Chapitre 1

Murs de soutènement (Murs poids)

1. Introduction :

Ce premier chapitre a pour objet la justification de la stabilité des murs poids (mur de soutènement en béton armé) selon les principes de calcul aux états limites avec facteurs partiels définis dans l'Eurocode 7.

2. Définition des murs poids :

C'est le type d'ouvrage le plus classique et le plus ancien. Ils peuvent être réalisés en béton non armé ou armé, en maçonnerie. Ils peuvent être constitués d'un assemblage de pierres sèches, de gabions ou d'éléments préfabriqués (blocs, caissons ou boîtes remplis de terre,...).

La stabilité de ces murs est assurée par leur poids propre

Mur en pierre sèche

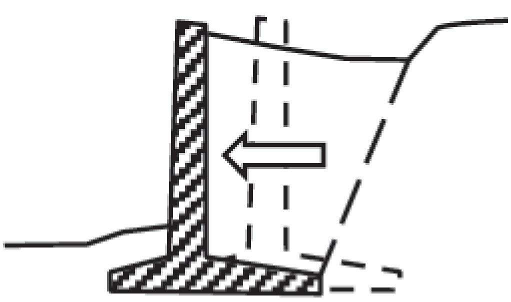
Mur en gabion

Mur cantilever en béton armé

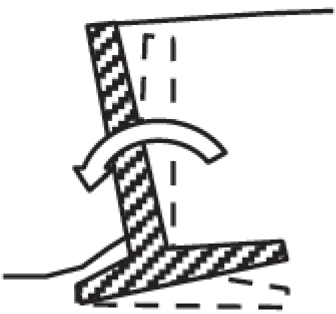
Mur poids en éléments préfabriqués

3. Justification de la stabilité :

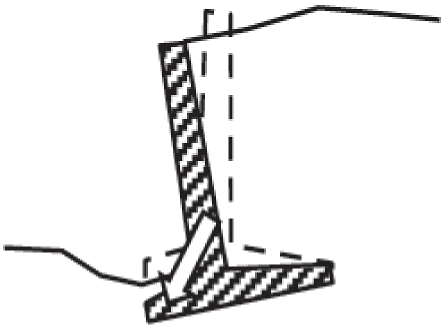
Parmi les modes de rupture possibles des murs de soutènement, on distingue la stabilité interne (rupture des éléments constitutifs de l'ouvrage sous l'action des forces extérieures), et la stabilité externe (renversement, instabilité d'ensemble, poinçonnement, glissement). La vérification doit être conduite pour chacun d'entre eux.



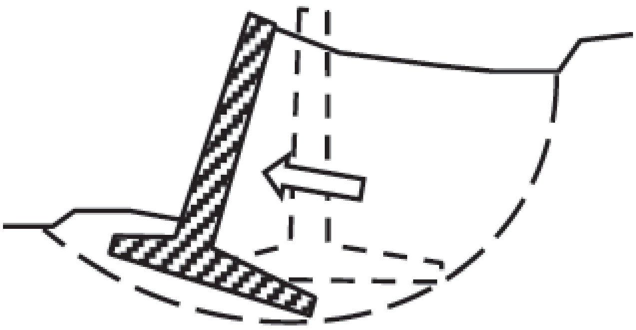
Glissement



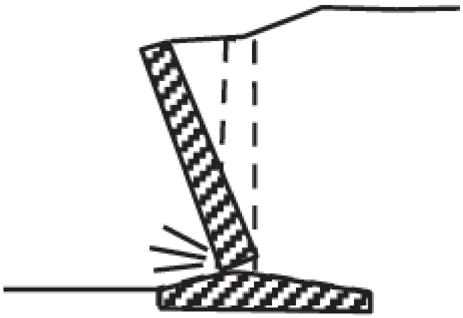
Renversement



Poinçonnement



Instabilité d’ensemble

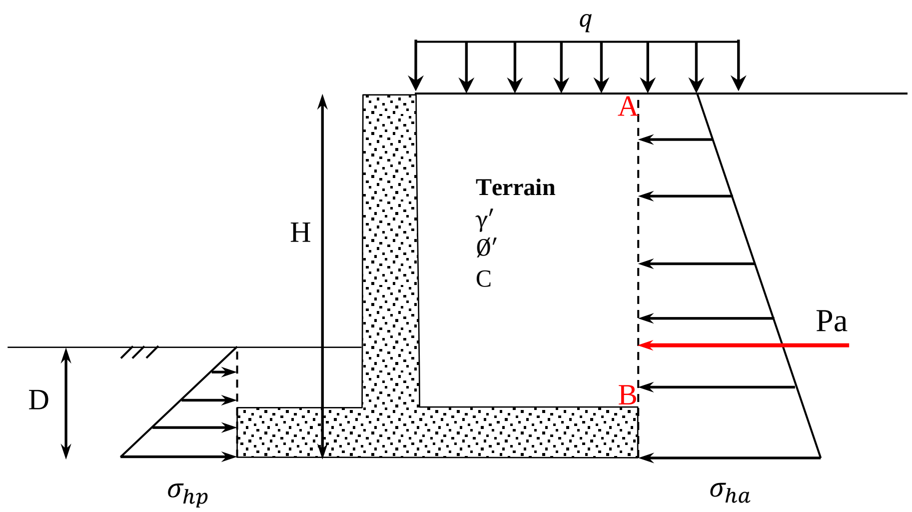


Rupture de mur

4. Justification de la stabilité externe :

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

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



La contrainte verticale :

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

La contrainte horizontale :

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

$$\text{avec : } K_0 = 1 - \sin Ø$$

<u>Coté Amont :</u> le mur se déplace vers l'extérieure : σ'_h va diminuer jusqu'à σ'_{ha}

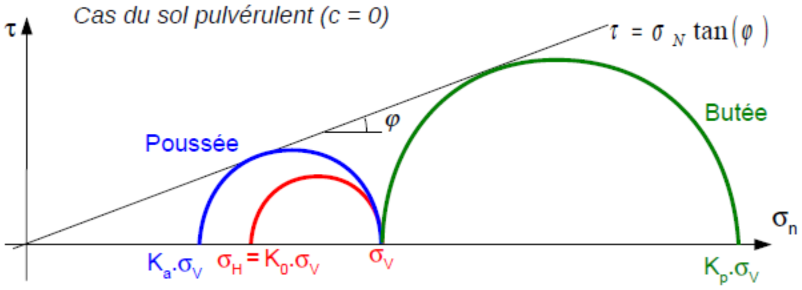
La contrainte horizontale à l'équilibre de poussée est : $\sigma'_{ha} = K_a \sigma'_v - 2C'\sqrt{K_a}$

Avec : $K_a = \tan^2\left(45 - Ø/_2\right)$: coefficient de poussée

<u>Coté Aval :</u> le mur se déplace vers l'intérieure : σ'_h va augmenter jusqu'à σ'_{hp}

La contrainte horizontale à l'équilibre de butée est : $\sigma'_{hp} = K_p \sigma'_v + 2C'\sqrt{K_P}$

Avec : $K_P = \tan^2\left(45 + {\varnothing}/{2}\right)$: coefficient de butée



Dans ce cas, la force de poussée est :

$$P_a = \int_0^H \sigma'_{ha}\,dz = \frac{1}{2}\,\gamma'.\ H^2.K_a + q\,H - 2c'\sqrt{K_a}\,.H$$

Et la force de butée :

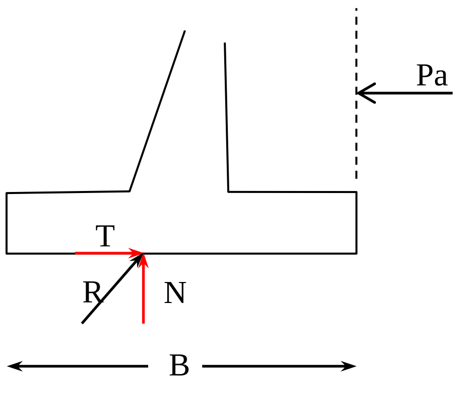
$$P_p = \int_0^D \sigma'_{hp}\,dz$$

Selon l'Eurocode 7, la justification de la stabilité externe de mur de soutènement consiste à vérifier :

- La stabilité au glissement à l'ELU
- La stabilité au renversement par limitation de l'excentrement à l'ELU et l'ELS
- La stabilité au poinçonnement (défaut de capacité portante) à l'ELU et l'ELS

4.1. La stabilité au glissement :

A. Méthode classique :



$$F_G = \frac{\sum \text{forces stabilisatrices}}{\sum \text{forces déstabilisatrices}}$$

Forces stabilisatrices :

$$\boldsymbol{T = \tau\,A}$$

$$\boldsymbol{T = (c + \sigma_n \tan\delta)A} \qquad \boldsymbol{(A = B * 1m)}$$

Forces déstabilisatrices :

Pa : force de poussée

$$F_G = \frac{B\,c + N\tan\delta}{P_a}$$

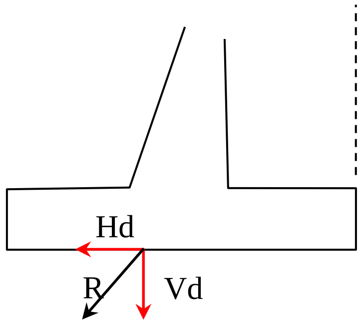
B. Eurocode 7 :

Pour tous les états limites ultimes, l'inégalité suivante doit être vérifiée :

$$\mathbf{H_d \leq R_{hd}}$$

H_d : l'action ou l'effect de l'action (forces déstabilisatrices)

R_{hd} : la résistance à l'action (forces stabilisatrices)



$$\underbrace{\textbf{Action ou effet de l'action}}_{\text{Majorer} * \gamma} \leq \underbrace{\textbf{Résistance à l'action}}_{\text{Minorer} / \gamma}$$

γ : Coefficient partiel de sécurité

- ✓ La vérification de la sécurité structurelle et de l'aptitude au service d'un ouvrage selon les Eurocodes se fait par une approche semi-probabiliste ; c'est-à-dire on utilise des coefficients partiels de sécurité sur les actions et les résistances afin de couvrir les différentes incertitudes et imprécisions.

Définition :

Actions : Ce sont les forces (charges) appliquées à l'ouvrage, ou des déformations imposées, accélération, tremblement de terre, changement de température

Elles peuvent être : Permanentes (G), Variables (Q), Accidentelles (A), Actions sismiques (A_E)

Exemple : Si la variabilité de G est faible, une valeur unique G_k est utilisée.

Si la variabilité de G n'est pas faible, 2 valeurs sont utilisées ; supérieure (Défavorable) G_{sup}, et inférieure (Favorable) G_{inf}

L'effet de l'action : Ce sont les forces internes (moment, contrainte …)

Valeur de calcul des actions :

$$\mathbf{F_d = \gamma_F F_k}$$

$\mathbf{F_k}$ **:** Valeur caractéristique (principale valeur représentative d'une action)

Valeur de calcul des propriétés de matériaux :

$$\mathbf{X_d = \frac{X_k}{\gamma_m}}$$

Résistance de calcul :

$$\mathbf{R_d} = \frac{\mathbf{X_d}}{\boldsymbol{\gamma}_{\mathbf{Rd}}} = \frac{X_k}{\underbrace{\gamma_m}_{\text{Incertitude de matériau}}\ \underbrace{\gamma_{Rd}}_{\text{Incertitude de résistance}}}$$

Pour effectuer une vérification à l'aide de la méthode des coefficients partiels ; il est nécessaire d'utiliser les combinaisons d'actions.

A l'ELU : Combinaisons fondamentales (situation de projet durable et transitoire)
Combinaisons d'actions pour les situations de projet accidentelles, ou sismiques

A l'ELS : Combinaisons caractéristiques, fréquentes, quasi-permanente

- En Europe, trois approches ont été adoptées pour vérifier les ouvrages aux états limites ; elles diffèrent par la façon dont elles distribuent les facteurs partiels. C'est-à-dire chaque pays utilise l'approche qui lui convient (voir annexe)

Pour vérifier le non glissement :

$$\mathbf{H_d \leq R_{hd}}$$

H_d : forces déstabilisatrices = la force de poussée

$$P_a = \int_0^H \sigma'_{ha}\,dz = \underbrace{\frac{1}{2}\gamma'.\ H^2.K_a - 2c'\sqrt{K_a}.H}_{P_{a\,G}} + \underbrace{K_a q\,H}_{P_{a\,Q}}$$

$$H_d = P_a = \gamma_{G\,def}.P_{a\,G} + \gamma_{Q\,def}.P_{a\,Q}$$

Et :

$$\mathbf{R_{hd}} = \frac{\mathbf{V_d \tan \delta_d}}{\boldsymbol{\gamma}_{\mathbf{Rh}}\,\boldsymbol{\gamma}_{\mathbf{Rd\,h}}} \ :\ \text{conditions drainées}\ \ (c' \text{et}\ \emptyset')$$

V_d : valeur de calcul de la charge totale verticale (mur + terrain mort) G_{min}

δ_d : angle de frottement sol-fondation de mur

$$\delta_d = k\,.\emptyset_d$$

$$k = 2/3 : mur\ en\ béton\ préfabriqué$$

$$k = 1 : mur\ en\ béton\ coulé\ sur\ place$$

$$\emptyset_d = tan^{-1}\left(\frac{\tan\emptyset}{\gamma_\emptyset}\right)$$

$$\mathbf{R_{hd}} = \mathbf{min}\left(\frac{\mathbf{A'}\boldsymbol{c_{uk}}}{\boldsymbol{\gamma}_{\mathbf{Rh}}\,\boldsymbol{\gamma}_{\mathbf{Rd\,h}}}; \mathbf{0,4}\,\boldsymbol{V_d}\right):\quad \text{conditions non drainées}\ \ (c_u \text{ et } \emptyset_u = 0)$$

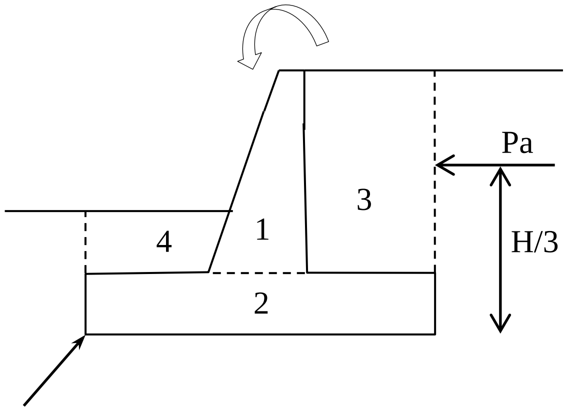
A′=B’ * L’ (L’ = 1m)

B’ = B – 2e

c_{uk} : Valeur caractéristique de la cohésion non drainée

$\boldsymbol{\gamma}_{\mathbf{Rh}} = \mathbf{1,1} \qquad \boldsymbol{\gamma}_{\mathbf{Rd\,h}} = \mathbf{0,9}$

4.2. La stabilité au renversement :



A. Méthode classique :

$$F_R = \frac{\sum \text{moments stabilisatrices}}{\sum \text{moments déstabilisatrices}}$$

$$F_G = \frac{M_1 + M_2 + M_3 + M_4}{P_a\ {}^{H}\!/_{3}}$$

B. L’Eurocode 7 :

On doit justifier l’excentricité des charges ; le calcul consiste à vérifier que :

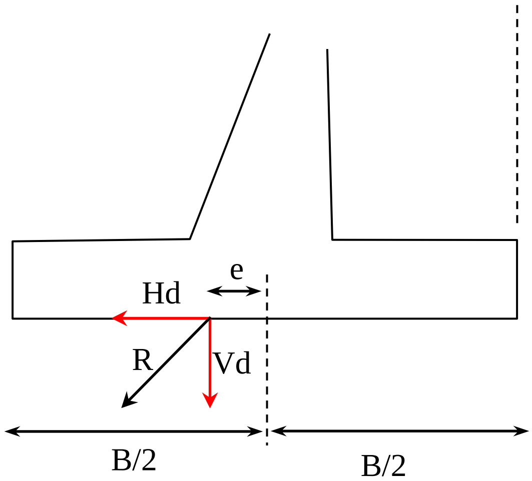
$\mathbf{1} - \frac{\mathbf{2\,e}}{\mathbf{B}} \geq \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{15}}$: à **l ′ELU**

$\mathbf{1} - \frac{\mathbf{2\,e}}{\mathbf{B}} \geq \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2}}$: à **l ′ELS**

e : l’excentricité de la résultante des charges

$$\mathbf{e} = \frac{\mathbf{B}}{\mathbf{2}} - \frac{\mathbf{M_{net}}}{\mathbf{V_d}}$$

Avec : $\mathbf{M_{net}} = \mathbf{M_{sta}} - \mathbf{M_{dest}}$



4.3. Stabilité au poinçonnement (défaut de la capacité portante)

A. Méthode classique :

Selon Terzaghi, la formule de la capacité portante d'une fondation filante est :

$q_u = C.N_c + q.N_q + 0{,}5\,\gamma.B.N_\gamma$

Contrainte admissible est : $q_{ad} = \gamma D + \frac{q_u}{3}$

Il faut que : $q_{ad} \geq \frac{Q}{A}$

B. L'Eurocode 7 :

On doit vérifier :

$$V_d/_{A'} \leq q_{net}/_{\gamma_{Rd\,.}\,\gamma_{R\,dv}}$$

Avec :

V_d : la somme des charges verticales transmissent par le mur au terrain

A' : est la valeur de la surface effective de semelle de mur

$$A' = B'.1m$$
$$B' = B - 2e$$

γ_{Rd} et $\gamma_{R\,dv}$: Facteurs partiels

Avec :

$\gamma_{R\,dv} = 1{,}7$: contions drainées $(c', \emptyset')$

$\gamma_{R\,dv} = 1$: contions non drainées Cu

Et :

$\gamma_{Rd} = 1{,}4$: à ELU

$\gamma_{Rd} = 2{,}3$: à ELS

Annexe :

Eurocodes 7

1) Généralités :

L'Annexe Nationale française propose de retenir principalement l'approche de calcul 2 pour le dimensionnement des murs de soutènement (vérification de la stabilité externe). Les coefficients partiels sont appliqués principalement aux actions, aux effets des actions et aux résistances du terrain.
L'approche de calcul 2 correspond à la combinaison donnée dans le tableau suivant :

Approches	Combinaisons
1	A1 + M1 + R1
	A2 + M2 + R1
2	A1 + M1 + R2
3	A1 ou A2 + M2 + R3

On doit vérifier qu'aucun état limite de rupture ou de déformation excessive ne sera atteint avec la combinaison d'ensemble de facteurs partiels A1 + M1 +R2.

Les coefficients partiels correspondants sont donnés dans les tableaux ci-dessous pour les vérifications STR et GEO (états limites structures et des états limites géotechniques).

- Actions :

Action		Symbole	A1	A2
Permanente	Défavorable	$\gamma_{G_{max}}$	1,35	1,0
	Favorable	$\gamma_{G_{min}}$	1,0	1,0
Variable	Défavorable	γ_Q	1,5	1,3
	Favorable	γ_Q	0	0

- Caractéristiques du terrain :

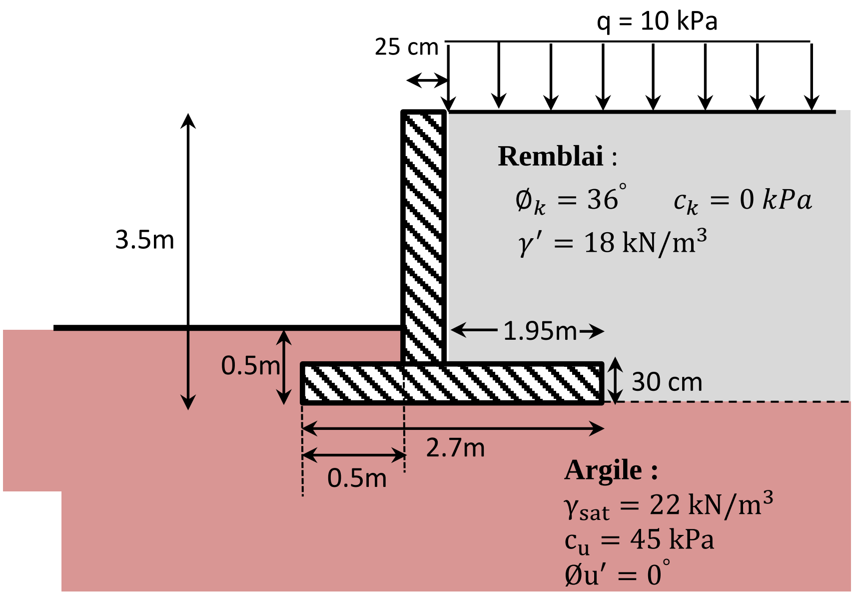
Paramètres du sol	Symbole	M1	M2
Angle de frottement interne	$\gamma_{\varphi'}$	1,0	1,25
Cohésion effective	$\gamma_{c'}$	1,0	1,25
Cohésion non drainée	γ_{cu}	1,0	1,4
Compression simple	γ_{qu}	1,0	1,4
Poids volumique	γ_{γ}	1,0	1,0

- Résistance **R2**

Type d'état limite	Coefficient	Cas général	R1 et R3
ELU de mobilisation de la capacité portante.	$\gamma_{R;v}$ $\gamma_{R;d}$	1,4 $1,0^4$	**1**
ELS de mobilisation de la capacité portante	$\gamma_{R;v}$ $\gamma_{R;d}$	2,3 $1,0^4$	**3**
ELU de glissement.	$\gamma_{R;h}$ $\gamma_{R;d}$	1,1 0,9	**1**
ELU de limitation de l'excentrement	γ_{exc}	15	
ELS de limitation de l'excentrement	γ_{exc}	2	

Exercice :

Vérifier la stabilité au renversement et au glissement du mur de soutènement illustré ci-dessous :



Solution :

- On utilise l'approche 2

Propriétés des matériaux :

Remblai :

$$\phi_d = tg^{-1}\left[\frac{tg\ \phi}{\gamma_\phi}\right] \quad ; \gamma_\phi = 1 \quad \text{donc} \quad \phi_d = 36°$$

$$c_d = \frac{c_k}{\gamma_c} = 0$$

Argile :

$$c_d = \frac{c_k}{\gamma_c} = \frac{45}{1} = 45\ kPa$$

Les actions (stabilisatrices):

- Permanentes :

$$W_{mur} = W_{voile} + W_{sem}$$

$$W_{mur} = (0{,}25\ .\ 3{,}2 + 0{,}3\ .\ 2{,}7)\ 25 = 40{,}25\ \ kN/m$$

Remblai (terrain mort) :

$W_{rem} = 1{,}95 \,.\, 3{,}2 \,.\, 18 = 112{,}3\ \ kN/m$

Poids total : $W = 40{,}25 + 112{,}3 = \mathbf{152,57\ kN/m}$

- Variables:

$$Q = q \,.\, b = 10 \,.\, 1{,}95 = \mathbf{19,5\ kN/m}$$

Action verticale V_d :

Défavorable : $V_d = \gamma_G\ W + \ \gamma_Q\ Q = 1{,}35 \,.\, 152{,}57 + 1{,}5 \,.\, 19{,}5 = \ \mathbf{235,22\ kN/m}$

Favorable : $V_d = \gamma_G\ W + \ \gamma_Q\ Q = 1 \,.\, 152{,}57 + 0 \,.\, 19{,}5 = \ \mathbf{152,57\ kN/m}$

Les actions (déstabilisatrices) :

La force de poussée :

$P_a = \int_0^{3,5} \sigma'_{ha}\, dz\ = \int_0^{3,5} (\ \sigma'_v\, K_a - 2c_d\sqrt{K_a}\ \ )\ dz$

Donc : $P_a = \frac{1}{2}\ K_a\, \gamma\, H^2 - 2c_d\sqrt{K_a}\ \ H + K_a\, q\, H$

Avec : $K_a = 0{,}26$

$H_d = P_a = \gamma_{G\ def} \,.\, P_{a\ G} + \gamma_{Q\ def} \,.\, P_{a\ Q}$

$H_d = P_a = 1{,}35 (0{,}5 \,.\, 0{,}26 \,.\, 18 \,.\, 3{,}5^2) + 1{,}5 (0{,}26 \,.\, 10 \,.\, 3{,}5)$

$$H_d = \mathbf{52,35\ \ kN/m}$$

La stabilité vis-à-vis au renversement :

à L'ELU : il faut vérifier que : $1 - \frac{2\, e}{B} \geq \frac{1}{15}$

Avec : $e = \frac{B}{2} - \frac{M_{st} - M_{dest}}{V_d}$

Les moments par rapport au point de rotation :

<u>Stabilisateurs :</u>

$$M_{voile} = W_{voil} \,.\ x_{voil} = (0{,}25 \,.\, 3{,}2)\ 25 \,.\, (0{,}5 + 0{,}125) = \mathbf{12,5\ kN.m}$$

$$M_{sem} = (0{,}3 \,.\, 2{,}7)\ 25 \,.\, (2{,}7/2) = \mathbf{27,337\ kN.m}$$

$$M_{remb} = (112{,}3) \,.\, (0{,}75 + 1{,}95/2) = \mathbf{193,71\ kN.m}$$

$$M_Q = (19{,}5)\,.\,(1{,}95/2 + 0{,}25 + 0{,}5) = \mathbf{33,63\ kN.m}$$

<u>Déstabilisateurs :</u>

$$M_{Pa\,G} = P_{a\,G}\,.\,{}^{H}/_{3}$$

$$M_{Pa\,G} = (0{,}5\,.\,0{,}26\,.\,18\,.\,3{,}5^2).\,{}^{3,5}/_{3} = \mathbf{33,44\ kN/m}$$

$$M_{Pa\,Q} = P_{a\,Q}\,.\,{}^{H}/_{2}$$

$$M_{Pa\,G} = (0{,}26\,.\,10\,.\,3{,}5).\,{}^{3,5}/_{2} = \mathbf{15,92\ kN/m}$$

Le moment stabilisateur à l'ELU:

$$M_{st} = \gamma_G\, M_G + \gamma_Q\, M_Q = \gamma_G\,(M_{voil} + M_{sem} + M_{rem}) + \gamma_Q\, M_Q$$
$$= 1{,}35.\,(12{,}5 + 27{,}337 + 193{,}71\,) + 1{,}5\,.\ 33{,}63 = \mathbf{365,73\ kn/m}$$

Le moment déstabilisateur à l'ELU :

$$M_{dst} = \gamma_G\, M_{Pa} + \gamma_Q\, M_{PQ} = 1{,}35.\,(33{,}44\,) + 1{,}5.\,(15{,}92) = \mathbf{69\ kn/m}$$

Donc :

$$e = \frac{2{,}7}{2} - \frac{365{,}73 - 69}{225{,}22} = 0{,}09\ m$$

$$1 - \frac{2\,.\ 0{,}09}{2{,}7} = 0{,}93 \geq \frac{1}{15} \qquad \text{ok}$$

à L'ELS : il faut vérifier que : $1 - \frac{2\,e}{B} \geq \frac{1}{2}$

Avec : $e = \frac{B}{2} - \frac{M_{st} - M_{dest}}{V_d}$

Le moment stabilisateur à l'ELS (favorable):

$M_{st} = \gamma_G\, M_G + \gamma_Q\, M_Q = \gamma_G\,(M_{voil} + M_{sem} + M_{rem}) + \gamma_Q\, M_Q = 1\,.\,(12{,}5 + 27{,}337 + 193{,}71\,) + 0\,.\ 33{,}63 = \mathbf{233,54\ kn/m}$

Le moment déstabilisateur à l'ELS :

$$M_{dst} = \gamma_G\, M_{Pa} + \gamma_Q\, M_{PQ} = 1\,.\,(33{,}44\,) + 0.\,(15{,}92) = \mathbf{33,44\ kn/m}$$

Donc :

$$e = \frac{2{,}7}{2} - \frac{233{,}54 - 33{,}44}{152{,}57} = 0{,}04 \text{ m}$$

$$1 - \frac{2\ .\ 0{,}04}{2{,}7} = 0{,}97 \geq \frac{1}{2} \qquad \text{ok}$$

2) Stabilité au glissement sur la base (à l'ELU):

Pour vérifier le non glissement, il faut que :

$$\mathbf{H_d \leq R_{hd}}$$

H_d : forces déstabilisatrices = la force de poussée

$$\mathbf{R_{hd} = min\left(\frac{A' c_{uk}}{\gamma_{Rh}\ \gamma_{Rd\,h}} ; 0,4\ V_d\right)} : \quad \text{conditions non drainées } (c_u \text{ et } \emptyset_u = 0)$$

A'=B' * L' (L' = 1m)

B' = B – 2e

c_{uk} : Valeur caractéristique de la cohésion non drainée

$\boldsymbol{\gamma_{Rh} = 1,1} \qquad \boldsymbol{\gamma_{Rd\,h} = 0,9}$

Donc :

$H_d = P_a = 1{,}35(0{,}5\ .\ 0{,}26\ .\ 18\ .\ 3{,}5^2) + 1{,}5(0{,}26\ .\ 10\ .\ 3{,}5)$

$H_d = \mathbf{52,35\ \ kN/m}$

Et :

$$R_{hd} = \min\left(\frac{(2{,}7 - 2\ .\ 0{,}09)45}{1{,}1\ .\ 0{,}9}\ ;\ 0{,}4 . 235{,}22\right) = min\ (114{,}54\ ; 94)$$

$\mathbf{R_{hd} = 94\ kN/m}$

$$\mathbf{52,35 \leq 94\ kN/m \quad ok}$$