

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

---

# **PRISE EN COMPTE DU RISQUE SISMIQUE**

**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**

---

# Calcul des fondations et murs de soutènement

David CRIADO  
(DREAL PACA)

# Calcul des fondations et murs de soutènement

## Plan de l'exposé

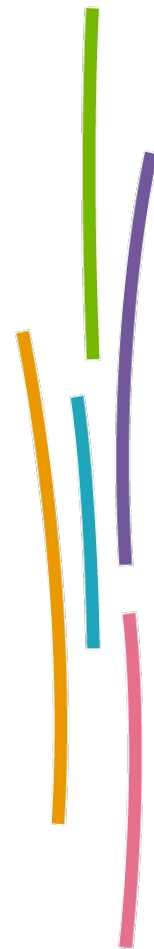
- choix du site ;
- reconnaissances géotechniques ;
- conception d'un système de fondations ;
- calcul, modélisation et justification des fondations (profondes, superficielles) ;
- ouvrages de soutènement ;
- cas particulier des culées ;
- référentiel technique.

# Calcul des fondations et murs de soutènement

## Choix du site

Une attention toute particulière devra être accordée à :

- la proximité de failles potentiellement actives ;
- la présence de sols potentiellement liquéfiables (cf. exposé précédent) ;
- la conception des culées (sur remblai, murs de front de grande hauteur, etc..) ;
- la conception des fondations sur pentes.





# Calcul des fondations et murs de soutènement

## Choix du site



<http://geoinfo.usc.edu/gees>

Proximité de failles actives  
(EC8-5 § 4.1.1)



<http://geoinfo.usc.edu/gees>



<http://geoinfo.usc.edu/gees>



# Calcul des fondations et murs de soutènement

## Choix du site



Karl V. Steinbrugge Collection, Earthquake Engineering Research Center

Stabilité des  
pentes  
(EC8-5, § 4.1.2)



<http://geoinfo.usc.edu/gees>



<http://geoinfo.usc.edu/gees>

# Calcul des fondations et murs de soutènement

## Stabilité des pentes (pour mémoire)

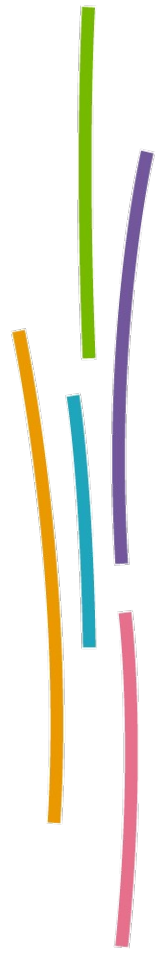
méthodes d'analyse aux éléments finis, bloc rigide, pseudo-statiques ;

coefficients d'inertie pour les méthodes d'analyse pseudo-statiques à utiliser si topo et stratigraphie régulières (E.L.U), avec  $W$  = poids de la masse en mouvement :  $F_H = 0,5 \alpha S W$ ,  $F_V = \pm 0,5 F_H (a_{vg}/a_g > 0,6)$  ;

déplacements permanents à l'E.L.S. : méthode de bloc rigide; pas de méthodes pseudo-statiques si possibilité d'augmentation des pressions interstitielles (sables lâches) ou dégradation rigidité (argiles molles) ;

sols saturés et  $\alpha S > 0,15$  : dégradation possible de la résistance et augmentation pression interstitielle (à évaluer pour glissement latents);

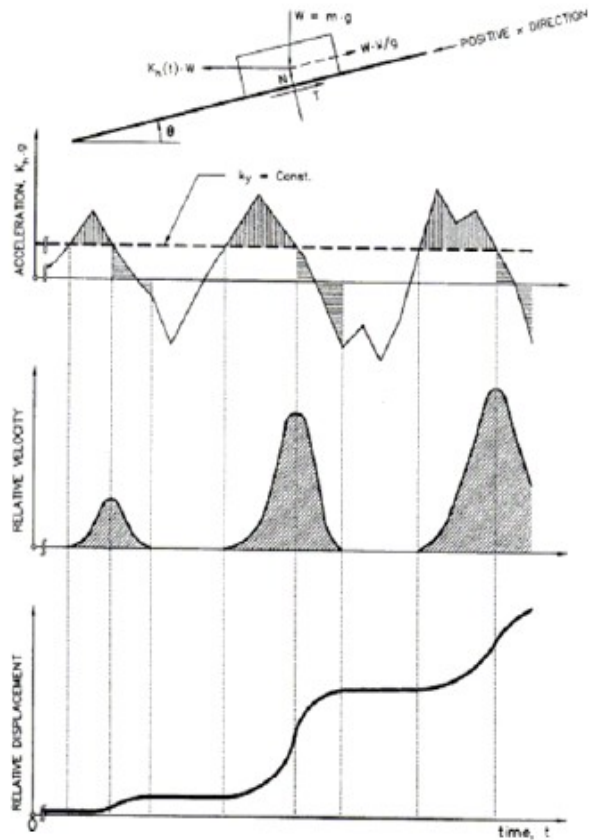
corrélations possibles pour  $\Delta u$  (pressions interstitielles) ,  
coefficient topographique  $1,2 \text{ à } 1,4 \leq S_T$



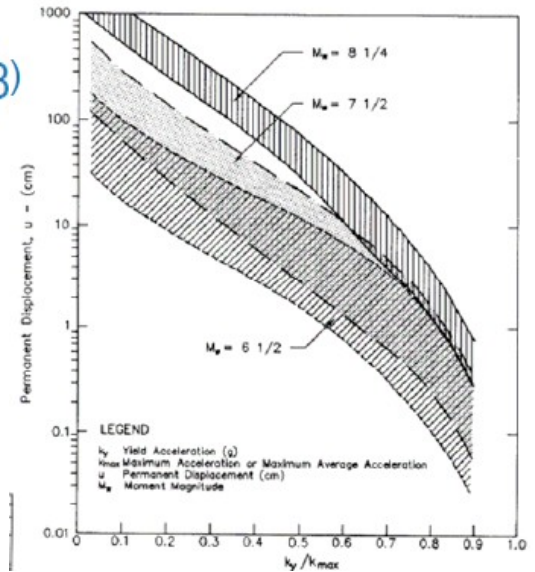
# Calcul des fondations et murs de soutènement

## Méthodes en déplacement, type Newmark

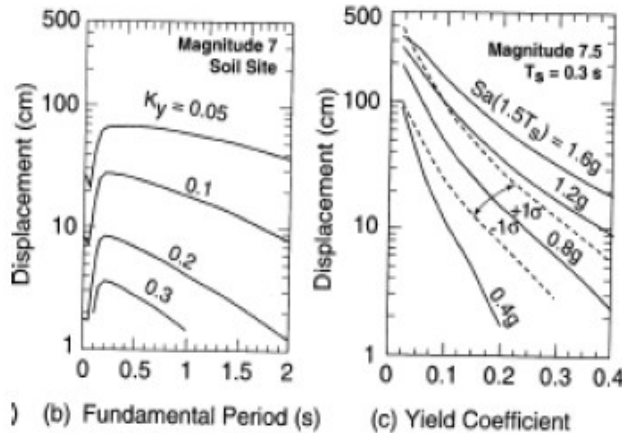
### Newmark (1965)



### Makdisi & Seed (1978)



### Bray & Travasarou (2007)



# Calcul des fondations et murs de soutènement

## Coefficient de site (S), rappel EC8-1 (§3.2)

- accélération maximale de référence au niveau du sol de type rocheux  $a_{gr}$  (donnée par arrêtés en fonction du zonage et type de construction : bâtiment, ouvrage d'art, etc...), varie entre 0,7 et 1,6 m/s<sup>2</sup> en métropole, 3 m/s<sup>2</sup> dans les Antilles ;
- coefficient d'importance  $\gamma_I$  en fonction de l'ouvrage , varie entre 0,8 et 1,4 (arrêté pont) ;
- coefficient de site : S en fonction de la classe de sol (A, B, C , D, S1 ou S2) définie par  $V_{s,30}$  , et zone de sismicité, varie entre 1 et 1,8 ;
- $\alpha = a_{gr} \times \gamma_I / g$
- d'où  $\alpha S$  varie entre 0,057 et 0,6.



# Calcul des fondations et murs de soutènement

## Coefficient de site (S), rappel EC8-1 (§3.2)

Classe de sol	Description du profil stratigraphique	Paramètres						
		$v_{s,30}$ (m/s)	$N_{SPT}$ (coups/30 cm)	$c_u$ (kPa)	Type de sol	Pressiomètre		CPT
						$p_l$ (MPa)	$E_M$ (MPa)	$q_c$ (Mpa)
A	Rocher ou autre formation géologique de ce type comportant une couche superficielle d'au plus 5 m de matériau moins résistant.	>800				> 5	> 100	
B	Dépôts raides de sables, de gravier ou d'argile sur-consolidée, d'au moins plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur, caractérisés par une augmentation progressive des caractéristiques mécaniques avec la profondeur	360-800	>50	>250	sols granulaires	> 2	> 20	> 15
					sols cohérents	> 2	> 25	> 3,5
C	Dépôts profonds de sables de densité moyenne, de gravier ou d'argile moyennement raide, ayant des épaisseurs de quelques dizaines de mètres à plusieurs centaines de mètres.	180-360	15-50	70-250	sols granulaires	> 1	> 8	> 5
					sols cohérents	> 0,5	> 5	> 1,5
D	Dépôts de sols sans cohésion de densité faible à moyenne (avec ou sans couches cohérentes molles) ou comprenant en majorité des sols cohérents mous à fermes.	< 180	< 15	<70	sols granulaires	< 1	< 8 MPa	< 5
					sols cohérents	< 0,5	< 5 Mpa	< 1,5

Tableau 1

# Calcul des fondations et murs de soutènement

## Coefficient de site (S), rappel EC8-1 (§3.2)

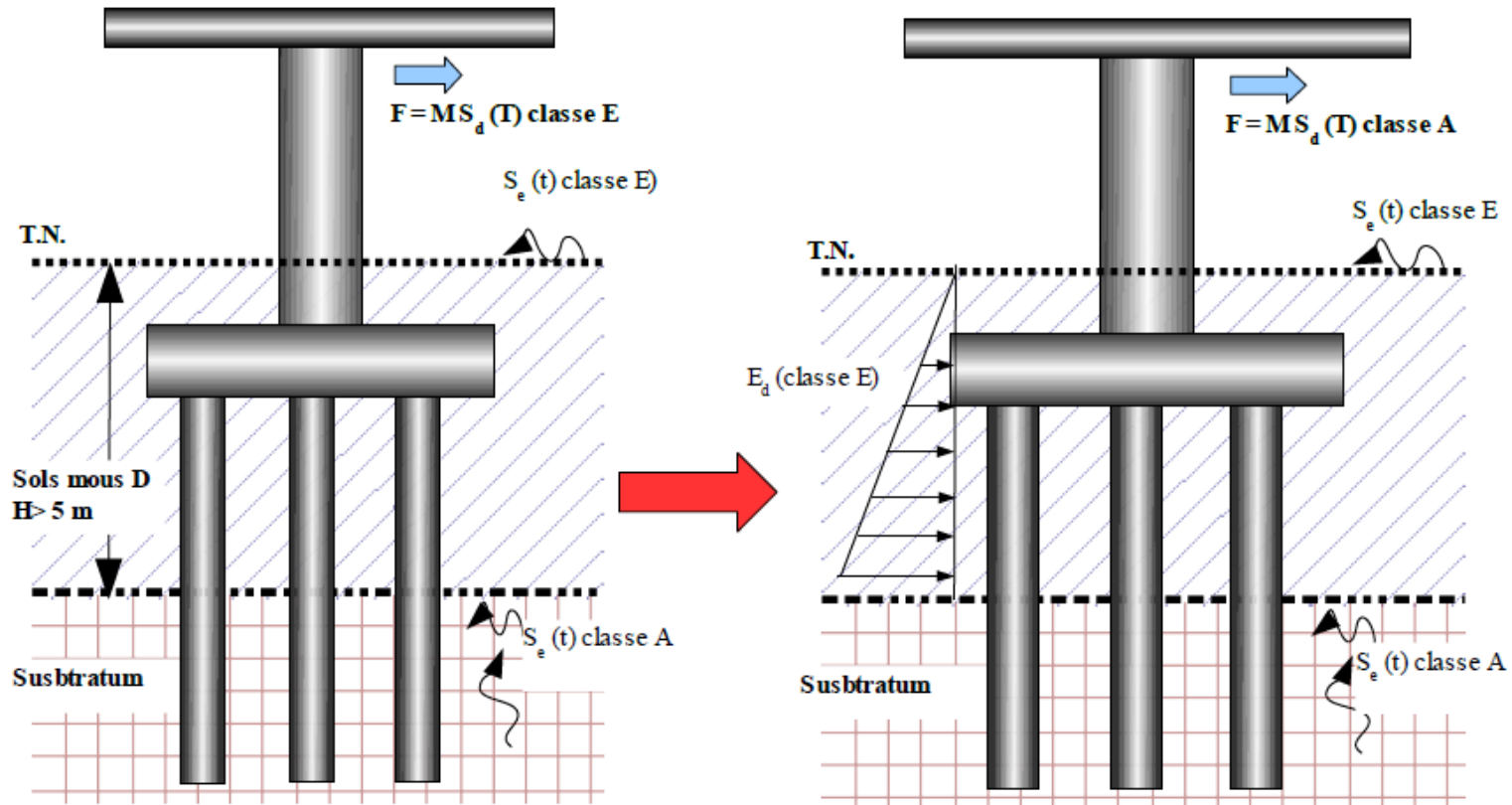
Classe de sol	Description du profil stratigraphique	Paramètres						
		V <sub>s,30</sub> (m/s)	N <sub>SPT</sub> (coups/30 cm)	c <sub>u</sub> (kPa)	Type de sol	Pressiomètre		CPT
						p <sub>l</sub> (MPa)	E <sub>M</sub> (MPa)	q <sub>c</sub> (Mpa)
E	Profil de sol comprenant une couche superficielle d'alluvions avec des valeurs de v <sub>s</sub> de classe C ou D et une épaisseur comprise entre 5 m environ et 20 m, reposant sur un matériau plus raide avec v <sub>s</sub> > 800 m/s.							
S <sub>1</sub>	Dépôts composés, ou contenant, une couche d'au moins 10 m d'épaisseur d'argiles molles/vases avec un indice de plasticité élevé (IP>40) et une teneur en eau importante.	< 100						
S <sub>2</sub>	Dépôts de sols liquéfiables d'argiles sensibles ou tout autre profil de sol non compris dans les classes 1 à E ou S <sub>1</sub> .							

$$v_{s,30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{v_i}}$$

Tableau 1

# Calcul des fondations et murs de soutènement

## Choix de la classe de sol (projet)



où :

$S_e(t)$  : spectre de réponse élastique fonction de l'accélération de calcul et du paramètre de sol  $S$  différent au niveau du substratum (classe A sur le schéma,  $S = 1$ ) et en surface (classe E sur le schéma,  $S = 1,8$  en Métropole)

$S_d(T)$  = accélération spectrale du spectre de calcul correspondant à la période fondamentale du pont ( $T$ )

$E_d$  = poussée dynamique calculée selon l'annexe E de l'EC8-5 en considérant l'action sismique en surface (application du paramètre  $S$  de la classe E dans l'exemple du schéma)



# Calcul des fondations et murs de soutènement

## Choix du site

Densification des sols sous actions cycliques (§4.1.4) :

- attention attirée sur la sensibilité de certains sols (sables lâches, argiles molles) à développer une densification importante sous séismes pouvant entraîner des tassements excessifs.



<http://geoinfo.usc.edu/gees>



# Calcul des fondations et murs de soutènement

## Reconnaissance et études géotechniques

Reconnaissances conformes aux critères de l'EC7 .

Reconnaissances spécifiques pour déterminer :

- la classe de sol pour le calcul du mouvement sismique de calcul (profil  $V_s$  le plus pertinent). Pour les structures importantes, en zone de forte sismicité, profil  $V_s$  par géophysique de forage recommandé ;
- les propriétés dynamiques des sols ( $G=\rho V_s^2$ ) en fonction du niveau de déformation (sauf pour S1 ou S2), intervenant dans les problèmes d'interaction sol-structure.

# Calcul des fondations et murs de soutènement

## Reconnaissance et études géotechniques

### Niveau de reconnaissance recommandé

Classe d'importance	Zone de sismicité			
	Faible	Modérée	Moyenne	Forte
II	A	B	B	C
III	A	B	C	C*
IV	B	C	C	C*

\*La mesure in-situ du profil de  $V_S$  par des méthodes géophysiques de forage est imposée dans le cas de classe de sol D

# Calcul des fondations et murs de soutènement

## Reconnaissance et études géotechniques

- reconnaissances de type A : classe de sol choisie en fonction des paramètres donnés dans le tableau 1 ;
- reconnaissances de type B : profil  $V_s$  obtenu à partir de corrélations empiriques avec d'autres paramètres géotechniques (exemple  $q_c$ ). Des essais de laboratoire sont nécessaires (domaine d'application) ;
- reconnaissances de type C : mesure de  $V_s$  in-situ, en forage (ex : cross-hole), ou à défaut en surface (ex : SASW, techniques non invasives et moins coûteuse).

# Calcul des fondations et murs de soutènement

## Reconnaissance et études géotechniques

Propriétés dynamiques des sols ( $G = \rho V_s^2$ ) en fonction du **niveau de déformation** (sauf pour S1 ou S2).

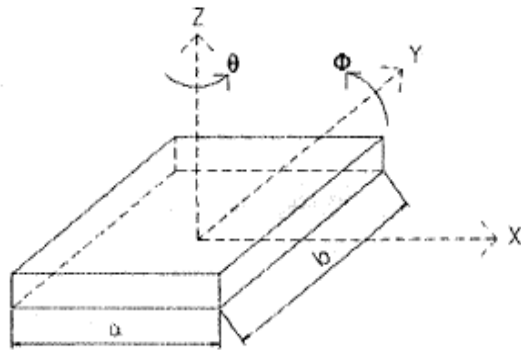
$\alpha S$	Amortissement interne	$V_s / V_{smax}$	$G / G_{max}$
0,1	0,03	0,90 ( $\pm 0,07$ )	0,80 ( $\pm 0,10$ )
0,2	0,06	0,70 ( $\pm 0,15$ )	0,50 ( $\pm 0,20$ )
0,3	0,1	0,60 ( $\pm 0,15$ )	0,36 ( $\pm 0,20$ )

Des essais de laboratoire peuvent être utilisés (colonne résonnante, essais triaxiaux cycliques).

Ces propriétés interviennent notamment pour déterminer la raideur des fondations.

# Calcul des fondations et murs de soutènement

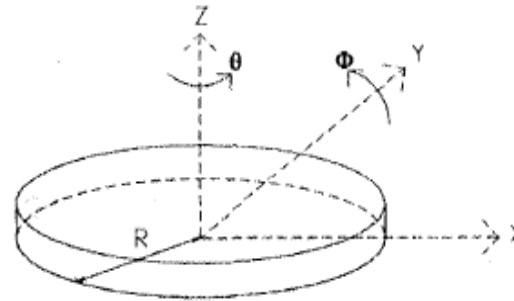
## Fondations superficielles



Fondation réelle

$$K_z = \frac{4 G R}{1 - \nu}$$

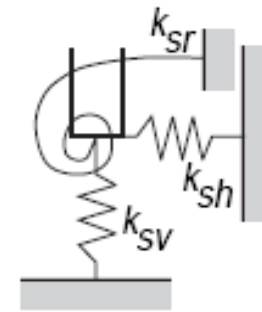
$$K_\phi = \frac{8 G R^3}{3(1 - \nu)}$$



Fondation circulaire équivalente

$$K_x = \frac{8 G R}{2 - \nu}$$

$$K_\theta = \frac{16 G R^3}{3}$$



Semelle superficielles  
Impédances

(Gazetas, 1991)



# Calcul des fondations et murs de soutènement

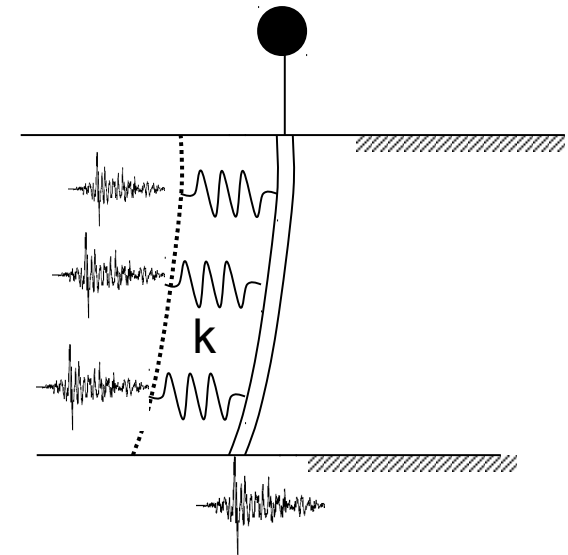
## Fondations profondes

$$k=1,2 E_s \text{ avec } E_s=2(1+\nu)G$$

où :

$\nu$  est le coefficient de Poisson du sol (à défaut d'information plus précise, on prendra forfaitairement  $\nu = 0,3$  pour les sols grenus hors nappe) ;

et  $G$  le module de cisaillement déterminé au niveau de déformation attendu pour l'action sismique de calcul (cf. ci-dessus).



Possibilité d'utiliser un rapport avec le module statique :

$K_{\text{sollicitations sismiques}} = 3 \times K_{\text{sollicitations courte durée}}$

NF P 94-262

# Calcul des fondations et murs de soutènement

## Systeme de fondations

### Prescriptions générales

- les forces dues à la superstructure sont transmises au sol sans déformations permanentes sensibles ;
- les déformations du sol induites par le séisme sont compatibles avec les exigences fondamentales de la structure ;
- la fondation est conçue, dimensionnée et mise en œuvre de manière à limiter les risques liés à l'incertitude de la réponse sismique.

### Fondations superficielles

EN1998-2, § 6.4.1 : les fondations superficielles ne sont pas autorisées à travailler dans le domaine plastique sous les actions sismiques de calcul et ne nécessitent donc pas de renforcements spécifiques



# Calcul des fondations et murs de soutènement

## Systeme de fondations

- **structures dissipatives** : effets des actions basées sur des considérations de dimensionnement en capacité avec développement d'une possible sur-résistance ( $\gamma_0 = 1,35$  pour B.A.) ;
- résultats de l'analyse pour **autres structures** ;
- distinction entre  $q \leq 1,5$  ou  $q > 1,5$  pour les **fondations de ponts** (§5.8.2. de l'EN 1998-2:2006)

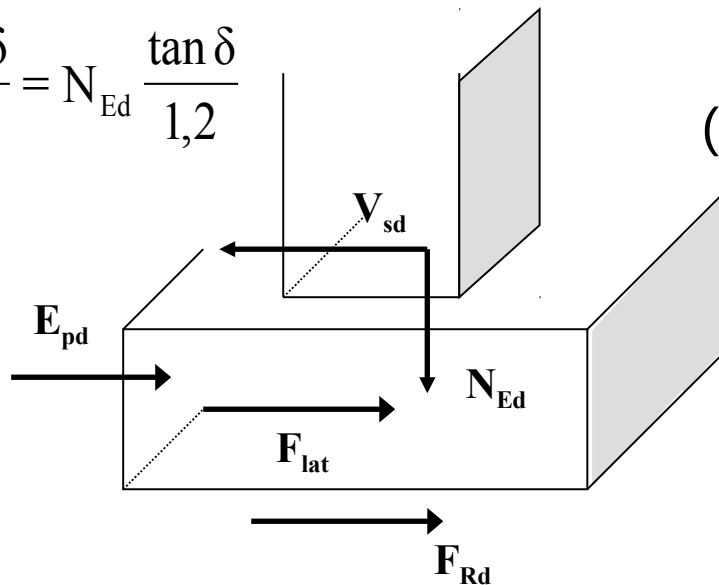
# Calcul des fondations et murs de soutènement

## Fondations superficielles

E.L.U. de rupture par glissement :

$$V_{sd} \leq F_{Rd} + F_{lat} + E_{pd}$$

$$F_{Rd} = N_{Ed} \frac{\tan \delta}{\gamma_M} = N_{Ed} \frac{\tan \delta}{1,2}$$



$E_{pd}$  (butée frontale) prise en compte sous certaines conditions (et avec 30 % maximum butée mobilisable)

# Calcul des fondations et murs de soutènement

## Fondations superficielles

### Capacité portante :

Nécessité de prendre en compte :

- l'inclinaison, et l'excentricité des charges ainsi que des efforts inertiels dans le sol,
- les mécanismes possibles de dégradation de la résistance et de la raideur des sols.

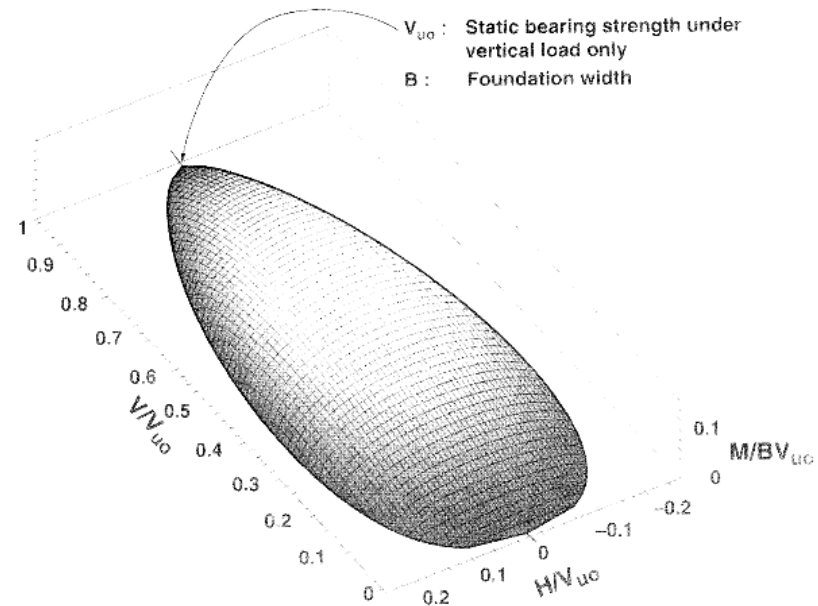
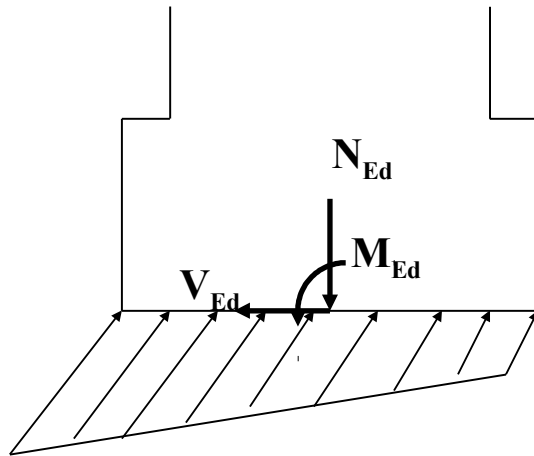
Dispositions constructives de liaison horizontale entre fondations (longrines, dallages, radiers)

# Calcul des fondations et murs de soutènement

## Fondations superficielles

### E.L.U. de rupture par poinçonnement du sol de fondation (annexe F informative)

$$\frac{(1 - e\bar{F})^{C_T} (\beta\bar{V})^{C_T}}{(\bar{N})^a [(1 - m\bar{F}^{k'})^{k'} - \bar{N}]^b} + \frac{(1 - f\bar{F})^{C_{M'}} (\gamma\bar{M})^{C_M}}{(\bar{N})^c [(1 - m\bar{F}^{k'})^{k'} - \bar{N}]^d} - 1 \leq 0$$



# Calcul des fondations et murs de soutènement

## Fondations superficielles

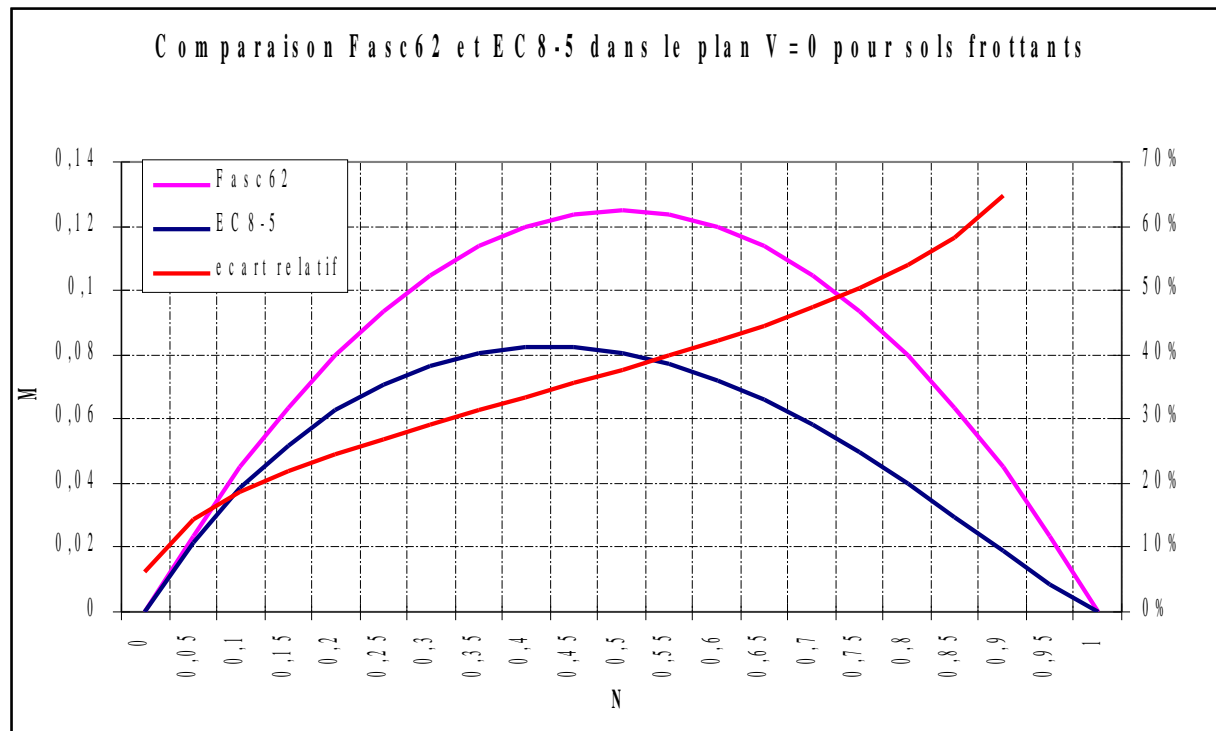
### E.L.U. de rupture par poinçonnement du sol de fondation (annexe F informative)

- possibilité d'utiliser  $N_{\max}$  (capacité portante ultime) issue des méthodes pressiométriques ou pénétrométriques ;
- comparaisons effectuées avec les justifications du fascicule 62 titre V et EC7 en statique (Burlon & Criado)

# Calcul des fondations et murs de soutènement

## Fondations superficielles

### Comparaison Fasc62 et EC8-5, projet

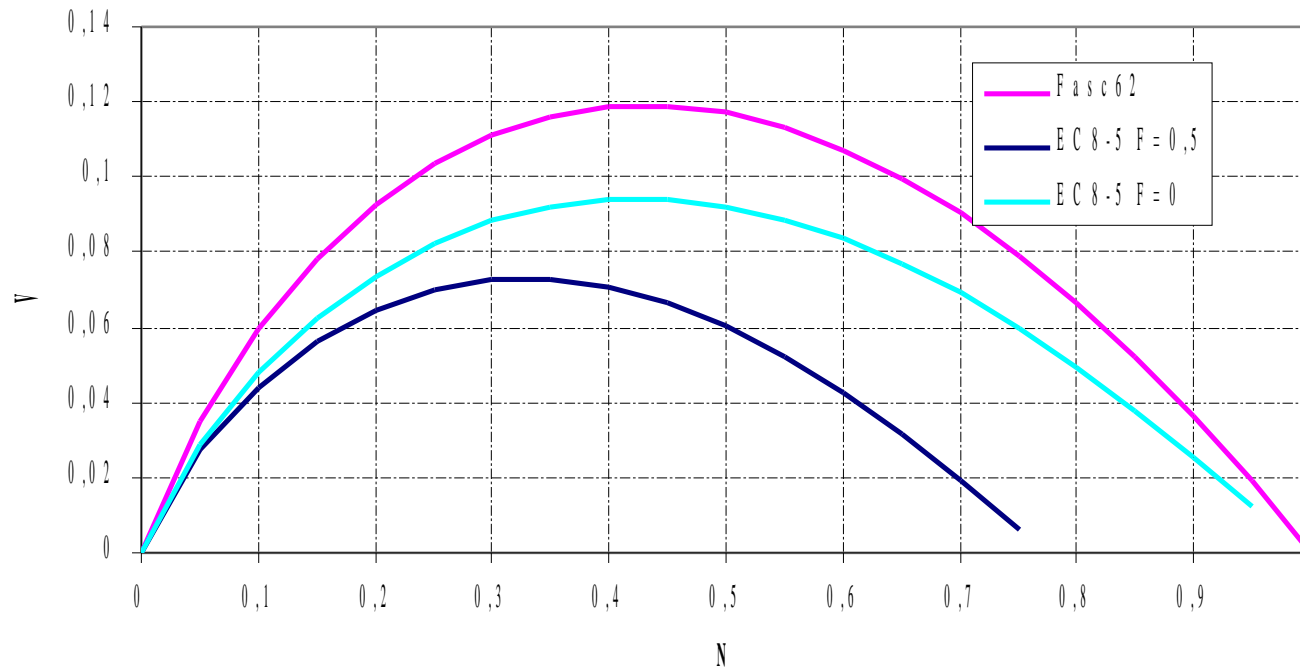


# Calcul des fondations et murs de soutènement

## Fondations superficielles

### Comparaison Fasc62 et EC8-5, projet

Comparaison Fasc62 et EC8-5 dans le plan  $M = 0$  pour sols frottants



# Calcul des fondations et murs de soutènement

## Fondations superficielles

E.L.U . de décompression ?



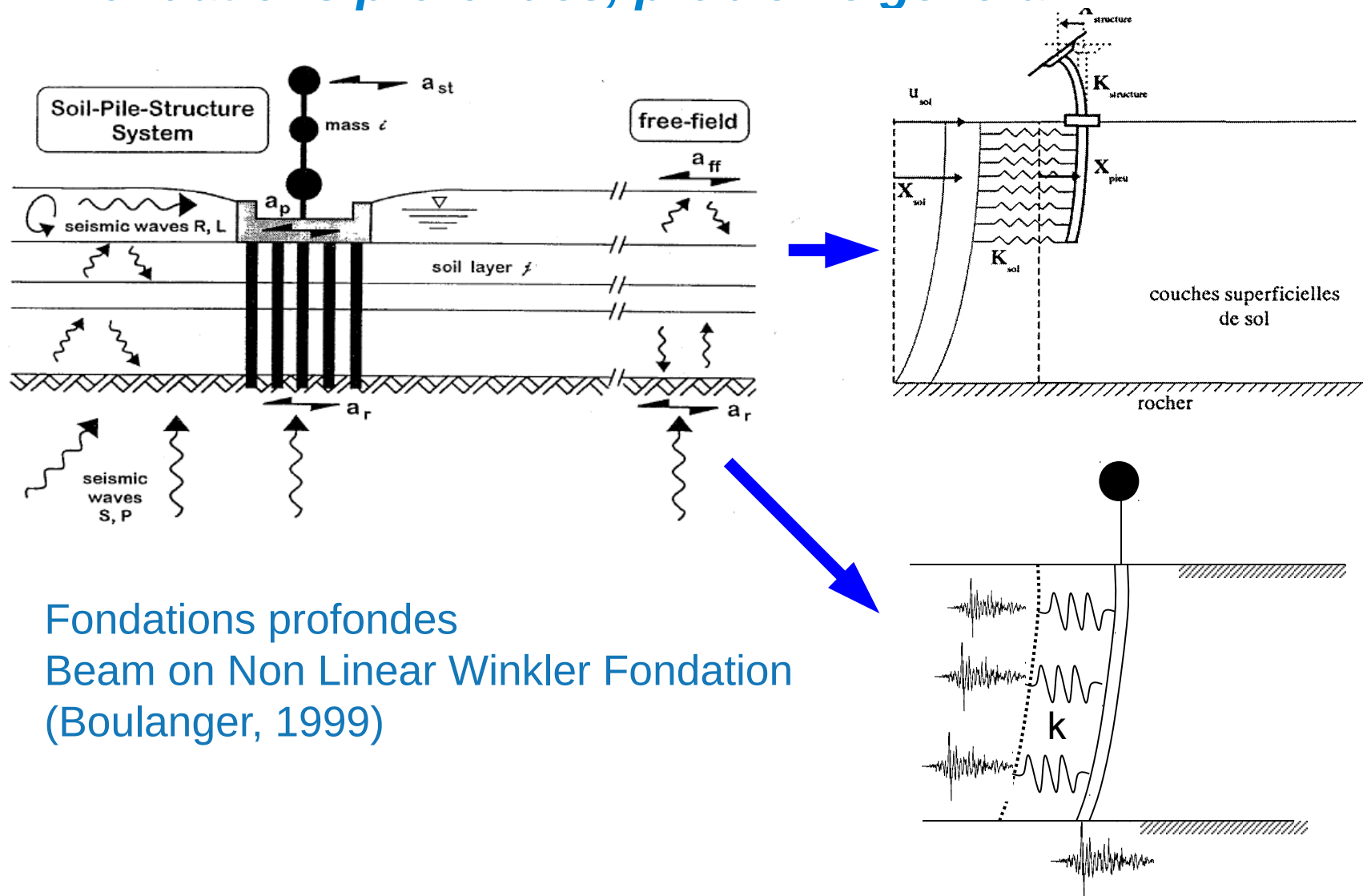
<http://geoinfo.usc.edu/gees>

couvert par la formule analytique...



# Calcul des fondations et murs de soutènement

## Fondations profondes, problème général



Fondations profondes  
Beam on Non Linear Winkler Foundation  
(Boulanger, 1999)

# Calcul des fondations et murs de soutènement

## Fondations profondes, méthodes simplifiées

Les méthodes d'analyse proposées consistent à découpler sollicitations induites:

- les effets inertiels
- les effets cinématiques.

Dans les cas courants l'**enveloppe** des sollicitations obtenues sera à considérer dans la vérification des pieux. Cette disposition est valable si la période fondamentale de la structure (sur base fixe) diffère sensiblement de la période fondamentale du système sol-pieu. Dans le cas contraire (résonance), on procédera au **cumul** des sollicitations induites par les effets inertiels avec celles induites par les effets cinématiques.

# Calcul des fondations et murs de soutènement

## Fondations profondes

### 1. Forces d'inerties en provenance de la superstructure (§ 5.4.2.)



Kobe geotechnical Collection, Earthquake Engineering Research Center



Kobe geotechnical Collection, Earthquake Engineering Research Center



Kobe geotechnical Collection, Earthquake Engineering Research Center

résistance couches  
liquéfiables négligées



# Calcul des fondations et murs de soutènement

## Fondations profondes

2. Forces cinématiques résultant de la déformation du sol due au passage des ondes sismiques (§ 5.4.2)



Kobe geotechnical Collection, Earthquake Engineering Research Center



Karl V. Steinbrugge Collection, Earthquake Engineering Research Center

# Calcul des fondations et murs de soutènement

## Fondations profondes

### 2. Forces cinématiques résultant de la déformation du sol due au passage des ondes sismiques

Les sollicitations qui se développent en raison de l'interaction cinématique doivent être évaluées si toutes les conditions suivantes sont réunies simultanément :

- profil de sol de classe D, E, S<sub>1</sub> ou S<sub>2</sub>, et d'une manière générale tous les profils de sol qui contiennent des couches de sol dont la rigidité diffère nettement ;
- zone de sismicité modérée à forte ( $a_g S > 0,1 g$ ) ;
- ouvrages de catégories d'importance III ou IV.

# Calcul des fondations et murs de soutènement

## Fondations profondes

### 2. Forces cinématiques résultant de la déformation du sol due au passage des ondes sismiques

Le pieu est supposé soumis à la déformée maximale du sol en champ libre :

- évaluée par une analyse de propagation verticale des ondes (ex : méthode linéaire équivalente, type SHAKE) ;
- dans le cas de profil homogène, considération de la déformée du sol dans le premier mode (quart de sinusoïde).

Dans les cas courants cette déformée est imposée à l'extrémité des ressorts d'un modèle de pieu (type élasto-plastiques). Si un modèle élastique est utilisé (type ST1), des paliers plastiques doivent être considérés « manuellement » (méthode itérative).

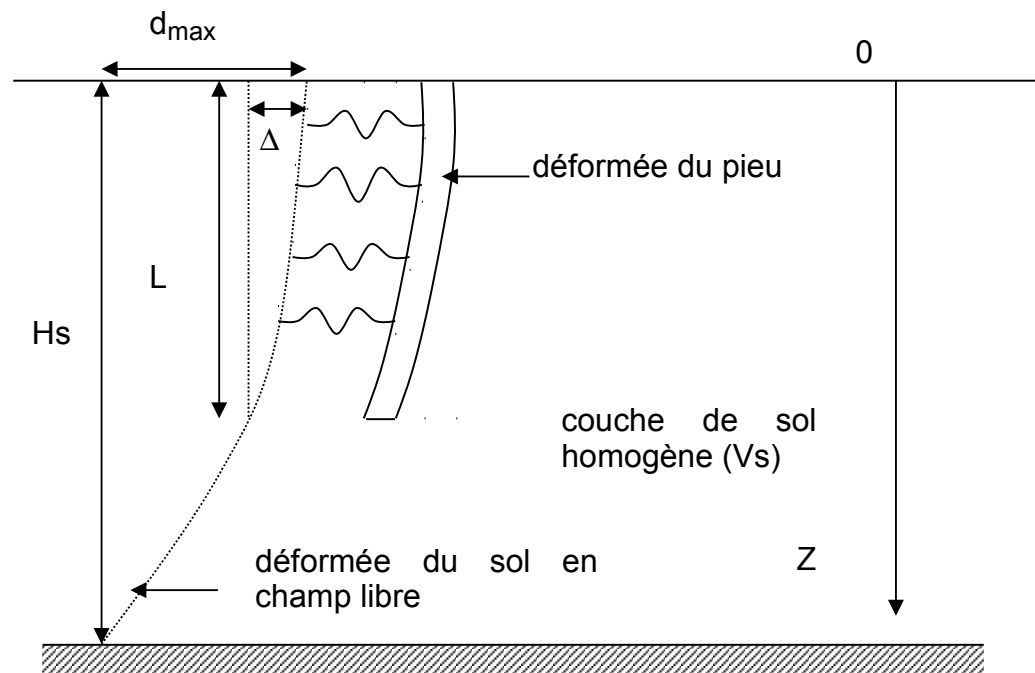
# Calcul des fondations et murs de soutènement

## Fondations profondes

### 2. Forces cinématiques résultant de la déformation du sol due au passage des ondes sismiques

$$\Delta = d_{\max} \left( 1 - \cos \left( \frac{\pi L}{2H_s} \right) \right)$$

$$d_{\max} = a_g S \left( \frac{2H_s}{\pi V_s} \right)^2$$



# Calcul des fondations et murs de soutènement

## Fondations profondes

### 2. Forces cinématiques résultant de la déformation du sol due au passage des ondes sismiques

#### Points d'alerte :

-  $d_{\max}$  ne doit pas être sensiblement inférieur à  $d_g$  (§ 3.2..2.4. de l'EC 8-1), déplacement maximal en surface (spectre de réponse élastique pour une période infinie) :

$$d_g = 0,0225 a_g S T_C T_D$$

- dans les cas courants cette déformée est imposée à l'extrémité des ressorts d'un modèle de pieu (type élasto-plastiques). Si un modèle élastique est utilisé (type ST1), des paliers plastiques doivent être considérés « manuellement » (méthode itérative).



# Calcul des fondations et murs de soutènement

## Fondations profondes

### Prise en compte de couches liquéfiables :

- couches de sol négligées en réaction latérale ;
- prise en compte du développement d'éventuels frottements négatifs liés au tassement des couches superficielles.

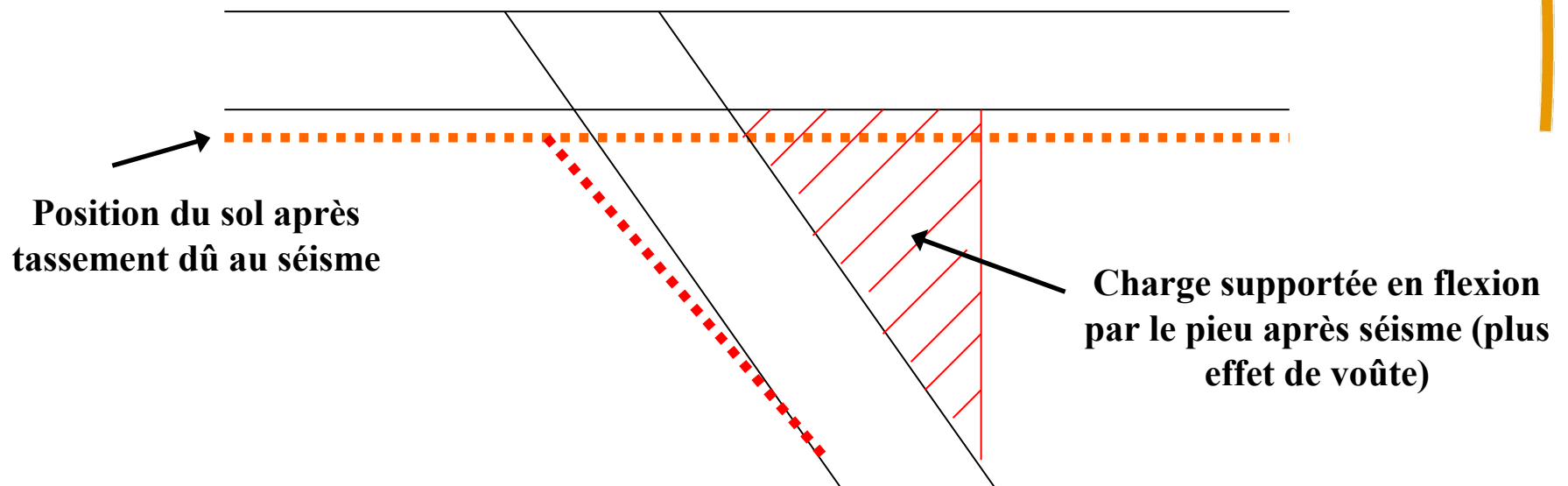


# Calcul des fondations et murs de soutènement

## Fondations profondes

### Dispositions constructives :

Pieux inclinés pour la reprise d'efforts horizontaux non recommandés, à défaut vérification en flexion (§ 5.4.2)



# Calcul des fondations et murs de soutènement

## Fondations profondes

### Dispositions constructives (EN 1998-2, § 6.4.2) :

Renforcement des zones de localisation potentielles des rotules plastiques (ferraillage de confinement) :



- 3 D au niveau de l'encastrement avec semelle de liaison ;
- 4 D dans la zone de moment fléchissant maximum et aux interfaces entre des sols de caractéristiques dynamiques contrastées (déformabilité au cisaillement)



# Calcul des fondations et murs de soutènement

## Interaction sol-structure

**Les effets de l'interaction sol-structure doivent être évalués :**

- sur les pieux (cf fondation profondes),
- sur les piles de pont,
- structures supportées par des sols mous ( $V_{s,max} < 100$  m/s).

**l'annexe D (informative)** donne des indications sur les effets de l'interaction sol-structure : différence de comportement d'une structure fondée sur terrain déformable (appuis flexibles) et sur terrain rigide (base fixe),

**l'annexe C** donne des expressions de rigidité statique en tête de pieu

# Calcul des fondations et murs de soutènement

## Ouvrages de soutènement des terres

### Méthodes pseudo-statiques :

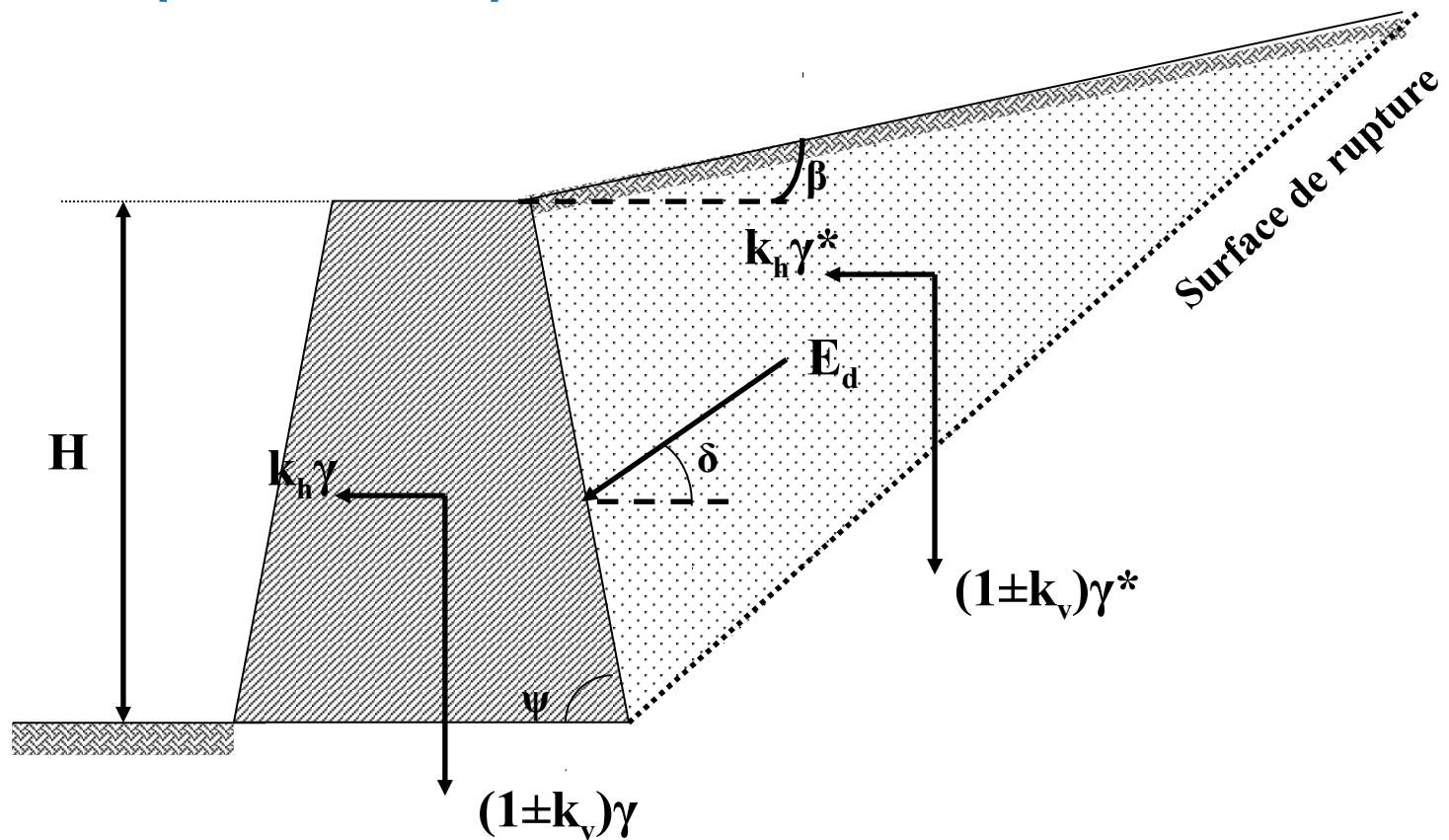
- coin de sol derrière la structure en état limite actif (déplacement nécessitant une structure flexible), et éventuellement masse de sol en équilibre limite passif devant l'ouvrage,
- actions sismiques représentées par un ensemble de forces statiques horizontales et verticales égales au produit des forces de gravité par un coefficient sismique.



# Calcul des fondations et murs de soutènement

## Ouvrages de soutènement des terres

Méthodes pseudo-statiques :



# Calcul des fondations et murs de soutènement

## Ouvrages de soutènement des terres

### Expression des coefficients sismiques ( $H \leq 10$ m)

EC8-partie 5	AFPS 90	PS 92
$k_h = \alpha \frac{S}{r}$	$\sigma_h = 0,4 \tau \frac{a_N}{g}$	$\sigma_h = 0,5 \tau \frac{a_N}{g}$
$k_v = \pm 0,5 k_h$ si $a_{vg} / a_g > 0,6$	à $\sigma_h = 1,3 \tau \frac{a_N}{g}$	à $\sigma_h = \tau \frac{a_N}{g}$
$k_v = \pm 0,33 k_h$ dans autres cas	$\sigma_v = 0,4 \sigma_h$	$\sigma_v = 0,5 \sigma_h$

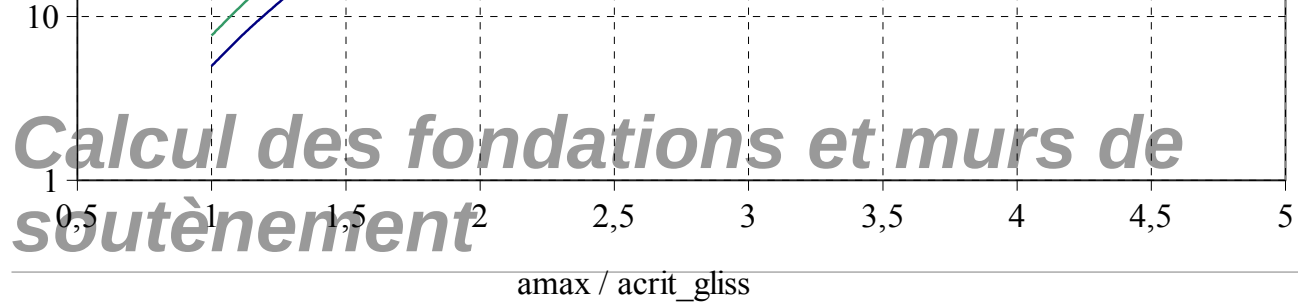
# Calcul des fondations et murs de soutènement

## Ouvrages de soutènement des terres

### Expression des coefficients sismiques ( $H \leq 10$ m)

Type d'ouvrage	r (EC8-5)	AFPS90*	PS 92*
Murs poids libre pouvant accepter un déplacement $dr \leq 300 \alpha$ (mm)	2	2	2
Murs poids $dr \leq 200 \alpha$ (mm)	1,5		
Murs B.A. soumis à la flexion	1	0,77	1
Murs ancrés ou contreventés			
Murs en BA fondés sur pieux			
Murs d'infrastructures encastrés et culées de pont			

$r = \text{accélération provoquant déplacement max} / \text{accélération Correspondant à l'état-limite}$

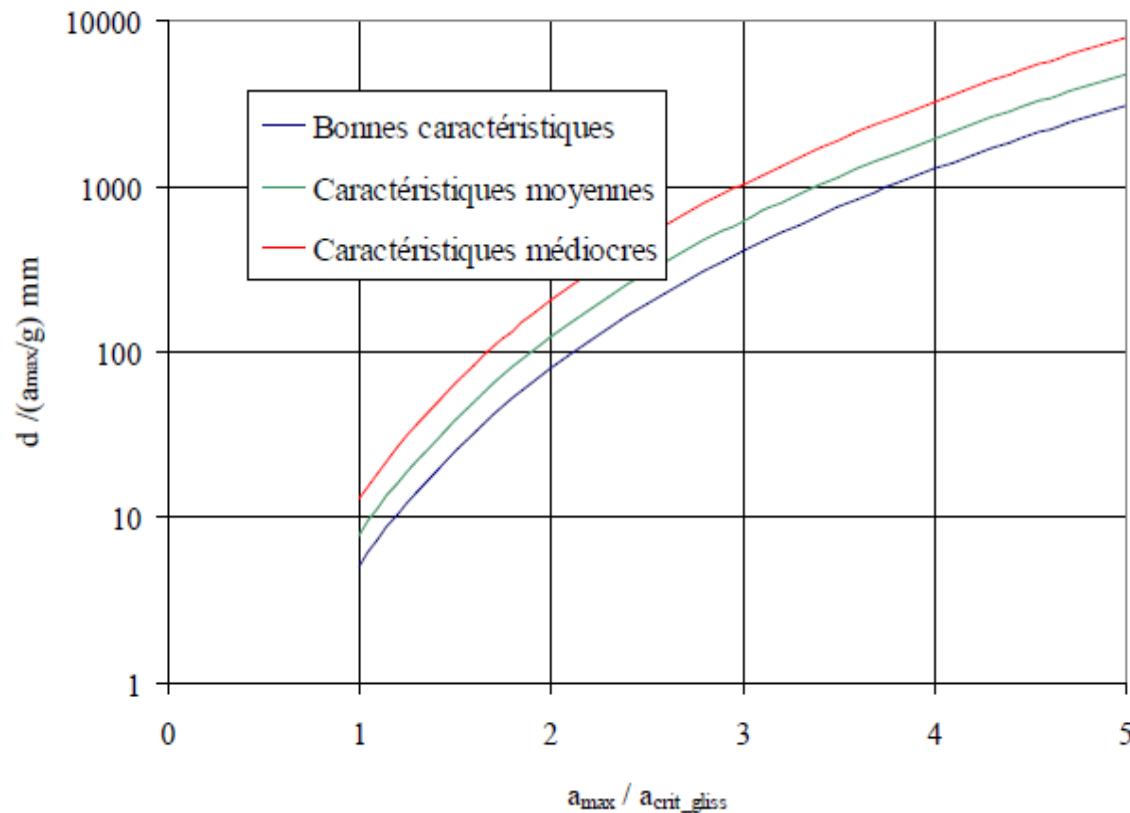


# Calcul des fondations et murs de soutènement

## Ouvrages de soutènement des terres

### Précisions sur le paramètre r

Déplacements rémanents du mur glissant sur sa base en fonction de l'accélération au sol sur l'accélération critique (Richards & Elms, 1979)



# Calcul des fondations et murs de soutènement

## Ouvrages de soutènement des terres

Annexe E (normative) : formulation de la poussée des terres sous séismes, Mononobe-Okabe

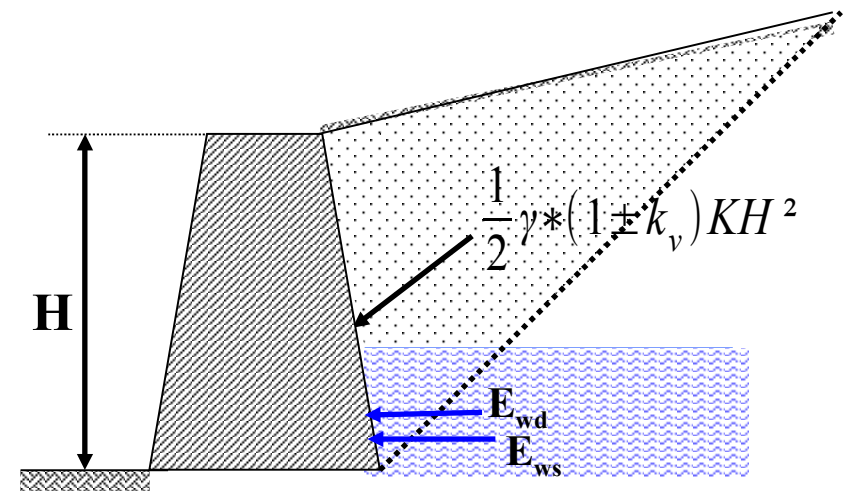
$$E_d = \frac{1}{2} \gamma^* (1 \pm k_v) KH^2 + E_{ws} + E_{wd}$$

$E_{ws}$  : poussée statique de l'eau

$E_{wd}$  : poussée hydrodynamique

$\gamma^*$  : poids volumique du sol

$K$  : coefficient de poussée des terres  
(statique+dynamique)





# Calcul des fondations et murs de soutènement

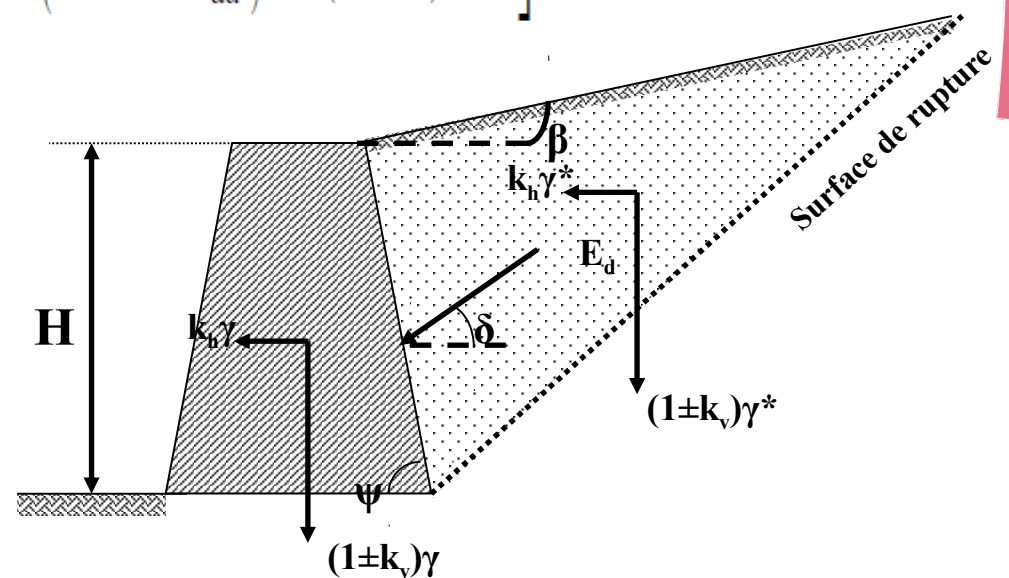
## Ouvrages de soutènement des terres

Annexe E (normative) : formulation de la poussée des terres sous séismes, Mononobe-Okabe

$$K_{ad} = \frac{\sin^2(\psi + \varphi_d - \theta)}{\cos \theta \sin^2 \psi \sin(\psi - \theta - \delta_{ad}) \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi_d + \delta_{ad}) \sin(\varphi_d - \beta - \theta)}{\sin(\psi - \theta - \delta_{ad}) \sin(\psi + \beta)}} \right]^2}$$

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

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

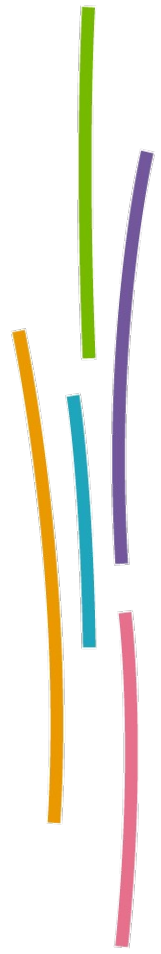
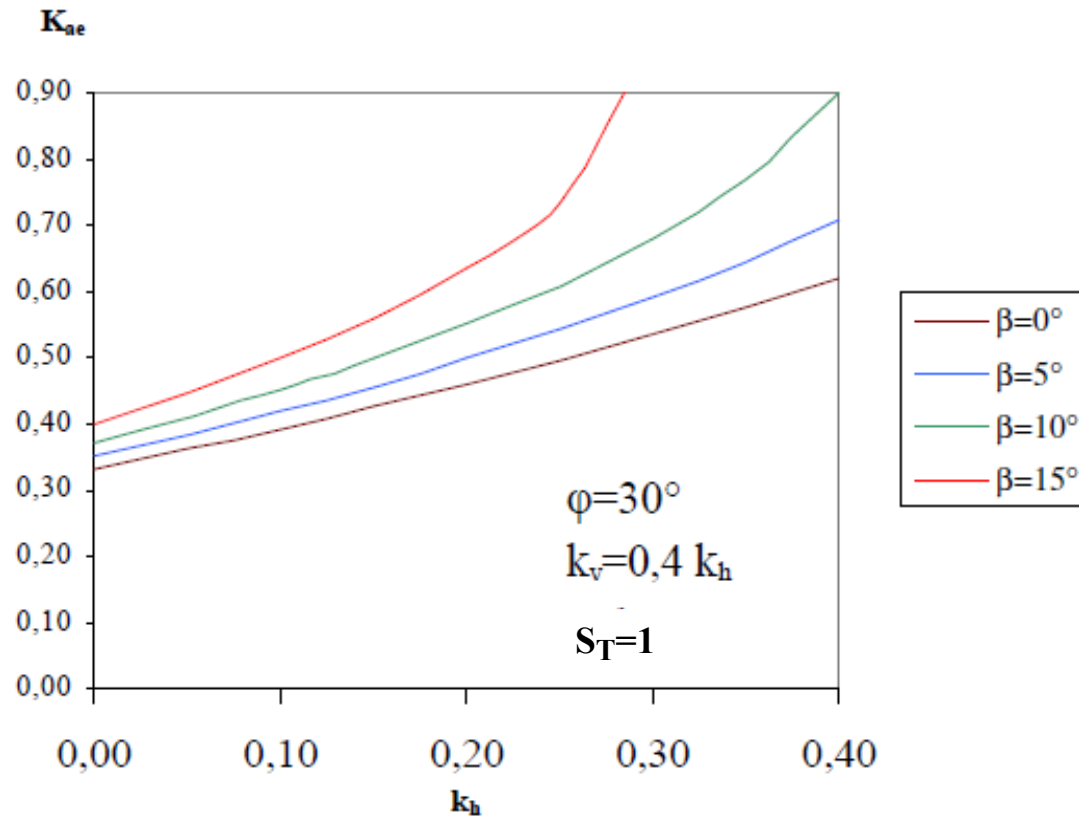


# Calcul des fondations et murs de soutènement

## Ouvrages de soutènement des terres

### Ordres de grandeur des coefficients de poussée dynamiques

$\gamma_1=1,2$   
 $S=1,2$

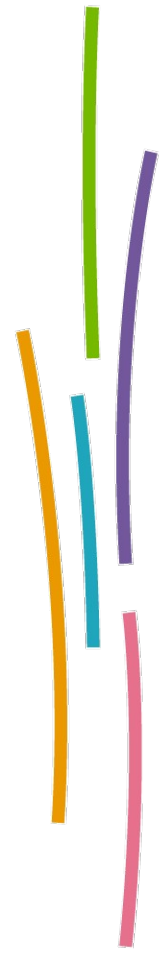
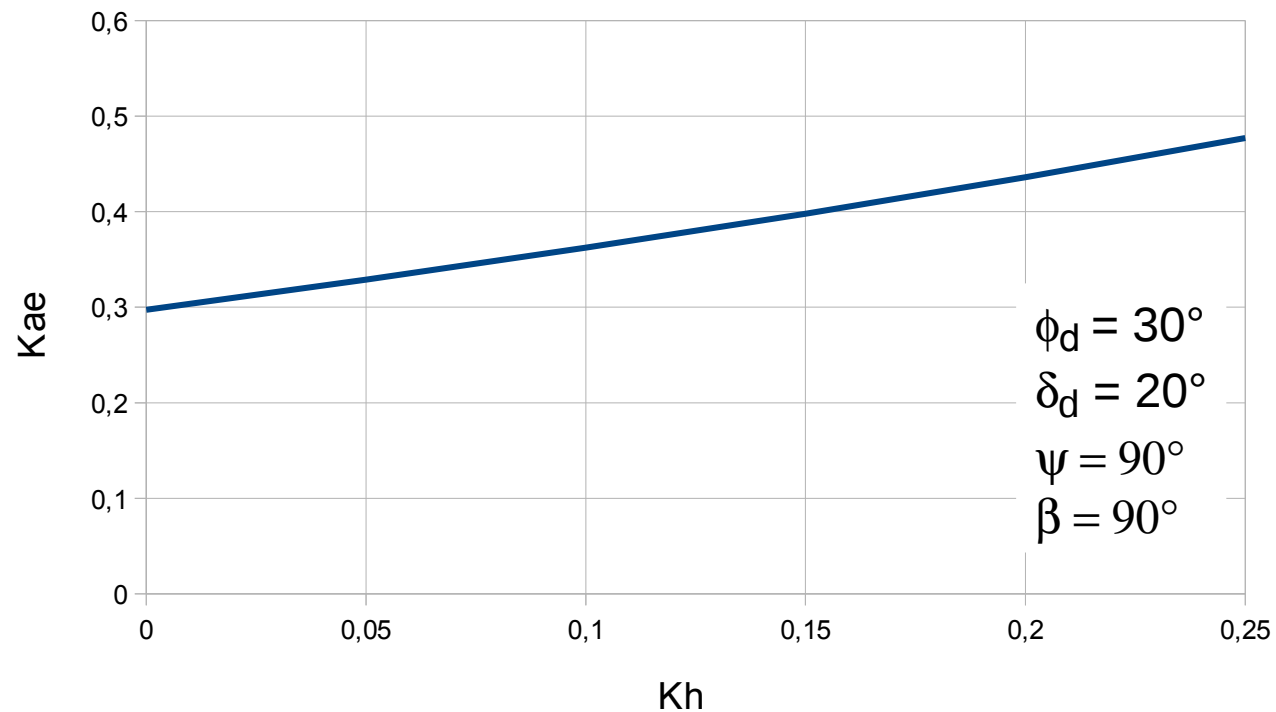


# Calcul des fondations et murs de soutènement

## Ouvrages de soutènement des terres

### Ordres de grandeur des coefficients de poussée dynamiques

$\gamma_I = 1,2$   
 $S = 1,2$   
 $S_T = 1$   
 $r = 2$



# Calcul des fondations et murs de soutènement

## Ouvrages de soutènement des terres

### Prise en compte de l'eau

Nappe au-dessous du mur	Sol sous nappe imperméable	Sol sous nappe très perméable
$\gamma^* = \gamma$	$\gamma^* = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w$	$\gamma^* = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w$
$\tan \theta = \frac{k_h}{1 \pm k_v}$	$\tan \theta = \frac{\gamma}{\gamma - \gamma_w} \frac{k_h}{1 \pm k_v}$	$\tan \theta = \frac{\gamma_d}{\gamma - \gamma_w} \frac{k_h}{1 \pm k_v}$
$E_{\text{wd}} = 0$	$E_{\text{wd}} = 0$	$E_{\text{wd}} = \frac{7}{12} k_h \gamma_w H^2$

# Calcul des fondations et murs de soutènement

## Ouvrages de soutènement des terres

### Problèmes soulevés

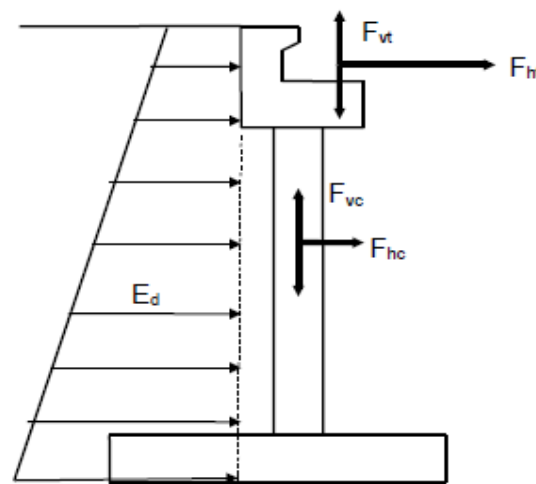
- point d'application de la sur-poussée dynamique à mi-hauteur, sauf pour murs pouvant tourner librement autour de leur base (= statique) -> non linéarité,
- inclinaison pressions mur  $< 2/3 \phi'$  pour poussée, et =0 butée,
- coefficients partiels sur les paramètres de cisaillement !
- sols très perméables (? Imperméabilité si  $k < 5 \cdot 10^{-4}$  m/s), pression hydrodynamique (Wasteergard) avec point d'application à 60 % de l'épaisseur de la couche saturée sous le toit de cette dernière,
- sécurité vis à vis liquéfaction impérative ( $F > 2$ )



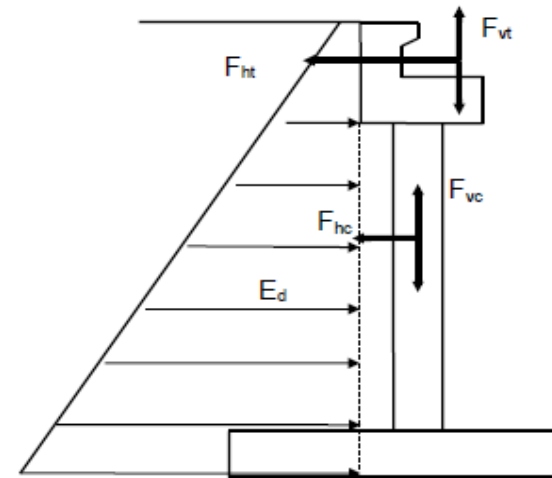
# Calcul des fondations et murs de soutènement

## Cas particuliers des culées

### Vérification de la stabilité interne



EFFORTS SISMIQUES VERS LE  
TABLIER



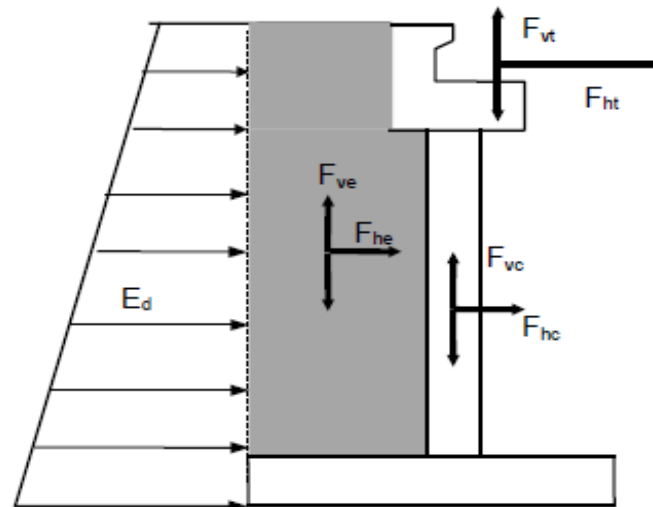
EFFORTS SISMIQUES VERS LA  
CULEE

- $F_{ht}$ ,  $F_{vt}$  : efforts transmis par le tablier sous séisme
- $F_{hc}$ ,  $F_{vc}$  : efforts provenant de l'accélération de la culée, calculés avec  $k_h$  et  $k_v$
- $E_d$  : poussée des terres calculée selon Mononobé-Okabé
- $F_{ht}$ ,  $F_{vt}$  : efforts transmis par le tablier sous séisme
- $F_{hc}$ ,  $F_{vc}$  : efforts provenant de l'accélération de la culée, calculés avec  $k_h$  et  $k_v$
- $E_d$  : butée des terres avec un coefficient de butée  $K_{pd}$  de 1

# Calcul des fondations et murs de soutènement

## Cas particuliers des culées

### Vérification de la stabilité externe



EFFORTS SISMIQUES VERS LE TABLIER

- $F_{ht}$ ,  $F_{vt}$  : efforts transmis par le tablier sous séisme
- $F_{hc}$ ,  $F_{vc}$  : efforts provenant de l'accélération de la culée, calculés avec  $k_h$  et  $k_v$
- $E_d$  : poussée des terres calculée selon Mononobé-Okabé
- $F_{he}$ ,  $F_{ve}$  : efforts provenant de l'accélération de la masse des terres reposant sur la semelle, calculés avec  $k_h$  et  $k_v$

# Calcul des fondations et murs de soutènement

## Cas particuliers des culées

### Concomitances entre sollicitations

- les sollicitations créées par  $F_{hc}$ ,  $F_{vc}$ ,  $F_{he}$ ,  $F_{ve}$  et  $F_s$  sont concomitantes et doivent être cumulées directement ;
- les sollicitations créées par  $F_{ht}$  et  $F_{vt}$  doivent être cumulées directement si le tablier est fixé sur la culée. Si le tablier n'est pas fixé sur la culée, les pratiques anciennes consistaient à les cumuler quadratiquement avec les précédentes. L'EC8-2 (§6.7.2.) préconisent désormais de supposer que ces actions agissent en phase, ce qui revient également à un cumul direct.

# Calcul des fondations et murs de soutènement

## Type d'ouvrages et méthodes de calcul

Ouvrages courants	Faibles déformations	Grandes déformations et ruine
Fondations superficielles	Impédances	BNLW - AL
Fondations profondes	BLW (inertiels)	BNLW (inertiels+cinématique)
Murs poids		PS, NW (EL, DL)
Remblai renforcé		PS, NW (EL, DL)
Remblais, digues		PS, NW (EL, DF)
Pentes naturelles (sols et roches)	Vibrations (roches)	PS, NW ( EL, DF)

Types d'ouvrages et méthodes de calcul disponibles.

AL : analyse limite

DF = différences finies

NW = bloc rigides&dérivées

EL = éléments finis

PS = pseudo-statique

BNLW = poutres sur appuis élastoplastiques

BLW )= poutres appuis élastiques