabilité du mur de soutènement

Questions a-b-c-d

			Δ	φ	Kp
			2000	24	0,4223
Type de charge	Désignation de la charge	Formule de calcul	Valeur (Kg)	Distance /Joint A(m)	Moment/Joint A (Kg.m)
Charges Stabilisatrices	Poids du mur partie rectangulaire	$P_{mur1} = 2500 \times 0,4 \times 4 \times 1$	4000	0,90	3 600,00
	Poids du mur partie triangulaire	$P_{mur2} = (2500 \times 0,3 \times 4 \times 1) / 2$	1500	0,60	900,00
	Poids de la semelle	$P_{sem} = 2500 \times 1,5 \times 0,4 \times 1$	1500	0,75	1 125,00
	Poids des terres/semelle	$PT/S = 2000 \times 0,4 \times 4 \times 1$	3200	1,30	4 160,00
	Surcharge q sur semelle	$Q/S = 400 \times 0,4 \times 1$	160	1,30	208,00
	Somme des charges stabilisatrices : $\sum P \downarrow$		10360	Moment stabilisant M_s	9 993,0
Charges motrices	Poussée des terres	$P_{terre} = (K_p \times \Delta \times H^2) / 2$	8176	1,47	11 991,47
	Poussée engendrée par q	$PQ = (K_p \times q \times H \times 1)$	743,28	2,20	1 635,20
	Somme des charges motrices : $\sum F \leftarrow$		8919,28	Moment de renversement M_r	13626,67
Vérification de la stabilité au reversement: $M_s/M_r =$					0,73

On a : $M_s/M_r = 0,73 < K = 1,25$

Donc, le mur n'est pas stable au renversement

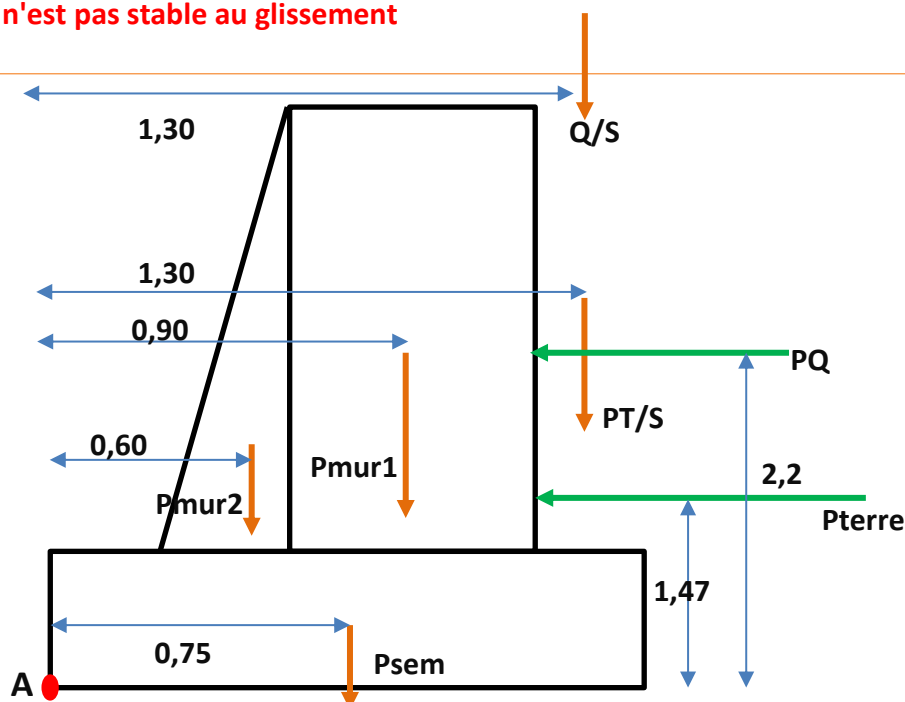
Vérification de la stabilité au glissement: $(\sum P \downarrow \times f) / (\sum F \leftarrow) =$

On a : $(\sum P \downarrow \times f) / (\sum F \leftarrow) = 0,73 < K_1 = 1,50$

Donc, le mur n'est pas stable au glissement

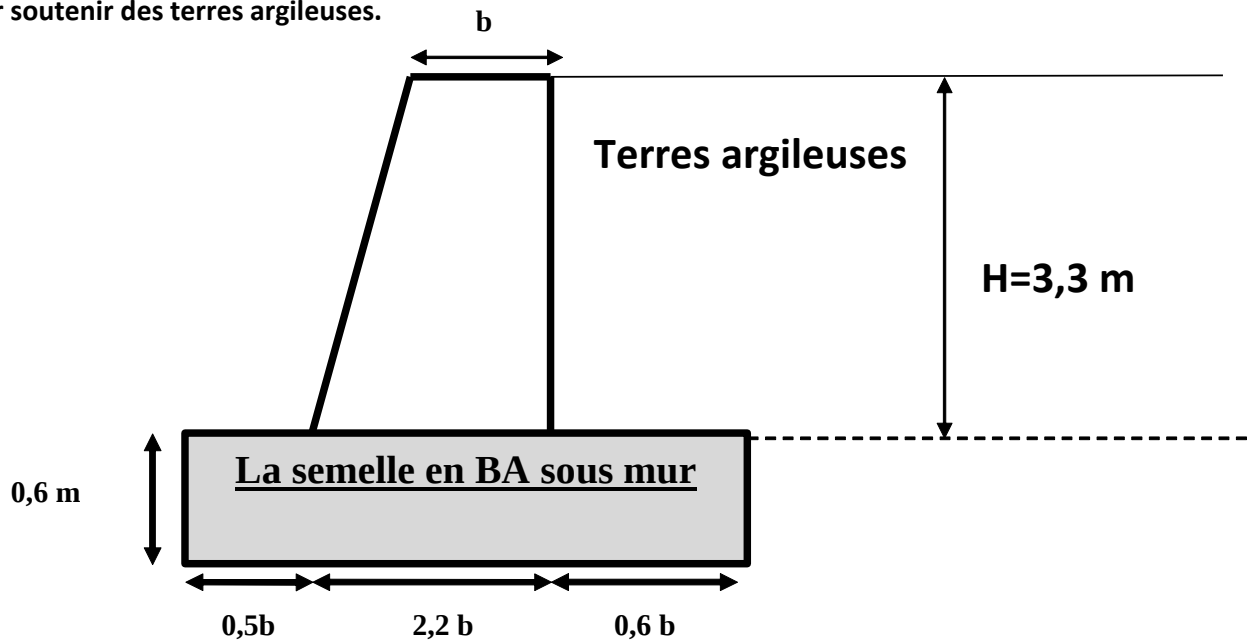
0,73

Schéma de calcul-Ex3



IV. Exercice corrigé N° 04 : Dimensionnement d'un mur en BA

Dimensionner le mur de soutènement en béton armé, représenté sur la figure suivante, et qui est conçu pour soutenir des terres argileuses.



ON DONNE :

Le poids spécifique des terres argileuses : $\Delta = 2 \text{ t/m}^3$

Le poids spécifique du béton armé : $\rho = 2500 \text{ Kg / m}^3$

Angle du talus naturel des terres argileuses: $\varphi = 20^\circ$

Coefficient de sécurité au renversement : $K = 1,3$

Coefficient de sécurité au glissement : $K_1 = 1,6$

Coefficient de frottement : $f = 0,72$

Projet :Exercice 04/ Dimensionnement d'un mur de soutènement

Questions 1

			Δ	φ	Kp
			2000	20	0,4910
Type de charge	Désignation de la charge	Formule de calcul	Valeur (Kg)	Distance /Joint A(m)	Moment/Joint (Kg.m)
Charges Stabilisatrices	Poids du mur partie rectangulaire	$P_{mur1}=2500 \times b \times 3,3 \times 1$	8250 b	2,2 b	18150 b ²
	Poids du mur partie triangulaire	$P_{mur2}=(2500 \times 1,2 \times b \times 3,3 \times 1)/2$	4950 b	1,3 b	6435 b ²
	Poids de la semelle	$P_{sem}=2500 \times 3,3 \times b \times 0,6 \times 1$	4950 b	1,65 b	8167,5 b ²
	Poids des terres/semelle	$PT/S=2000 \times 0,6 \times b \times 3,3 \times 1$	3960 b	3 b	11880 b ²
	Somme des charges stabilisatrices : $\sum P \downarrow$		22110 b	Moment stabilisant Ms	44632,5 b ²
Charges motrices	Poussée des terres	$P_{terre}= (Kp \times \Delta \times H^2)/2$	7467,36	1,30	9 707,57
	Somme des charges motrices : $\sum F \leftarrow$		7467,36	Moment de renversement Mr	9707,5685

Dimensionnement du mur au renversement:

Pour que le mur soit stable au renversement, il faut, au moins, que $M_s/M_r = K$

C'est-à-dire : $(44632,5 b^2)/(9707,6) = 1,3$

Donc : $b = \text{racine}(1,3 \times 9707,6/44632,5)$

La résolution de cette équation nous donne : $b_r = 0,54 \text{ m}$

Dimensionnement du mur au glissement:

Pour que le mur soit stable au glissement, il faut, au moins, que: $(\sum P \downarrow \times f)/(\sum F \leftarrow) = K_1$

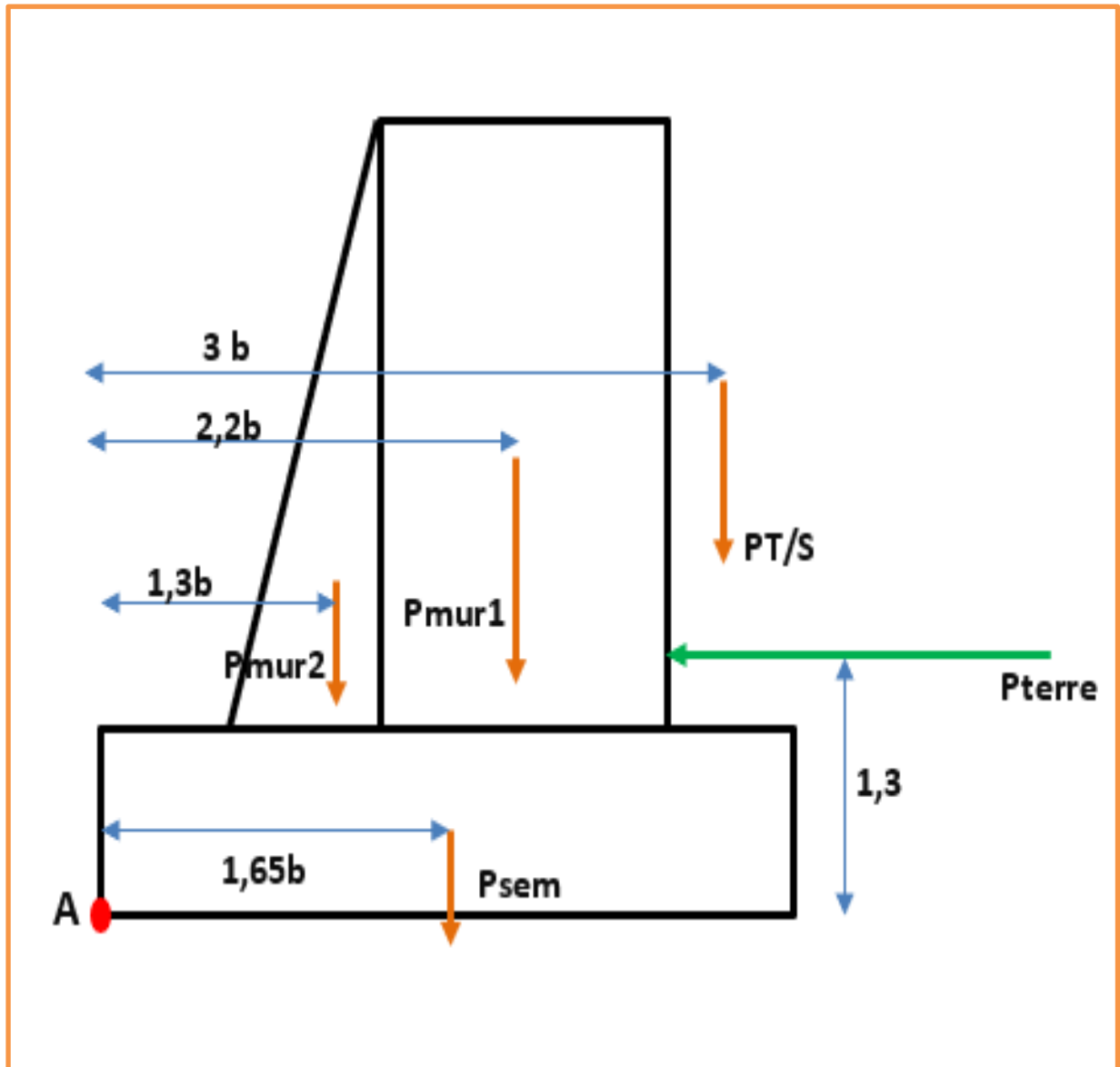
C'est-à-dire : $(22110 b) \times 0,72/(7467,36) = 1,6$

Donc : $b = ((1,6 \times 7467,36)/0,72)/22110$ (Equation 1er degré)

La résolution de cette équation nous donne : $b_g = 0,76 \text{ m}$

On prendra : $b = \sup(b_r, b_g) = 0,76 \text{ m}$, soit $b = 0,80 \text{ m}$

Schéma de calcul du mur- Exercice 04



V. Exercice corrigé N° 05 : Calcul de la surcharge maximale

On se propose d'étudier la stabilité d'un mur de soutènement en béton armé, représenté sur la figure suivante, et qui est conçu pour soutenir des terres marneuses humides.

ON DONNE :

Le poids spécifique des terres marneuses humides: $\Delta = 1,8 \text{ t/m}^3$

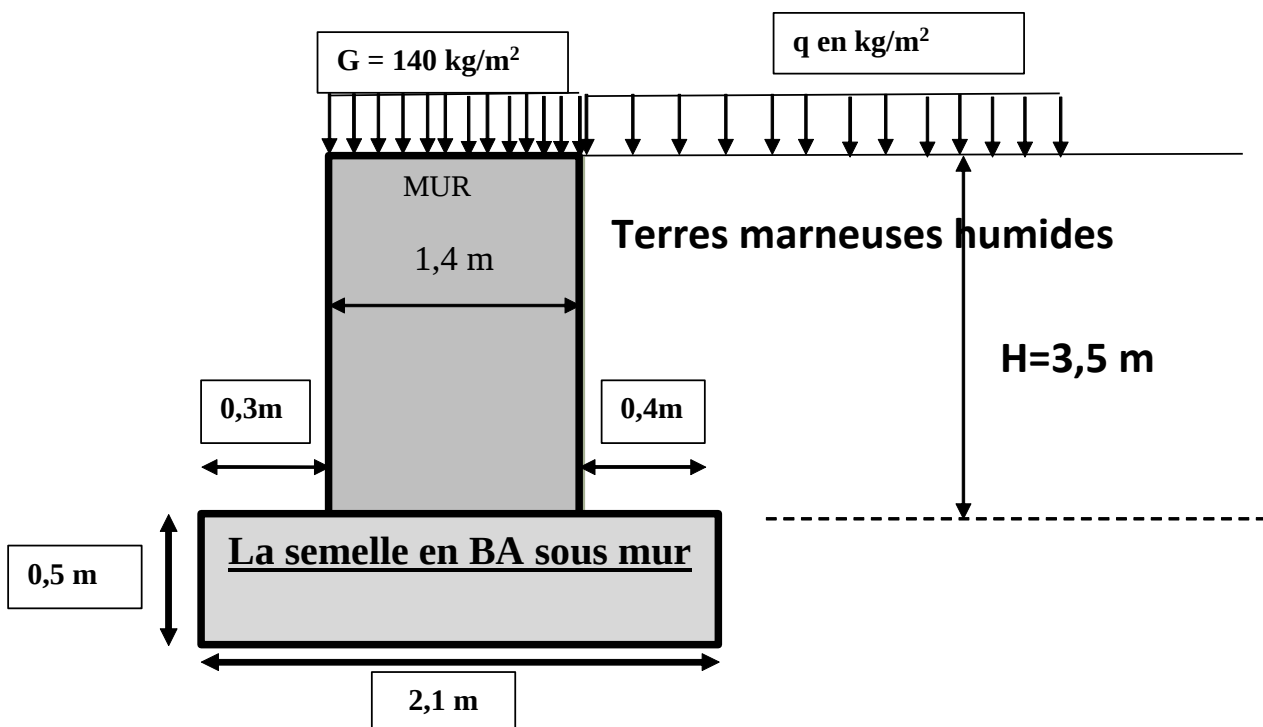
Le poids spécifique du béton armé : $\rho = 2500 \text{ Kg / m}^3$

Angle du talus naturel des terres marneuses humides: $\varphi = 25^\circ$

Coefficient de sécurité au renversement : $K = 1,25$

Coefficient de sécurité au glissement : $K_1 = 1,5$

Coefficient de frottement : $f = 0,7$



Calculer la surcharge maximale qu'on peut appliquer sur les terres marneuses en conservant la stabilité du mur. (la surcharge maximale doit être calculée au renversement et au glissement)

Projet :Exercice 05/ Calcul de la surcharge maximale

			Δ	φ	Kp
			1800	25	0,4064
Type de charge	Désignation de la charge	Formule de calcul	Valeur (Kg)	Distance /Joint A(m)	Moment/Joint A (Kg.m)
Charges Stabilisatrices	Poids du mur	$P_{mur}=2500 \times 1,4 \times 3,5 \times 1$	12250	1,00	12 250,00
	Charge G sur le mur	$G= 140 \times 1,4 \times 1$	196	1,00	196,00
	Poids de la semelle	$P_{sem}=2500 \times 2,1 \times 0,5 \times 1$	2625	1,05	2 756,25
	Poids des terres/semelle	$PT/S=1800 \times 0,4 \times 3,5 \times 1$	2520	1,90	4788
	Surcharge q sur semelle	$Q/S = q \times 0,4 \times 1$	0,4 q	1,90	0,76 q
	Somme des charges stabilisatrices : $\sum P \downarrow$		17591 + 0,4 q	Moment stabilisant Ms	19999,25+0,76 q
Charges motrices	Poussée des terres	$P_{terre}=(Kp \times \Delta \times H^2)/2$	5847	1,33	7 804
	Poussée engendrée par q	$PQ= (Kp \times q \times H \times 1)$	1,63 q	2	3,25 q
	Somme des charges motrices : $\sum F \leftarrow$		5847+1,63 q	Moment de renversement Mr	7804+ 3,25 q

Calcul de q au renversement:

Pour que le mur soit stable au renversement, il faut, au moins, que $M_s/M_r = K$

C'est-à-dire : $(19999.25 + 0,76 q)/(7804 + 3,25 q) = 1,25$

Equation 1er degré

$q = (1,25 \times 7804 - 19999,25)/(0,76 - 1,25 \times 3,25)$

La résolution de cette équation nous donne : $q_r = 3102 \text{ Kg/m}^2$

Calcul de q au glissement:

Pour que le mur soit stable au glissement, il faut, au moins, que: $(\sum P \downarrow \times f)/(\sum F \leftarrow) = K_1$

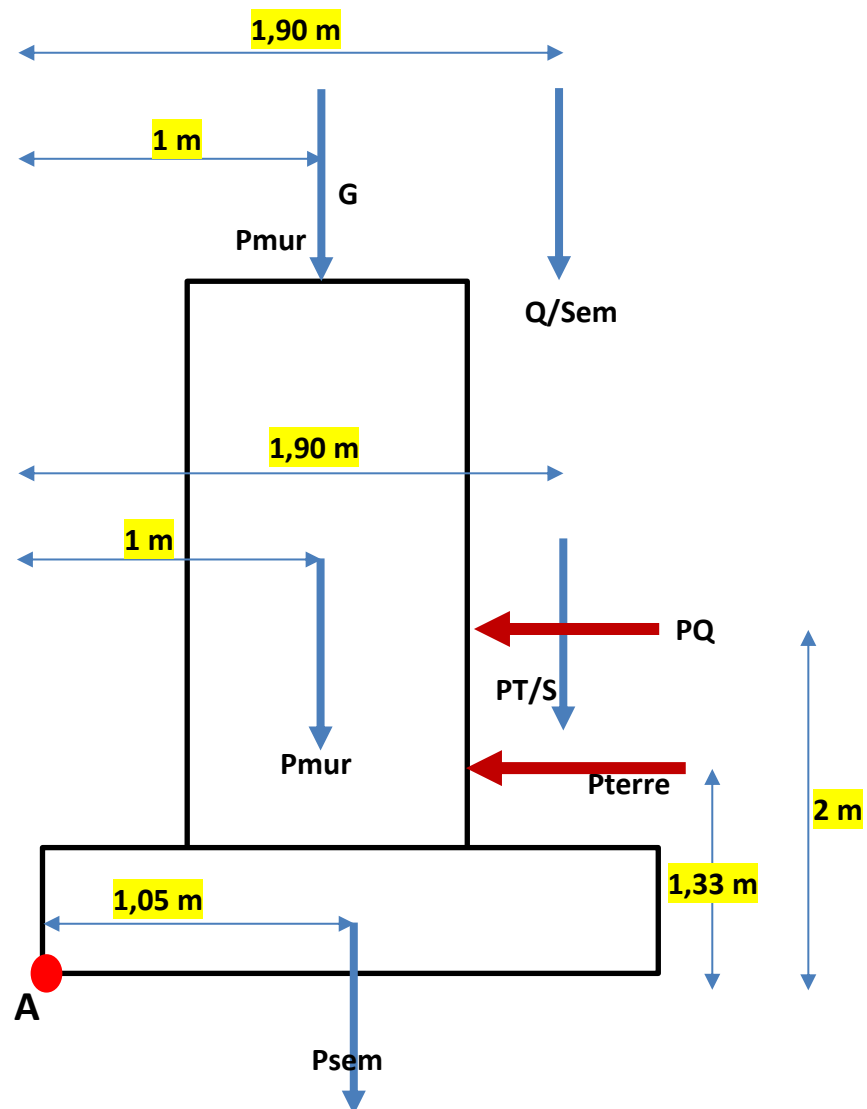
C'est-à-dire : $(17591 + 0,4 q) \times 0,7 / (5847 + 1,63 q) = 1,5$

Donc : $((1,5/0,7) \times 5847 - 17591)/(0,4 - (1,5/0,7) \times 1,63)$

La résolution de cette équation nous donne : $q_g = 1636 \text{ Kg/m}^2$

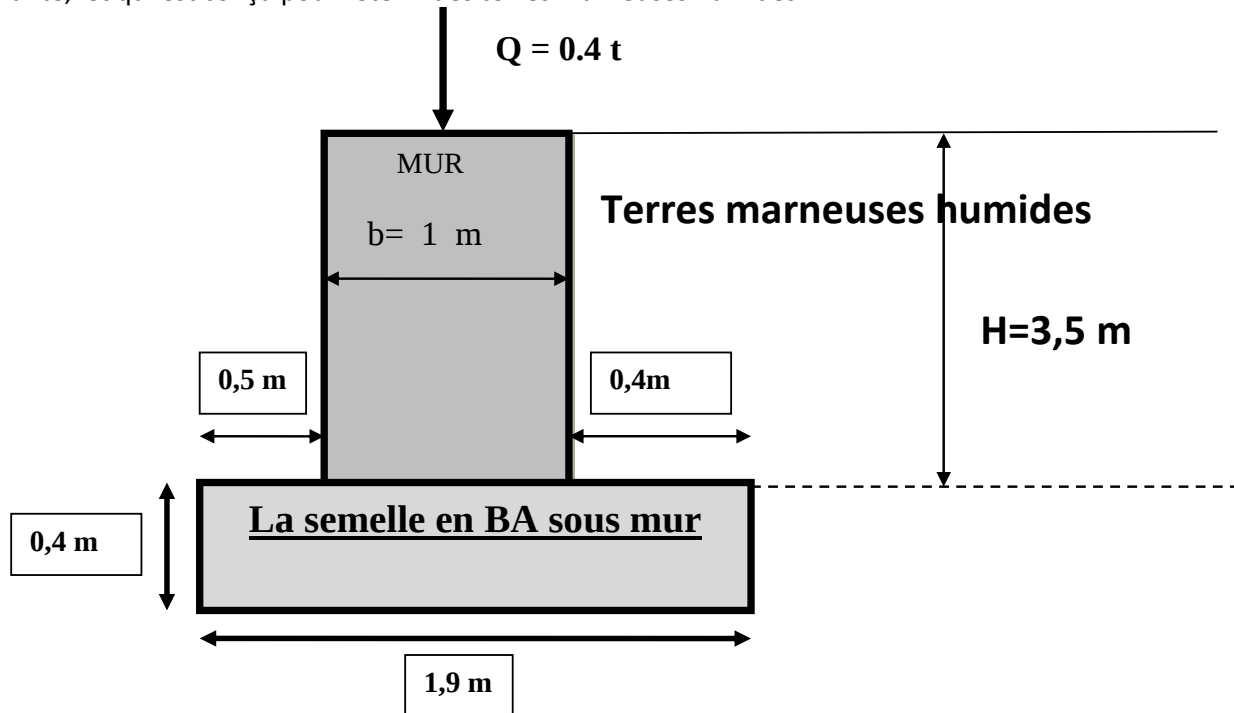
La surcharge maximale qu'on peut mettre sur les terres est : $\min(q_r, q_g) = 1636 \text{ Kg/m}^2$

Schéma de calcul du mur- Exercice 05



VI. Exercice corrigé N° 06 : Vérification et dimensionnement d'un mur de soutènement.

On se propose de vérifier la stabilité d'un mur de soutènement en béton armé, représenté sur la figure suivante, et qui est conçu pour retenir des terres marneuses humides.



ON DONNE :

Le poids spécifique des terres marneuses humides: $\Delta = 1,85 \text{ t/m}^3$

Le poids spécifique du béton armé : $\rho = 2500 \text{ Kg / m}^3$

Angle du talus naturel des terres marneuses humides: $\phi = 29^\circ$

Coefficient de sécurité au renversement : $K = 1,5$

Coefficient de sécurité au glissement : $K_1 = 1,7$

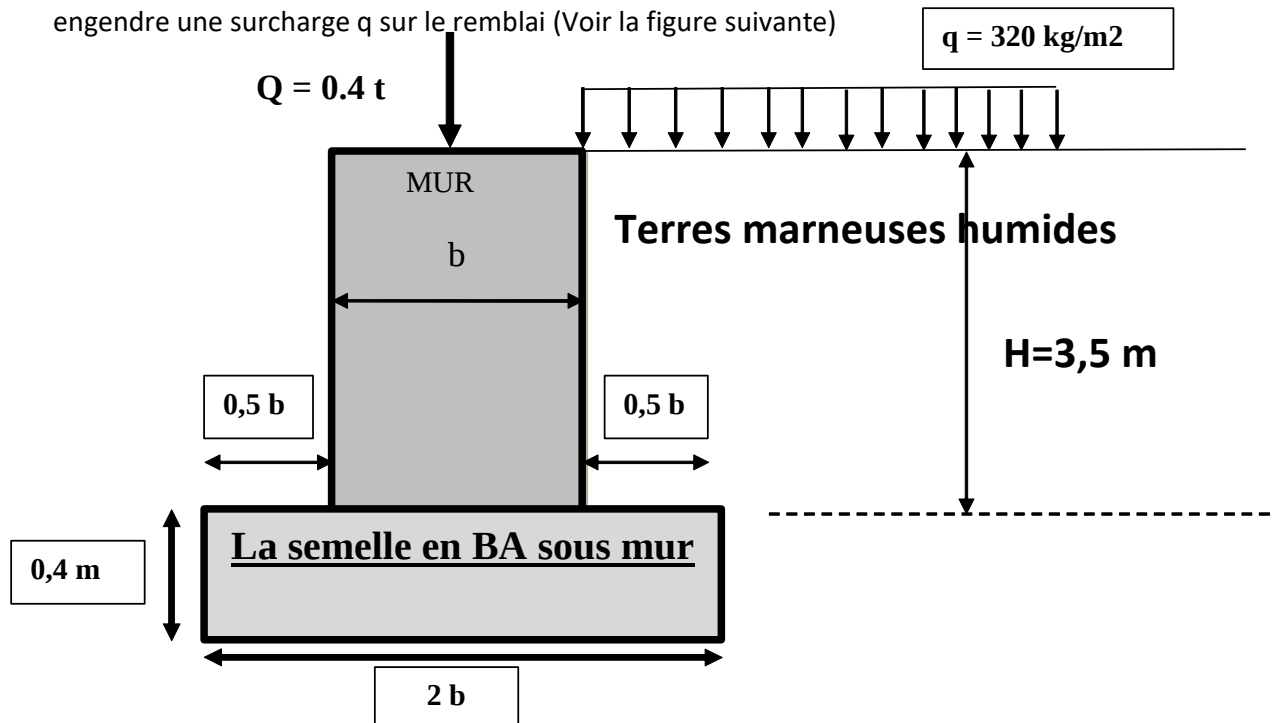
Coefficient de frottement : $f = 0,72$

Partie 01

- 1) Faire l'inventaire de toutes les charges appliquées au mur et dessiner un schéma en représentant les charges calculées.
- 2) Calculer le moment stabilisant M_s et le moment de renversement M_r .
- 3) Vérifier la stabilité du mur au renversement et la stabilité du mur au glissement.

Partie 02

Après la construction du mur, on projette construire un jardin sur les terres marneuses humides, ce qui engendre une surcharge q sur le remblai (Voir la figure suivante)



- 1) Redimensionner le mur au renversement et au glissement.
- 2) Calculer les contraintes au niveau de la surface portante de la semelle et tracer le diagramme correspondant.
- 3) Vérifier la résistance au non-poinçonnement sachant que la contrainte admissible du sol = $3,2 \text{ bar}$

Projet :Exercice 06/ Etude de stabilité du mur de soutènement

Partie01 : Questions 1-2-3

Type de charge	Désignation de la charge	Formule de calcul	Δ	φ	K_p
			1850	29	0,3475
Type de charge	Désignation de la charge	Formule de calcul	Valeur (Kg)	Distance /Joint A(m)	Moment/Joint A (Kg.m)
Charges Stabilisatrices	Poids du mur	$P_{mur} = 2500 \times 1 \times 3,5 \times 1$	8750	1,00	8750
	Charge Q sur le mur	$Q = 0,4 \times 1000$	400	1,00	400,00
	Poids de la semelle	$P_{sem} = 2500 \times 1,9 \times 0,4 \times 1$	1900	0,95	1 805,00
	Poids des terres/semelle	$PT/S = 1850 \times 0,4 \times 3,5 \times 1$	2590	1,70	4 403,00
	Somme des charges stabilisatrices : $\sum P \downarrow$		13640	Moment stabilisant M_s	15358
Charges motrices	Poussée des terres	$P_{terre} = (K_p \times \Delta \times H^2) / 2$	4888,72597	1,30	6 355,34
	Somme des charges motrices : $\sum F \leftarrow$		4888,73	Moment de renversement M_r	6355,34

Vérification de la stabilité au renversement: $M_s/M_r =$

On a : $M_s/M_r = 2,42 > K = 1,5$

Donc, le mur est stable au renversement

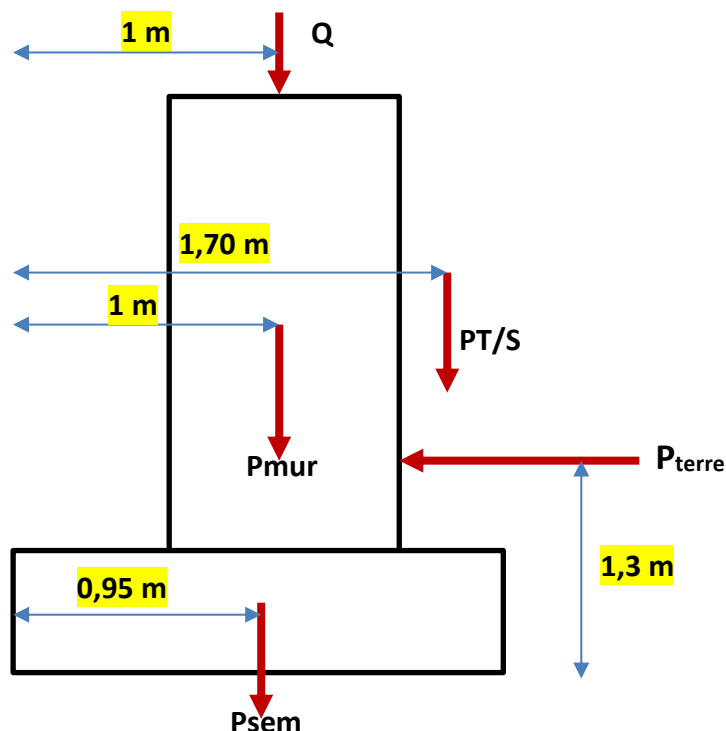
Vérification de la stabilité au glissement: $(\sum P \downarrow \times f) / (\sum F \leftarrow) =$

On a : $(\sum P \downarrow \times f) / (\sum F \leftarrow) = 2,01 > K_1 = 1,70$

Donc, le mur est stable au glissement

Exercice 6 -partie
01

Schéma de calcul



Projet :Exercice 06/ Etude de stabilité du mur de soutènement

Partie 02 : Questions 4:
redimensionnement

			Δ	φ	Kp
			1850	29	0,3475
Type de charge	Désignation de la charge	Formule de calcul	Valeur (Kg)	Distance /Joint A(m)	Moment/Joint A (Kg.m)
Charges Stabilisatrices	Poids du mur P_{mur}	$2500 \times b \times 3,5 \times 1$	8750 b	b	$8750 b^2$
	Charge Q sur le mur	$0,4 \times 1000$	400	b	400 b
	Poids de la semelle P_{sem}	$2500 \times 2b \times 0,4 \times 1$	2000 b	b	$2000 b^2$
	Poids des terres/semelle PT/S	$1850 \times 0,5b \times 3,5 \times 1$	3237,5b	1,75 b	$5665,6 b^2$
	Surcharge q sur semelle Q/S	$320 \times 0,5b \times 1$	160 b	1,75 b	$280 b^2$
	Somme des charges stabilisatrices : $\sum P \downarrow$		14147,5 b +400	Moment stabilisant Ms	$16695,6 b^2 +400b$
Charges motrices	Poussée des terres	$P_{terre} = (Kp \times \Delta \times H^2) / 2$	4888,73	1,30	6 355,34
	Poussée engendrée par q	$PQ = Kp \times q \times H \times 1$	433,65	1,95	845,62
	Somme des charges motrices : $\sum F \leftarrow$		5 322,38	Moment de renversement Mr	7 200,96

Dimensionnement du mur au renversement:

Pour que le mur soit stable au renversement, il faut, au moins, que $M_s/M_r = K$

C'est-à-dire : $(16695,625 b^2 + 400b) / (7201) = 1,5$

Donc : $16695,63 b^2 + 400b - 10801,5 = 0$ Equation 2ème degré

La résolution de cette équation nous donne : $b_r = 0,80 \text{ m}$

Dimensionnement du mur au glissement:

Pour que le mur soit stable au glissement, il faut, au moins, que: $(\sum P \downarrow \times f) / (\sum F \leftarrow) = K_1$

C'est-à-dire : $(14147,5 b + 400) \times 0,72 / (5322,38) = 1,7$

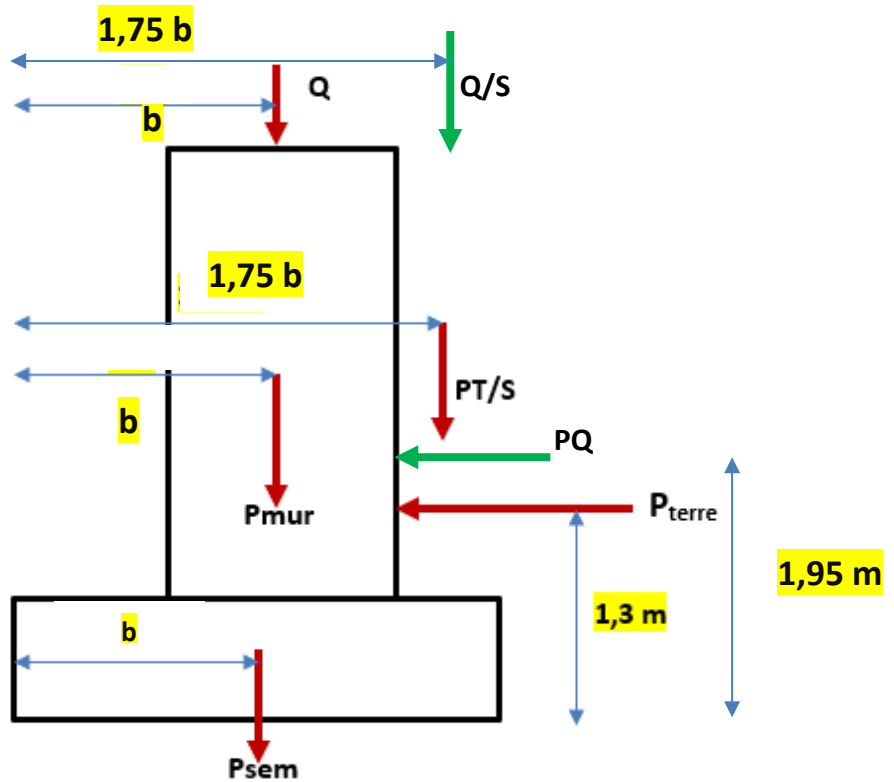
Donc : $b = (1,7 \times 5322,38 / 0,72 - 400) / 14147,5$ (Equation 1er degré)

La résolution de cette équation nous donne : $b_g = 0,86 \text{ m}$

On prendra : $b = \sup (b_r, b_g) = 0,86 \text{ m}$, soit $b = 0,90 \text{ m}$

Exercice 6 -partie 02

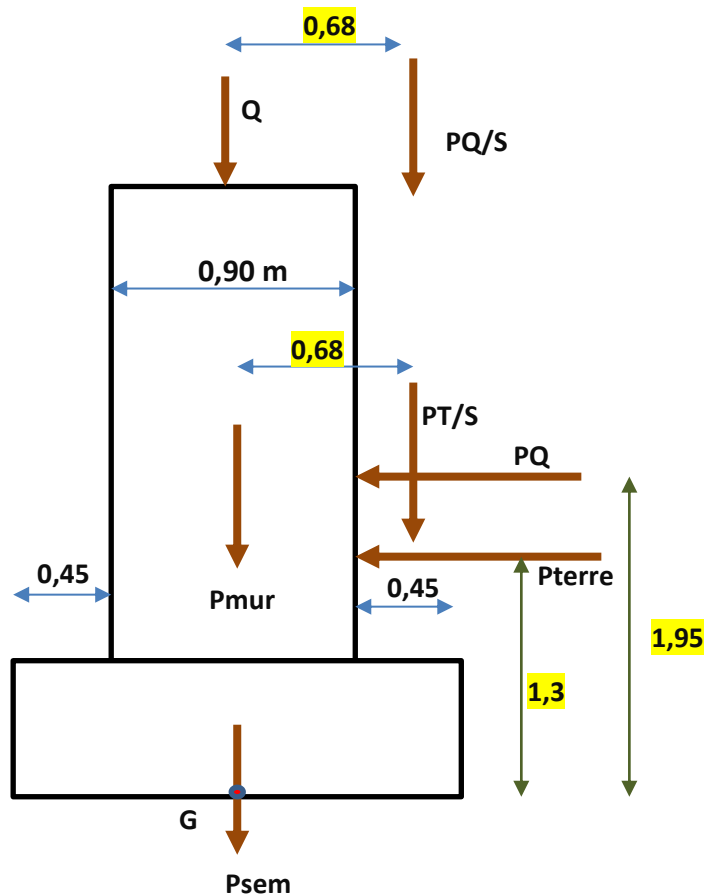
Schéma de calcul
pour le
redimensionnement



Exercice 6 -partie 03

Schéma de calcul
pour vérifier le non-
poinçonnement

Note de calcul sur la
page suivante



Projet :Exercice 06/ résistance au poinçonnement

Questions5/6		b trouvée dans 5	Δ	φ	Kp
		0,9	1850	29	0,3475
Type de charge	Désignation de la charge	Formule de calcul	Valeur (Kg)	Distance /Joint G(m)	Moment/Joint G (Kg.m)
Charges Stabilisatrices	Poids du mur	2500 x b x 3,5 x1	7875	0,00	0,00
	Charge Q sur le mur P _{mur}	0,4 x 1000	400	0,00	0,00
	Poids de la semelle P _{sem}	2500 x 2b x 0,4 x 1	1800	0,00	0,00
	Poids des terres/semelle PT/S	1850 x 0,5b x3,5 x 1	2913,75	0,68	-1 966,78
	Surcharge q sur semelle Q/S	320 x 0,5b x1	144	0,68	-97,92
	Somme des charges stabilisatrices : ΣP↓		13132,75		
Charges motrices	Poussée des terres	P _{terre} =(Kp x ΔxH²)/2	4888,73	1,30	6 355,34
	Poussée engendrée par q	PQ=Kp x q x H x 1	433,65	1,95	845,62
				Moment de flexion	5 136,26
Largeur de la surface portante b en cm			180		
Moment d'inertie (IGX) en cm4 = (100 * b3)/12			48600000		
ymax en cm = (b/2)			90		
Surface portante en cm² (100 * b)			18000		
Somme des charges Verticales en Kg			13 132,75		
Moment de Flexion par rapport à G (MT) en Kg.cm			513625,9972		
Contrainte en point A en bar : (ΣP↓)/Ω+(Mf x ymax)/Igx (bar)			σ _A = 1,68		
Contrainte en point B en bar (ΣP↓)/Ω-(Mf x ymax)/IGx (bar)			σ _B = -0,22		
Contrainte maximale de compression appliquée sur le sol σ _{max} (en bar)			1,26		

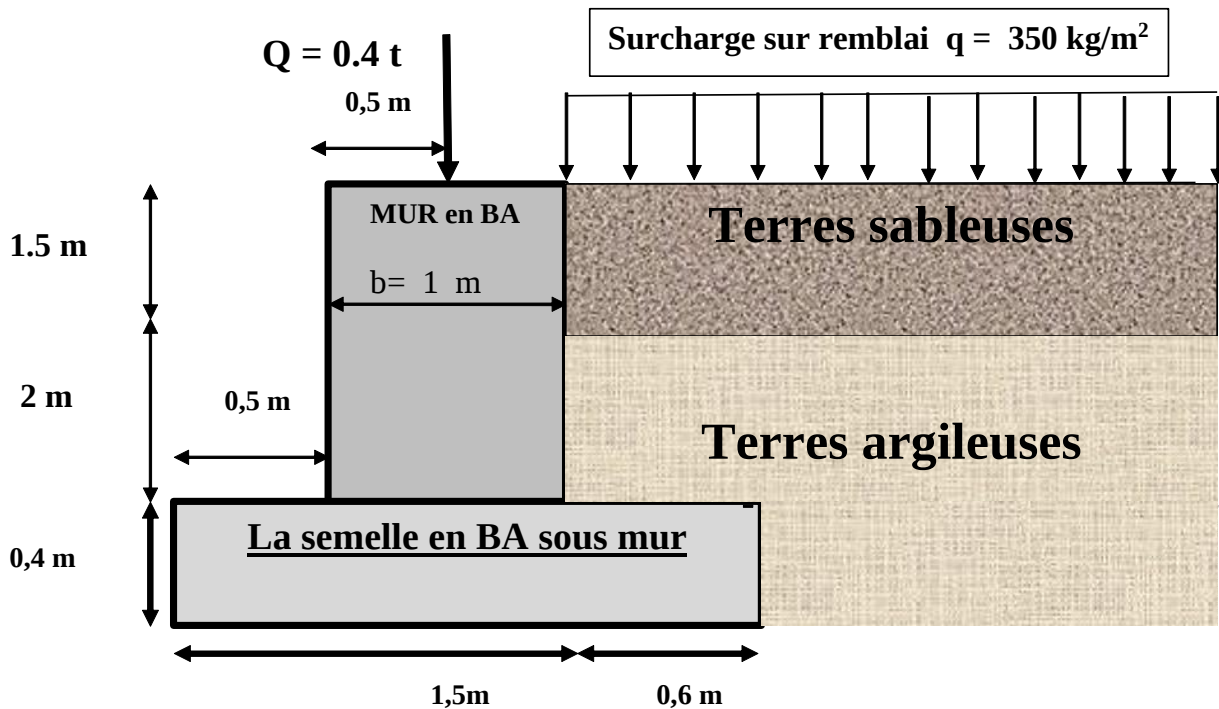
Vérification :

$$\sigma_{max} = 3 \sigma_A / 4 = 1,26 \text{ bar} \leq \bar{\sigma}_{sol} = 3,2 \text{ bars}$$

Vérifiée

VII. Exercice corrigé N° 07 : Vérification de la stabilité d'un mur (cas de deux couches différentes)

On se propose d'étudier la stabilité d'un mur de soutènement en béton armé, représenté sur la figure suivante, et qui est conçu pour retenir deux couches de terres.



DONNÉES DU PROJET :

Le poids spécifique des terres sableuses : $\Delta_1 = 1,75 \text{ t/m}^3$

Le poids spécifique des terres argileuses : $\Delta_2 = 1,9 \text{ t/m}^3$

Le poids spécifique du béton armé : $\rho = 2500 \text{ Kg / m}^3$

Angle du talus naturel des terres sableuses: $\varphi_1 = 33^\circ$

Coefficient de frottement : $f = 0,63$

Angle du talus naturel des terres argileuses:

$\varphi_2 = 26^\circ$

Coefficient de sécurité au renversement :

$K = 1,25$

Coefficient de sécurité au glissement :

$K_1 = 1,5$

- 1) Faire l'inventaire de toutes les charges appliquées au mur et représenter sur le schéma les charges calculées.
- 2) Calculer le moment stabilisant M_s et le moment de renversement M_r .
- 3) Vérifier la stabilité du mur au renversement et la stabilité du mur au glissement
- 4) Vérifier le non-poinçonnement sachant que la contrainte admissible du sol $= 4 \text{ bars}$

Questions 1-2-3

Projet :Exercice 07/ Etude de stabilité du mur de soutènement

$\Delta 1$	$\varphi 1$	Kp1	$\Delta 2$	$\varphi 2$	Kp2
1750	33	0,2952	1900	26	0,3910
Type de charge	Désignation de la charge	Formule de calcul	Valeur (Kg)	Distance /Joint A(m)	Moment/Joint A (Kg.m)
Charges Stabilisatrices	Poids du mur	$P_{mur}=2500 \times 1 \times 3,5 \times 1$	8750	1,00	8 750,00
	Charge Q sur le mur	$Q= 0,4 \times 1000$	400	1,00	400,00
	Poids de la semelle	$P_{sem}=2500 \times 2,1 \times 0,4 \times 1$	2100	1,05	2 205,00
	Poids des terres sableuses/semelle	$PT1/S=1750 \times 0,6 \times 1,5 \times 1$	1575	1,80	2 835,00
	Poids des terres argileuses/semelle	$PT2/S+1900 \times 0,6 \times 2 \times 1$	2280	1,80	4 104,00
	Surcharge q sur semelle	$Q/S=350 \times 0,6 \times 1$	210	1,80	378,00
	Somme des charges stabilisatrices : $\sum P \downarrow$		15315	Moment stabilisant Ms	18 672,0
Charges motrices	Poussée des terres sableuses P_{terre1}	$(Kp1 \times \Delta 1 \times H1^2)/2$	581,26	2,90	1 685,67
	Poussée des terres argileuses P_{terre2}	$(Kp2 \times \Delta 2 \times H2^2)/2$	2139,61	0,80	1 711,7
	Poussée engendrée par la surcharge des terres sableuses sur les terres argileuses	$PQ1/2=Kp2 \times \Delta 1 \times H1 \times H2$	2463,37	1,20	2 956,05
	Poussée engendrée par q sur les terres sableuses	$PQ1= Kp1 \times q \times H1 \times 1$	155,00	3,15	488,26
	Poussée engendrée par q sur les terres argileuses	$PQ2= Kp2 \times q \times H2 \times 1$	328,45	1,20	394,14
	Somme des charges motrices : $\sum F \leftarrow$		5667,70	Moment de renversement Mr	7236

Vérification de la stabilité au reversement: $Ms/Mr =$

2,58

On a : $Ms/Mr = 2,74 > K = 1,25$

Donc, le mur est stable au renversement

Vérification de la stabilité au glissement: $(\sum P \downarrow \times f)/(\sum F \leftarrow) =$

1,70

On a : $(\sum P \downarrow \times f)/(\sum F \leftarrow) = 1,70 > K1 = 1,50$

Donc, le mur est stable au glissement

Projet : Exercice 07/ Etude de stabilité du mur de soutènement

Questions 4

$\Delta 1$	$\varphi 1$	Kp1	$\Delta 2$	$\varphi 2$	Kp2
1750	33	0,2952	1900	26	0,3910
Type de charge	Désignation de la charge	Formule de calcul	Valeur (Kg)	Distance /Joint G(m)	Moment/Joint A (Kg.m)
Charges Stabilisatrices	Poids du mur	$2500 \times 1 \times 3,5 \times 1$	8750	0,05	437,50
	Charge Q sur le mur	$0,4 \times 1000$	400	0,05	20,00
	Poids de la semelle	$2500 \times 2,1 \times 0,4 \times 1$	2100	0,00	0,00
	Poids des terres sableuses/semelle	$1750 \times 0,6 \times 1,5 \times 1$	1575	0,75	-1 181,25
	Poids des terres argileuses/semelle	$1900 \times 0,6 \times 2 \times 1$	2280	0,75	-1 710,00
	Surcharge q sur semelle	$350 \times 0,6 \times 1$	210	0,75	-157,50
	Somme des charges stabilisatrices : $\Sigma P \downarrow$		15315		
Charges motrices	Poussée des terres sableuses	$(Kp1 \times \Delta 1 \times H1^2)/2$	581,26	2,90	1 685,67
	Poussée des terres argileuses	$(Kp2 \times \Delta 2 \times H2^2)/2$	2139,61	0,80	1 711,70
	Poussée engendrée par la surcharge des terres sableuses sur les terres argileuses	$Kp2 \times \Delta 1 \times H1 \times H2$	2463,37	1,20	2 956,05
	Poussée engendrée par q sur les terres sableuses	$Kp1 \times q \times H1 \times 1$	155,00	3,15	488,26
	Poussée engendrée par q sur les terres argileuses	$Kp2 \times q \times H2 \times 1$	328,45	1,20	394,14
				Moment de flexion	4645
Contrainte au point A en bar : $(\Sigma P \downarrow)/\Omega + (Mf \times y_{max})/I_{gx}$			1,36		
Contrainte au point B en bar $(\Sigma P \downarrow)/\Omega - (Mf \times y_{max})/I_{gx}$			0,1		
Contrainte maximale de compression appliquée sur le sol σ_{max} (en bar)			1,05		

Vérification :

$$\sigma_{max} = 1,05 \text{ bar} \leq \bar{\sigma}_{sol} = 4 \text{ bars}$$

Vérifiée

Schéma de
calcul
exercice 07-
Partie 01

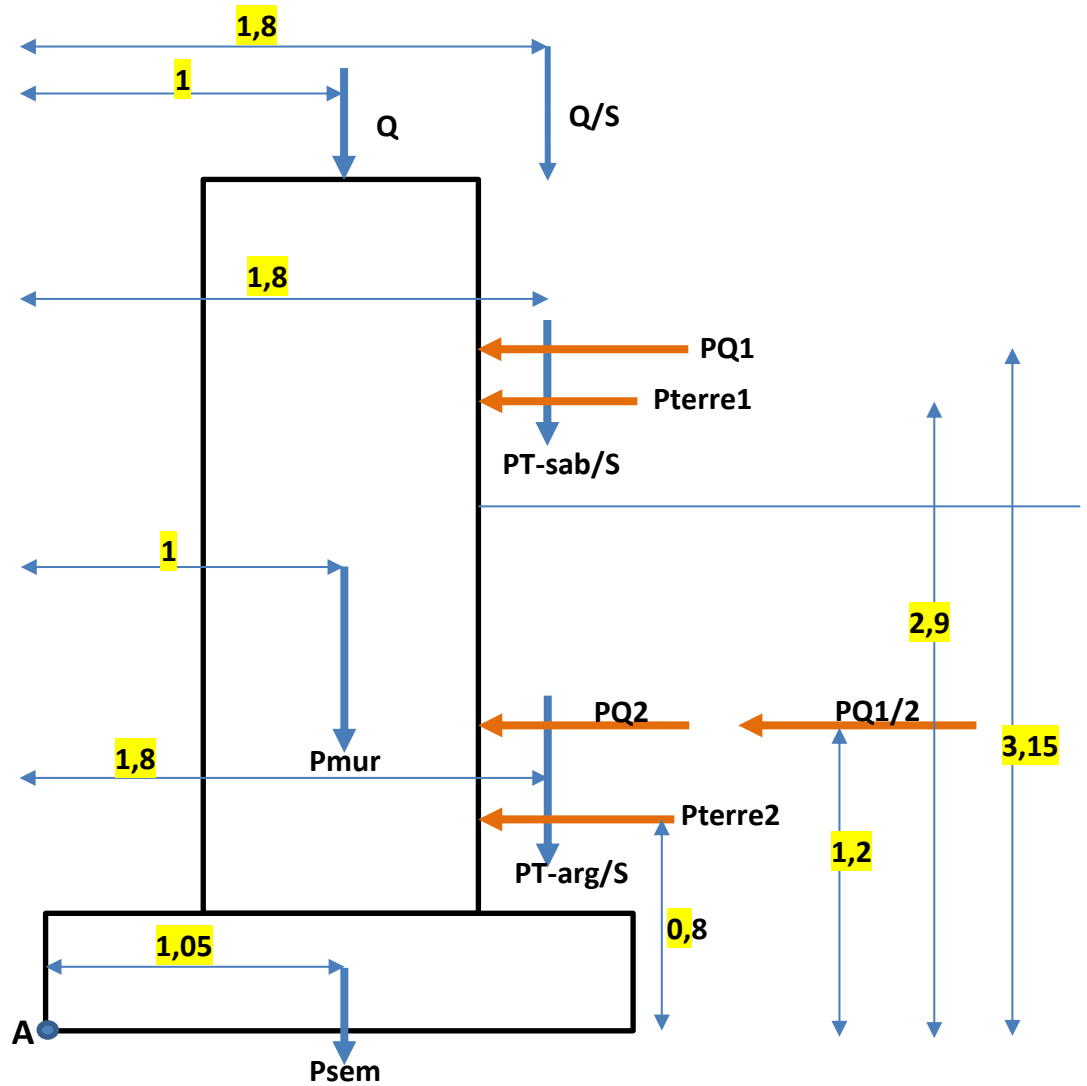
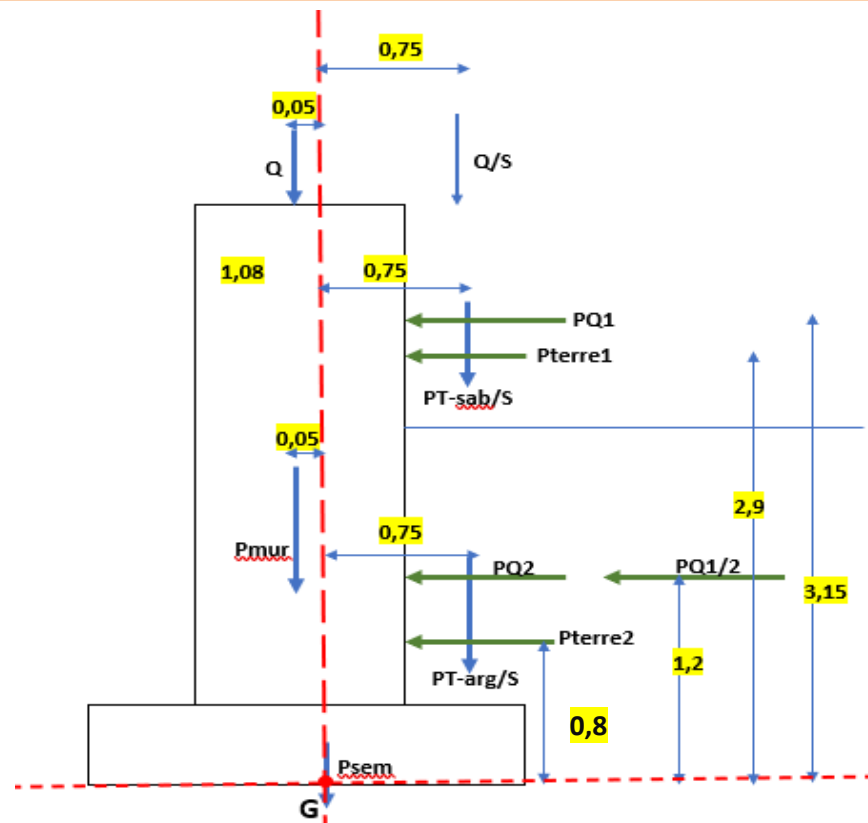


Schéma de
calcul
exercice 07-
Partie 02



VIII. Exercice corrigé N° 08 : Dimensionnement d'un mur en BA

On se propose de dimensionner le mur de soutènement en béton armé, représenté sur la figure suivante, et qui est conçu pour retenir des terres marneuses.

ON DONNE :

Le poids spécifique des terres marneuses: $\Delta = 2 \text{ t/m}^3$

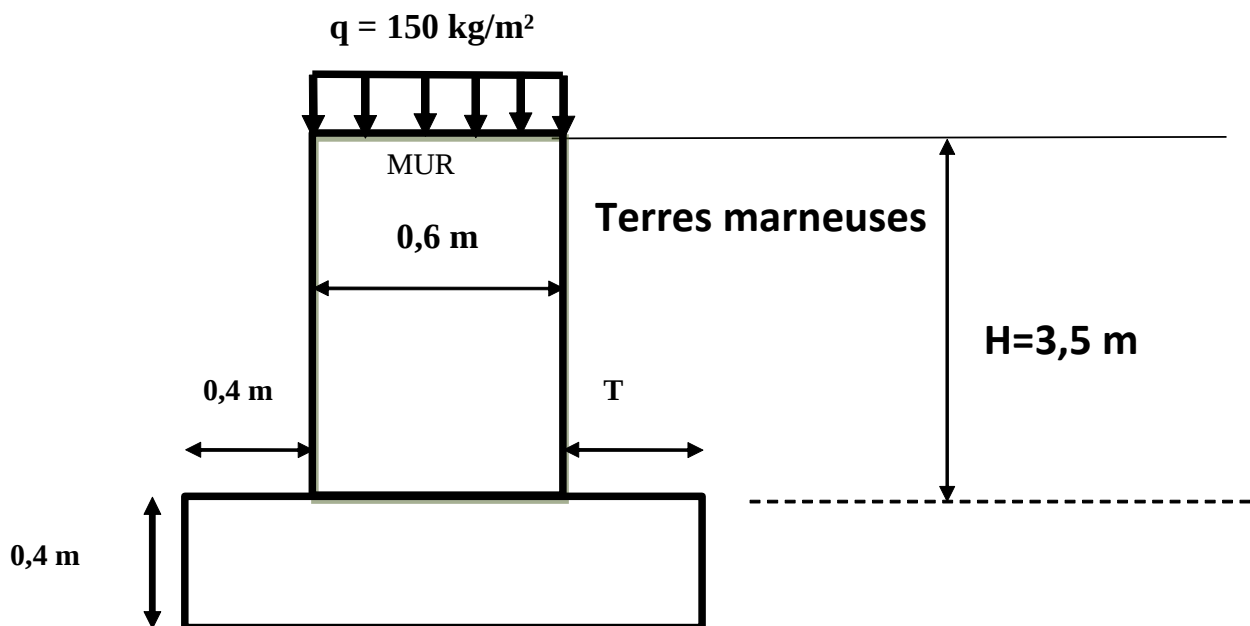
Le poids spécifique du béton armé : $\rho = 3000 \text{ Kg / m}^3$

Angle du talus naturel des terres marneuses: $\varphi = 20^\circ$

Coefficient de sécurité au renversement : $K = 1,45$

Coefficient de sécurité au glissement : $K_1 = 1,55$

Coefficient de frottement : $f = 0,72$



Travail demandé : Calculer la largeur du talon (T) de mur pour qu'il soit stable au renversement et au glissement.

Projet :Exercice 8/ Dimensionnement d'un mur de soutènement

Type de charge	Désignation de la charge	Formule de calcul	Δ	φ	Kp
			2000	20	0,4910
Charges Stabilisatrices	Poids du mur	$3000 \times 0,6 \times 3,5 \times 1$	6300	0,70	4 410,00
	Charge Q sur le mur	$150 \times 0,6 \times 1$	90	0,70	63,00
	Poids de la semelle	$3000 \times (1+T) \times 0,4 \times 1$	$1200 + 1200 T$	$(1+T)/2$	$600 T^2 + 1200T + 600$
	Poids des terres/semelle	$2000 \times 3,5 \times T \times 1$	$7000 T$	$1 + 0,5 T$	$3500 T^2 + 7000 T$
	Somme des charges stabilisatrices : $\sum P \downarrow$		$7590 + 8200 T$	Moment stabilisant Ms	$4100 T^2 + 8200 T + 5073$
Charges motrices	Poussée des terres	$(Kp \times \Delta \times H^2)/2$	7467,36	1,30	9 707,57
	Somme des charges motrices : $\sum F \leftarrow$		7 467,36	Moment de renversement Mr	9 707,57

Calcul de T au renversement:

Pour que le mur soit stable au renversement, il faut, au moins, que $M_s/M_r = K$

C'est-à-dire : $(4100 T^2 + 8200 T + 5073)/(9708) = 1,45$

Donc : $4100 T^2 + 8200 T - 9004 = 0$

Equation 2ème degré

La résolution de cette équation nous donne : $T_r = 0,79 \text{ m}$

Dimensionnement du mur au glissement:

Pour que le mur soit stable au glissement, il faut, au moins, que: $(\sum P \downarrow \times f)/(\sum F \leftarrow) = K_1$

C'est-à-dire : $(8200 T + 7590) \times 0,72 / (7468) = 1,55$

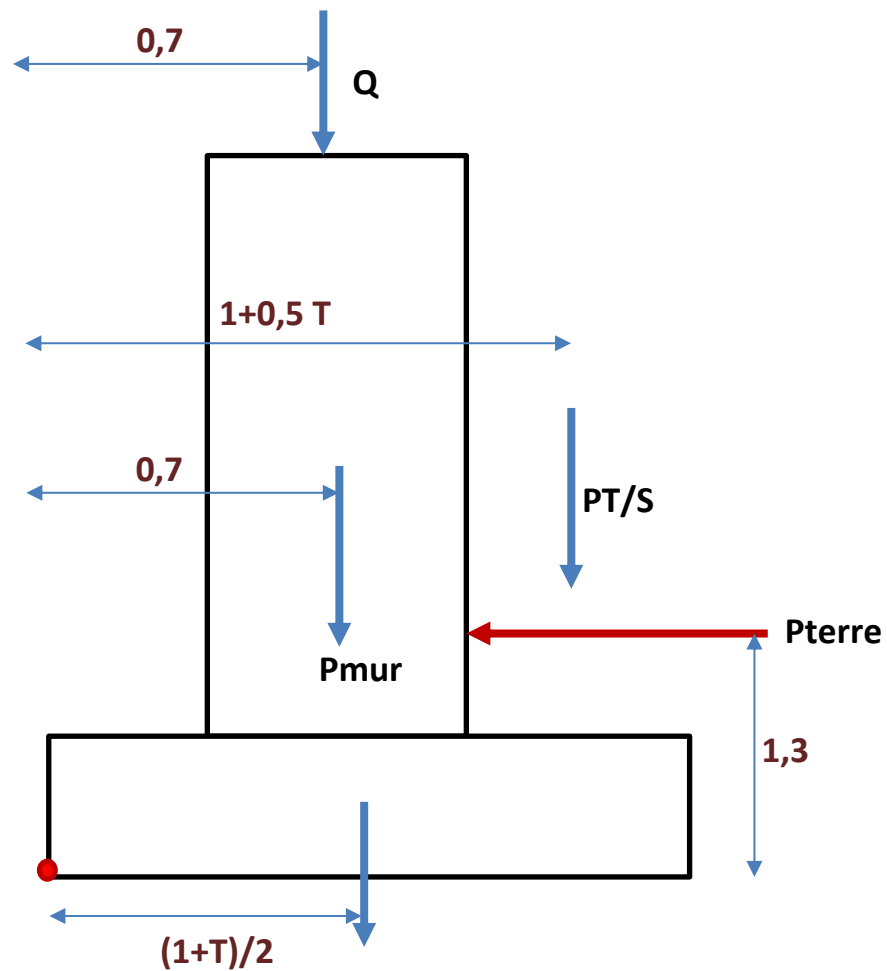
Donc : $T = ((1,55 \times 7468 / 0,72) - 7590) / 8200$

(Equation 1er degré)

La résolution de cette équation nous donne : $b_g = 1,04 \text{ m}$

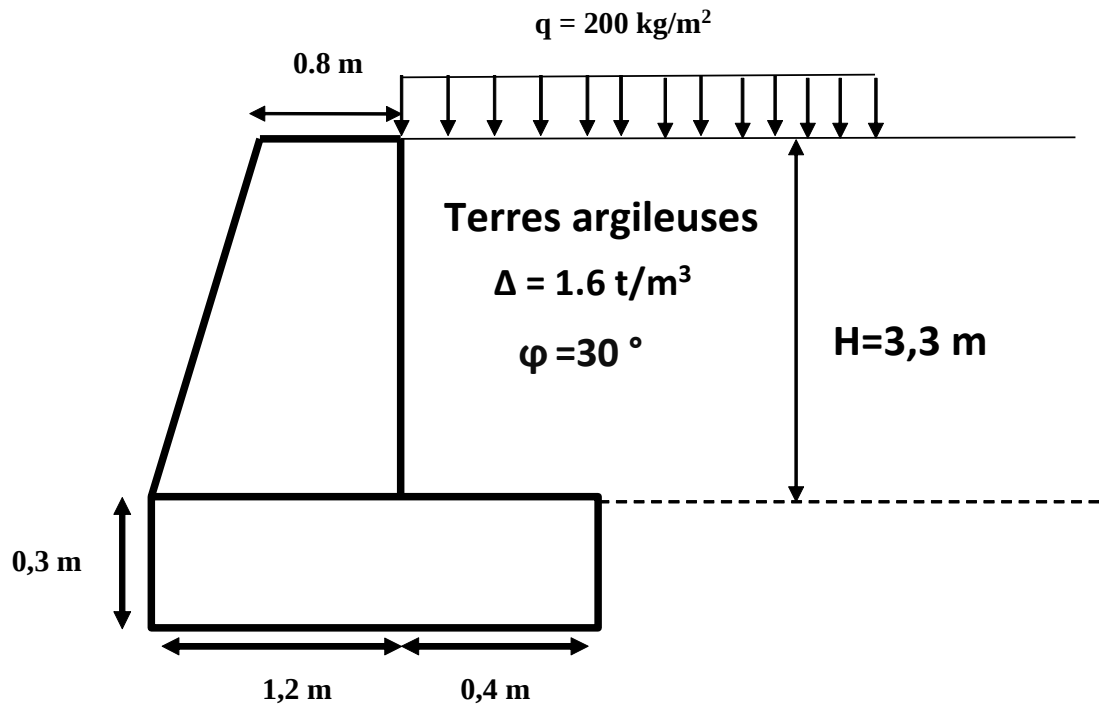
On prendra : $T = \sup (T_r, T_g) = 1,04 \text{ m}$, soit $T = 1,05 \text{ m}$

Schéma de calcul- Exercice 08



IX. Exercice corrigé N° 09 : Calcul du poids volumique d'un mur

Calculer le poids volumique minimal que doit avoir le mur de soutènement, en béton armé, représenté sur la figure suivante, et qui est conçu pour retenir des terres argileuses.



On donne :

Coefficient de sécurité au renversement : $K = 1,33$

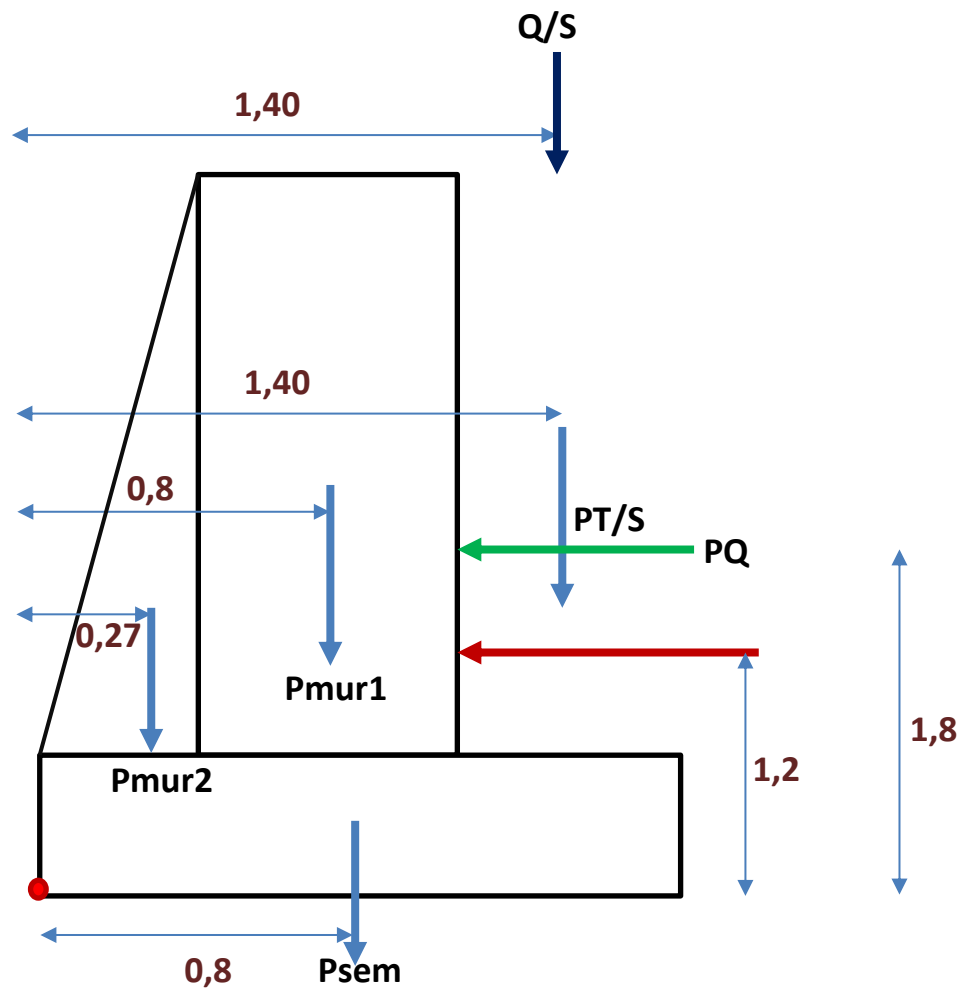
Coefficient de sécurité au glissement : $K_1 = 1,50$

Coefficient de frottement : $f = 0,63$

NB : LE POIDS DOIT ÊTRE CALCULÉ AU RENVERSEMENT ET AU GLISSEMENT

BON COURAGE

Schéma de calcul-
Exercice 09



Projet :Exercice 09/ Etude de stabilité du mur de soutènement

Soit ρ le poids du mur

			Δ	φ	Kp
			1600	30	0,3338
Type de charge	Désignation de la charge	Formule de calcul	Valeur (Kg)	Distance /Joint A(m)	Moment/Joint A (Kg.m)
Charges Stabilisatrices	Poids du mur partie rectangulaire	$P_{mur1} = \rho \times 0,8 \times 3,3 \times 1$	2,64 ρ	0,80	2,112 ρ
	Poids du mur partie triangulaire	$P_{mur2} = (\rho \times 0,4 \times 3,3 \times 1) / 2$	0,66 ρ	0,27	0,18 ρ
	Poids de la semelle	$P_{sem} = \rho \times 1,6 \times 0,3 \times 1$	0,48 ρ	0,80	0,384 ρ
	Poids des terres/semelle	$P_{T/S} = 1600 \times 0,4 \times 3,3 \times 1$	2112	1,40	2956,8
	Surcharge q sur semelle	$Q/S = 200 \times 0,4 \times 1$	80	1,40	112
	Somme des charges stabilisatrices : $\sum P \downarrow$		3,78 ρ + 2192	Moment stabilisant M_s	3069 + 2,67 ρ
Charges motrices	Poussée des terres	$P_{terre} = (K_p \times \Delta \times H^2) / 2$	3461,05	1,20	4 153,26
	Poussée engendrée par q	$PQ = (K_p \times q \times H \times 1)$	240,35	1,80	432,63
	Somme des charges motrices : $\sum F \leftarrow$		3701,40	Moment de renversement M_r	4585,89

Calcul de ρ au renversement:

Pour que le mur soit stable au renversement, il faut, au moins, que $M_s/M_r = K$

C'est-à-dire : $(3069 + 2,67 \rho) / (4586) = 1,33$

Equation 1er degré

$\rho = (1,33 \times 4586 - 3069) / 2,67$

La résolution de cette équation nous donne : $\rho_r = 1135 \text{ Kg/m}^3$

Calcul de ρ au glissement:

Pour que le mur soit stable au glissement, il faut, au moins, que: $(\sum P \downarrow \times f) / (\sum F \leftarrow) = K_1$

C'est-à-dire : $(3,78 \rho + 2192) \times 0,63 / (3702) = 1,5$

Equation 1er degré

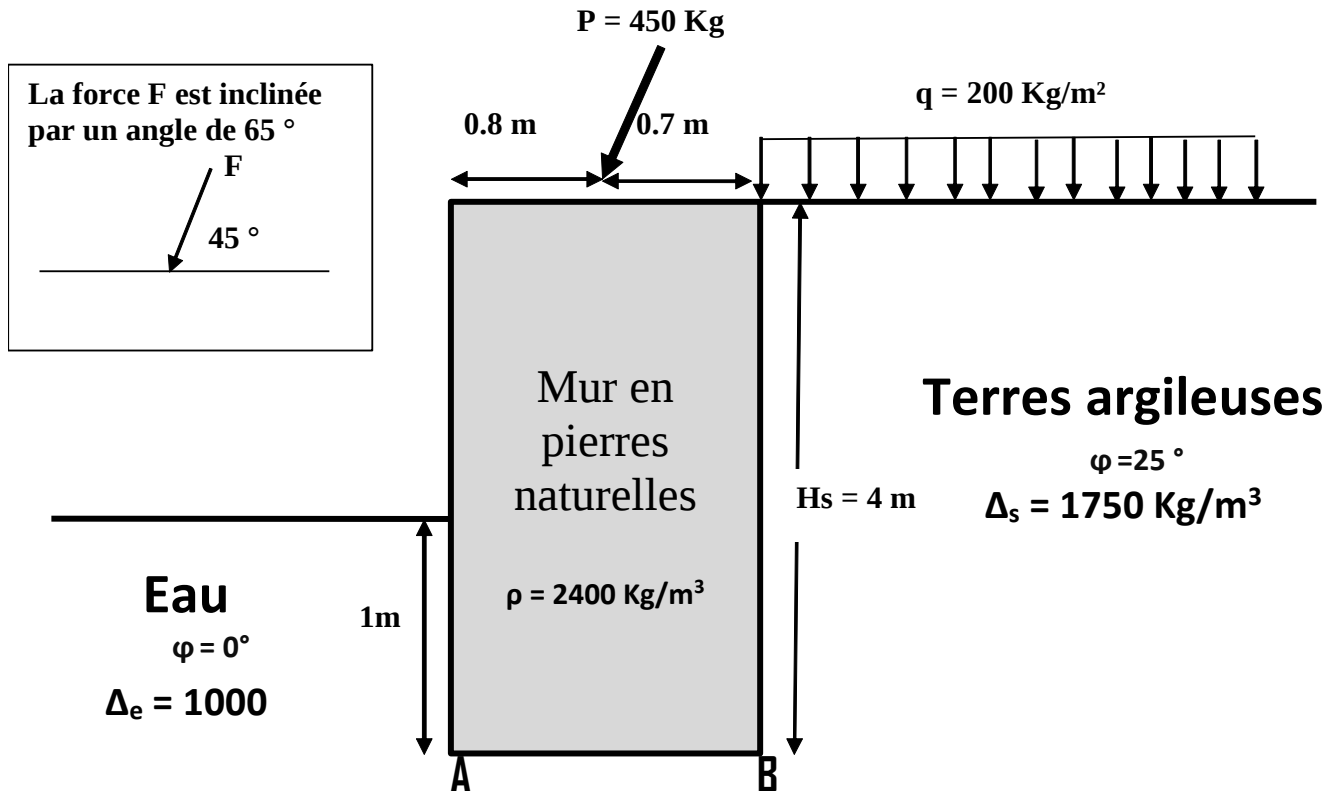
$\rho = ((1,5 \times 3702 / 0,63) - 2192) / 3,78$

La résolution de cette équation nous donne : $\rho_g = 1752 \text{ Kg/m}^3$

Le poids du béton armé doit être supérieur à 1752 Kg/m³ pour assurer la stabilité du mur

X. Exercice corrigé N° 10 : Vérification de la stabilité d'un mur(Cas d'une butée)

Soit à étudier la stabilité du mur représenté sur le schéma suivant :



On donne : $K=2$ $K1=2$ $f = 0.7$

L'eau applique une butée sur le mur.

- 1) Vérifier la stabilité du mur au renversement.
- 2) Vérifier la stabilité du mur au glissement :

Projet :Exercice 10/ Etude de stabilité du mur de soutènement

Questions 1 et 2

Questions 1 et 2			Δ	φ	Kp
			1750	25	0,4064
Type de charge	Désignation de la charge	Formule de calcul	Valeur (Kg)	Distance /Joint A(m)	Moment/Joint A (Kg.m)
Charges Stabilisatrices	Poids du mur	2400 x 1,5 x 4 x 1	14400	0,75	10 800
	Composante verticale de P (Py)	P sin 45 = 450 sin 45	318,2	0,80	254,56
	Butée eau	(1 x 1000 x 1 ²)/2 = (KB x Δe x He ²)/2	2450	0,33	816,67
	Somme des charges verticales		14718,2	Moment stabilisant Ms	11 871,2
Charges motrices	Poussée des terres	(Kp x Δ x H ²)/2 = (0,406 x 1750 x 4 ²)/2	5689,95	1,33	7 586,60
	Composante horizontale de P (Px)	P cos 45 = 450 cos 45	318,20	4,00	1 272,79
	Poussée engendrée par q	Kp x q x H x 1 = 0,406x 200 x 4	325,14	2,00	650,28
	Somme des charges horizontales - Butée		3883,29	Moment de renversement Mr	7586,60
Vérification de la stabilité au reversement: Ms/Mr =					1,56

On a : Ms/Mr = 1,56 < K = 2

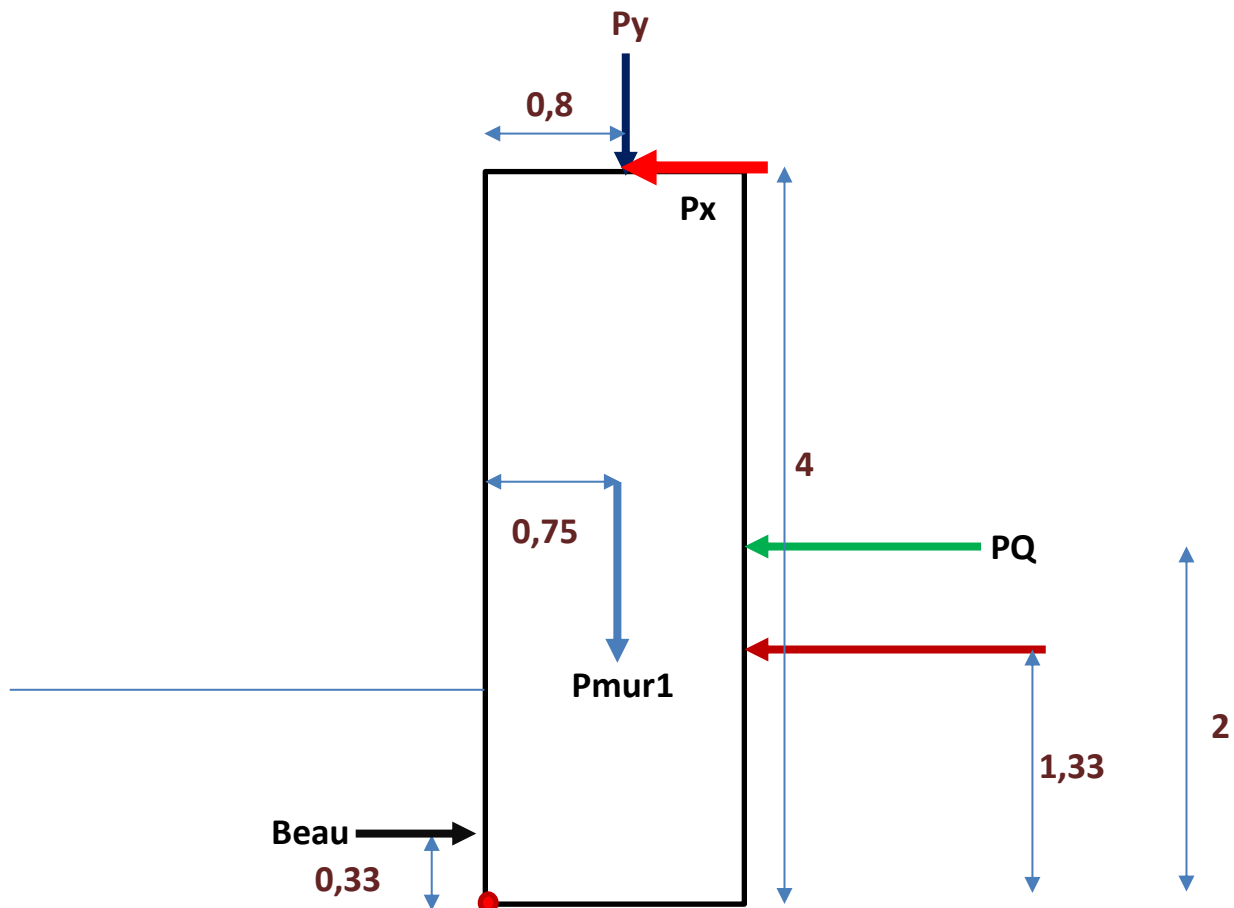
Donc, le mur n'est pas stable au renversement

Vérification de la stabilité au glissement: $(\sum P \downarrow \times f)/(\sum F \leftarrow - \text{Butée}) =$

On a : $(\sum P \downarrow \times f)/(\sum F \leftarrow - \text{Butée}) = 2,65 > K1 = 2$

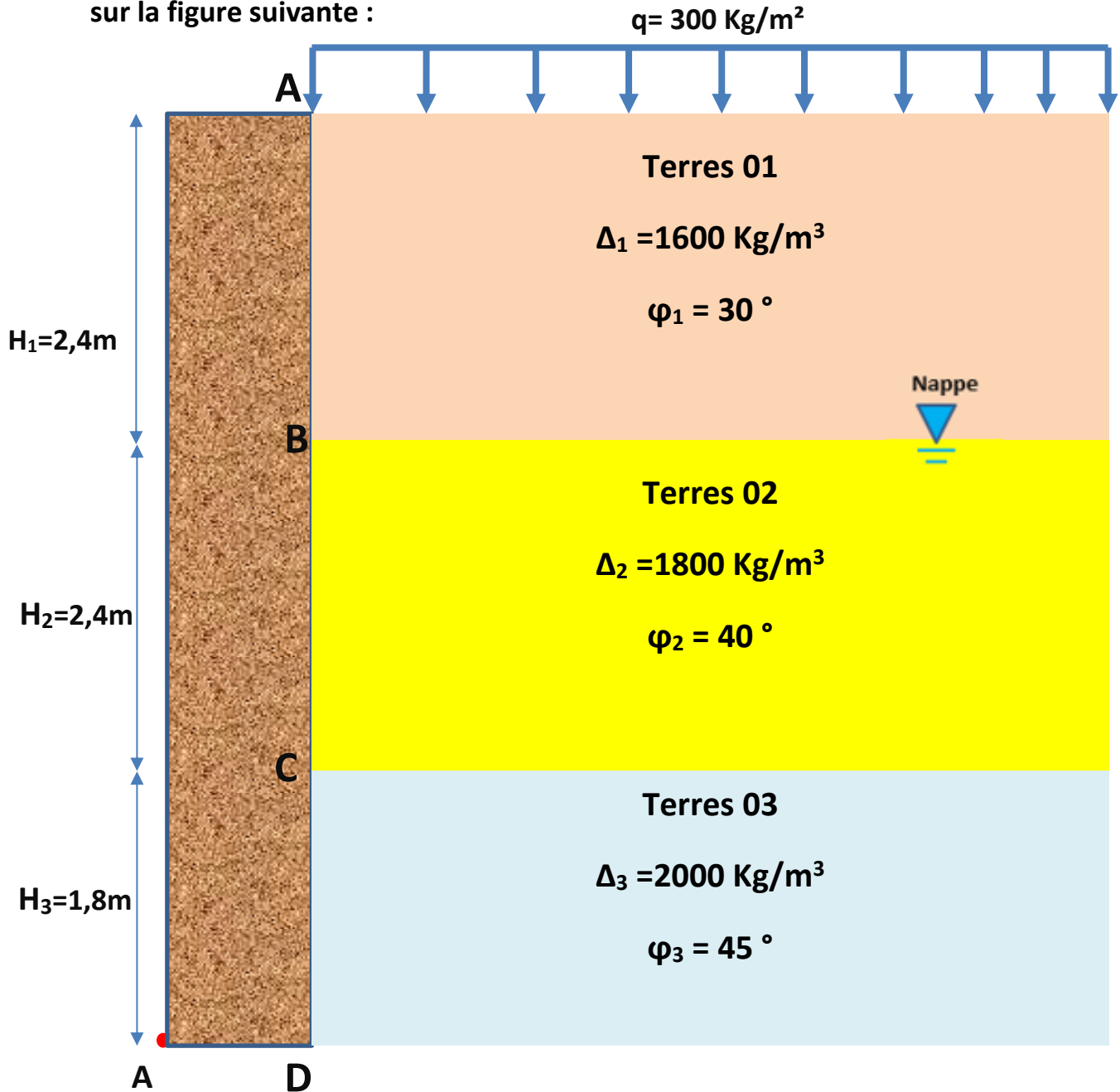
Donc, le mur est stable au glissement

Schéma de calcul- Exercice 10



XI. Exercice corrigé N° 11 : Calcul des poussées appliquées sur un mur (3 couches avec présence de la nappe)

Calculer et représenter les poussées appliquées sur l'écran vertical représenté sur la figure suivante :

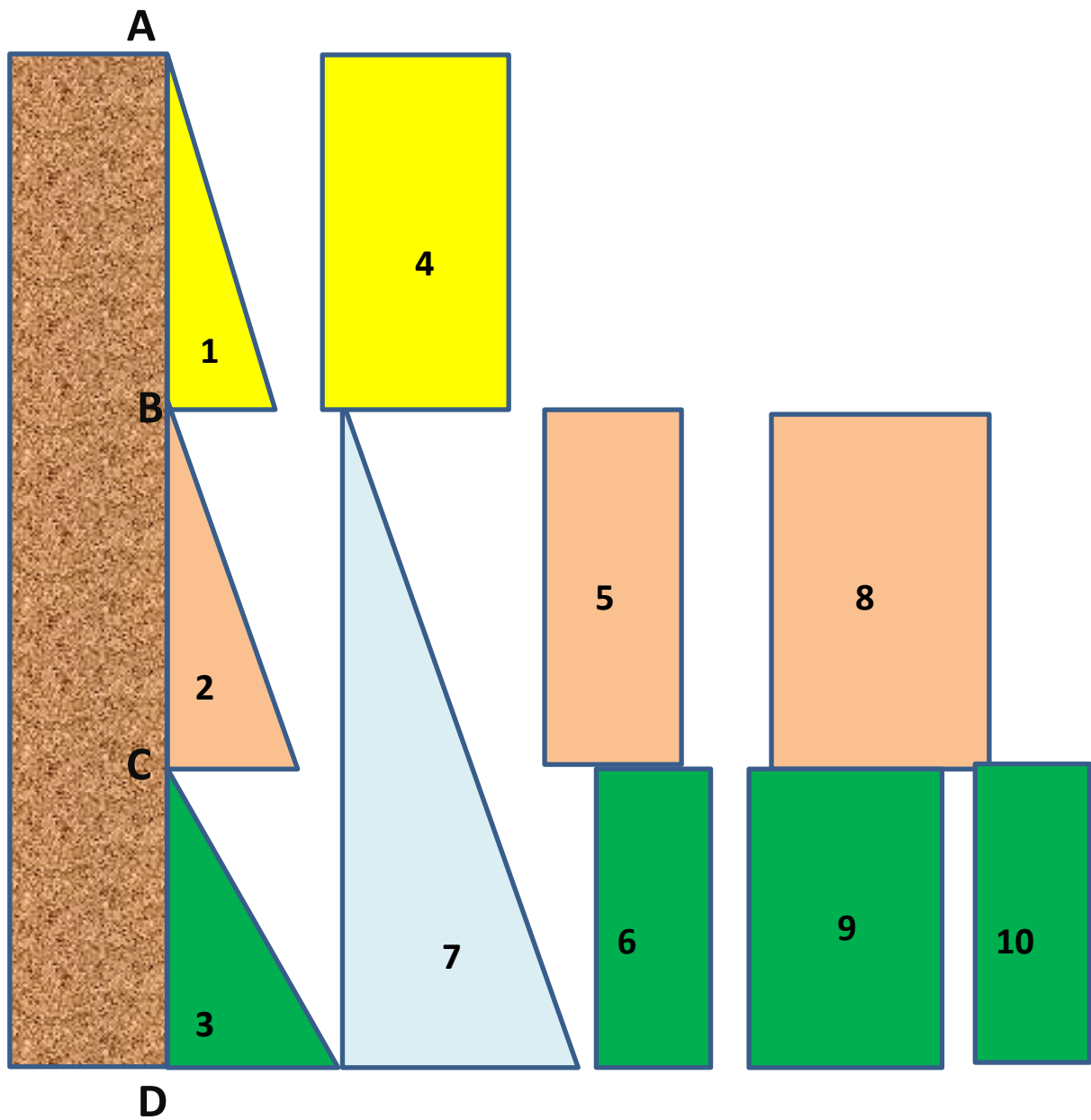


Solution (Exercice 11)

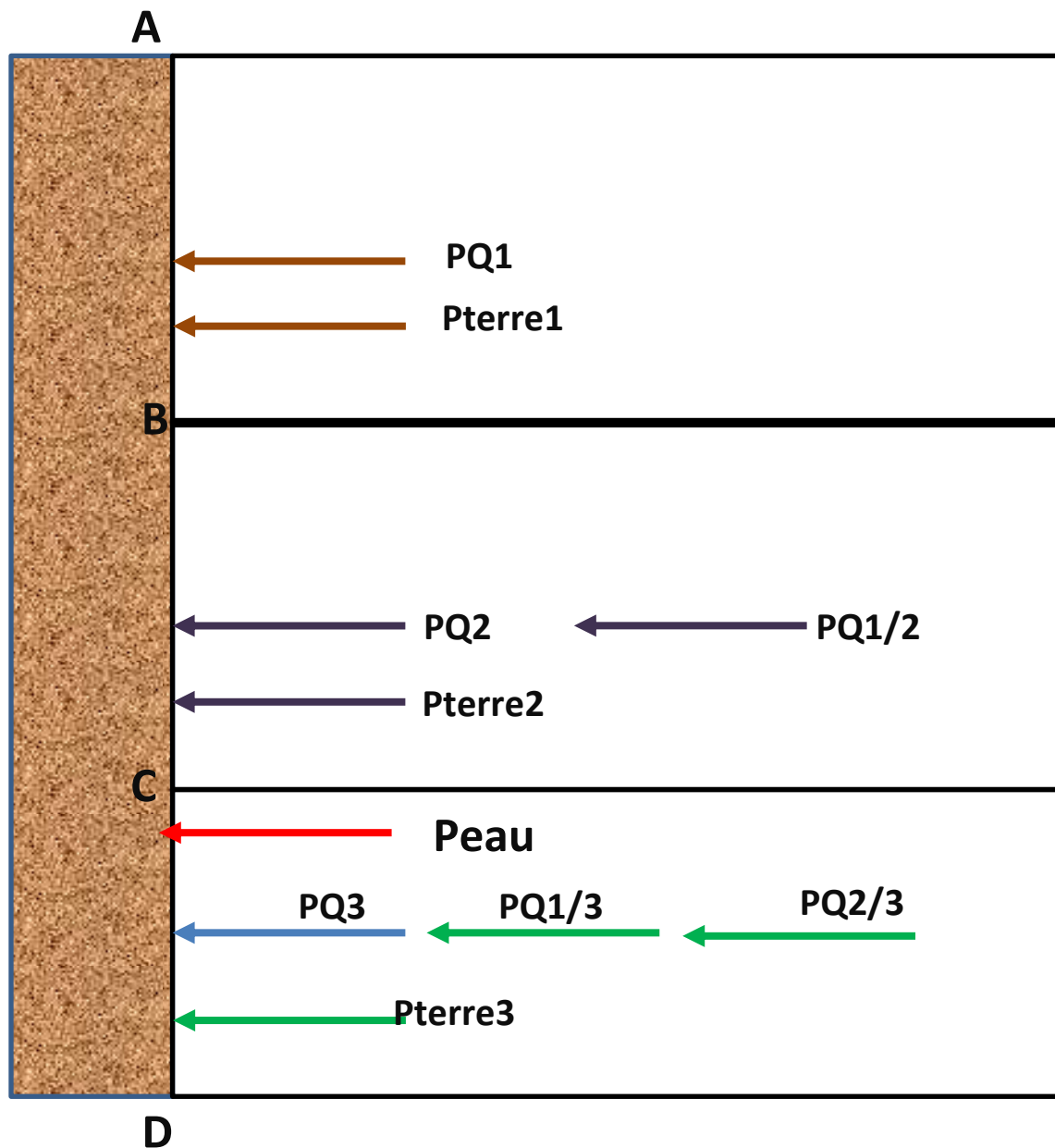
Δ_{eau}	1000	q	1000	Niveau nappe	2,4
Δ_1	1600	KP1	0,334	H1	2,4
Δ_2	1800	KP2	0,218	H2	2,4
Δ_3	2000	KP3	0,172	H3	1,8

Désignation	Points	Pressions(Kg/m ²)
1) Poussée des terres 01 Pterre01 (Triangle)	A	0,00
	B	$Kp_1 \cdot \Delta_1 \cdot H_1 = 1\,281,87$
2) Poussée des terres 02 : Pterre 02 (Triangle)	B	0,00
	C	$Kp_2 \cdot (\Delta_2 - \Delta_{\text{eau}}) \cdot H_2 = 418,18$
3) Poussée des terres 03 : Pterre 03 (Triangle)	C	0,00
	D	$Kp_3 \cdot (\Delta_3 - \Delta_{\text{eau}}) \cdot H_3 = 309,38$
4) Poussée engendrée par la surcharge sur des terres 01 PQ1 (Rectangle)	A	$Kp_1 \cdot q = 100,15$
	B	$Kp_1 \cdot q = 100,15$
5) Poussée engendrée par la surcharge sur des terres 02 PQ2 (Rectangle)	B	$Kp_2 \cdot q = 65,34$
	C	$Kp_2 \cdot q = 65,34$
6) Poussée engendrée par la surcharge sur des terres 03 PQ3 (Rectangle)	C	$Kp_3 \cdot q = 51,56$
	D	$Kp_3 \cdot q = 51,56$
7) Poussée hydrostatique (Triangle)	B	0,00
	D	$\Delta_{\text{eau}} \cdot (H_2 + H_3) = 4\,200,00$
8) Poussée engendrée par la surcharge des terres 01 sur les terres 02 PQ1/2 (Rectangle)	B	$Kp_2 \cdot \Delta_1 \cdot H_1 = 836,36$
	C	$Kp_2 \cdot \Delta_1 \cdot H_1 = 836,36$
9) Poussée engendrée par la surcharge des terres 01 sur les terres 03 PQ1/3 (Rectangle)	C	$Kp_3 \cdot \Delta_1 \cdot H_1 = 660,02$
	D	$Kp_3 \cdot \Delta_1 \cdot H_1 = 660,02$
10) Poussée engendrée par la surcharge des terres 02 sur les terres 03 PQ2/3 (Rectangle)	C	$Kp_3 \cdot (\Delta_2 - \Delta_{\text{eau}}) = 330,01$
	D	$Kp_3 \cdot (\Delta_2 - \Delta_{\text{eau}}) = 330,01$

Diagramme des pressions



Désignation	Résultante des pressions-Forces	Distance /joint A	Moment/Joint A (Kg.m)
1) Poussée des terres 01 Pterre01 (Triangle)	$Kp_1 \cdot \Delta_1 \cdot H_1^2 / 2 = 1\,538,24$	5,00	7 691,22
2) Poussée des terres 02 : Pterre 02 (Triangle)	$Kp_2 \cdot (\Delta_2 - \Delta_{eau}) \cdot H_2^2 / 2 = 501,82$	2,60	1 304,72
3) Poussée des terres 03 : Pterre 03 (Triangle)	$Kp_3 \cdot (\Delta_3 - \Delta_{eau}) \cdot H_3^2 / 2 = 278,45$	0,60	167,07
4) Poussée engendrée par la surcharge sur des terres 01 PQ1 (Rectangle)	$Kp_1 \cdot q \cdot H_1 = 240,35$	5,40	1 297,89
5) Poussée engendrée par la surcharge sur des terres 02 PQ2 (Rectangle)	$Kp_2 \cdot q \cdot H_2 = 156,82$	3,00	470,45
6) Poussée engendrée par la surcharge sur des terres 03 PQ3 (Rectangle)	$Kp_3 \cdot q \cdot H_3 = 92,82$	0,90	83,53
7) Poussée hydrostatique (Triangle)	$(\Delta_{eau} \cdot (H_2 + H_3)^2) / 2 = 8\,820,00$	1,40	12 348,00
8) Poussée engendrée par la surcharge des terres 01 sur les terres 02 PQ1/2 (Rectangle)	$Kp_2 \cdot \Delta_1 \cdot H_1 \cdot H_2 = 2\,007,26$	3,00	6 021,79
9) Poussée engendrée par la surcharge des terres 01 sur les terres 03 PQ1/3 (Rectangle)	$Kp_3 \cdot \Delta_1 \cdot H_1 \cdot H_3 = 1\,188,03$	0,90	1 069,23
10) Poussée engendrée par la surcharge des terres 02 sur les terres 03 PQ2/3 (Rectangle)	$Kp_3 \cdot (\Delta_2 - \Delta_{eau}) \cdot H_2 \cdot H_3 = 594,02$	0,90	534,62
	15418	Moment de renversement Mr	30989



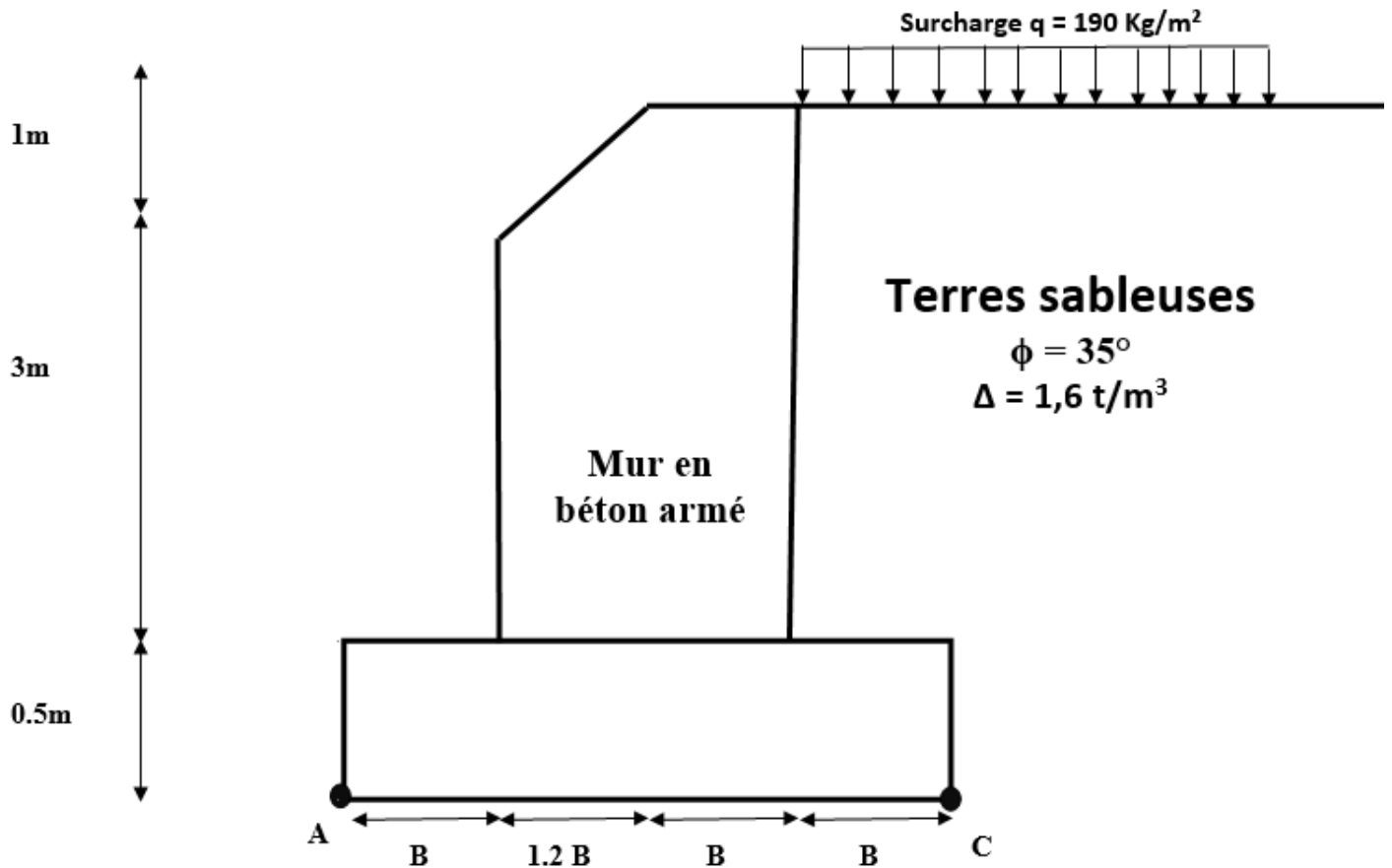
Remarque :

On peut sommer les forces qui s'appliquent sur le même point :

- $PQ2$ et $PQ1/2$
- $PQ3$ et $PQ1/3$ et $PQ2/3$

XII. Evaluation N°1

On se propose de dimensionner un de soutènement en béton armé, représenté sur la figure suivante, et qui est conçu pour soutenir des terres sableuses.



Données du projet :

Le poids spécifique du béton armé : $\rho = 2500 \text{ Kg/m}^3$

Coefficient de sécurité au renversement : $K = 1,3$

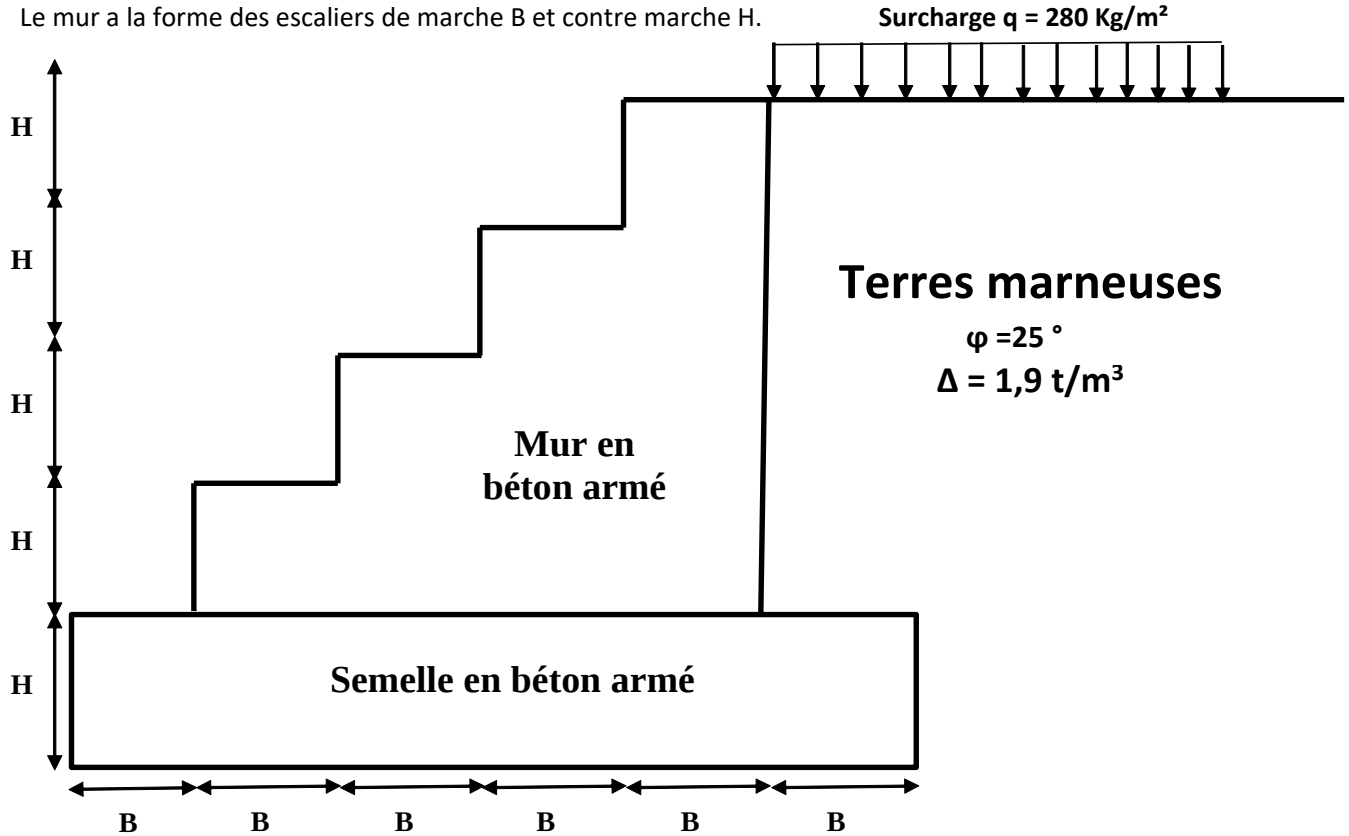
Coefficient de sécurité au glissement : $K_1 = 1,65$

- 1) Calculer la dimension B qui assure la stabilité du mur au renversement et au glissement.
- 2) Si $B = 0,5 \text{ m}$; Calculer les contraintes en points A et C de la surface portante de la semelle et tracer le diagramme correspondant.
- 3) Sachant que la contrainte admissible du sol = 3 bars, vérifier le non-poinçonnement du mur dans le sol

XIII. Evaluation N°2

On se propose de dimensionner le mur de soutènement en béton armé, représenté sur la figure suivante, et qui est conçu pour soutenir des terres marneuses.

Le mur a la forme des escaliers de marche B et contre marche H.



ON DONNE :

Le poids spécifique du béton armé : $\rho = 2500 \text{ Kg/m}^3$

Coefficient de sécurité au renversement : $K = 1,25$

Coefficient de sécurité au glissement : $K_1 = 1,5$

Coefficient de frottement : $f = 0,7$

$H = 0,45 \text{ m}$

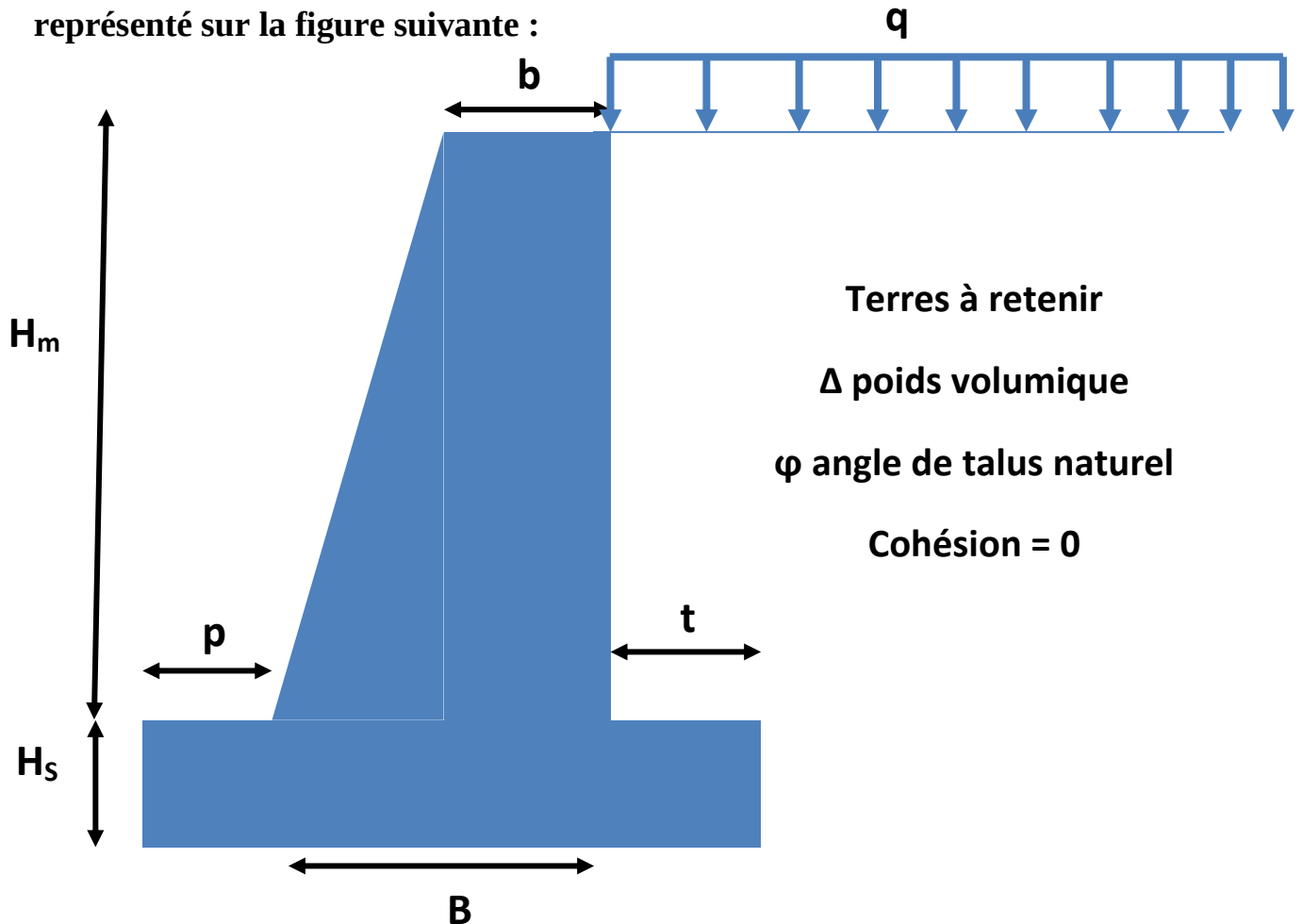
La longueur du mur = 1 m

Le dimensionnement fait par l'un de vos collègues a donné : $B = 0,3 \text{ m}$

- 1) Vérifier la stabilité au renversement et au glissement du mur dimensionné par votre collègue.
- 2) En cas d'instabilité du mur, calculer la dimension B qui assure la stabilité du mur au renversement et au glissement

XIV. Evaluation N°3

Sur une feuille Excel, préparer une feuille de calcul qui permet de vérifier la stabilité totale (Renversement, glissement, poinçonnement) du mur représenté sur la figure suivante :



Données :

- K : Coefficient de sécurité au renversement
- K_1 : coefficient de sécurité au glissement
- f : coefficient de frottement
- ρ : Poids volumique du béton armé
- σ_{sol} : Contrainte admissible du sol

Bibliographie :

Ouvrage	Auteurs	Édition
FONDATIONS ET OUVRAGES EN TERRE- Manuel professionnel de géotechnique du BTP	Bertrand HUBERT Bruno PHILIPPONNAT Olivier PAYANT Moulay ZERHOUNI	
Cours Géotechnique-Ecole Mohammedia des ingénieurs	Mr RAMADANE	Eyrolles
Aide-mémoire de MÉCANIQUE DES SOLS	Yves Berthaud Patrick de Buhan Nicolas Schmitt	Dunod
Cours de la mécanique des sols-OFPPPT	CDC BTP OFPPT	