



Webinaire du 10 Mai 2022 de 10h30 à 12h30

Soutènements en zone sismique – Partie II

Séance animée par :

- Fahd CUIRA
- Delphine BOUTHEON
- Gaël GOURRIN
- Gustavo PEREIRA
- Delphine LAOT et Dominique NIBEL
- Florent BOUDET et Dominique BATISTA

TERRASOL – CFMS
ERG – CFMS
SOCOTEC
SOLETANCHE BACHY
BOTTE FONDATIONS
CEREMA

Sommaire

- Murs et écrans de soutènement sous séisme
 - Compléments au webinaire du 12 Avril 2022
 - Exemple d'un mur gravitaire
 - Exemple d'un écran en milieu urbain

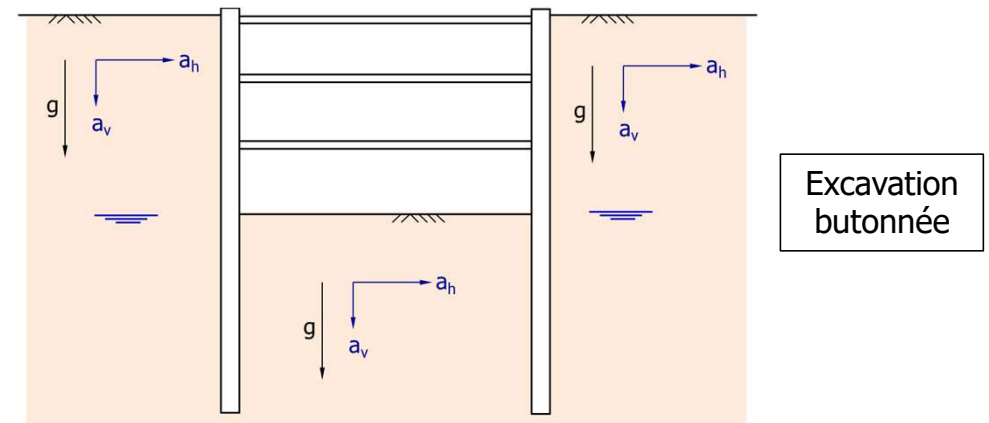
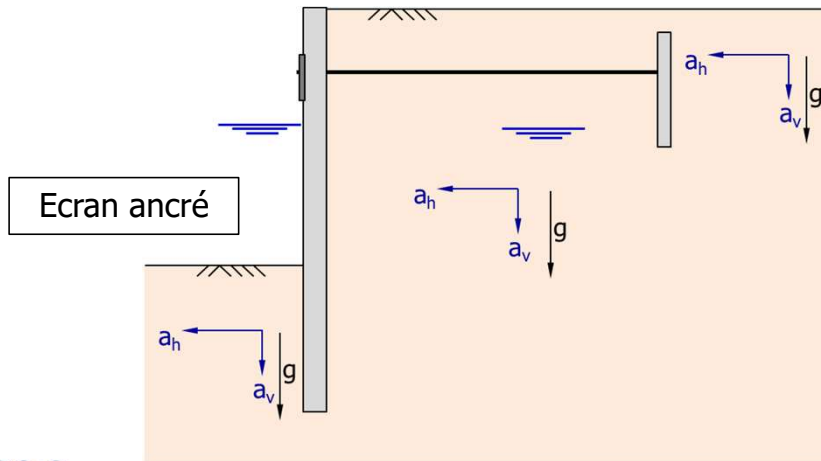
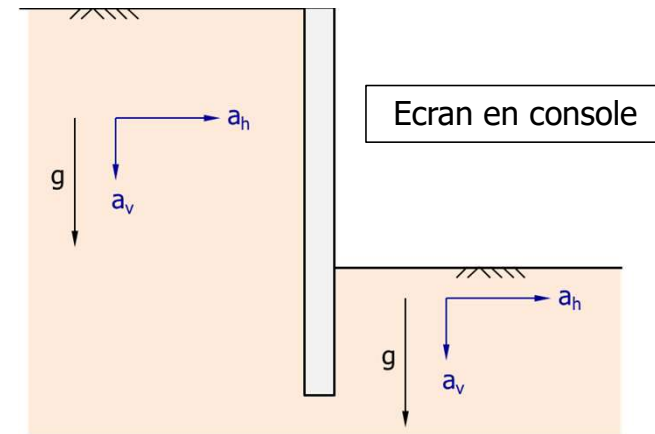
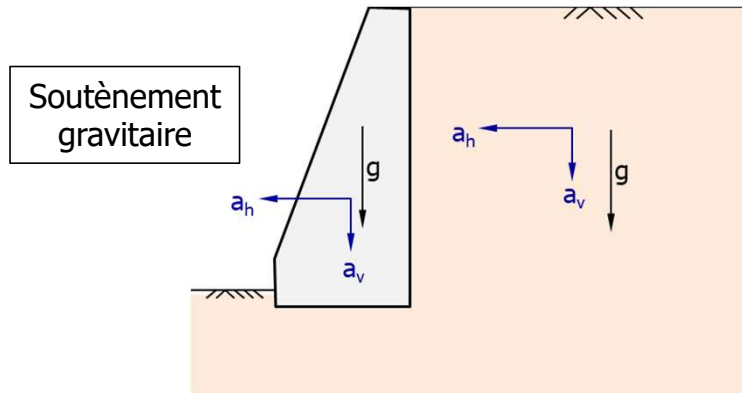
F. Caira (Terrasol)
G. Gourrin (Socotec)
D. Laot (Botte Fondations)
- Les soutènements en milieu portuaire
 - Les points clés à gérer
 - Projet de Guide Cerema

G. Pereira (Soletanche Bachy)
F. Boudet et D. Batista (Cerema)
- Perspectives normatives

F. Caira (Terrasol)

Objet du webinaire

- Ouvrages de soutènement soumis à action sismique



Sommaire

- Murs et écrans de soutènement sous séisme

- Compléments au webinaire du 12 Avril 2022

F. Caira (Terrasol)

- Exemple d'un mur gravitaire

G. Gourrin (Socotec)

- Exemple d'un écran en milieu urbain

D. Laot (Botte Fondations)

- Les soutènements en milieu portuaire

- Les points clés à gérer

G. Pereira (Soletanche Bachy)

- Projet de Guide Cerema

F. Boudet et D. Batista (Cerema)

- Perspectives normatives

F. Caira (Terrasol)

Compléments sur le calcul de poussée/butée

- Approches globales (par l'extérieur)
 - ⇒ Modèle de Mononobé-Okabé (1924) qui est une généralisation du modèle de Coulomb = couvre la majorité des cas courants. Son application pour la butée impose (tout comme en statique) est possible seulement pour une rugosité nulle ;
 - ⇒ Calcul à la rupture (Salençon, 1983) qui est une approche cinématique par l'extérieur = permet de couvrir des stratigraphies complexes et une gestion plus fine des effets de la cohésion et de la rugosité (en butée notamment)
- Approches locales (par l'intérieur)
 - ⇒ Utilisation des abaques de Caquot Kérisel (1948) avec gravité modifiée, approche qui s'inscrit dans la continuité de la pratique des calculs de soutènement sous action statique
 - ⇒ Modèle de Lancellota (2002) qui est une approche statique par l'intérieur = approche en contraintes effectives présentant un intérêt pratique (simplicité d'utilisation)

Compléments sur le calcul de poussée/buté

- Comparaison des différentes approches : action de poussée

		← Estimation par défaut		Estimation par excès →	
		Mononobé-Okabé (1924)	Calcul à la rupture (1983)	Caquot-Kérisel (1948)	Lancellota (2002)
$k_h = 0$	$\delta/\varphi = 0$	120	120	120	120
$k_h = 0$	$\delta/\varphi = +2/3$	107	108	108	109

Poussée résultante en kN/ml - Hauteur soutenue = 6m, $\gamma = 20\text{kN/m}^3$, $\varphi = 30^\circ$, $c = 0$, $k_v = 0$

Compléments sur le calcul de poussée/buté

- Comparaison des différentes approches : action de poussée

		← Estimation par défaut		Estimation par excès →	
		Mononobé-Okabé (1924)	Calcul à la rupture (1983)	Caquot-Kérisel (1948)	Lancellota (2002)
$k_h = 0$	$\delta/\varphi = 0$	120	120	120	120
$k_h = 0$	$\delta/\varphi = +2/3$	107	108	108	109
$k_h = 0,20$	$\delta/\varphi = 0$	170	170	170	181
$k_h = 0,20$	$\delta/\varphi = +2/3$	163	163	164	170

Poussée résultante en kN/ml - Hauteur soutenue = 6m, $\gamma = 20\text{kN/m}^3$, $\varphi = 30^\circ$, $c = 0$, $k_v = 0$

Compléments sur le calcul de poussée/butée

- Comparaison des différentes approches : réaction de butée

		← Estimation par excès		Estimation par défaut →	
		Mononobé-Okabé (1924)	Calcul à la rupture (1983)	Caquot-Kérisel (1948)	Lancellota (2002)
$k_h = 0$	$\delta/\varphi = 0$	480	480	480	480
$k_h = 0$	$\delta/\varphi = -2/3$	976	856	850	789

Butée résultante en kN/ml - Hauteur de fiche = 4m, $\gamma = 20\text{kN/m}^3$, $\varphi = 30^\circ$, $c = 0$, $k_v = 0$

Compléments sur le calcul de poussée/butée

- Comparaison des différentes approches : réaction de butée

		← Estimation par excès		Estimation par défaut →	
		Mononobé-Okabé (1924)	Calcul à la rupture (1983)	Caquot-Kérisel (1948)	Lancellota (2002)
$k_h = 0$	$\delta/\varphi = 0$	480	480	480	480
$k_h = 0$	$\delta/\varphi = -2/3$	976	856	850	789
$k_h = 0,20$	$\delta/\varphi = 0$	420	420	420	417
$k_h = 0,20$	$\delta/\varphi = -2/3$	796	734	712	686

Butée résultante en kN/ml - Hauteur de fiche = 4m, $\gamma = 20\text{kN/m}^3$, $\varphi = 30^\circ$, $c = 0$, $k_v = 0$

Compléments sur le calcul de poussée/butée

- Lien avec l'annexe E de l'EC8-5

Annexe E

(normative)

Analyse simplifiée pour les ouvrages de soutènement

E.1 D'un point de vue conceptuel, le facteur r est défini comme étant le rapport entre la valeur de l'accélération produisant le déplacement permanent maximal compatible avec les sujétions existantes, et la valeur correspondant à l'état d'équilibre limite (apparition des déplacements). Il en résulte que r est plus grand pour les murs qui peuvent supporter des déplacements plus importants.

$$r = \frac{a_N}{a_{dsb}}$$

E.2 Pour des ouvrages de soutènement de hauteur supérieure à 10 m, on peut effectuer une analyse mono-dimensionnelle de propagation verticale des ondes en champ libre, pour obtenir une estimation plus affinée de α dans l'expression (7.1), en prenant la valeur moyenne du pic d'accélération horizontale du sol, le long de la hauteur de la structure.

k_h peut varier avec la profondeur

Compléments sur le calcul de poussée/buté

- Lien avec l'annexe E de l'EC8-5

E.4 Le coefficient de poussée des terres peut être calculé à partir de la formule de Mononobe et Okabe.

Pour les états actifs (poussée) :

si $\beta \leq \phi'_d - \theta$

D'autres approches
peuvent être utilisées

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

Compléments sur le calcul de poussée/buté

- Lien avec l'annexe E de l'EC8-5

Pour les états passifs (pas de force de frottement entre le sol et le mur) :

Dans le cadre de la formule de Monobé-Okabé (Coulomb)

$$K = \frac{\sin(\psi + \phi'_d - \theta)}{\cos\theta \sin^2 \psi \sin(\psi + \theta) \left[1 - \sqrt{\frac{\sin\phi'_d \sin(\phi'_d + \beta - \theta)}{\sin(\psi + \beta) \sin(\psi + \theta)}} \right]} \quad \dots \text{(E.4)}$$

Compléments sur le calcul de poussée/buté

- Lien avec l'annexe E de l'EC8-5

E.5 Nappe phréatique au-dessous du mur de soutènement — Coefficient de poussée des terres

On donne aux paramètres les valeurs suivantes :

$$\gamma^* = \gamma \text{ est le poids volumique du sol} \quad \dots \text{ (E.5)}$$

$$\tan \theta = \frac{k_h}{1 \mp k_v} \quad \dots \text{ (E.6)}$$

$$E_{wd} = 0 \quad \dots \text{ (E.7)}$$

où :

k_h est le coefficient sismique horizontal (voir l'expression 7.1).

En variante, on peut utiliser les tables et les abaques applicables dans les conditions statiques (charges gravitaires uniquement), avec les modifications suivantes :

Par exemple, Caquot-Kérisel avec gravité modifiée

en notant :

$$\tan \theta_A = \frac{k_h}{1 + k_v} \quad \dots \text{ (E.8)}$$

et

$$\tan \theta_B = \frac{k_h}{1 - k_v} \quad \dots \text{ (E.9)}$$

l'ensemble du système sol-mur subit une rotation correspondant à l'angle supplémentaire θ_A ou θ_B .

cf. webinaire du 12 Avril

Compléments sur le calcul de poussée/butée

- Lien avec l'annexe E de l'EC8-5

E.9 Effort dû à la poussée des terres pour les structures rigides et complétement empêchées de se mouvoir par rapport au sol...

Pour les structures rigides complétement empêchées de se mouvoir par rapport au sol de telle sorte qu'un état actif ne peut pas se produire dans le sol, et lorsque le mur est vertical et le remblai horizontal, l'effort dynamique dû à l'augmentation de la poussée des terres peut être pris comme étant égal à :

$$\Delta P_d = \alpha \cdot S \cdot \gamma \cdot H^2 \quad \dots \text{(E.19)}$$

où :

H est la hauteur du mur.

Le point d'application peut être pris à mi-hauteur.

Suppose l'absence de tout déplacement « relatif » du mur par rapport au sol. D'autres approches peuvent être utilisées faisant intervenir la notion de rigidité relative.

Quelques références utiles

Calculs de poussée/butée

- [1] 1924, Okabe S., General theory of earth pressure and seismic stability of retaining wall and dam. Journal of Japan Society of Civil Engineers, Vol. 10, N°6
- [2] 1948, Caquot A. et Kérisel J., Traité de Mécanique des sols, Editions de l'Ecole Polytechnique
- [3] 1983, Salençon J., Calcul à la rupture et analyse limite. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées
- [4] 2002, Lancellotta R., Analytical solution of passive earth pressure. *Géotechnique* 52(8) : 617-619.
- [5] 2003, Kérisel J. et Absi E., Tables de Poussée et de Butée des Terres, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées
- [6] 2005, Psarropoulos P.N. ,Klonaris G. ,Gazetas G., Seismic earth pressures on rigid and flexible retaining walls. Soil Dynamics and Earthquake Engineering
- [7] 2006, Simon B., Applications du calcul à la rupture aux ouvrages de soutènements, Symposium ELU-ULS, LCPC, Paris
- [8] 2018, Cuira F. et Brûlé S., Ouvrages de soutènement sous séisme, Fascicule C253 des Techniques de l'Ingénieur (p16-23)

Justification parasismique des ouvrages de soutènement

- [10] 1979, Richards R. J. et Elms D., Seismic Behavior of Gravity Walls, J. Geotech Eng. Div., 105(GT4), 449-464
- [11] 1985, Whitman R.V. et Liao S., Seismic design of gravity retaining walls, Cambridge, Ma.
- [12] 1988, Ambraseys N.N. et Menu J.M., Earthquake-induced ground displacements, Earthquake Engineering Structural Dynamics, Vol16, Issue 7
- [13] 2000, Younan, A.H. et Veletsos, A.S., Dynamic response of flexible retaining walls. Earthq. Eng. and Struct. Dyn., 29, 1815-1844.
- [14] 2001, PIANC, Seismic design guidelines for port structures, Report of WG34
- [15] 2003, Betbeder-Matibet J., Génie Parasismique, Prévention parasismique – tome 3, Lavoisier Hermès
- [16] 2016, Garini E., Tsantilas L., Gazetas G., Seismic Response of Cantilever Retaining Walls, Verification of Centrifuge Experiments, ICONHIC 2016
- [17] 2017, Cuira F. et Brûlé S., Pratique de l'interaction sol-structure sous séisme – Chapitre 11 (Ouvrages de soutènement). AFNOR Editions

Quelques références utiles

JST CFMS/AFPS « Vibrations et séismes » : <https://www.cfms-sols.org/documentation/exposes-du-cfms#2016>

JST CFMS « Interaction sol-structure » : <https://www.cfms-sols.org/documentation/exposes-du-cfms#2017>

JST CFMS/AFPS « Frontière Géotechnique/Parasismique » : <https://www.cfms-sols.org/documentation/exposes-du-cfms#2019>

JST CFMS sur les « ouvrages portuaires » : <https://www.cfms-sols.org/documentation/exposes-du-cfms#2021>

Sommaire

- Murs et écrans de soutènement sous séisme
 - Compléments au webinaire du 12 Avril 2022 F. Caira (Terrasol)
 - Exemple d'un mur gravitaire **G. Gourrin (Socotec)**
 - Exemple d'un écran en milieu urbain D. Laot (Botte Fondations)
- Les soutènements en milieu portuaire
 - Les points clés à gérer G. Pereira (Soletanche Bachy)
 - Projet de Guide Cerema F. Boudet et D. Batista (Cerema)
- Perspectives normatives F. Caira (Terrasol)

Sommaire

- Murs et écrans de soutènement sous séisme

- Compléments au webinaire du 12 Avril 2022 F. Caira (Terrasol)
- Exemple d'un mur gravitaire G. Gourrin (Socotec)
- Exemple d'un écran en milieu urbain D. Laot (Botte Fondations)

- Les soutènements en milieu portuaire

- Les points clés à gérer G. Pereira (Soletanche Bachy)
- Projet de Guide Cerema F. Boudet et D. Batista (Cerema)

- Perspectives normatives

F. Caira (Terrasol)

Sommaire

- Murs et écrans de soutènement sous séisme
 - Compléments au webinaire du 12 Avril 2022 F. Caira (Terrasol)
 - Exemple d'un mur gravitaire G. Gourrin (Socotec)
 - Exemple d'un écran en milieu urbain D. Laot (Botte Fondations)
- Les soutènements en milieu portuaire
 - Les points clés à gérer G. Pereira (Soletanche Bachy)
 - Projet de Guide Cerema F. Boudet et D. Batista (Cerema)
- Perspectives normatives F. Caira (Terrasol)

Sommaire

- Murs et écrans de soutènement sous séisme
 - Compléments au webinaire du 12 Avril 2022 F. Cuirra (Terrasol)
 - Exemple d'un mur gravitaire G. Gourrin (Socotec)
 - Exemple d'un écran en milieu urbain D. Laot (Botte Fondations)
- Les soutènements en milieu portuaire
 - Les points clés à gérer G. Pereira (Soletanche Bachy)
 - **Projet de Guide Cerema F. Boudet et D. Batista (Cerema)**
- Perspectives normatives F. Cuirra (Terrasol)

Sommaire

- Murs et écrans de soutènement sous séisme
 - Compléments au webinaire du 12 Avril 2022 F. Caira (Terrasol)
 - Exemple d'un mur gravitaire G. Gourrin (Socotec)
 - Exemple d'un écran en milieu urbain D. Laot (Botte Fondations)
- Les soutènements en milieu portuaire
 - Les points clés à gérer G. Pereira (Soletanche Bachy)
 - Projet de Guide Cerema F. Boudet et D. Batista (Cerema)
- Perspectives normatives F. Caira (Terrasol)

Eurocode 8 de 2^e génération

- Action sismique
Enrichissement de la classification sismique des ouvrages (critères déplacements)
Enrichissement de la classification sismique des sols
- Facteurs de sécurité
Les facteurs partiels applicables sur les $\tan(\varphi')$ et c_u (re)passent à 1,00 (au lieu de 1,25 et 1,40 dans la version actuelle)
Développement de facteurs permettant de réduire explicitement l'action sismique pour ouvrage autorisant des déplacements
- Liquéfaction
Facteur de sécurité de 1,25 (et 2,00 vis-à-vis soutènements)
Annexe détaillée sur méthodes empiriques CPT et SPT (y compris l'estimation des tassements)
- ISS
Promotion des « approches en déplacement » (ISS non linéaire), notamment vis-à-vis des mécanismes de stabilité « géotechnique » (glissement, décollement, portance etc.)
Annexe détaillée sur les fonctions d'impédances pour fondations superficielles et profondes
- Soutènements
Poussée/butée en contraintes effectives avec prise en compte cohésion, rugosité
Prise en compte variation spatiale (X, Y) de l'action sismique
Notion d'accélération déstabilisante (ou critique)

Eurocode 8 de 2^e génération

- Trois états limites sismiques
 - ⇒ Etat limite « NC » Proche effondrement (ELU)
 - ⇒ Etat limite « SD » Dommages significatifs mais réparables (ELU)
 - ⇒ Etat limite « DL » Limitation des dommages (ELS)
- Trois classes de conséquence (selon EC0)
 - ⇒ Classe « CC1 » Structures ordinaires
 - ⇒ Classe « CC2 » Structures importantes
 - ⇒ Classe « CC3 » Structures essentielles
- Deux méthodes d'analyse
 - ⇒ Approche « FBA » Force-based approach (formalisme de sécurité)
 - ⇒ Approche « DBA » Displacement-based approach (ISS non linéaire)

Eurocode 8 de 2^e génération

- Webinaire de présentation de l'EC8-5 organisé par l'EAAE le 08 Juillet 2022 de 9h à 13h
 - Basis of design for geotechnical structures + Seismic actions Alain Pecker
 - Site stability (slopes, liquefaction...) Amir Kaynia
 - Soil structure interaction George Gazetas
 - Foundation systems (shallow foundations, piles) Antonio Correia
 - Retaining structures Luigi Callisto
 - Underground structures Kyriazis Pitilakis

Inscriptions et replay sur : <https://ec8webinars.org/webinars/>

AGENDA DU CFMS : Les Webinaires

Le Comité Français de Mécanique des Sols et de Géotechnique (CFMS) organise un webinaire par visio-conférence tous les deuxièmes mardis du mois (de 11h à 12h30, en général ; certains webinaires ont lieu de 10h30 à 12h30).

Vous trouverez ci-après le programme prévisionnel (dates et thématiques) de nos prochains webinaires. Les programmes détaillés sont diffusés sur <https://www.cfms-sols.org> au fur et à mesure de leur finalisation.

Date	Thématique
10/05/2022	WEBINAIRE : Ouvrages de soutènement en zone sismique – 2ème Partie
14/06/2022	Géostructures énergétiques : concepts de base, retours d'expérience et applications pratiques
05/07/2022	Jeunes Chercheurs en géotechnique – 3ème édition
11/10/2022	Regards croisés sur la pratique de la géotechnique à l'international – 1ère édition
08/11/2022	Réparation et reprise en sous œuvre des murs de soutènement

<https://www.cfms-sols.org/agenda-du-cfms>

AGENDA DU CFMS : Les Journées Scientifiques et Techniques

Le Comité Français de Mécanique des Sols et de Géotechnique (CFMS) organise régulièrement (intervalle de 1 à 2 mois) des Journées Scientifiques et Techniques (JST), par défaut en présentiel, combinant des exposés et des séances d'échange.

Vous trouverez ci-après le programme prévisionnel (dates et thématiques) de nos prochaines JST. Les programmes détaillés sont diffusés sur <https://www.cfms-sols.org> au fur et à mesure de leur finalisation.

Date	Thématique	Lieu
12/05/2022	Présentation des Recommandations pour la conception, l'exécution et le suivi des rabattements temporaires de nappes	A l'Université Gustave Eiffel, Amphi Bienvenüe, Champs-sur-Marne
01/06/2022	ASSEMBLEE GÉNÉRALE 2022 et Demi-journée Scientifique et Technique	Université Gustave Eiffel (UGE)
15/09/2022	Ouvrages fluviaux (date et lieu à confirmer)	A définir
06/10/2022	Modèles physiques (1/2 journée : 14h à 17h)	UGE(*)
15/11/2022	Gestion des données et nouvel environnement digital en géotechnique	UGE(*)

(*) Université Gustave Eiffel (Champs sur Marne)

<https://www.cfms-sols.org/agenda-du-cfms>

Merci pour votre attention



Retrouvez le replay et les supports sur :

<https://www.cfms-sols.org/documentation/webinaires-du-cfms>

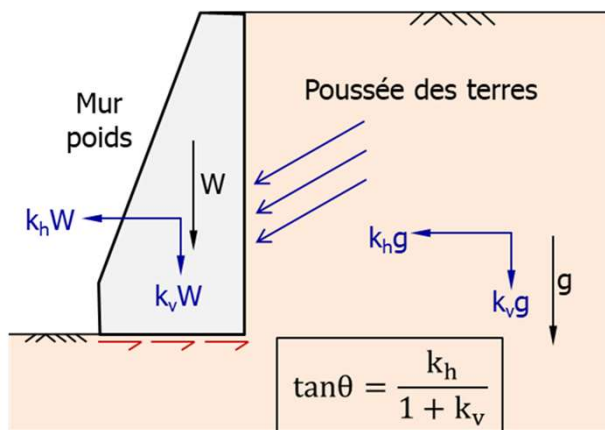
Compléments sur la stabilité sismique

- Formalisme de justification

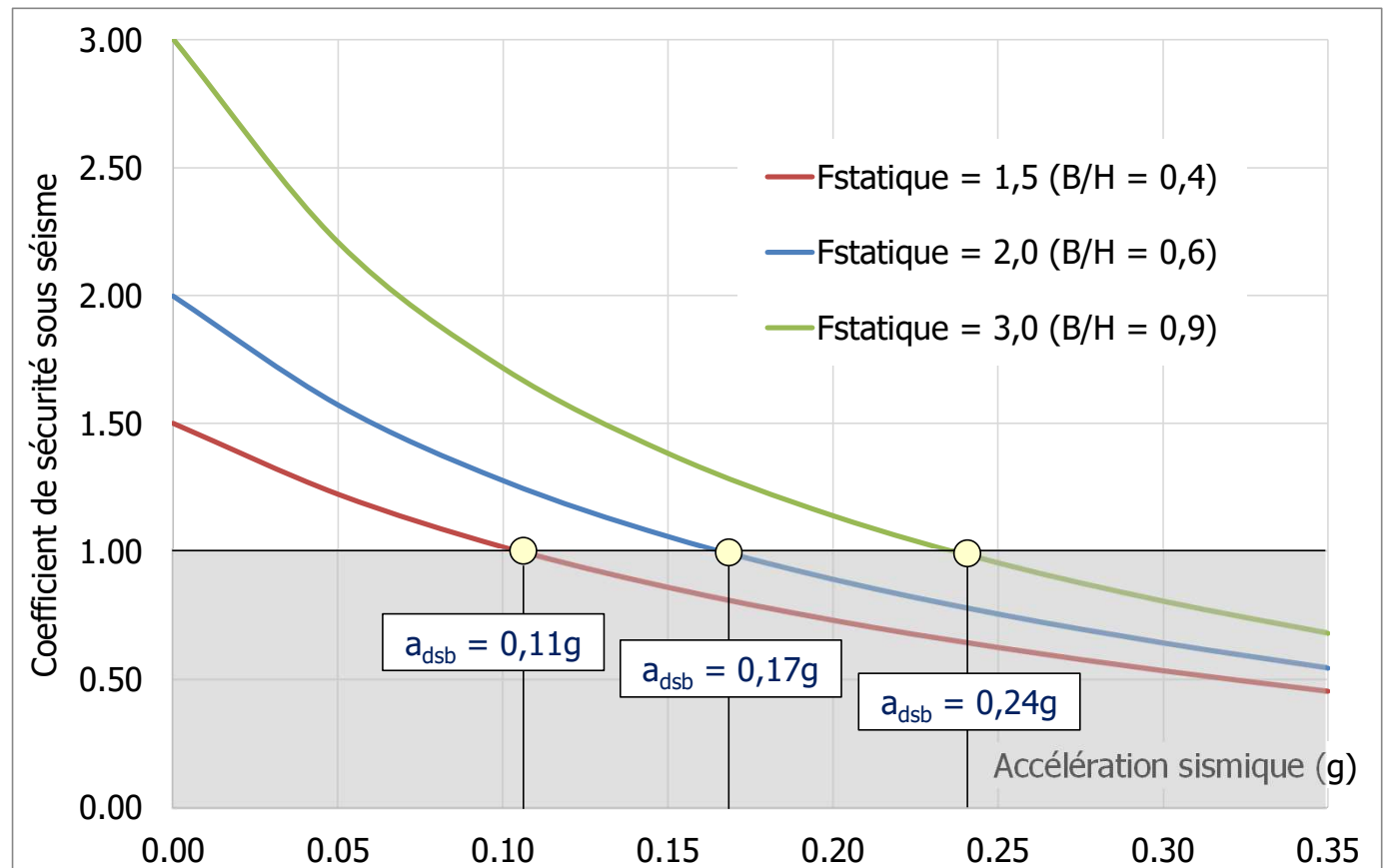
- ⇒ Un état limite sismique est un état limite pour lequel il y a apparition de déplacements irréversibles d'une amplitude inacceptable. Cela peut se présenter sous la forme d'un déplacement absolu (ex. tassement ou translation excessive) ou différentiel (rotation ou distorsion excessives)
- ⇒ Dans la pratique courante, il est souvent fait recours à des formalismes de justification « **pseudo-statiques** » comparant des actions et des résistances. Il s'agit d'un moyen « détourné » de couvrir les déplacements irréversibles post-séisme (rôle du facteur « r » notamment, des facteurs partiels etc.)
- ⇒ Ces formalismes peuvent dans certains conduire à une « impasse conceptuelle » : il peut alors être fait recours à des **analyses « en déplacement »** (modèle de bloc rigide, modèle dynamique non linéaire etc.) visant à quantifier l'amplitude des déplacements induits et en vérifier l'acceptabilité vis-à-vis de l'ouvrage projeté

Compléments sur la stabilité sismique

- Impasse conceptuelle des modèles pseudo-statiques : stabilité au glissement d'un mur poids

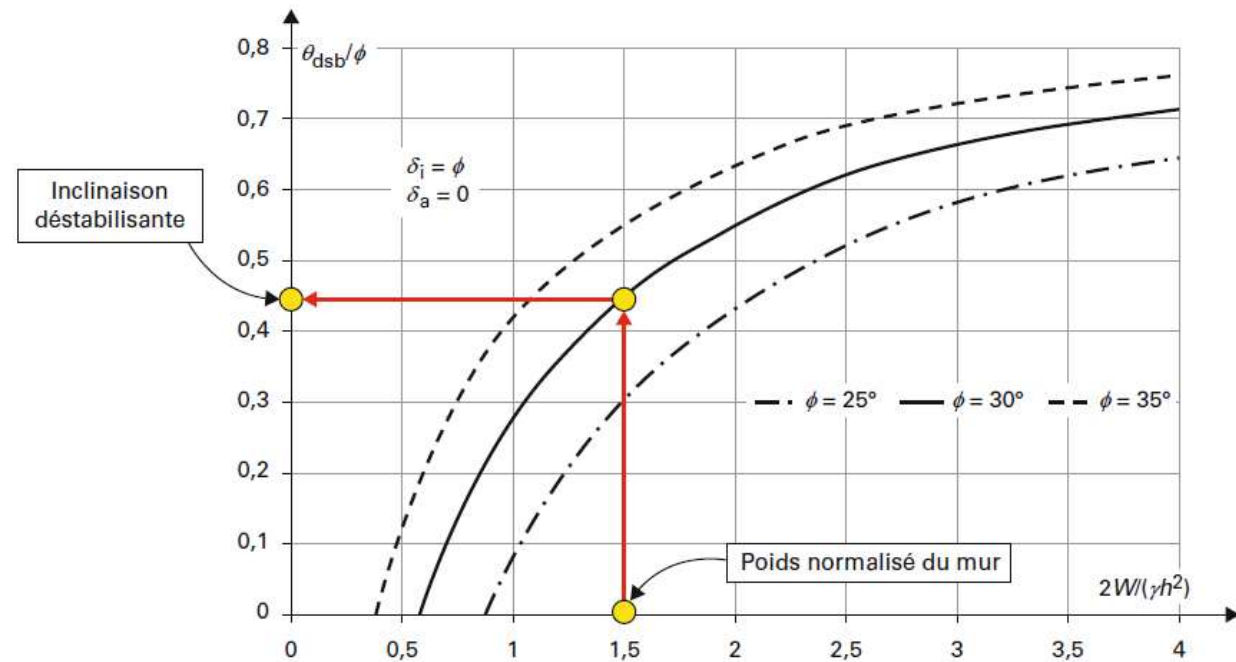
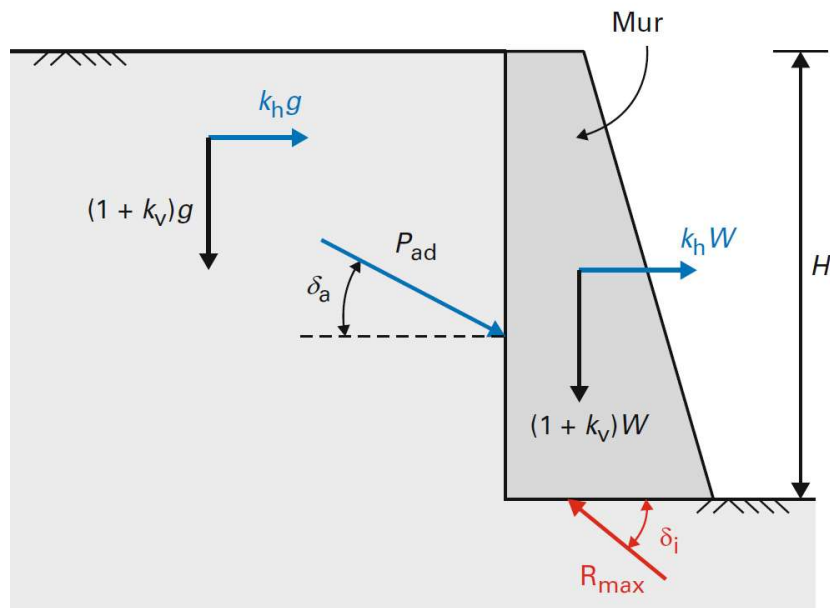


$\gamma = 20 \text{ kN/m}^3, \varphi = 33^\circ, c = 0$



Compléments sur la stabilité sismique

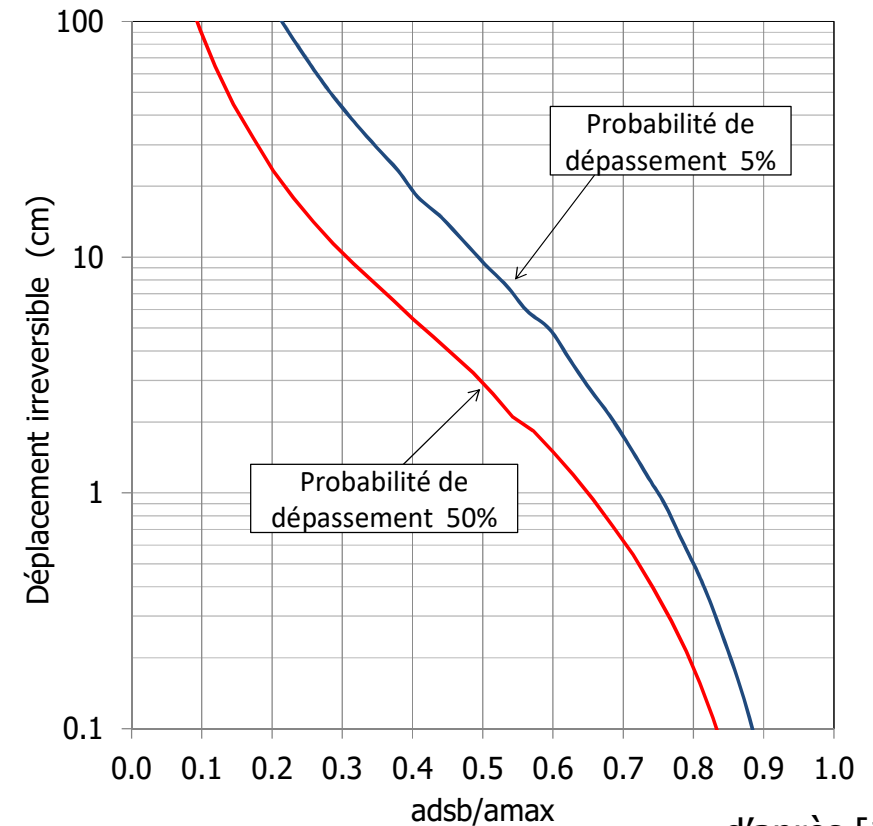
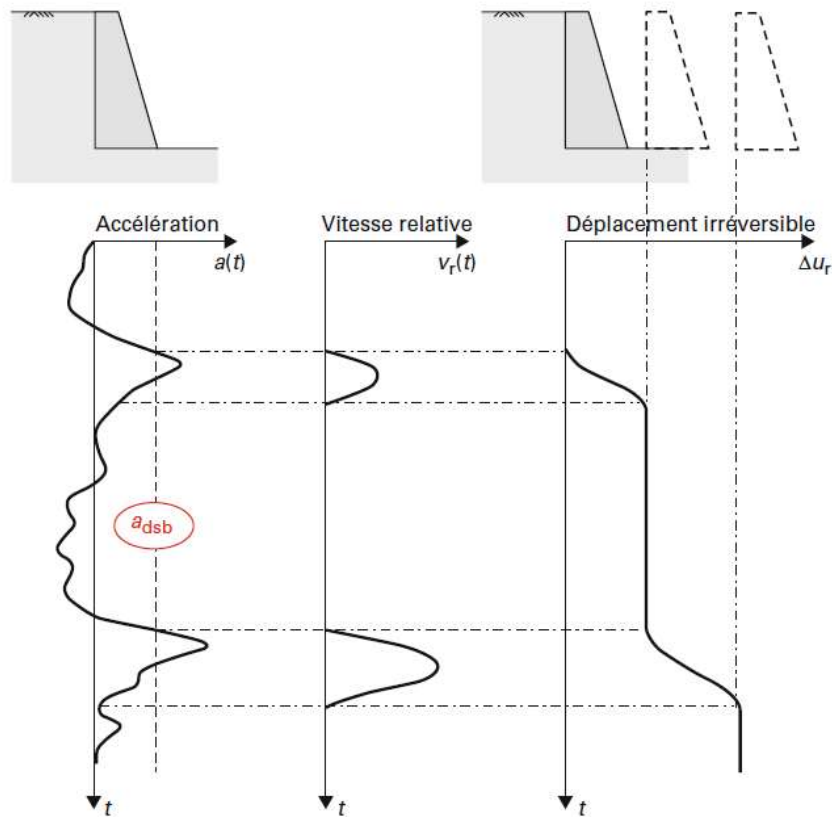
- Estimation pratique de l'accélération déstabilisante : recherche de a_h (ou k_h) telle que $F = 1$



d'après [8] et [17]

Compléments sur la stabilité sismique

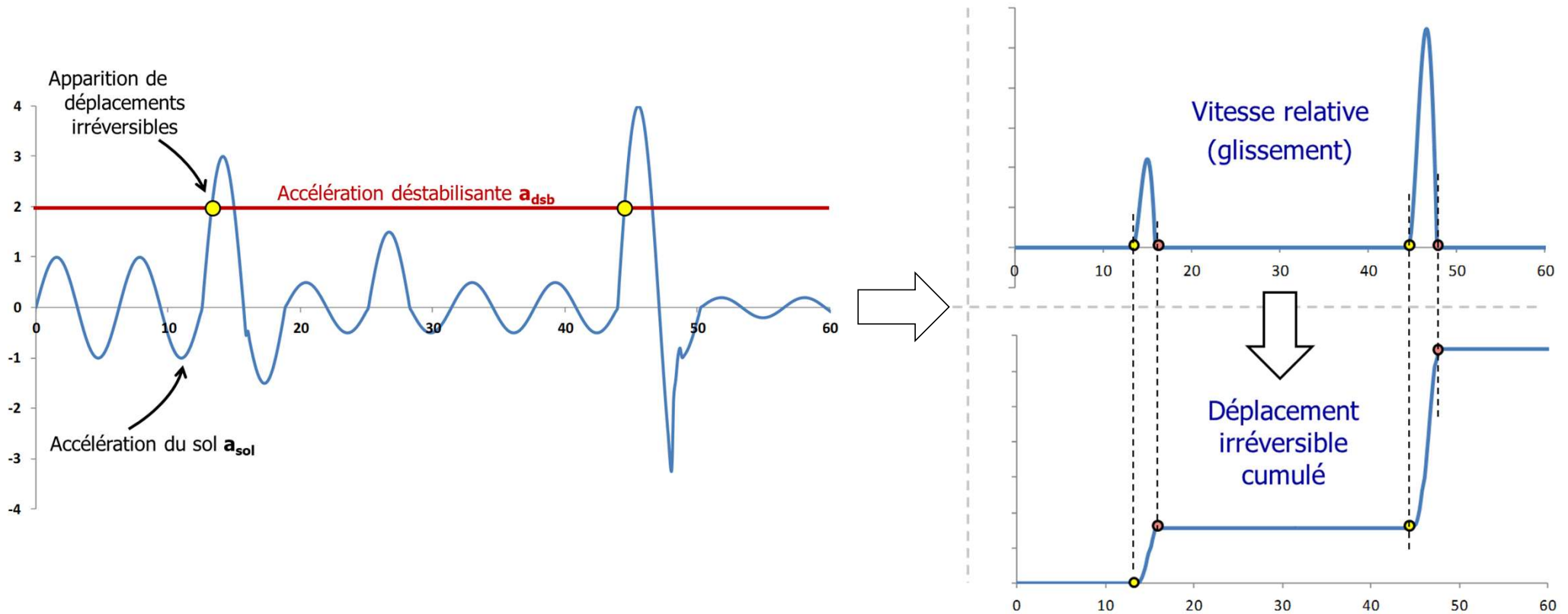
- Estimation des déplacements irréversibles par un modèle empirique



d'après [12]

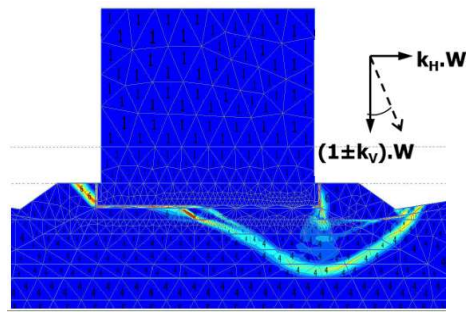
Compléments sur la stabilité sismique

- Estimation des déplacements irréversibles par un modèle analytique (par ex. Newmark)

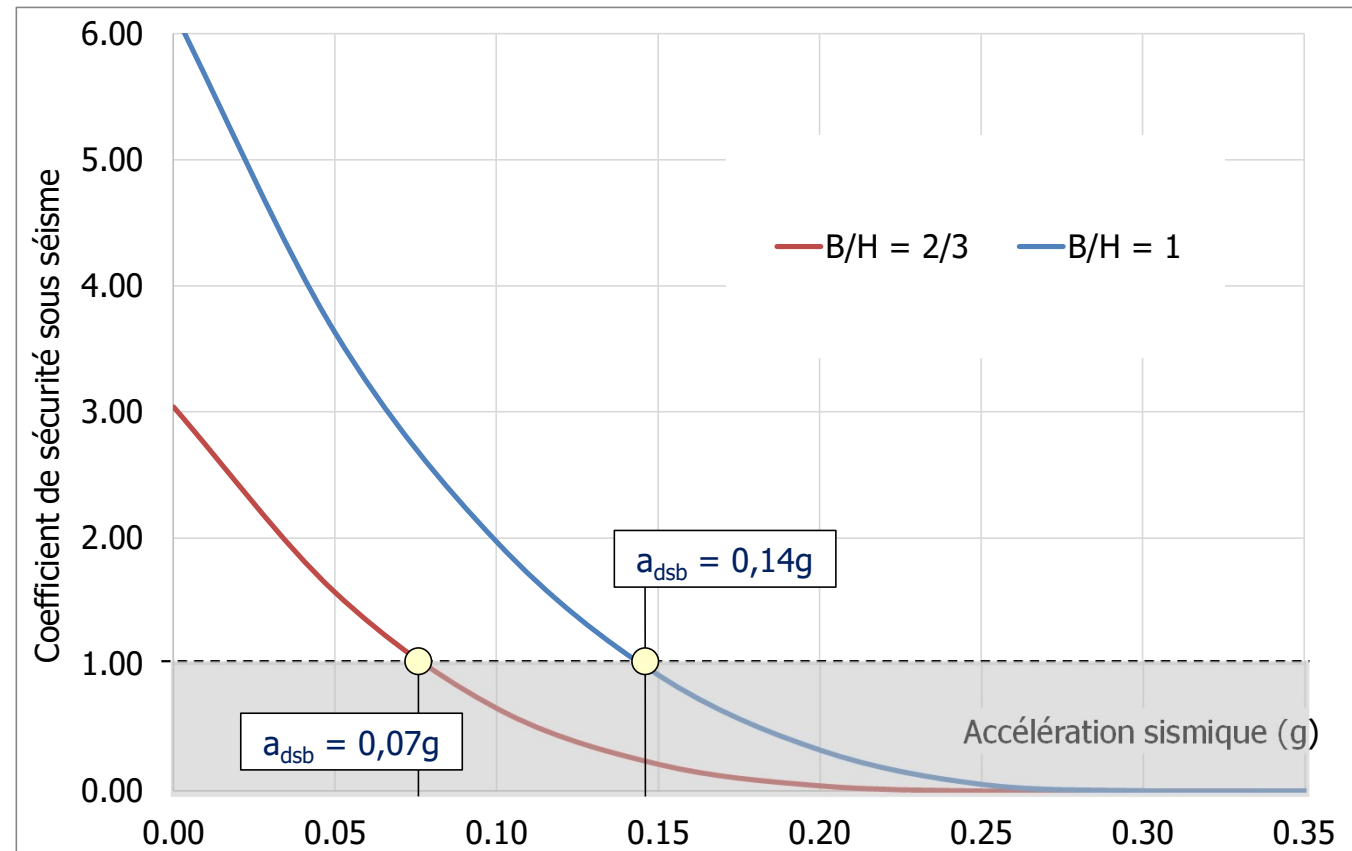


Compléments sur la stabilité sismique

- Impasse conceptuelle des modèles pseudo-statiques : stabilité au poinçonnement d'un quai poids

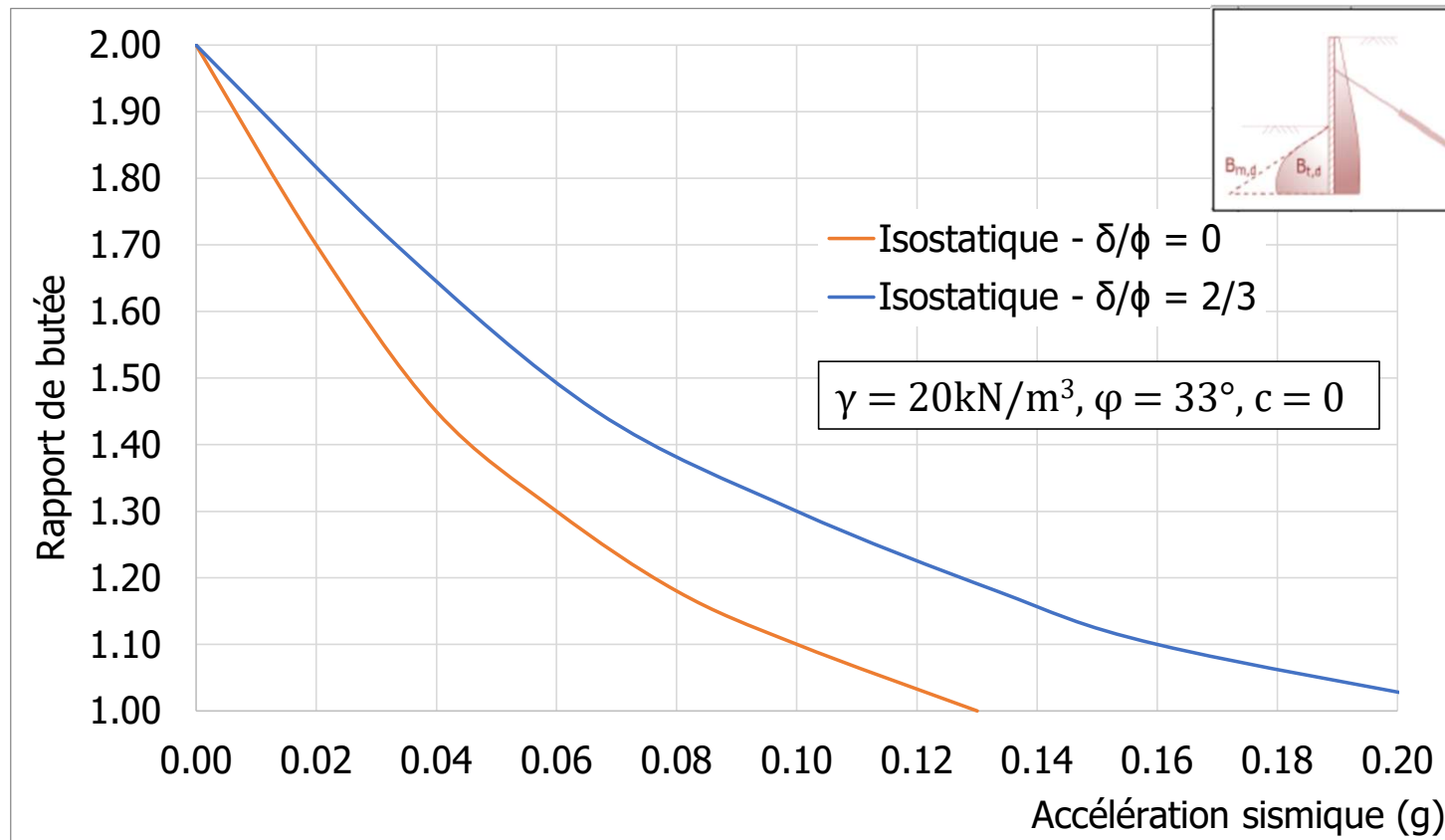


$\gamma = 20\text{kN/m}^3$, $\varphi = 33^\circ$, $c = 0$



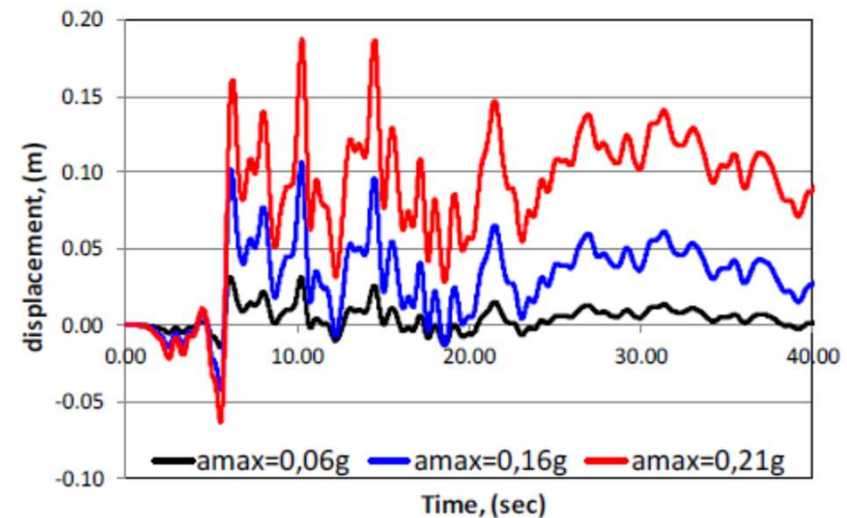
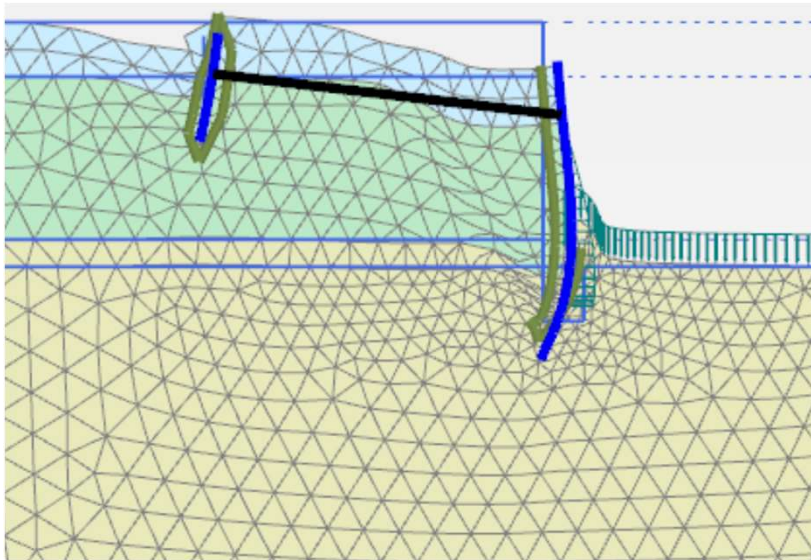
Compléments sur la stabilité sismique

- Impasse conceptuelle des modèles pseudo-statiques : équilibre limite d'un rideau ancré



Compléments sur la stabilité sismique

- Estimation des déplacements irréversibles par un modèle dynamique (non-linéaire) temporel



Permet d'avoir accès aux sollicitations et aux déplacements en fonction du temps

Compléments sur la stabilité sismique

- Exploitation d'une analyse en déplacements : exemples de critères (recommandations PIANC)

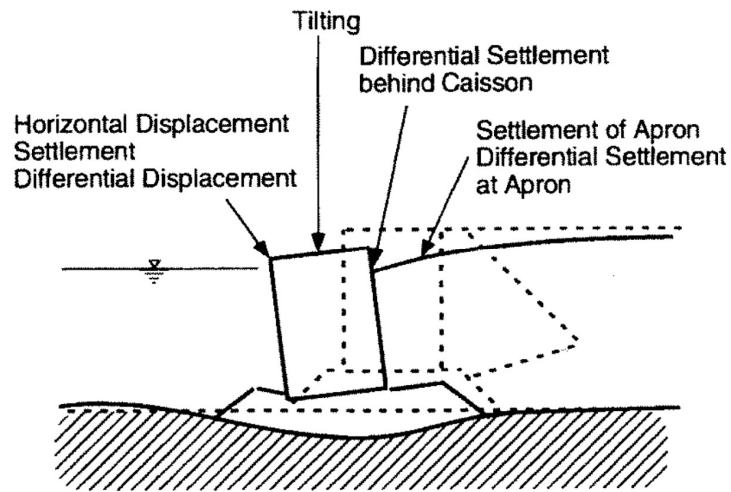


Table 4.1. Proposed damage criteria for gravity quay walls.

Level of damage		Degree I	Degree II	Degree III	Degree IV
Gravity wall	Normalized residual horizontal displacement (d/H)*	Less than 1.5%**	1.5~5%	5~10%	Larger than 10%
	Residual tilting towards the sea	Less than 3°	3~5°	5~8°	Larger than 8°
Apron	Differential settlement on apron	Less than 0.03~0.1 m	N/A***	N/A	N/A
	Differential settlement between apron and non-apron areas	Less than 0.3~0.7 m	N/A	N/A	N/A
	Residual tilting towards the sea	Less than 2~3°	N/A	N/A	N/A
		Opérationnel	Réparable	Proche effondrement	Perte totale de la structure