



Mardi 27 mars 2012
Lundi 2 et mardi 3 avril 2012

CETE Méditerranée, Aix-en-Provence

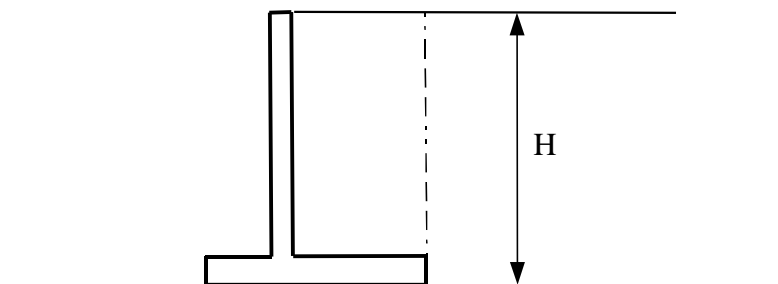
PRISE EN COMPTE DU RISQUE SISMIQUE

Journées techniques
organisées avec l'appui du Sétra
et sous l'égide de la CoTITA

Exemples de calculs sismiques ***Exemple de mur de soutènement*** (énoncé)

T. Mary

I - CONTEXTE



**MUR en retour en BA soutenant un remblai autoroutier
construit en zone de sismicité faible**

Géométrie du mur :

- patin : 1,40 m
- talon : 2,10 m
- épaisseur du voile : 0,25 m
- épaisseur de la semelle : 0,40 m
- H = 3,80 m
- poids du mur : 58,75 kN/ml

Remblais :

- angle de frottement = 36°
- poids volumique : 20 kN/m³
- terre-plein horizontal
- angle de poussée = 0,172°
- coefficient de poussée statique = 0,259

Sol de fondation :

- sable moyennement dense (cohésion nulle ; $\phi'=33^\circ$)
- pas de nappe

II - OBJECTIFS

1. Définir les composantes horizontales (k_h) et verticales (k_v) de l'action sismique
2. En déduire les coefficients de poussée des terres K (statique + dynamique)
3. Déterminer les efforts de poussée (statique et dynamique) et les moments résultants au centre de la semelle
4. Étudier la stabilité au poinçonnement et au glissement

1. Définir les composantes horizontales (k_h) et verticales (k_v) de l'action sismique

- Zone de sismicité :

Zone de sismicité : accélération au rocher, a_{gr} = m/s²

- Catégorie d'importance :

Catégorie d'importance de l'ouvrage :
(mur de soutènement solidaire d'un pont du domaine public portant une autoroute)

Coefficient d'importance associé, γ_I :

Coefficient sismique r :

- Classe de sol :

Classe de sol : Paramètre de sol S :

- Nature du relief :

Coefficient d'amplification topographique S_T :

Représentation de l'action sismique

Accélération horizontale de calcul au rocher, a_g = m/s² ($a_{gr} \times \gamma_I$)

Coefficient sismique horizontal, k_h = ($a_g \times S / r \times S_T / g$)

Coefficient sismique vertical, k_v = ($0,5 \times k_h$)

2. En déduire les coefficients de poussée des terres K (statique + dynamique)

$$K = \frac{\sin^2(\psi + \phi'_d - \theta)}{\cos \theta \sin^2 \psi \sin(\psi - \theta - \delta_d) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi'_d + \delta_d) \sin(\phi'_d - \beta - \theta)}{\sin(\psi - \theta - \delta_d) \sin(\psi + \beta)}} \right]^2}$$

Hypothèses :

- écran vertical $\Psi = \boxed{90}^\circ$
- sol horizontal $\beta = \boxed{0}^\circ$

Les valeurs de calcul des angles Φ_d et δ_{ad} sont déterminées en tenant compte d'un coefficient γ_ϕ qui vaut 1,25 et qui s'applique sur la tangente des angles :

$$\phi_d = \tan^{-1}\left(\frac{\tan \phi}{\gamma_\phi}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{\tan \phi}{1,25}\right)$$

$$\delta_{ad} = \tan^{-1}\left(\frac{\tan \delta_a}{\gamma_\phi}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{\tan \delta_a}{1,25}\right)$$

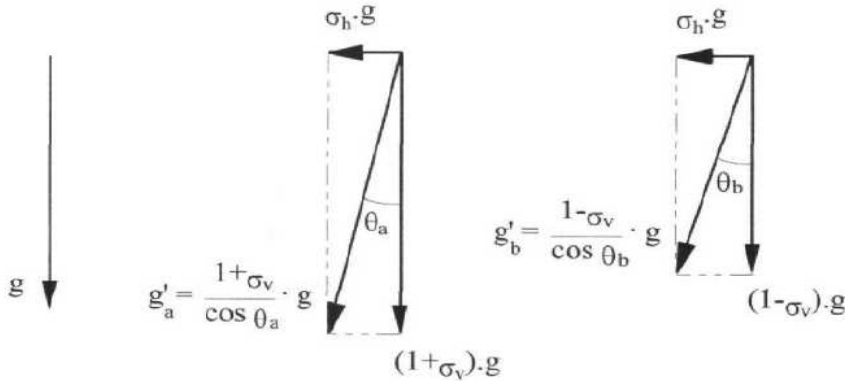
$\phi = \boxed{36}^\circ$
 d'où $\phi_d = \boxed{}^\circ$

$\delta_a = \boxed{0,172}^\circ$
 d'où $\delta_{ad} = \boxed{}^\circ$

Correspond à l'angle de la poussée en conditions statiques

L'angle θ correspond à l'inclinaison de la gravité en cas de séisme.

2 cas sont possibles selon que la composante verticale du séisme est descendante (A) ou ascendante (B)



Soit : $\tan \theta = \frac{k_h}{1 \pm k_v}$ D'où : $\theta_A = \boxed{}^\circ$ $\theta_B = \boxed{}^\circ$

Finalemnt : $KA = \boxed{}$ (séisme descendant = cas A)
 $KB = \boxed{}$ (séisme ascendant = cas B)

3. Déterminer les efforts de poussée (statique et dynamique) et les moments résultants au centre de la semelle

La poussée totale (statique + dynamique) vaut : $E_d = \frac{1}{2} \gamma^* (1 \pm k_v) KH^2 + E_{ws} + E_{wd}$

pas de nappe => Ews et Ewd nuls

Pour connaître l'incrément dynamique, il faut calculer la poussée totale puis soustraire la poussée statique.

		Comb. Accidentelle Séisme		
		A	B	bras de levier par rapport au centre de la semelle
Poussée statique	V			
	N			
Incrément dynamique	V			
	N			

V : composante horizontale
N : composante verticale

4. Étudier la stabilité au poinçonnement et au glissement

en prenant en compte l'ensemble des actions (poids du mur, poids des terres aval et amont, poussée statique et dynamique), on obtient les tenseurs suivants :

		Comb. Accidentelle. Séisme	
		A	B
Résultante (au centre de la semelle)	Ved	83	89
	Ned	189	215
	Med	26	23

Stabilité au poinçonnement :

pour assurer la stabilité au poinçonnement, il faut vérifier l'inégalité suivante :

$$\frac{(1 - e\bar{F})^{c_T} (\beta \bar{V})^{c_T}}{(\bar{N})^a \left[(1 - m\bar{F}^k)^{k'} - \bar{N} \right]^b} + \frac{(1 - f\bar{F})^{c'_M} (\gamma \bar{M})^{c_M}}{(\bar{N})^c \left[(1 - m\bar{F}^k)^{k'} - \bar{N} \right]^d} - 1 \leq 0$$

$a, b, c, d, e, f, m, k, k', c_T, c_M, c'_M, \beta, \gamma$ sont des paramètres numériques dépendant du type de sol

pour un sol purement frottant, on a :

a	b	c	d	e	f	m
0,92	1,25	0,92	1,25	0,41	0,32	0,96
k	k'	c _T	c _M	c' _M	β	γ
1	0,39	1,14	1,01	1,01	2,9	2,8

$$\bar{F} = \frac{a_g}{g \tan \phi'_d} \quad \text{désigne la force d'inertie du sol}$$

$$\bar{N} = \frac{\gamma_{Rd} N_{Ed}}{N_{max}}, \quad \bar{V} = \frac{\gamma_{Rd} V_{Ed}}{N_{max}}, \quad \bar{M} = \frac{\gamma_{Rd} M_{Ed}}{BN_{max}}$$

N_{max} est la capacité portante ultime de la fondation sous charge verticale centrée

N_{max} est la capacité portante ultime de la fondation sous charge verticale centrée

pour un sol frottant :
$$N_{max} = \frac{1}{2} \rho g \left(1 + \frac{a_v}{g} \right) B^2 N_\gamma$$

avec $N_\gamma = 2 (N_q - 1) \tan \varphi'$ et $N_q = e^{\pi \tan \varphi'} \tan^2 (45 + \varphi'/2)$

Tableau F.2 — Valeurs du coefficient partiel de modèle γ_{Rd}

Sable moyennement dense à dense	Sable lâche sec	Sable lâche saturé	Argile non sensible	Argile sensible
1,00	1,15	1,50	1,00	1,15

	Comb. Accidentelle. Séisme	
	A	B
Nmax		
F		
γ_{Rd}		
Ned	189	215
Ved	83	89
Med	26	23
N		
V		
M		
Terme de gauche de l'inégalité		
Stabilité		

doit être négatif

Vérification au glissement :

il faut vérifier : $V_{Ed} \leq F_{Rd} + E_{pd}$

on néglige les frottements latéraux soit $E_{pd}=0$

où :
$$F_{Rd} = N_{Ed} \frac{\tan \delta}{\gamma_M}$$
 avec $\gamma_M = 1,25$

δ est l'angle de frottement de l'interface sol-structure sous la base de la semelle

	Accidentelle sismique	
	A	B
Force active de glissement (Ved)		
Force résistante limite de glissement		
Stabilité		



Mardi 27 mars 2012
Lundi 2 et mardi 3 avril 2012

CETE Méditerranée, Aix-en-Provence

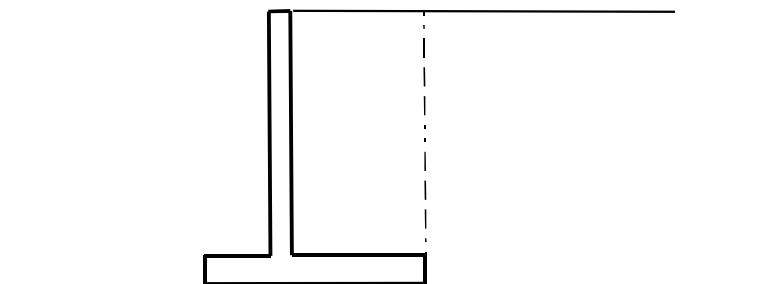
Journées techniques
organisées avec l'appui du Sétra
et sous l'égide de la CoTITA

PRISE EN COMPTE DU RISQUE SISMIQUE

Exemples de calculs sismiques *Exemple de mur de soutènement* (corrigé)

T. Mary

I - CONTEXTE



**MUR en retour en BA soutenant un remblai autoroutier
construit en zone de sismicité faible**

Géométrie du mur :

- patin : 1,40 m
- talon : 2,10 m
- épaisseur du voile : 0,25 m
- épaisseur de la semelle : 0,40 m
- H_totale : 3,80 m
- poids du mur : 58,75 kN/ml

Remblais :

- angle de frottement = 36°
- poids volumique : 20 kN/m³
- terre-plein horizontal
- angle de poussée = $0,172^\circ$
- coefficient de poussée statique = 0,259

Sol de fondation : sable moyennement dense (cohésion nulle ; $\phi'=33^\circ$)
pas de nappe

II - OBJECTIFS

1. Définir les composantes horizontales (k_h) et verticales (k_v) de l'action sismique
2. En déduire les coefficients de poussée des terres K (statique + dynamique)
3. Déterminer les efforts de poussée (statique et dynamique) et les moments résultants au centre de la semelle
4. Étudier la stabilité au poinçonnement et au glissement

1. Définir les composantes horizontales (k_h) et verticales (k_v) de l'action sismique

- Zone de sismicité :

Zone de sismicité : 2 (faible) accélération au rocher, $a_{gr} =$ 0,7 m/s²

- Catégorie d'importance :

Catégorie d'importance de l'ouvrage : III
 (mur de soutènement solidaire d'un pont du domaine public portant une autoroute)

Arrêté du 26 octobre 2011 relatif à la classification et aux règles de construction parasismique applicables aux ponts de la classe dite « à risque normal »

Coefficient d'importance associé, γ_I : 1,2

Coefficient sismique r : 1,0

- Classe de sol :

Classe de sol : C Paramètre de sol S : 1,50

- Nature du relief :

Coefficient d'amplification topographique S_T : 1,00

Représentation de l'action sismique

Accélération horizontale de calcul au rocher, $a_g =$ 0,84 m/s² ($a_{gr} \times \gamma_I$)

Coefficient sismique horizontal, $k_h =$ 0,128 ($a_g \times S / r \times S_T / g$)

Coefficient sismique vertical, $k_v =$ 0,064 ($0,5 \times k_h$)

2. En déduire les coefficients de poussée des terres K (statique + dynamique)

$$K = \frac{\sin^2(\psi + \phi'_d - \theta)}{\cos \theta \sin^2 \psi \sin(\psi - \theta - \delta_d) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi'_d + \delta_d) \sin(\phi'_d - \beta - \theta)}{\sin(\psi - \theta - \delta_d) \sin(\psi + \beta)}} \right]^2}$$

Hypothèses :

- écran vertical $\Psi = 90^\circ$
- sol horizontal $\beta = 0^\circ$

Les valeurs de calcul des angles Φ_d et δ_{ad} sont déterminées en tenant compte d'un coefficient γ_ϕ qui vaut 1,25 et qui s'applique sur la tangente des angles :

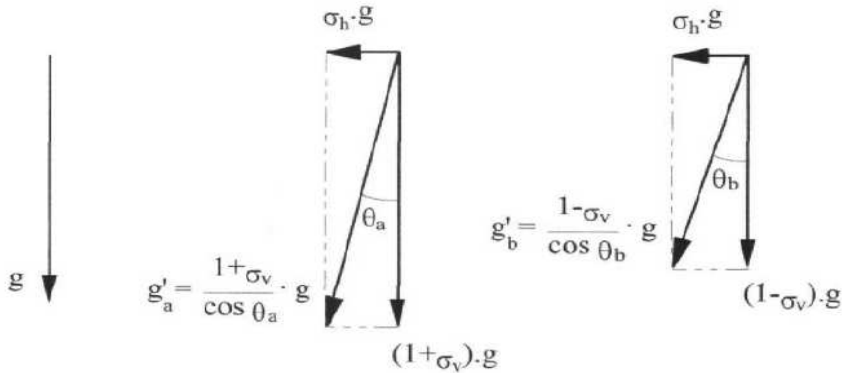
$$\phi_d = \tan^{-1}\left(\frac{\tan \phi}{\gamma_\phi}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{\tan 36}{1,25}\right) \Rightarrow \phi_d = 30,2^\circ$$

$$\delta_{ad} = \tan^{-1}\left(\frac{\tan \delta_a}{\gamma_\phi}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{\tan 0,172}{1,25}\right) \Rightarrow \delta_{ad} = 0,138^\circ$$

Correspond à l'angle de la poussée en conditions statiques

L'angle θ correspond à l'inclinaison de la gravité en cas de séisme.

2 cas sont possibles selon que la composante verticale du séisme est descendante (A) ou ascendante (B)



Soit : $\tan \theta = \frac{k_h}{1 \pm k_v}$ D'où : $\theta_A = 6,9^\circ$ $\theta_B = 7,8^\circ$

Finalemnt : $KA = 0,408$ (séisme descendant = cas A)
 $KB = 0,420$ (séisme ascendant = cas B)

3. Déterminer les efforts de poussée (statique et dynamique) et les moments résultants au centre de la semelle

La poussée totale (statique + dynamique) vaut : $E_d = \frac{1}{2} \gamma^* (1 \pm k_v) KH^2 + E_{ws} + E_{wd}$

pas de nappe => Ews et Ewd nuls

Pour connaître l'incrément dynamique, il faut calculer la poussée totale puis soustraire la poussée statique.

		Comb. Accidentelle Séisme			
		A	B	bras de levier par rapport au centre de la semelle	
Poussée statique	V	37,43	37,43	-1,27	V : composante horizontale N : composante verticale
	N	0,09	0,09	1,88	
Incrément dynamique	V	25,30	19,37	-1,9	
	N	0,06	0,05	1,88	

4. Étudier la stabilité au poinçonnement et au glissement

en prenant en compte l'ensemble des actions (poids du mur, poids des terres aval et amont, poussée statique et dynamique), on obtient les tenseurs suivants :

		Comb. Accidentelle. Séisme	
		A	B
Résultante (au centre de la semelle)	Ved	83	89
	Ned	189	215
	Med	26	23

Stabilité au poinçonnement :

pour assurer la stabilité au poinçonnement, il faut vérifier l'inégalité suivante :

$$\frac{(1 - e\bar{F})^{c_T} (\beta\bar{V})^{c_T}}{(\bar{N})^a \left[(1 - m\bar{F}^k)^{k'} - \bar{N} \right]^b} + \frac{(1 - f\bar{F})^{c'_M} (\gamma\bar{M})^{c_M}}{(\bar{N})^c \left[(1 - m\bar{F}^k)^{k'} - \bar{N} \right]^d} - 1 \leq 0$$

$a, b, c, d, e, f, m, k, k', c_T, c_M, c'_M, \beta, \gamma$ sont des paramètres numériques dépendant du type de sol

pour un sol purement frottant, on a :

a	b	c	d	e	f	m
0,92	1,25	0,92	1,25	0,41	0,32	0,96
k	k'	c _T	c _M	c' _M	β	γ
1	0,39	1,14	1,01	1,01	2,9	2,8

$$\bar{F} = \frac{a_g}{g \tan \phi'_d} \quad \text{désigne la force d'inertie du sol}$$

$$\bar{N} = \frac{\gamma_{Rd} N_{Ed}}{N_{max}}, \quad \bar{V} = \frac{\gamma_{Rd} V_{Ed}}{N_{max}}, \quad \bar{M} = \frac{\gamma_{Rd} M_{Ed}}{BN_{max}}$$

N_{max} est la capacité portante ultime de la fondation sous charge verticale centrée

pour un sol frottant : $N_{\max} = \frac{1}{2} \rho g \left(1 + \frac{a_v}{g} \right) B^2 N_\gamma$
 avec $N_\gamma = 2 (N_q - 1) \tan \varphi'$ et $N_q = e^{\pi \tan \varphi'} \tan^2 (45 + \varphi'/2)$

Tableau F.2 — Valeurs du coefficient partiel de modèle γ_{Rd}

Sable moyennement dense à dense	Sable lâche sec	Sable lâche saturé	Argile non sensible	Argile sensible
1,00	1,15	1,50	1,00	1,15

		Comb. Accidentelle. Séisme	
		A	B
Nmax	2 000	Ned	189
F	0,16	Ved	83
γ_{Rd}	1	Med	26
		N	0,09
		V	0,04
		M	0

Terme de gauche de l'inégalité	-0,01	-0,04
Stabilité	stable	stable

doit être négatif

Vérification au glissement :

il faut vérifier : $V_{Ed} \leq F_{Rd} + E_{pd}$

on néglige les frottements latéraux soit $E_{pd}=0$

où : $F_{Rd} = N_{Ed} \frac{\tan \delta}{\gamma_M}$
 avec $\gamma_M = 1,25$

δ est l'angle de frottement de l'interface sol-structure sous la base de la semelle

Accidentelle sismique		
	A	B
Force active de glissement (Ved)	82,68	88,62
Force résistante limite de glissement	98,06	111,51
Stabilité	stable	stable