

Chapitre 1. Murs de soutènement (3 Semaines)

1.1. Généralités

1.2. Analyse de stabilité des murs en béton armé

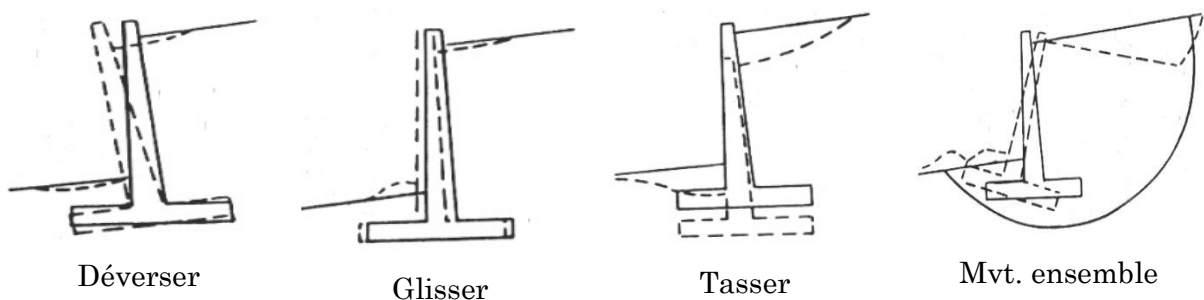
Chapitre 1

Murs de soutènement

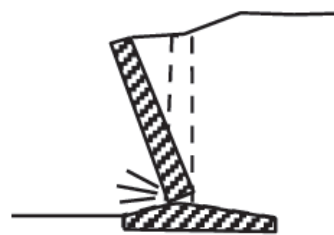
1.1. Généralités

Le présent chapitre a pour but la justification de la stabilité des murs de soutènement en béton armé, selon les principes de calcul aux états limites avec facteurs partiels définis dans l'Euro-Code 7.

Un mur de soutènement est un solide quasiment indéformable, souvent fragile, qui cherche son équilibre, tel un corps étranger, dans un milieu plus ou moins mou et hétérogène, qui est le sol. Il peut se déverser, glisser ou se fissurer.



Parmi les modes de rupture possibles des murs de soutènement, on distingue la rupture des éléments constitutifs de l'ouvrage sous l'action des forces extérieures (instabilité interne).



Rupture de mur

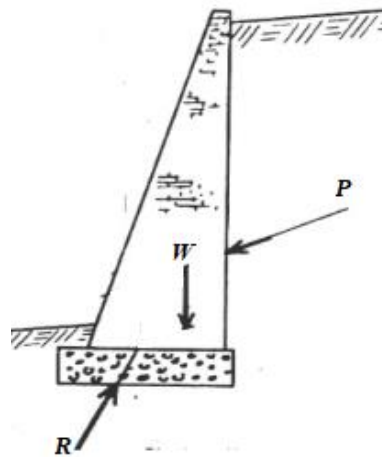
A l'équilibre, les forces en présence dans un mur de soutènement doivent concourir et l'on a :

P : action des terres à soutenir,

W : poids du mur,

R : réaction du sol d'assise

Le mur de soutènement en béton armé est le type d'ouvrage le plus classique et le plus ancien. Il est réalisé en béton armé. La stabilité de ces murs est assurée par leur poids propre.



1.2. Analyse de stabilité des murs en béton armé

La stabilité d'un mur de soutènement en béton armé est considérée sous les aspects suivant :

- *Stabilité au renversement
- *Stabilité au glissement
- *Résistance au poinçonnement
- *Stabilité interne du mur

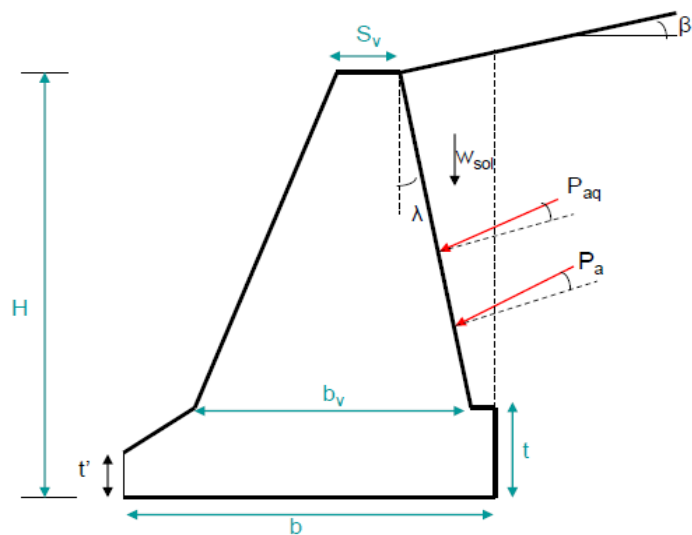


Fig : mur poids

Selon l'Euro-Code 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

1.2.1. Stabilité au glissement

A. Méthode classique

On compare N à la résistance que le terrain de fondation est capable d'opposer au glissement, soit :

$$Fg = \frac{\sum \text{Forces stabilisatrices}}{\sum \text{Forces déstabilisatrices}}$$

Forces stabilisatrices : $T = \tau.A = (c' + \sigma_n.tg\varphi).A$

Bien que : $A = b.lm \Rightarrow T = c'.b + N.tg\varphi'$

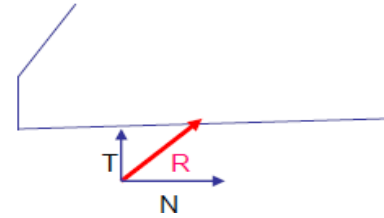
Avec : $N = W_{mur} + W_{sol} + \Sigma P_{ai}.sin(\lambda + \delta)$

c' : la cohésion du sol de fondation.

b : largeur de la base du mur.

N : résultante normale de R .

φ' : angle de frottement interne du sol de fondation.



Forces déstabilisatrices (force de poussée) : $P_a = \Sigma P_{ai}.cos(\lambda + \delta)$

Le coefficient de glissement égale à:

$$Fg = \frac{c'.b + N.tg\varphi'}{P}$$

IL faut que : $Fg > 1.5$

B. Euro-Code 7 :

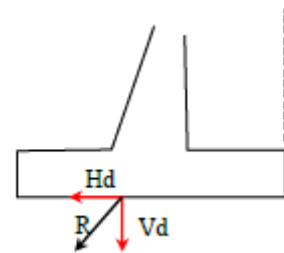
Pour tous les états limites ultimes, l'inégalité suivante doit être vérifiée :

$$H_d \leq R_{hd}$$

H_d : Action ou effet de l'action (Majorer * γ) (forces déstabilisatrices)

Résistance à l'action (Minorer / γ) (forces stabilisatrices)

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 (AE)

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 :

$$F_d = \gamma F \cdot F_k$$

F_k : Valeur caractéristique (principale valeur représentative d'une action)

- Valeur de calcul des propriétés de matériaux :

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

- Résistance de calcul :

$$R_d = \frac{X_d}{X_{Rd}} = \frac{X_k}{X_{Rd} \cdot \gamma_m}$$

Avec : X_{Rd} : Incertitude de résistance ; γ_m : Incertitude de matériau

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.

Pour vérifier le non glissement : $H_d \leq R_{hd}$

H_d : forces déstabilisatrices = la force de poussée (P) (permanente+ exploitation)

$$H_d = P_a = \sum P_{ai} \cdot \cos(\lambda + \delta) = (\gamma_G \cdot P_{aG} + \gamma_Q \cdot P_{aQ}) \cos(\lambda + \delta)$$

Et :

$$R_{hd} = \frac{V_d \tan \delta_d}{\gamma_{Rh} \cdot \gamma_{Rdh}} \quad \text{conditions drainées (c'et } \phi')$$

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

δ_d : angle de frottement sol-fondation de mur.

$$\delta_d = K \cdot \phi_d$$

$K = 2/3$: murs en béton préfabriqué

$K = 1$: murs coulé sur place.

$$\phi_d = tg^{-1}\left(\frac{tg\phi}{\gamma\phi}\right)$$

$$R_{hd} = \min\left(\frac{A'c_{uk}}{\gamma_{Rh} \cdot \gamma_{Rdh}}; 0.4V_d\right) \text{ conditions non drainées } (c_u \text{ et } \phi_u = 0)$$

$A' = B' \cdot L'$; (soit $L' = 1\text{m}$ et $B' = B - 2e$)

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

$\gamma_{Rh} = 1.1$; $\gamma_{Rdh} = 0.9$

1.2.2. Stabilité au renversement

A. Méthode classique

Les moments fléchissant par rapport à l'axe passant par un point "A" choisi sont:

✚ Moment stabilisant: $M_s = M(W_{mur}) + M(W_{sol}) + \Sigma M(P_{ai} \cdot \sin(\lambda + \delta))$

✚ Moment renversant: $M_r = \Sigma M(P_{ai} \cdot \cos(\lambda + \delta))$

P_{ai} : poussée exercée sur le mur

Soit :

$$Fr = \frac{\Sigma \text{Moments stabilisatrices}}{\Sigma \text{Moments déstabilisatrices}}$$

La stabilité est vérifiée lorsque : $Fr = M_s/M_r > 1.5$

B. Euro-Code 7 :

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

$$1 - \frac{2e}{b} \geq \frac{1}{15} \text{ (ELU) et } 1 - \frac{2e}{b} \geq \frac{1}{2} \text{ (ELS)}$$

Avec : e : excentricité de la résultante des charges

$$e = \frac{b}{2} - \frac{M_{net}}{Vd} \text{ et } M_{net} = M_{stab} - M_{destab}$$

1.2.3. Résistance au poinçonnement

A. Méthode classique

Un mur de soutènement rigide doit présenter une marge de sécurité suffisante contre la rupture de la capacité portante du sol. La pression maximale exercée sur le sol à la base du mur ne doit pas dépasser la capacité portante admissible du sol, soit :

$$\sigma_z^{max} \leq q_a$$

où $(\sigma_z)^{max}$ est la contrainte verticale maximale imposée et q_a la capacité portante admissible du sol.

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

$$ql = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot B \cdot N_{\gamma} \cdot s_{\gamma} + c \cdot N_c \cdot s_c + (q + \gamma \cdot D) \cdot N_q \cdot s_q$$

Contrainte admissible est :

$$q_{adm} = \frac{q_{net}}{F_s} + \gamma \cdot D \text{ telle que : } q_{net} = ql - \gamma D \text{ et } F_s = 3$$

Il faut que : $\sigma_A \leq \sigma_B$

$$q_{adm} \geq \frac{Q}{A}$$

B. Euro-Code 7 :

On doit vérifier :

$$\frac{V_d}{A'} \leq \frac{q_{net}}{\gamma_{Rd} \cdot \gamma_{Rdv}}$$

Avec :

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

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

$A' = b' \cdot 1m$ et, $b' = b - 2e$

γ_{Rd} et γ_{Rdv} : Facteurs partiels

Avec :

$\gamma_{Rdv} = 1.7$: conditions drainées (c' ; ϕ') ; $\gamma_{Rdv} = 1$: conditions non drainées (c_u)

$\gamma_{Rd} = 1.4$: ELU ; $\gamma_{Rd} = 2.3$: ELS

1.2.4. Stabilité interne du mur

Généralement, la traction maximale est identifiée à la surface d'encastrement du fut du mur (soumis à une flexion) dans la semelle. Son expression est donnée par:

$$\sigma_T = \frac{M_{encast}}{I/v}$$

Où: M_{encast} : le moment à la section dangereuse;

Soit Q la résultante des poussées et r la distance de cette résultante à la partie inférieure de la semelle

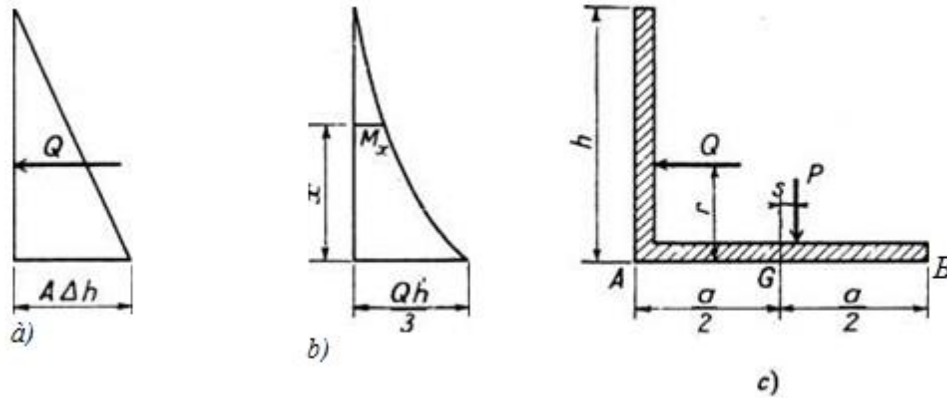
Soit P la résultante des charges verticales et s la distance de P au milieu G de la semelle.

Le moment par rapport au centre de gravité G de la semelle est égal, en valeur absolue, à : $M = Q.r - P.s$

Si P était à gauche de G, alors $M = Qr + Ps$.

I: moment d'inertie d'une section dangereuse;

v : distance de l'axe neutre à la fibre la plus tendue de la section droite de l'élément vérifier du mur.



Annexe : Approches de calcul

L'Eurocode 7 introduit 3 approches de calcul pour la justification des ELU dans les situations durables et transitoires (Équilibres STR & GEO).

Approche	Combinaison	Remarques
1	A1 + M1 + R1	combinaison structurelle
	A2 + M2 + R1	combinaison géotechnique
2	A1 + M1 + R2	Généralement utilisé
3	A1 ou A2 + M2+ R3	

"A" pour actions ou effets des actions, "M" pour les paramètres du sol, "R" pour les résistances.

Les coefficients partiels correspondants sont donnés dans les tableaux suivants :

- Actions

Action (γ_F)		Symbole	A1	A2
Permanente	Défavorable	γ_G	1,35	1.00
	Favorable	γ_G	1,00	1.00
Variable	Défavorable	γ_Q	1.50	1.30
	Favorable	γ_Q	0	0

- Paramètres du sol

Paramètre de sol (γ_M)	Symbole	M1	M2
Angle de frottement interne	$\gamma_{\phi'}$	1.00	1.25
Cohésion effective	$\gamma_{c'}$	1.00	1.25
Cohésion non drainée	γ_{cu}	1.00	1.40
Compression simple	γ_{qu}	1.00	1.40
Poids volumique	γ_Y	1.00	1.00

- Résistance R2

Résistance (γ_R)	Symbole	R2	R1 et R3
Capacité portante (ELU)	γ_{RV}	1.4	1.0
	γ_{Rd}	1.0	
Capacité portante (ELS)	γ_{RV}	2.3	3.0
	γ_{Rd}	1.0	

Glissement (ELU)	γ_{Rh}	1.1	1.0
	γ_{Rd}	0.9	
Limitation de l'excentrement (ELU)	γ_{ext}	1.5	/
Limitation de l'excentrement (ELS)	γ_{ext}	2.0	/