

Questions ouvertes pour l'analyse structurale et le dimensionnement sismique des systèmes de fondations

Dr F. Mayoraz, ing. civil dipl. EPFL
De Cérenville Géotechnique SA, Ecublens

Table des matières

1. Mandat de l'OFEV

2. Bâtiments

2.1 Analyse structurale

2.2 Dimensionnement

3. Ouvrages d'art

3.1 Analyse structurale

4. Besoins identifiés

4.1 Hypothèses géomécaniques

4.2 Analyse structurale (fondations superficielles et profondes)

5. Conclusions

1. Mandat de l'OFEV

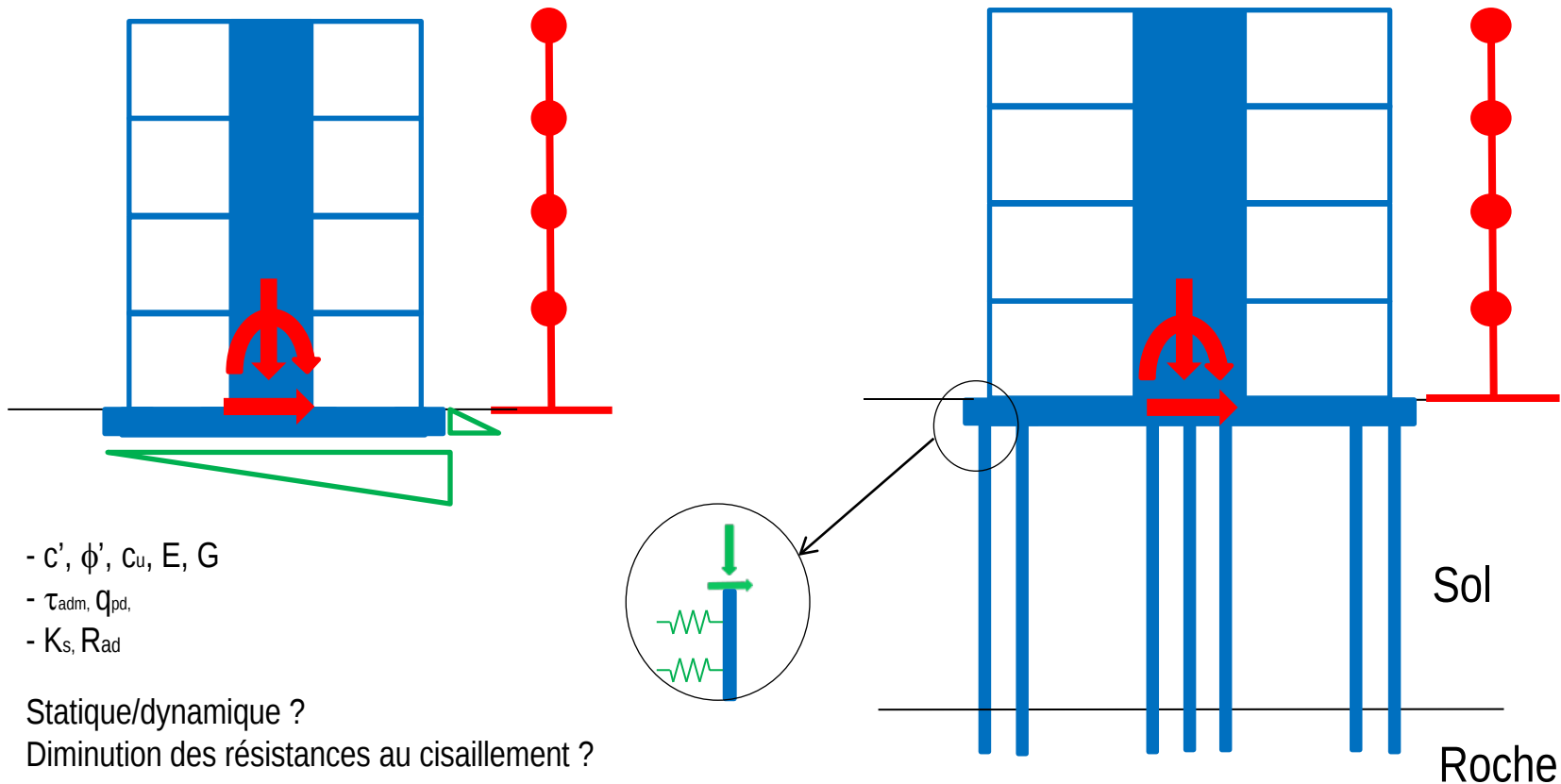
Documenter, à l'aide de cas pratiques, les démarches, hypothèses, modes d'analyse, et solutions adoptées pour le dimensionnement des fondations et soutènements.

Objet	Lieu et zone de danger	Pont	Bâtiment	Avec sous-sols ?	Sans sous-sols ?	Fondations superficielles ?	Fondations profondes ?	Soutènements	Ancrés ?	Nouveau ou existant	Qui
Pont de Fégire	VD/FR, N12 Zone II	X					X			Existant	GEOMOD
Y-Parc, bâtiment Galilée	VD Yverdon, Zone I		X		X		X			Nouveau	PGRA
Garage Emile Frey	NE La Chaux-de-Fonds, Zone I		X		X	X				Existant	STAMM
CSS Vennes	VD Lausanne, Zone I		X	X			X			Nouveau	Jundt
ARTEVIL	VD Villeneuve, Zone II		X		X		X			Nouveau	Ott + Uldry
La Barme	VS Collombey Zone IIIa		X	X			X			Nouveau	Kurmann & Cretton
Tunnel d'Eyholz	VS N9 Eyholz, Zone IIIb							X	non	Nouveau	GEOMOD
Murs N12	VD, N12 Zone II							X	oui	Existant	DCG

But : résumer les questions fréquemment soulevées lors de l'analyse structurale et le dimensionnement des fondations et proposer des axes de recherche.

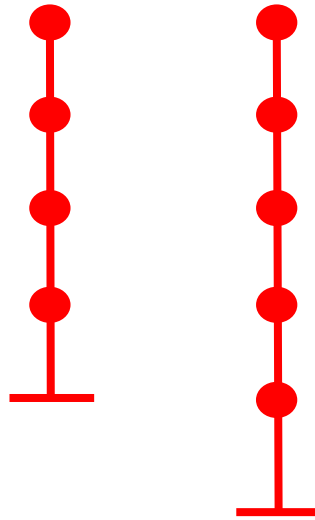
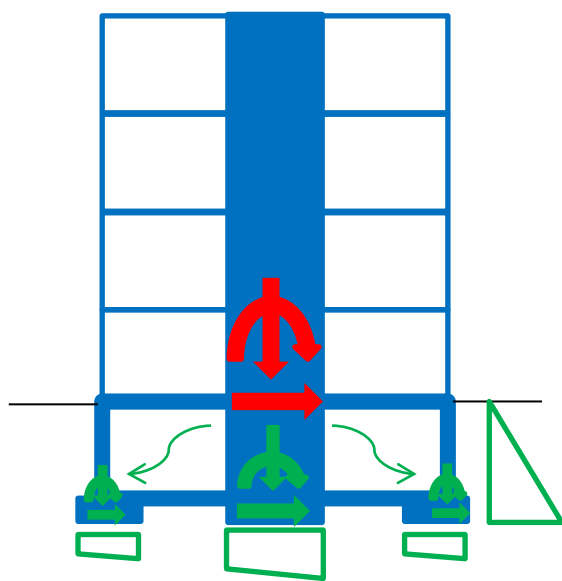
2. Bâtiment sans sous-sol - analyse structurale

Méthode des forces (forces de remplacement ou spectre de réponse) / encastrement au niveau du terrain naturel



2. Bâtiment avec sous-sol - analyse structurale

Méthode des forces (forces de remplacement ou spectre de réponse)

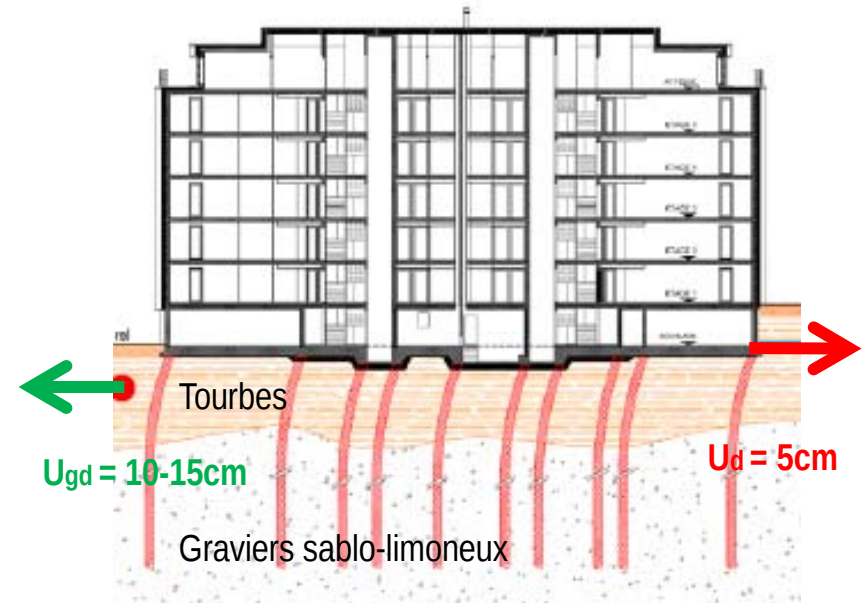
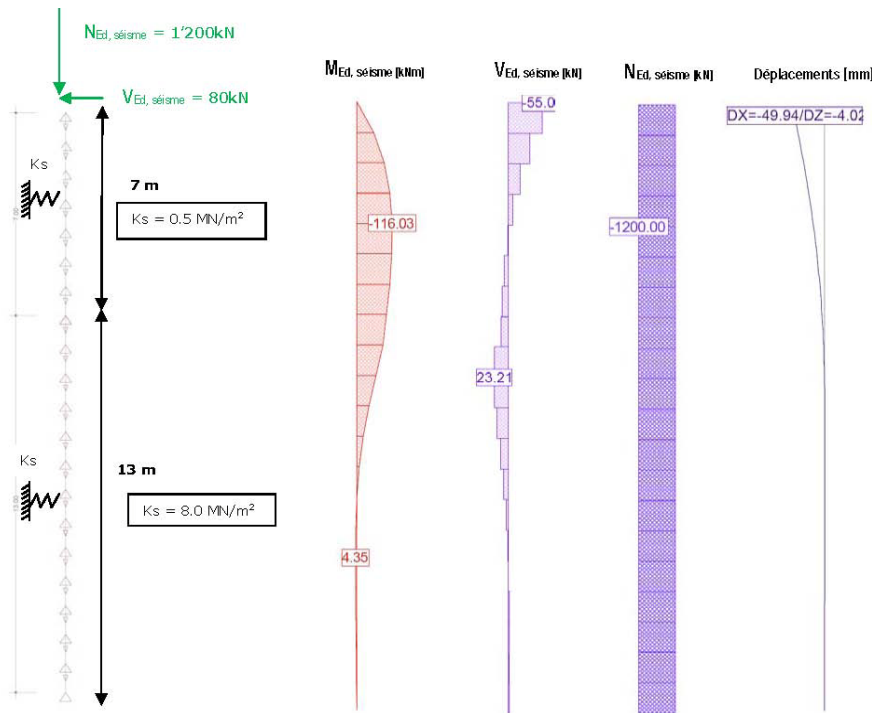


Niveaux d'encastrement pour l'analyse structurale variable.

Prise en compte des efforts sur les murs de sous-sols pas claire.

2. Bâtiment sur fondations profondes - dimensionnement

Zone IIIa, Classe de sol D, COI

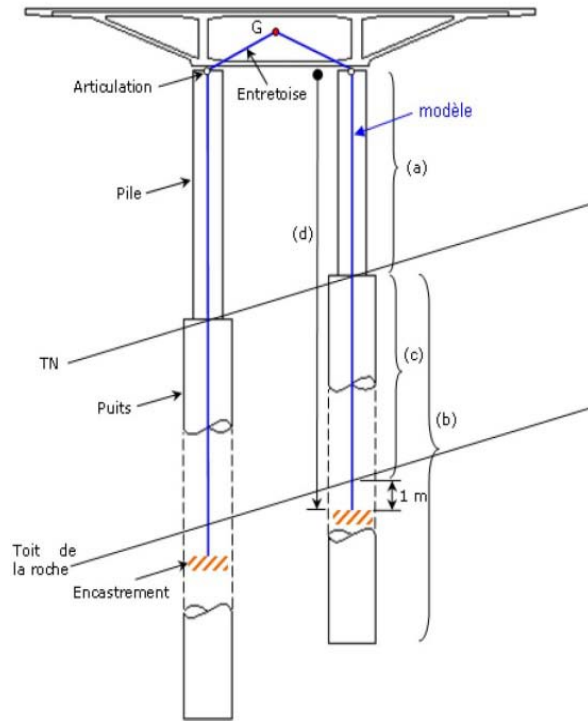


69 Pieux Ø 55cm, L=20m
As = 9Ø16, spirale Ø10 - e=10 et 15 cm

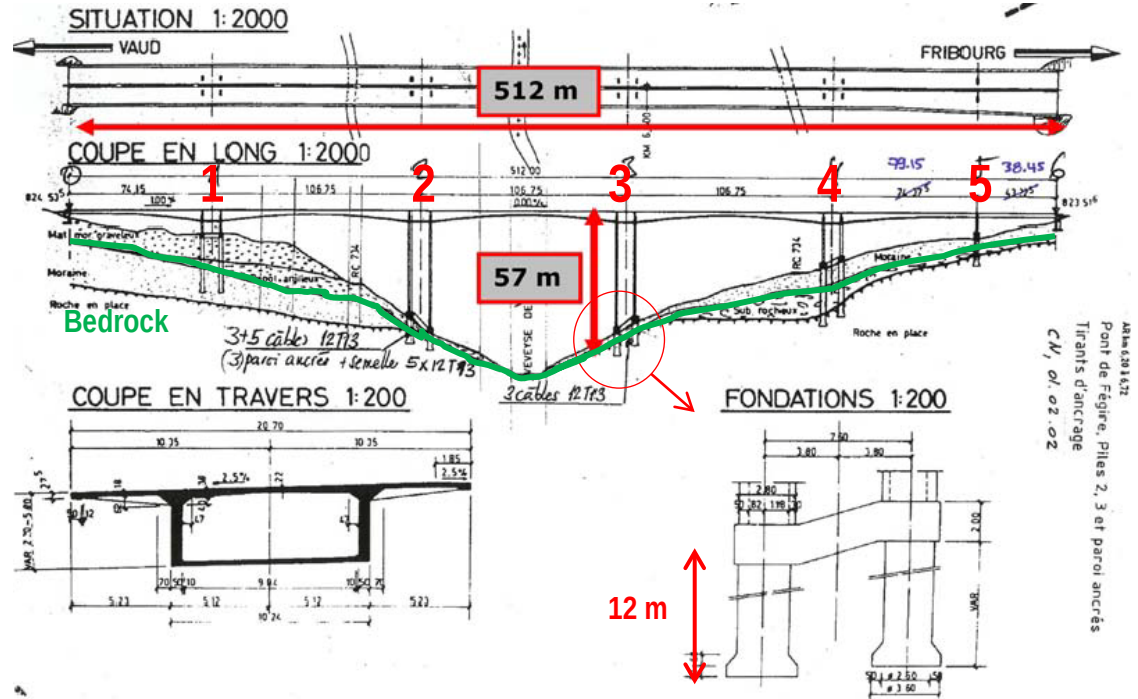
Source : Kurmann & Cretton SA

3. Ouvrage d'art – analyse structurale

Zone II, Classe de sol E, COII, q = 2



N12 - Pont de Cucloz



N12 - Pont de la Veveyse de Fégire

Pas de prise en compte du sol au-dessus du niveau d'encastrement (ni résistant, ni sollicitant)

3. Ouvrage d'art – analyse structurale

					Coefficient de conformité α (réduit à α_{red} si nécessaire) pour chaque pile								
			T [s]	S _d [%]	1 VD	1 FR	2 VD	2 FR	3 VD	3 FR	4 VD	4 FR	5
Forces de remplacement	transversal	encastré	1.9	5.6	10.19	1.10	2.95	3.19	2.93	2.77	1.94	1.94	6.46
		base	2.2	4.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		optimiste	2.2	4.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	longitudinal	encastré	0.8	13.0	0.21	0.23	4.96	4.86	4.36	4.89	1.86	1.64	0.56
		base	1.4	7.6	0.25	0.49	6.49	8.44	7.06	8.66	1.17	1.49	3.41
		optimiste	1.8	5.2	0.46	1.53	9.53	13.14	11.00	14.36	1.48	1.91	4.41
Push-over	transversal	encastré	1.9	5.6	23.57	3.16	17.67	21.67	19.24	16.50	24.03	31.59	95.75
		base	2.2	4.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		optimiste	2.2	4.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	longitudinal	encastré	0.8	13.0	0.20	0.18	38.66	51.25	50.90	41.24	8.29	7.31	1.61
		base	1.4	7.6	0.38	0.36	33.20	34.19	42.58	43.83	7.58	8.42	1.77
		optimiste	1.8	5.2	0.76	0.76	29.91	30.74	38.82	39.88	6.89	7.63	2.97

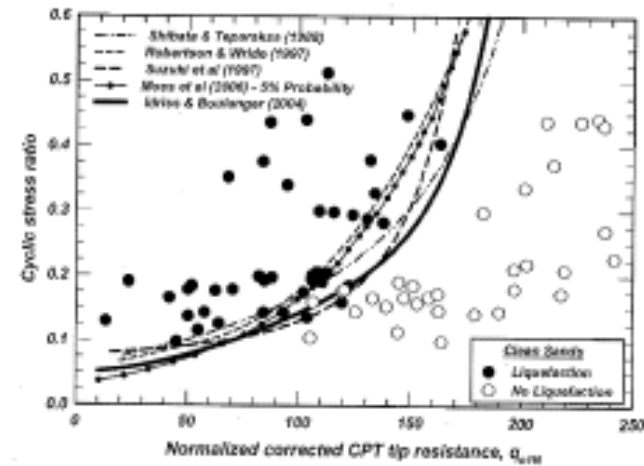
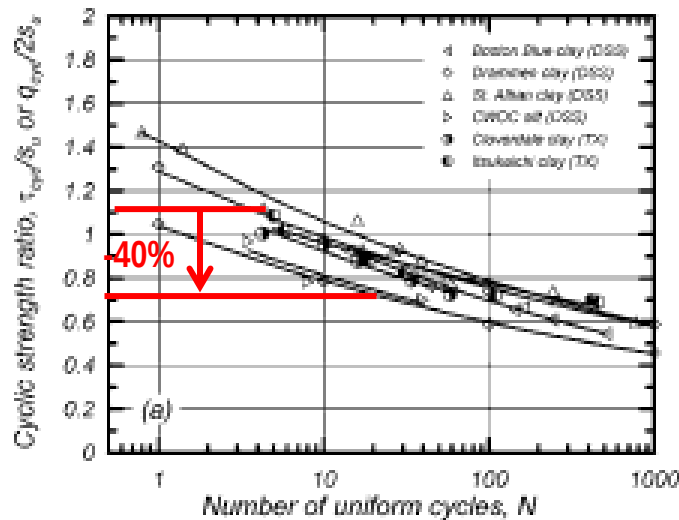
Encastré : appui au niveau du TN, Base = appui au niveau du bedrock. Optimiste = appui au niveau du bedrock avec modification de l'inclinaison des bielles de compression et a_{gd} selon carte SED

Source : GEOMOD SA

4. Besoins identifiés – hypothèses géomécaniques

Définition des paramètres de résistance dynamiques : diminution des résistances sous sollicitations cycliques, p.ex cohésions non drainées pour les sols fins -> Influence sur les capacités portantes, les tassements ou la résistance externe des pieux.

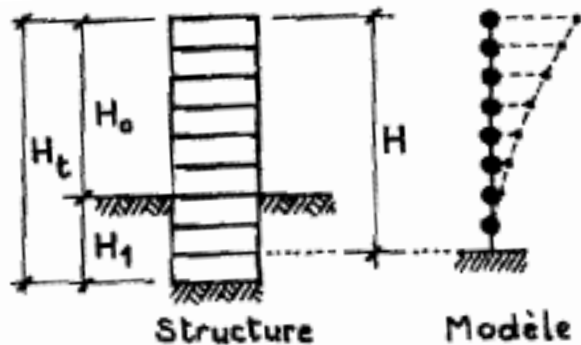
Définition de la susceptibilité et du potentiel de liquéfaction : analyse simplifiée (voir aussi EC8-5 §4.1.4) et prise en compte dans l'analyse structurale des ouvrages sur pieux (pendant et après séisme).



Source : Idriss & Boulanger 2008 « Soil liquefaction during earthquake » EERI 2008

4. Besoins identifiés – analyse structurale / fond. superficielles

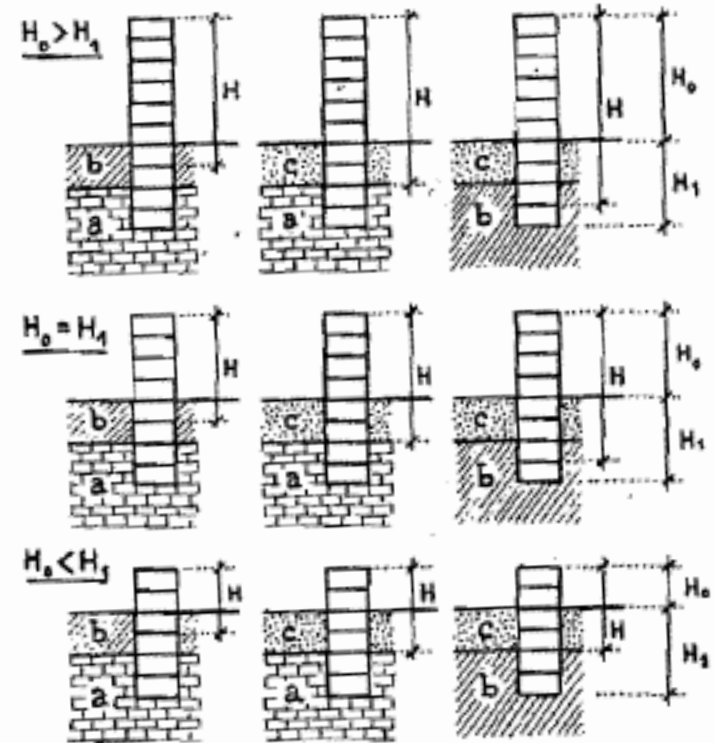
Définition d'un **niveau d'encastrement** d'un bâtiment, particulièrement avec sous-sol ?



$H = H_0$: si la structure est fondée sur rocher ou sol de catégorie a

$H = H_0 + H_1/2$: si la structure est fondée sur rocher ou sol de catégorie b

$H = H_0 + H_1$: si la structure est fondée sur sol de catégorie c

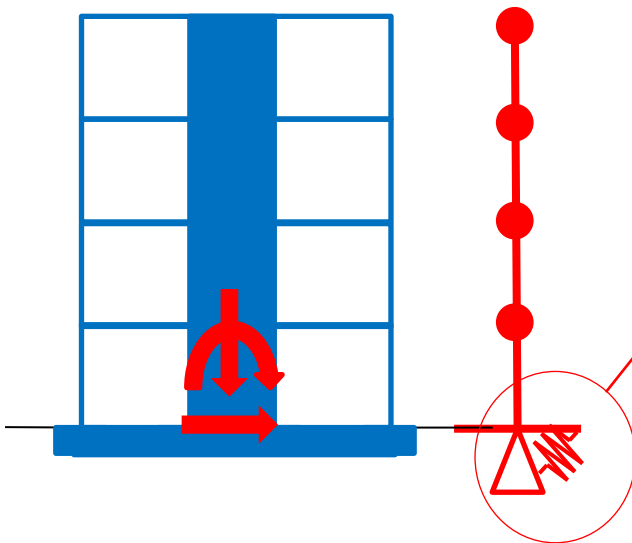


Pour un bicouche

Source : Recommandations AFPS 1990

4. Besoins identifiés – analyse structurale / fond. superficielles

Prise en compte de la **souplesse** de la fondation ?



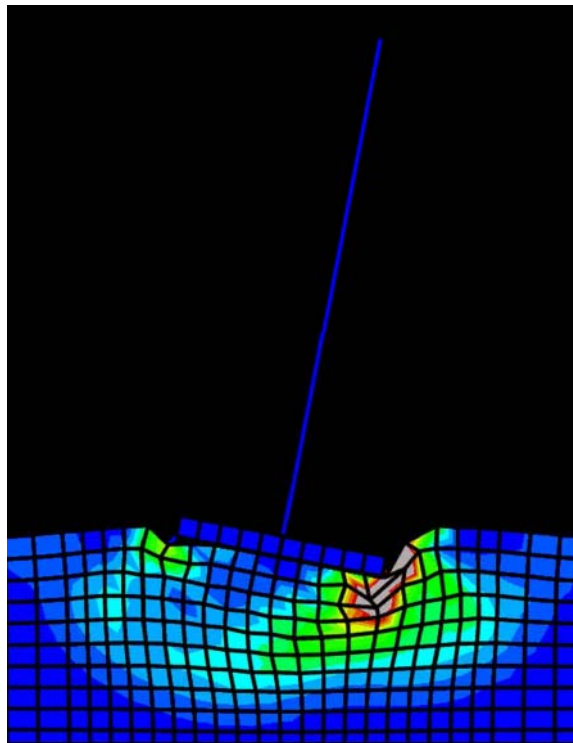
Freiheitsgrad	Steifigkeitsparameter
Translation Richtung X	$K_x = \frac{G_{eff} \cdot b}{2 - \nu} \left[3,4 \left(\frac{a}{b} \right)^{0,681} + 1,2 \right]$
Translation Richtung Y	$K_y = \frac{G_{eff} \cdot b}{2 - \nu} \left[3,4 \left(\frac{a}{b} \right)^{0,681} + 0,4 \left(\frac{a}{b} \right) + 0,8 \right]$
Translation Richtung Z	$K_z = \frac{G_{eff} \cdot b}{1 - \nu} \left[1,55 \left(\frac{a}{b} \right)^{0,771} + 0,8 \right]$
Rotation um die X-Achse	$K_{xx} = \frac{G_{eff} \cdot b^3}{1 - \nu} \left[0,4 \left(\frac{a}{b} \right) + 0,1 \right]$
Rotation um die Y-Achse	$K_{yy} = \frac{G_{eff} \cdot b^3}{1 - \nu} \left[0,47 \left(\frac{a}{b} \right)^{2,4} + 0,034 \right]$
Torsion um die Z-Achse	$K_{zz} = \frac{G_{eff} \cdot b^3}{1 - \nu} \left[0,53 \left(\frac{a}{b} \right)^{2,41} + 0,51 \right]$
G_{eff}	effektiver Schubmodul.
ν	Poissonzahl.
$a \geq b$	
a	Länge der Flachfundation in der X-Richtung.
b	Breite der Flachfundation in der Y-Richtung.



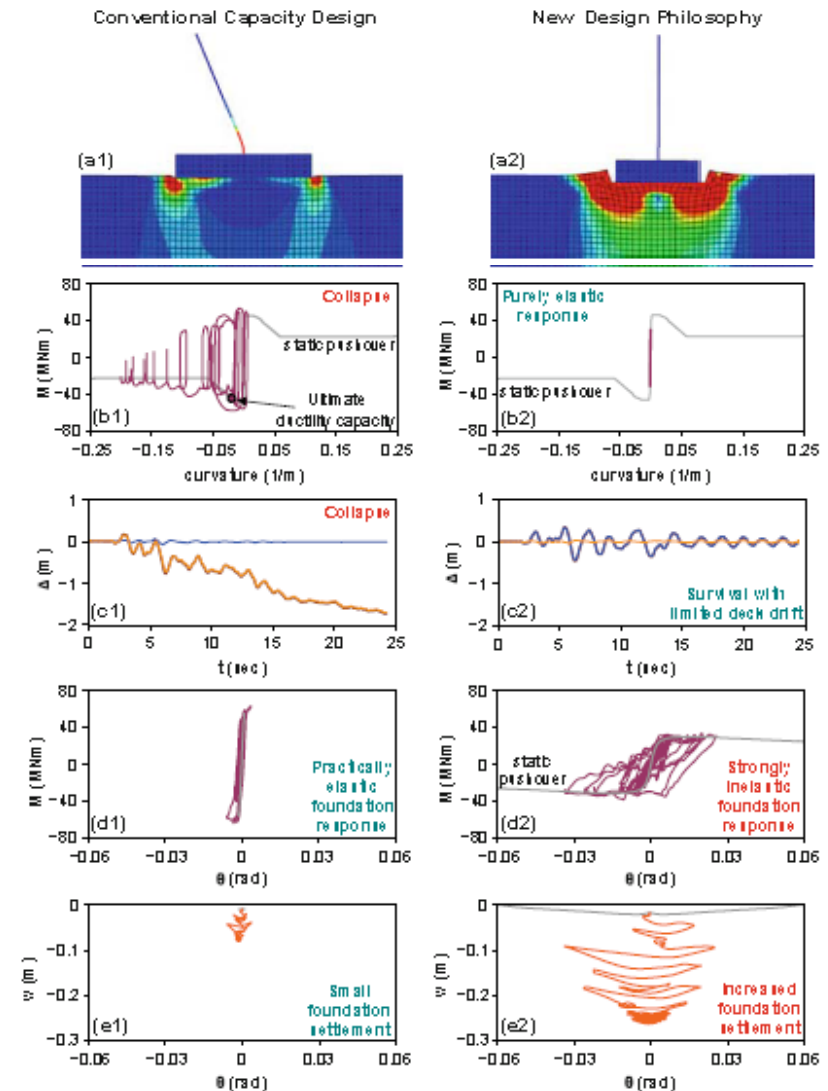
Source : Norme SIA 268/8 « Erhaltung von Tragwerken – Erdbeben, 2014 (Vernehmlassung)

4. Besoins identifiés – analyse structurale / fond. superficielles

Possibilité de **plastifier** le terrain ?
Possibilité de permettre un **soulèvement** de la fondation ?



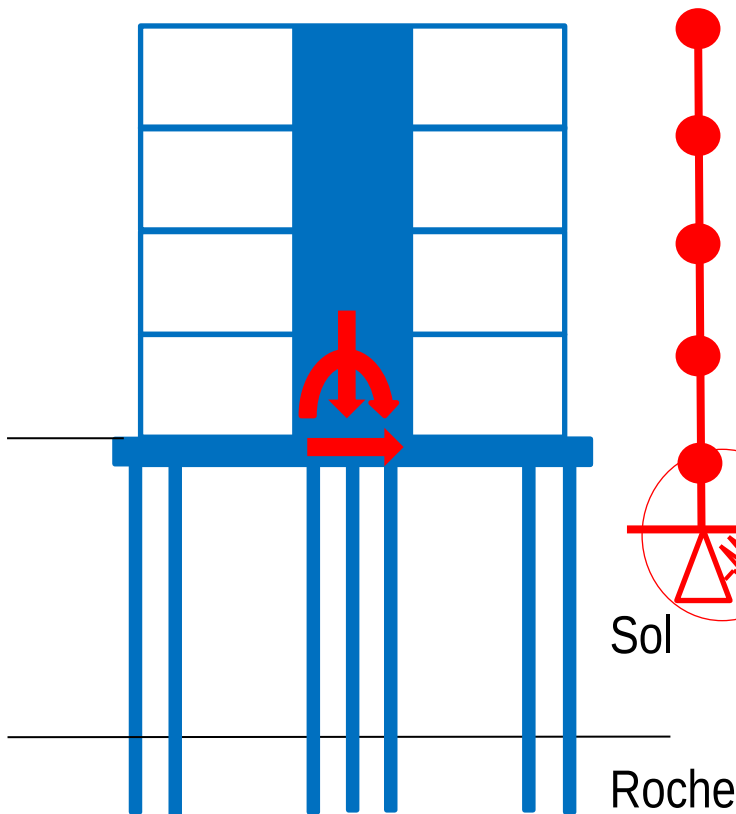
Source : Anastopoulos et al. « Soil failure can be used for seismic protection of structures »
Bull. Earthquake Eng.8, 2010



4. Besoins identifiés – analyse structurale / fond. profondes

Définition du **niveau d'encastrement** sous le radier ?

Prise en compte de la **souplesse** de la fondation ?



Bodenmodell ¹⁷⁾	$K_{HH} / (D \cdot E_s)$	$K_{HH} / (D^3 \cdot E_s)$	$K_{HH} / (D^3 \cdot E_s)$
Mit der Tiefe linear steigender E-Modul: $E_s = E_{s0} \cdot z/D$	$0,80 (E_{pf}/E_{s0})^{0,25}$	$0,14 (E_{pf}/E_{s0})^{0,25}$	$-0,17 (E_{pf}/E_{s0})^{0,25}$
Mit der Tiefe parabolisch steigender E-Modul: $E_s = E_{s0} \cdot (z/D)^{0,25}$	$0,79 (E_{pf}/E_{s0})^{0,23}$	$0,15 (E_{pf}/E_{s0})^{0,23}$	$-0,24 (E_{pf}/E_{s0})^{0,23}$
Mit der Tiefe konstanter E-Modul: $E_s = E_{s0}$	$1,08 (E_{pf}/E_{s0})^{0,21}$	$0,16 (E_{pf}/E_{s0})^{0,21}$	$-0,22 (E_{pf}/E_{s0})^{0,21}$
$E_{s0} = 2 \cdot G_{eff} \cdot (1+\nu)$ E_{s0} Elastizitätsmodul des Bodens, ein Pfahldurchmesser ab Oberkante Pfahl. G_{eff} Effektiver Schubmodul, ein Pfahldurchmesser ab Oberkante Pfahl, bzw. ab Bodenoberfläche falls der Pfahl über die Bodenoberfläche hinausreicht. ν Poissonzahl. E_s Elastizitätsmodul des Bodens. D Pfahldurchmesser. z Tiefe. E_{pf} Elastizitätsmodul des Pfahlmaterials. ¹⁷⁾ Eine etwa lineare Steifigkeitszunahme mit der Tiefe ist typisch für normal konsolidierte feinkörnige Böden, eine etwa parabolische Steifigkeitszunahme für Sande und eine etwa konstante Steifigkeit für überkonsolidierte feinkörnige Böden.			

Contrôle de la compatibilité des déplacements ?

Source : Norme SIA 268/8 « Erhaltung von Tragwerken – Erdbeben, 2014 (Vernehmlassung)

4. Besoins identifiés – analyse structurale / fond. profondes

Nécessité de prendre en compte **l'interaction sol-structure**
(méthode directe, sous-structure) ?

Selon EC8-5 - chap.5 et 6.

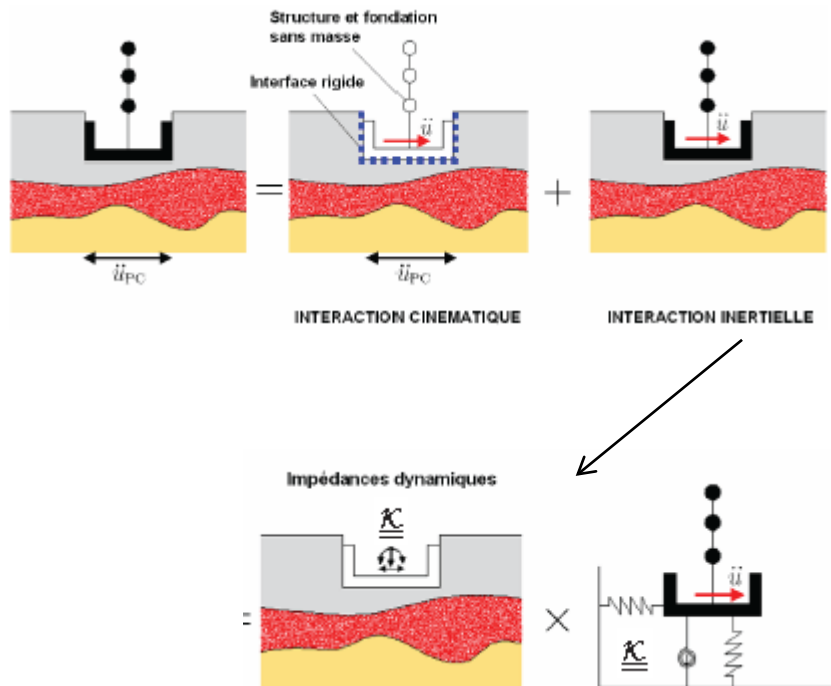
6 (1) : Les effets de l'interaction sol-structure doivent être pris en compte [...] pour les structures avec fondations massives ou profondes comme les piles de pont [...]

6 (2) : Les effets de l'interaction sol-structure sur les pieux doivent être évalués, pour toutes les structures conformément à 5.4.2

5.4.2 (1) : Pieux et puits doivent être dimensionnés pour résister aux effets des forces d'inertie et cinématique

5.4.2 (6): Les moments fléchissants qui se développent en raison de l'interaction cinématique doivent être calculés uniquement lorsque toutes les conditions suivantes sont réunies simultanément

- Profil de sol de classe D, S1 ou S2 et contient des couches consécutives dont la rigidité diffère nettement
- La zone est de sismicité modérée ou forte, i.e. le produit $a_g S$ dépasse 0.10g et la structure supportée est de catégorie d'importance III ou IV



Source : Chatzigogos C. « Comportement sismique des fondations superficielles : Vers la prise en compte d'un critère de performance dans la conception ». PhD Diss. 2007)

4. Besoins identifiés – analyse structurale / fond. profondes

Exemple d'IC (BDWF)

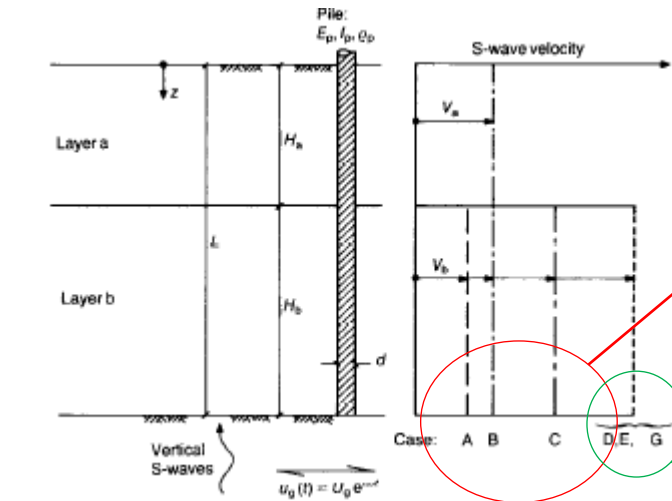
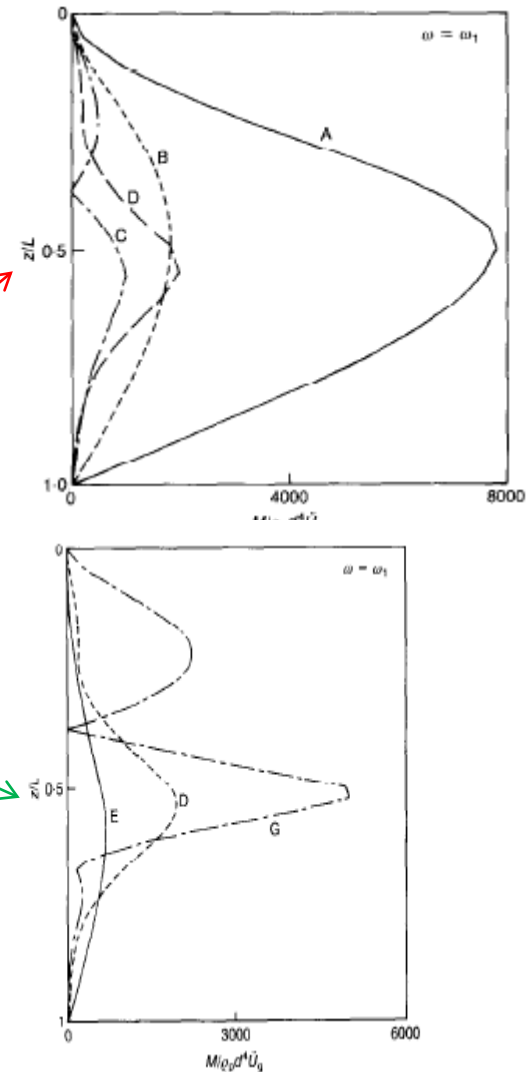


Table 1. Series 1 (A–D) and series 2 (E and G) of studied profiles

Case	V_b/V_a	E_p/E_b	H_a/H_b	L/d	Computed $\omega_1 d/V_b$
A	0.58	5000	1	20	0.048
B	1	5000	1	20	0.079
C	1.73	5000	1	20	0.116
D	3	5000	1	20	0.141
E	3	5000	1	10	0.282
G	3	5000	1	40	0.071



Source : Kavvas M. & Gazetas G. (1993) « Kinematic seismic response and bending of free-head piles in layered soil » Géotechnique 43/2

5. Conclusions

Les besoins identifiés, proposés pour traitement dans une deuxième phase par le GT Erdbeben & Geotechnik sont :

- **Un état de l'art pratique**
- **Pour l'analyse structurale**
 - Détermination du modèle équivalent permettant de déterminer les sollicitations horizontales sismiques (niveau d'encastrement, souplesse de la fondation).
 - Traitement du comportement au cisaillement – compatibilité des déplacements.
 - Détermination des actions/réactions du sol le long des pieux (sol résistant/sollicitant – court terme / long terme).
 - Fourniture de bornes pour savoir si l'interaction sol-structure doit être étudiée (interaction cinématique).
- **Pour le dimensionnement**
 - Révision des critères de dimensionnement des fondations superficielles (soulèvement, plastification ...).
- **Pour les paramètres géotechnique**
 - Prise en compte de l'influence de l'eau sur les résistances (cas non drainés), de la dégradation/amélioration des paramètres.
 - Une définition des zones où la susceptibilité à la liquéfaction est à craindre serait bienvenue (bornes ou cartes).

L'étude de certains de ces points fait l'objet de projets de semestre/diplôme à l'attention des étudiants EPF ou HES.