

Journées Ouvrages d'Art 2018



Réflexions sur la justification au séisme des murs de soutènement fondés sur semelles superficielles

Dominique BATISTA (DterMed)
Denis DAVI, Sylvain MERELLE, Jérôme SALIBA

Introduction

- Le décret du 22 octobre 2010 étend les zones de sismicité sur 2/3 du territoire (contre 17% auparavant) multipliant le nombre de murs concernés par le séisme
- Méthode pseudo-statique de Mononobe Okabe : préconisée dans l'annexe E de l'EC8-5.
- Méthode apparaissant sécuritaire (limitations documentées dans la littérature américaine)
- Des retours d'expérience plutôt rassurants
 - Peut-on mettre en évidence les sources de conservatisme de la méthode de Mononobe Okabe ?
 - Peut-on formuler des pistes d'évolution de l'EC8-5 ?
 - évolution des coefficients de sécurité
 - prise en compte de l'effet de la cohésion
 - utilisation d'approches alternatives

Plan de la présentation

- 1) Calcul de la poussée dynamique des terres selon l'annexe E de l'EC8-5, limites identifiées
- 2) Comparaison de méthodes sur l'exemple d'un mur poids
 - A) Méthode pseudo-statique
 - B) General Limit Equilibrium à partir de contraintes calculées par MEF
 - C) Méthodes en déplacement
- 3) Conclusion, propositions et perspectives

1) Limites de Mononobe Okabe :

Pondération de l'angle de frottement interne

- L'eurocode 8-5 impose la pondération de la résistance au cisaillement et de l'angle de frottement à l'interface sol/mur :

$$\Phi_d = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \Phi}{1.25} \right) \quad \delta_{ad} = \arctan \left(\frac{\tan \delta_a}{1.25} \right)$$

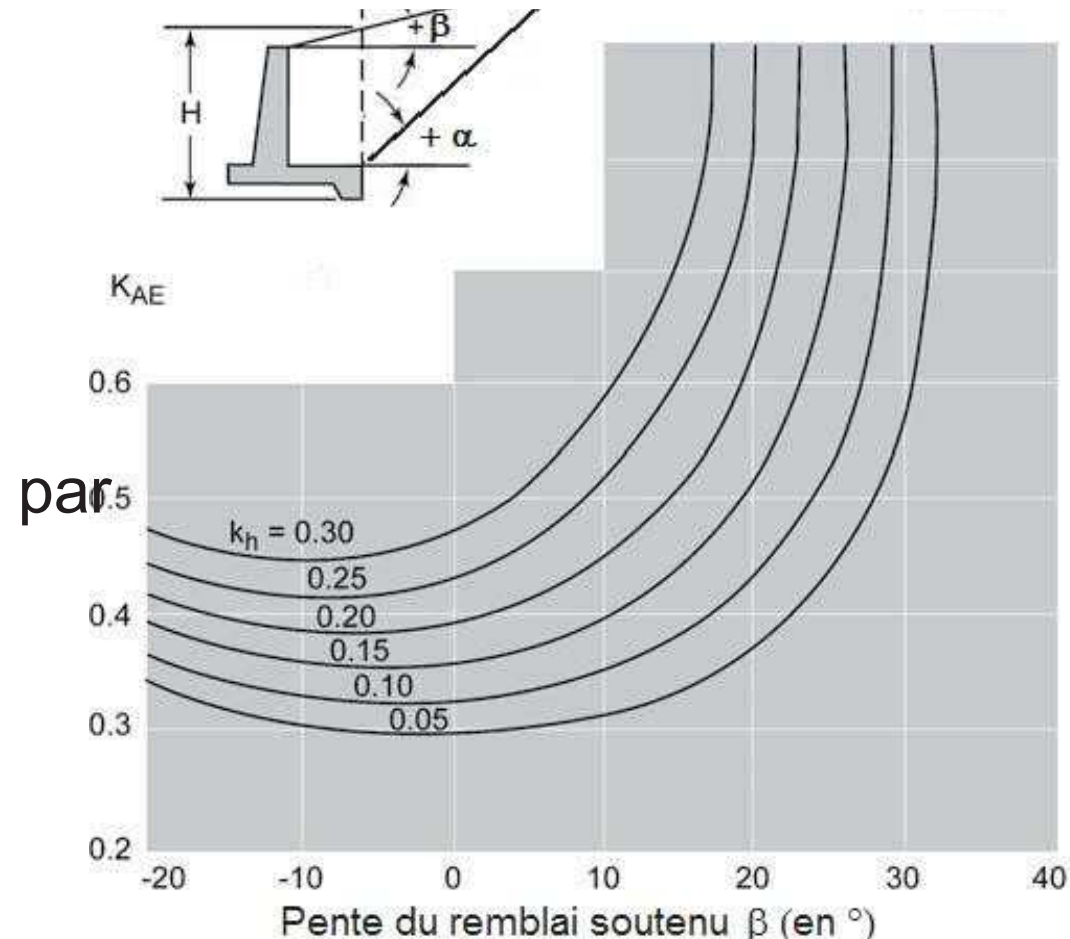
- pondérations absentes des règles PS92 et règlements américains « AASHTO LRFD Bridge Design Specifications ».
- => majoration du coefficient de poussée de 18 à 27%
- => majoration de l'action de poussée alors que les efforts ne sont pas pondérés dans les combinaisons d'action sismiques
- «double pondération» excessivement conservative notamment pour la justification au glissement : poussées x (1,18 à 1,27) et résistance / 1,25

1) Limites de Mononobe Okabe :

Surestimation de la poussée pour les pentes importantes

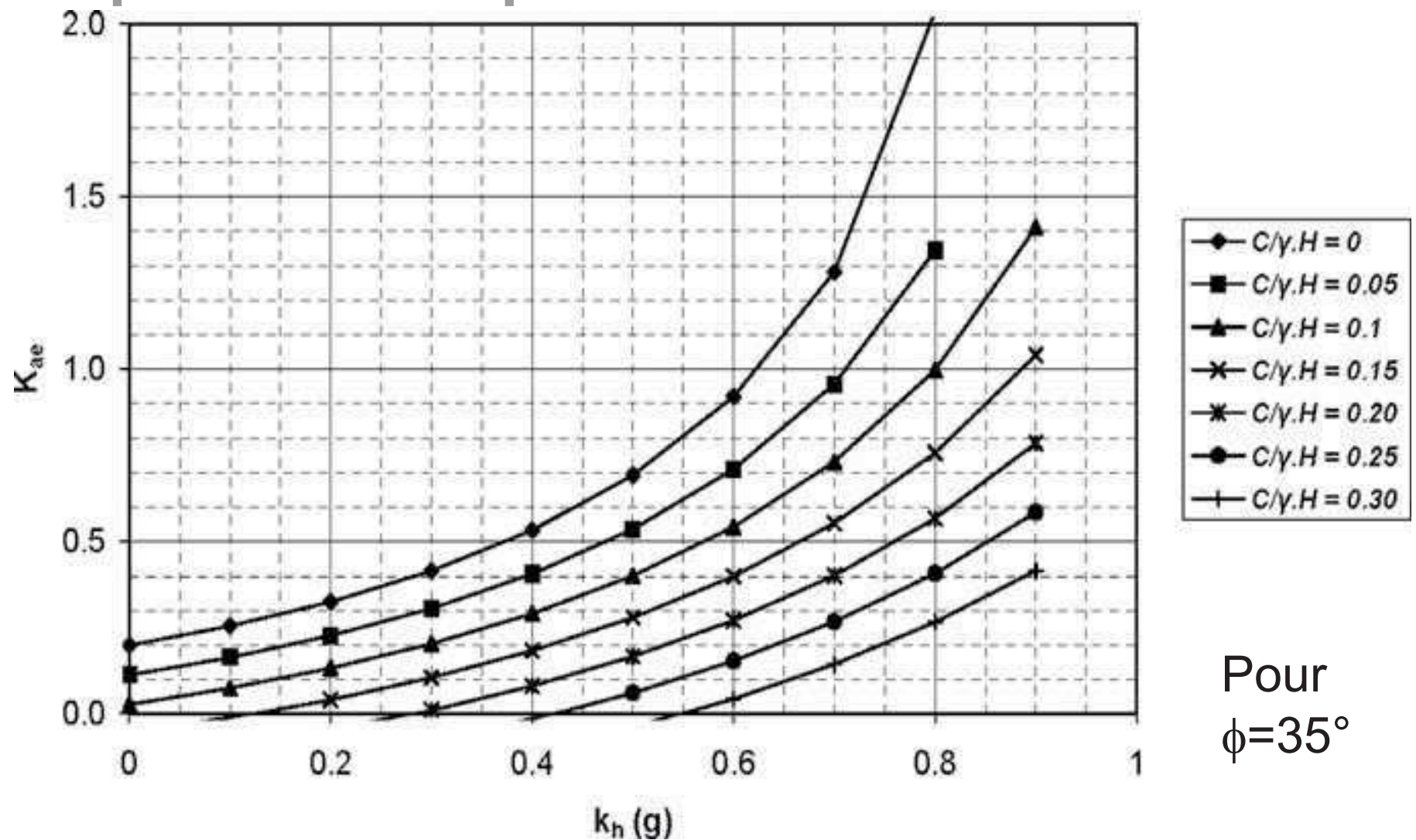
Divergence mathématique pour $\beta = \phi_{\delta} - \theta$

- pb accentué pondération de ϕ
- $$\Phi_d = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \Phi}{1.25} \right)$$



Résolution de la divergence conduisant à une surestimation de la poussée pour des remblais inclinés

1) Limites de Mononobe Okabe : Non prise en compte de la cohésion

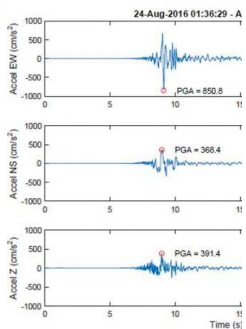
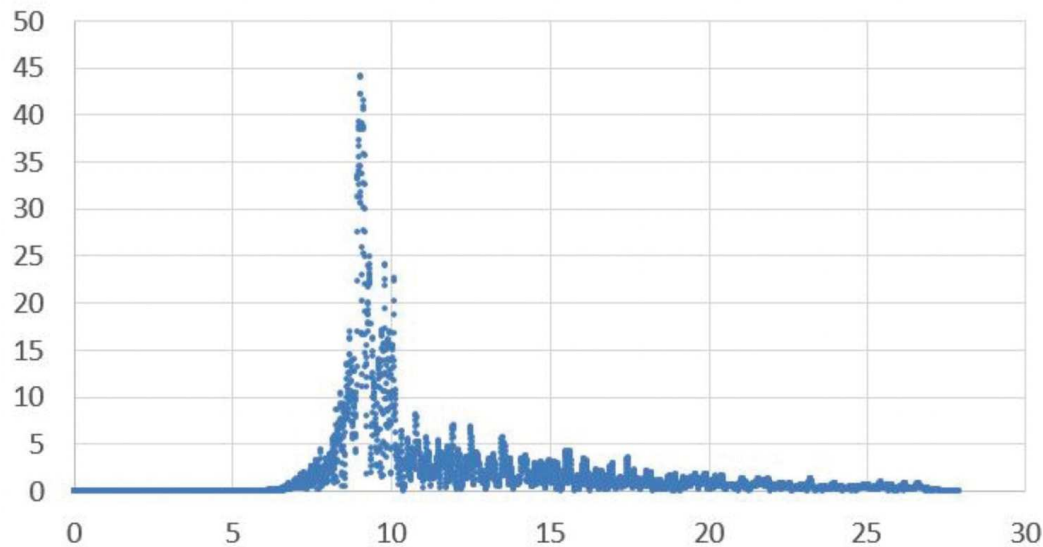


- surestimation de 100 à 300 % de la poussée dynamique
- prise en compte de la cohésion permettant d'expliquer le bon comportement de certains murs poids

1) Limites de Mononobe Okabe : Non prise en compte de la cohésion

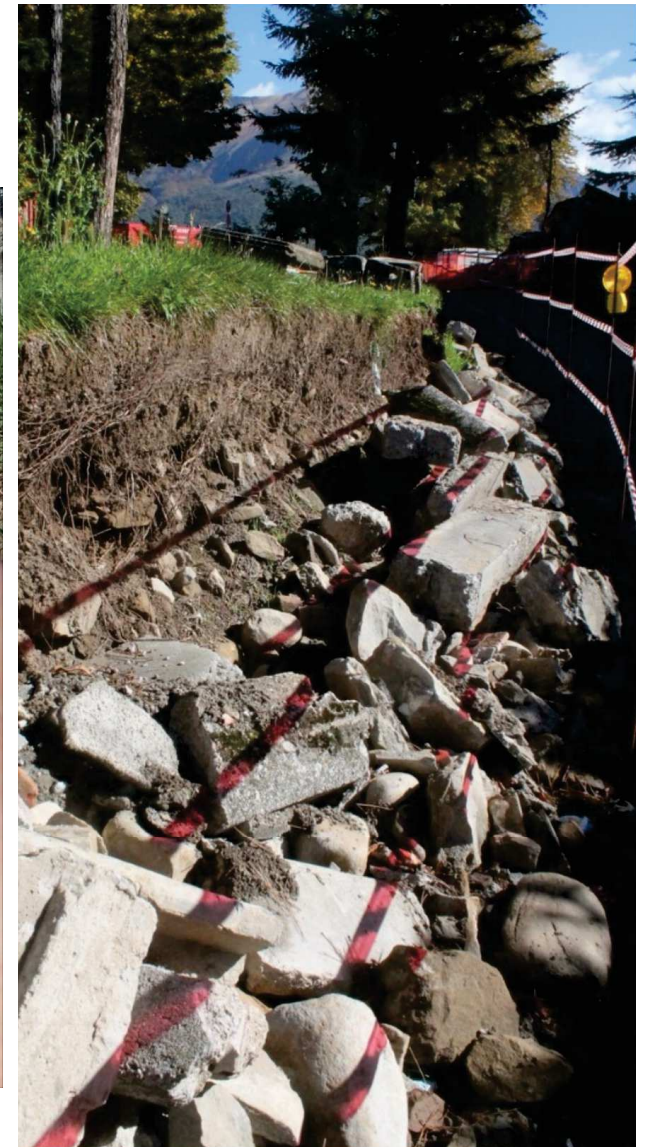
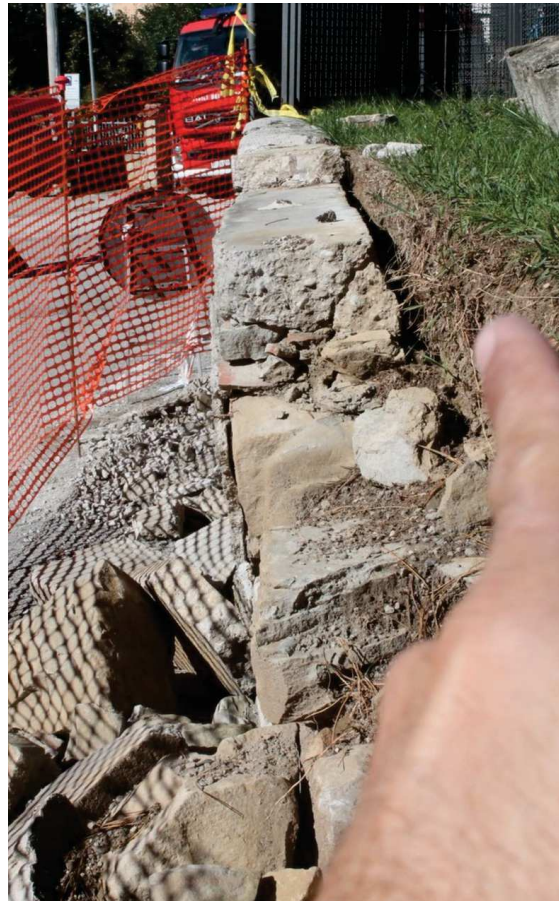
- Séisme d' Amatrice : rotation maximale de la gravité de 44°
- Effet inertiel majeur
- => « expulsion des blocs »

rotation de la gravité (°) en fonction du temps (s)



1) Limites de Mononobe Okabe : Non prise en compte de la cohésion

- Rupture du mur sans rupture du sol !
 - cohésion des sols non saturés
 - Mononobe Okabe non représentatif
- ≠ poinçonnement du sol
- ≠ glissement du mur
- rupture par actions inertielles



1) Des alternatives à Mononobe Okabe

Pour évaluer plus finement la poussée dynamique :

- généralisation de Mononobe Okabe aux sols cohérents en se limitant à des ruptures planes : Anderson et al (2008)
- pour des sols cohérents, lithologies et géométries complexes
 - préférer le calcul à la rupture (approche cinématique, Cuir Simon 2016)
 - ou la méthode GLE (Generalized Limit Equilibrium, Spencer)

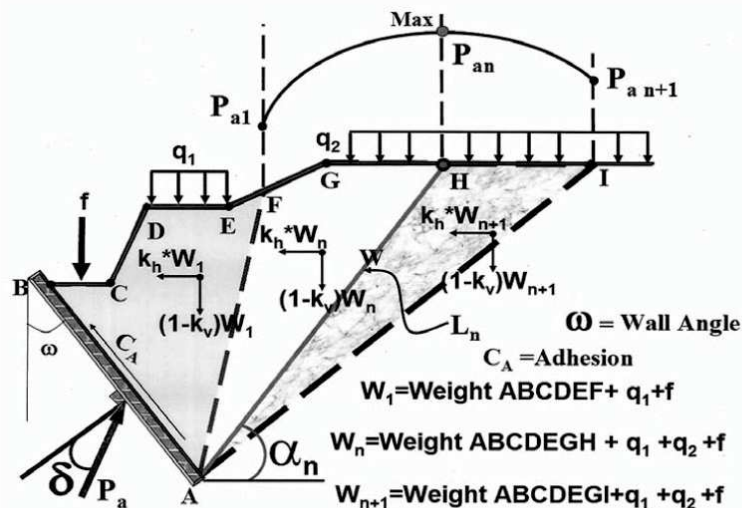
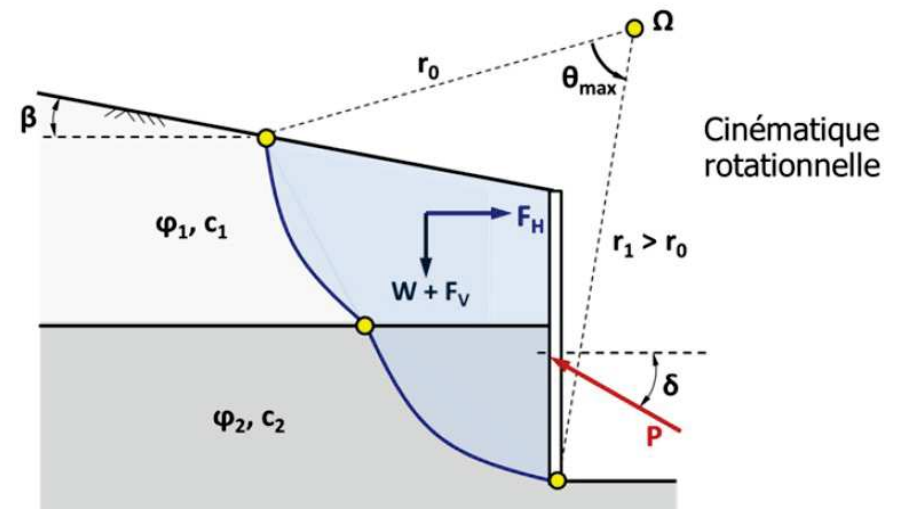


Figure A11.3.2-1—Active Seismic Wedge



2) Comparaison de méthodes, justification du glissement pour un mur poids

■ Caractéristiques du mur :

mur poids béton de 5m de hauteur, 1,66m de base

Parement arrière vertical, remblai horizontal

- déplacement admissible de 105 mm (critère 300 α S de la norme EC8-5)

■ Caractéristiques du sol :

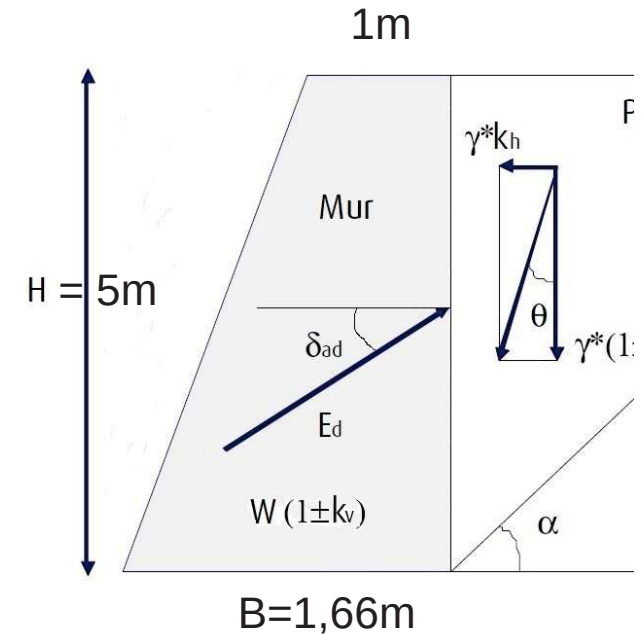
Poids volumique = 20 kN/m³

Angle de frottement = 35 °

C = 10 kPa, G_{max} = 100 MPa

$G_{sismique}$ = 36 +/- 20 MPa

Amortissement du sol = 10%



■ Caractéristiques du séisme:

- $a_{gr} = 1,6 \text{ m/s}^2$

- pseudo statique : $a = 3,36 \text{ m/s}^2$

$$k_h = 0,17, r = 2$$

$$k_h = \alpha \frac{S S_T}{r} = \frac{a_g S S_T}{g r}$$

- Dynamique : $a_{max} = 0,35 g (3,43 \text{ m/s}^2)$

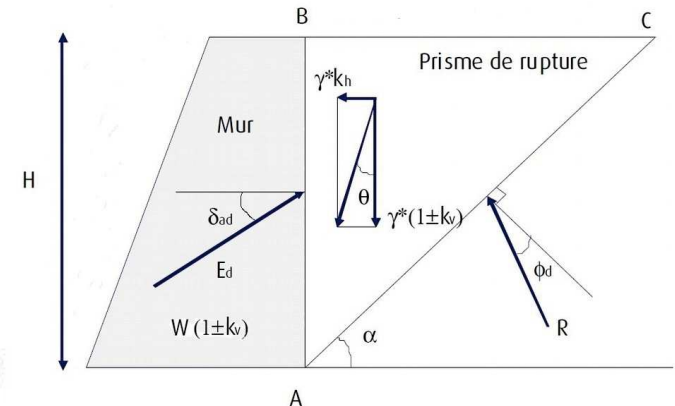
A) Approche réglementaire

Approche quasi-statique : Mononobe Okabe (sans cohésion)

Le critère de stabilité au glissement du mur est :

$$(W(1 \pm k_v) + P_{AE} \sin \delta) \tan \Phi_b \geq k_h W(1 \pm k_v) + P_{AE} \cos \delta$$

Avec $\delta = \frac{2}{3} \Phi = 0,33 \text{ rad} = 19,04^\circ$



Efforts (en kN)	$W(1 \pm k_v)$	P_{AE}	<i>Res</i>	<i>Mot</i>	F_s
Séisme descendant ($1 + k_v$)	181	115*	122	140	0,87
Séisme ascendant ($1 - k_v$)	152	103*	104	124	0,84

- On a l'équilibre pour

$k_{h_crit_gliss} = 0,11$ alors qu'on impose $k_h=0,17$

Approche quasi-statique, Mononobe Okabe sans pondération de $\tan \phi$ dans la poussée

- $F_s = 0,99$ (+18 % de stabilité)

Approche quasi-statique, avec prise en compte d'une cohésion de 10 kPa ($C'_d = 7\text{kPa}$) et pondération de $\tan \phi$

- $F_s = 1,15$ (méthode d'Anderson et al (2008))
 - réduction de près de 40 % de la poussée dynamique
 - gain de 35 % de stabilité / Mononobe Okabe réglementaire

B) Méthode General Limit Equilibrium à partir de contraintes calculées par MEF

Caractéristiques du sol :

- Poids volumique = 20 kN/m³
- $\phi = 35^\circ$, $\Phi_d = 30^\circ$, $C=10\text{kPa}$, $C_d= 7\text{kPa}$
- $\nu = 0,33$ kPa, $G_{\text{max}} = 100$ MPa
- Amortissement du sol = 10%

Accélérogramme représentatif du contexte sismologique et géologique du site de Saint-Isidore

=> calcul par la Méthode des Éléments Finis de la distribution de contraintes toutes les 50ms

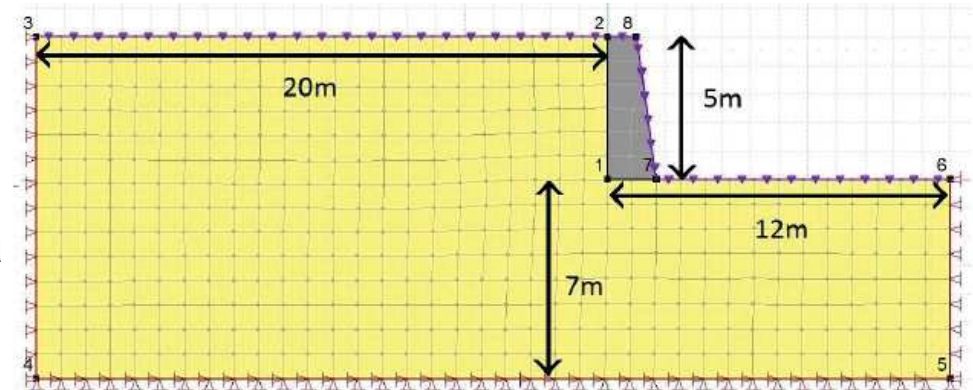
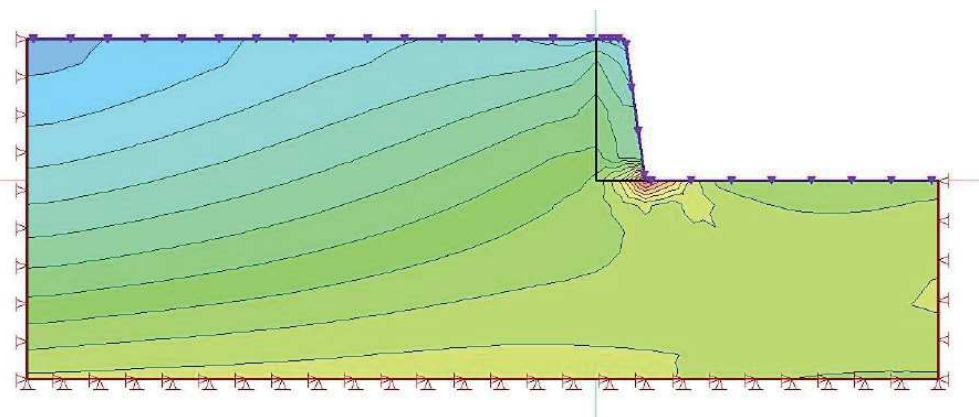
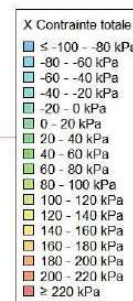
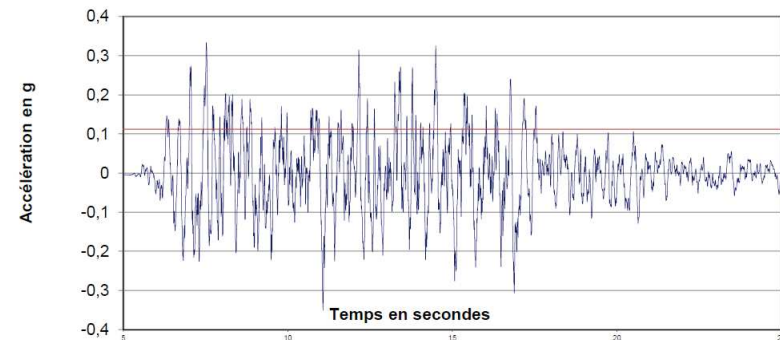


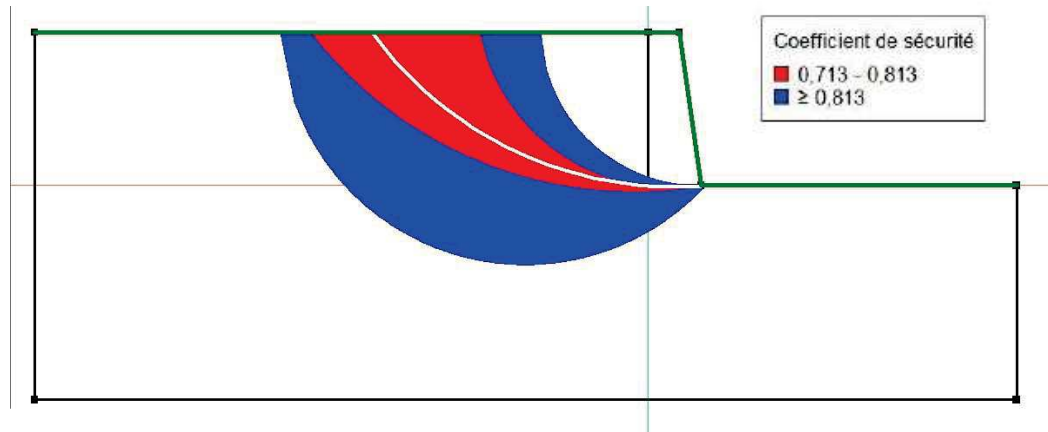
Figure 28 : géométrie et maillage du modèle dans geoslope

Accélérogramme



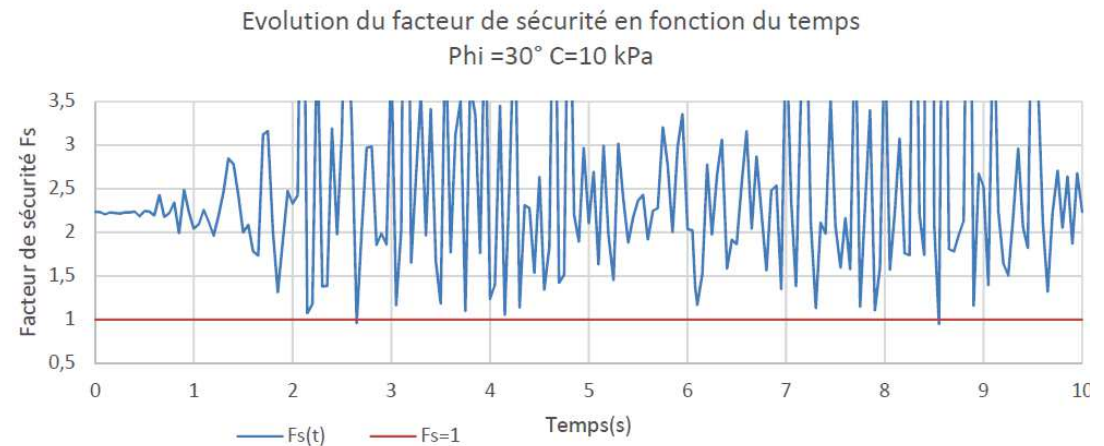
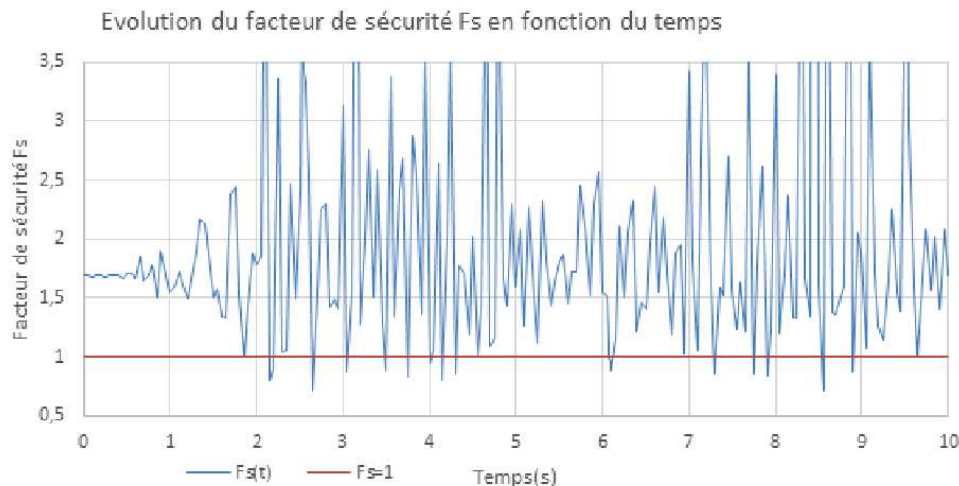
B) Méthode General Limit Equilibrium à partir de contraintes calculées par MEF

La distribution de contraintes à chaque instant étant connue, résolution d'un problème d'équilibre limite par la méthode de Spencer



Pour $c = 0 \text{ kPa}$,
 $F_{s \min} = 0,7$

Pour $c = 10 \text{ kPa}$, $F_{s \min} \approx 1$,
déplacements faibles
compatibles avec le
fonctionnement d'un mur

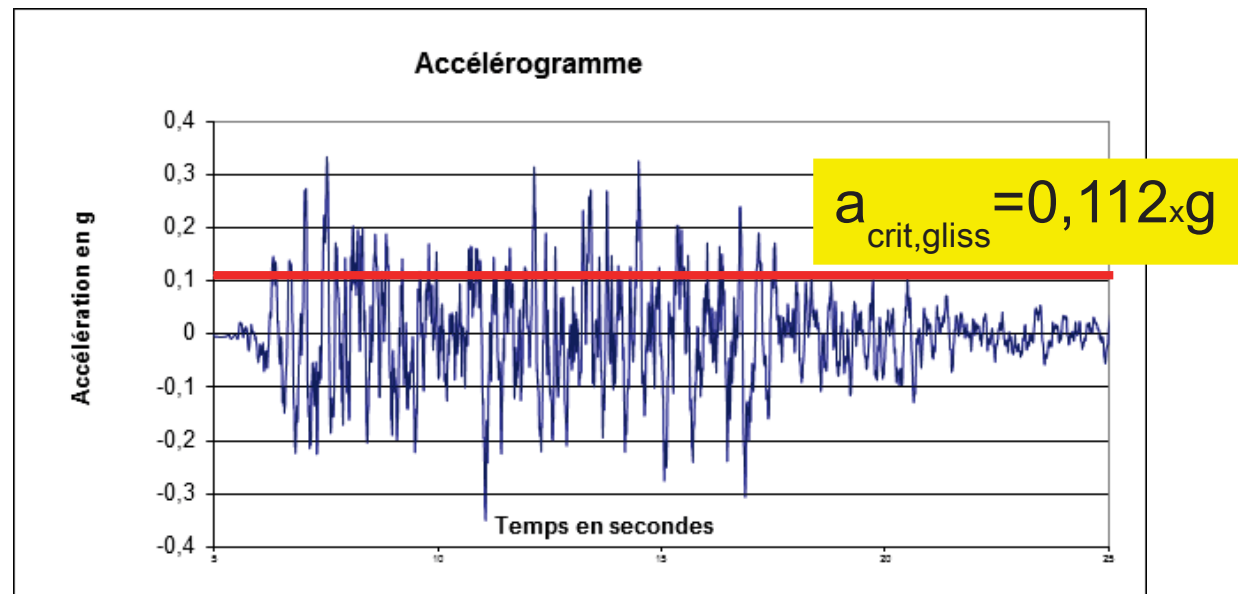


C) Méthodes en déplacement de type Newmark : Intégration directe de l'accélération au delà d'un seuil

Le critère de stabilité au glissement du mur est :

$$(W(1 \pm k_v) + P_{AE} \sin \delta) \tan \Phi_b \geq k_h W(1 \pm k_v) + P_{AE} \cos \delta$$

- Ce critère de non glissement fait apparaître une accélération critique, au-delà se produit un glissement : $a_{\text{crit,gliss}} = k_{h,\text{crit}} \times g$
- avec $k_{h,\text{crit}} = 0,112$



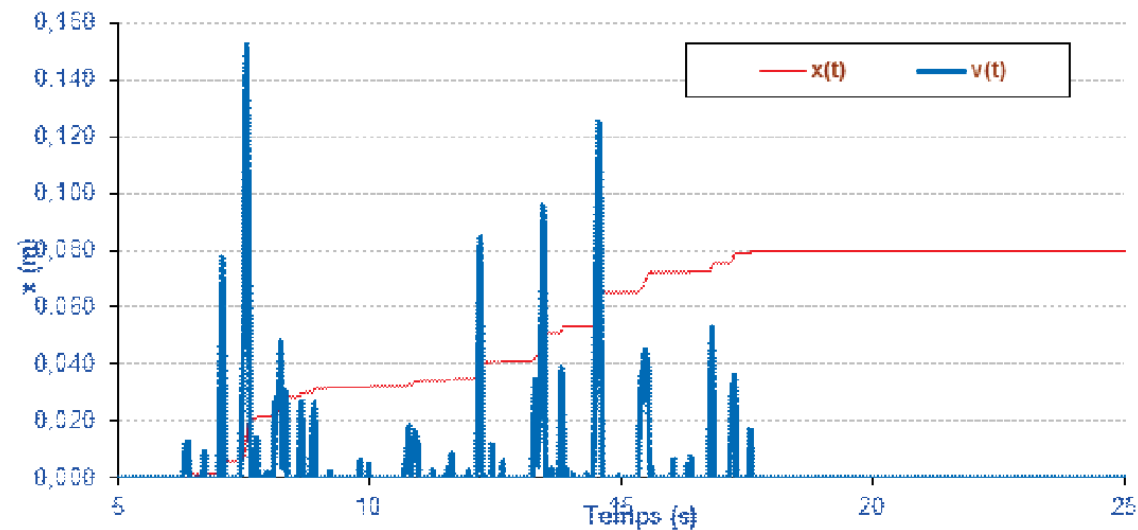
- Pendant le dépassement de cette accélération critique, la vitesse relative du mur peut s'écrire

$$v(t + \Delta t) = v(t) + [a(t + \Delta t) - a_{\text{crit_gliss}}] \Delta t$$

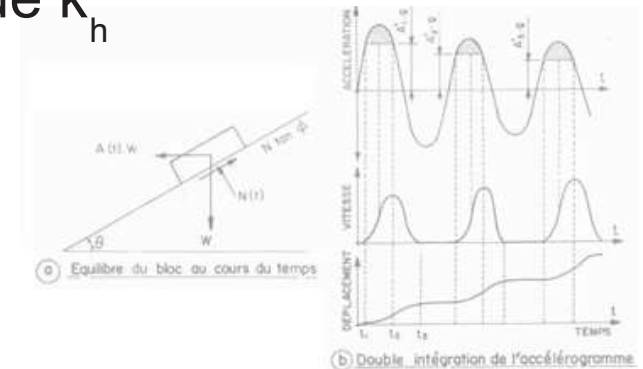
C) Méthodes en déplacement de type Newmark : Intégration directe de l'accélération au delà d'un seuil

- Après double intégration, on obtient un déplacement de 80 mm admissible ($< 300 \alpha S = 105 \text{ mm}$, critère de la norme EC8-5)

Déplacements cumulés du muren fonction du temps



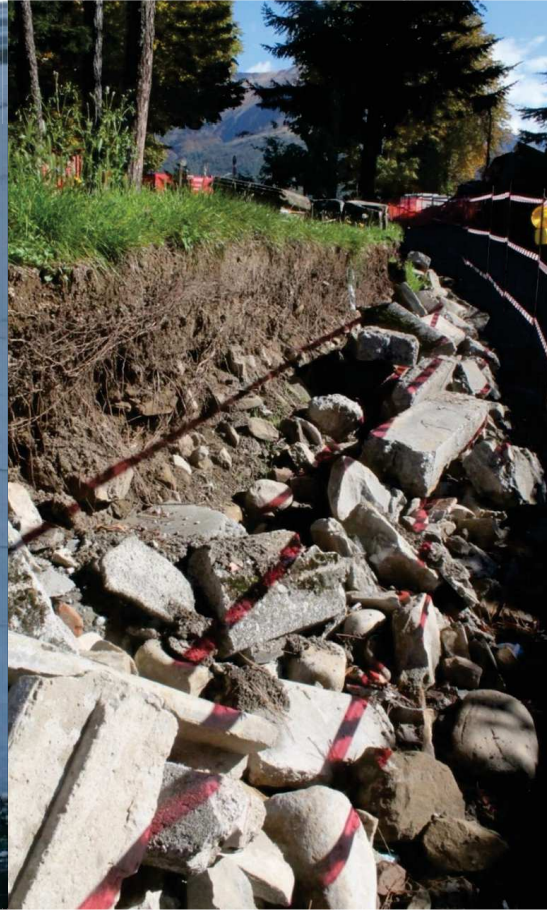
- méthode simplifiée ne tenant pas compte de l'augmentation de la poussée dynamique avec l'accroissement de k_h



- La méthode de Mononobe Okabe proposée par l'EC8-5 conduit à :
 - une double pondération de la résistance et de la poussée dynamique qui peut poser question et n'est pas reprise par d'autres réglementations
 - une forte surestimation de la poussée pour des remblais inclinés ($\beta \approx \phi_{\delta} - \theta$)
 - la non prise en compte de la cohésion et des lithologies complexes à l'arrière du remblai
 - une surestimation de l'effet de la poussée dynamique expliquant des pb d'adéquation avec les REX existants.
 - Nous recommandons d'envisager l'abandon de la pondération de $(\tan \phi, c)$ car elle induit une surestimation fortement non linéaire de la poussée dynamique

CONCLUSIONS

- D'autres approches permettent d'affiner le calcul des poussées dynamiques en intégrant la cohésion des sols :
 - Anderson et al (2008) généralisant M. O. pour des ruptures planes
 - calcul à la rupture (approche cinématique) ainsi que la Méthode de Spencer (Generalized Limit Equilibrium) permettant en plus d'intégrer des géométries et des lithologies complexes
- Proposition de développer des approches alternatives en déplacement (type Newmark):
 - plage de déformations autorisées pour un ouvrage de soutènement (intégrité structurale, traficabilité...)
- Arrêtons d'appliquer l'arrêté pont à des murs communs (hors murs de culée...) car cela se solde par des sécurités excessives.
- Annexe F de l'EC8-5 et le poinçonnement ...



Dominique Batista, Service Géotechnique et Mécanique des Sols, Laboratoire d'Aix en Provence, Dtermed