



*Pr NF P 94-261*

Norme de justification  
des fondations  
superficielles

---

*Journée CFMS du 11/10/2012*

**Julien HABERT**

CETE Nord Picardie

**Sébastien BURLON**

IFSTTAR



# Contexte de la *pr* NF P 94-261

- Section 6 de l'EN 1997-1 : fondations superficielles
  - ◆ ELU à considérer :
    - Portance :  $V_d < R_d$  (Les règles de calcul de  $R_d$  sont présentées à titre informatif en annexe et sont précisées par chaque pays)
    - Glissement :  $H_d < R_d + R_{p,d}$
  - ◆ ELS : estimation des tassements à fournir
  - ◆ Précautions particulières pour les charges « fortement » excentrées ( $e > B/3$ )
- Norme 94-261 : norme d'application nationale de l'Eurocode 7 relative à la justification des fondations superficielles
- Calendrier :
  - Rédaction du texte (CNJOG) : depuis juin 2010
  - Enquête publique (AFNOR) : 1<sup>er</sup> semestre 2012
  - Publication à l'AFNOR : début 2013

# Table des matières de la norme

## ■ 14 sections

1	Domaine d'application		
2	Références normatives	8	Justification des fondations superficielles - Règles générales
3	Termes, définitions, symboles et convention de signes	9	Capacité portante
4	Comportement des fondations superficielles	10	Glissement
5	Actions et données géométriques	11	Calcul de la structure des fondations superficielles
6	Propriétés des terrains et des matériaux	12	Stabilité générale du site
7	Situations de calcul, sollicitations et combinaisons d'actions	13	Justification à l'état limite de service
		14	Documents justificatifs des calculs de stabilité d'une fondation superficielles

# Section 8 – Règles générales de justification

## ■ Liste des ELU à vérifier :

- ◆ Instabilité générale du site
- ◆ Rupture par poinçonnement du sol support :
  - défaut de capacité portante
  - excès d'excentricité
- ◆ Rupture par glissement
- ◆ Rupture de la structure de la fondation
- ◆ Instabilité de l'ouvrage (flambement) porté vis-à-vis des déplacements et des rotations de la fondation

## ■ Liste des ELS à vérifier :

- ◆ Tassements de la fondation
- ◆ Critère d'excentricité (« surface comprimée »)
- ◆ Limitation de la descente de charge à une fraction de la résistance limite

# Table des matières de la norme - annexes

- 17 annexes (A à Q), dont 3 **annexes normatives**

Annexe A (informative) : Détermination des **catégories conventionnelles** de terrain

Annexe B (**normative**) : **Facteurs partiels** pour les états-limites ultimes

Annexe C : Détermination de la hauteur d'encastrement équivalente  $D_e$

Annexe D (**normative**) : Procédures pour déterminer la **contrainte nette du terrain** sous une fondation superficielle à partir de la pression limite **pressiométrique**

Annexe E (**normative**) : Procédures pour déterminer la **contrainte nette du terrain** sous une fondation superficielle à partir de la **résistance de pointe pénétrométrique**

Annexe F (informative) : Procédures pour déterminer la **contrainte nette du terrain** sous une fondation superficielle à partir des **propriétés de cisaillement du sol**

Annexe G (informative) : Procédure d'estimation de la **réaction du terrain** transmise à une fondation superficielle

# Table des matières de la norme - annexes

Annexe H (informative) : Procédures d'estimation du **tassement** d'une fondation superficielle à partir des **modules pressiométriques Ménard**

Annexe I (informative) : Procédures d'estimation du **tassement** d'une fondation superficielle à partir de la **résistance de pointe pénétrométrique**

Annexe J (informative) : Procédures d'estimation des **déplacements** d'une fondation superficielle à partir des **paramètres de déformation** d'un sol

Annexe K (informative) : Reconnaissances géotechniques et valeurs caractéristiques des propriétés des terrains

Annexe L (informative) : Déformations des structures et mouvements des fondations

Annexe M (informative) : Aide-mémoire pour la surveillance des travaux et le suivi du comportement des ouvrages

Annexe N (informative) : Catégories géotechniques et durée d'utilisation du projet

Annexe O (informative) : Aide pour la prise en compte des actions géotechniques particulières liées à l'eau

Annexe P (informative) : Dispositions particulières pour les **fondations semi-profondes**

Annexe Q (informative) : Procédures de calcul de la **surface effective** d'une fondation superficielle

# Justifications

## ■ Expression générale de la portance de calcul

$$V_d - R_0 \leq R_{v;d} \quad R_{v;d} = \frac{R_{v;k}}{\gamma_{R;v}} = \frac{R_v}{\gamma_{R;v} \gamma_{R;d}}$$

Tableau A.5 — Facteurs partiels de résistance ( $\gamma_R$ ) pour les fondations superficielles

Résistance	Symbole	Ensemble		
		R1	R2	R3
Portance	$\gamma_{R;v}$	1,0	1,4	1,0
Glissement	$\gamma_{R;h}$	1,0	1,1	1,0

## ■ Différentes règles de calcul de la portance :

- Méthodes semi-empiriques :  $p_{IM}$ ,  $q_c$  (Annexes D et E de la norme NF P 94-261)

$$\gamma_{R;d} = 1.2 \Rightarrow \gamma_{R;d} \gamma_{R;v} = 1.68$$

- Méthode analytique :  $C_u$  ou  $c'$  et  $\phi'$  –  $N_c$ ,  $N_q$ ,  $N_\gamma$  (Annexe F de la norme NF P 94-261)

$$\gamma_{R;d} = 1.2 \text{ (cu) ou } \gamma_{R;d} = 2 \text{ (c' et } \phi') \Rightarrow \gamma_{R;d} \gamma_{R;v} = 1.68 \text{ à } 2.4$$

- Méthodes numériques (éléments finis, différences finies, etc.)

$$\gamma_{R;d} > 1 \Rightarrow \gamma_{R;d} \gamma_{R;v} > 1.4$$

# Annexe E : portance par la méthode pressiométrique

$$R_{v,k} = \frac{A' q_{net}}{\gamma_{R;d}}$$

$$q_{net} = k_p p_{le}^* i_\delta i_\beta$$

■  $p_{le}^*$  calculée sur une hauteur  $h_r(e)$  sous la fondation :

■ Exemple pour une semelle filante :

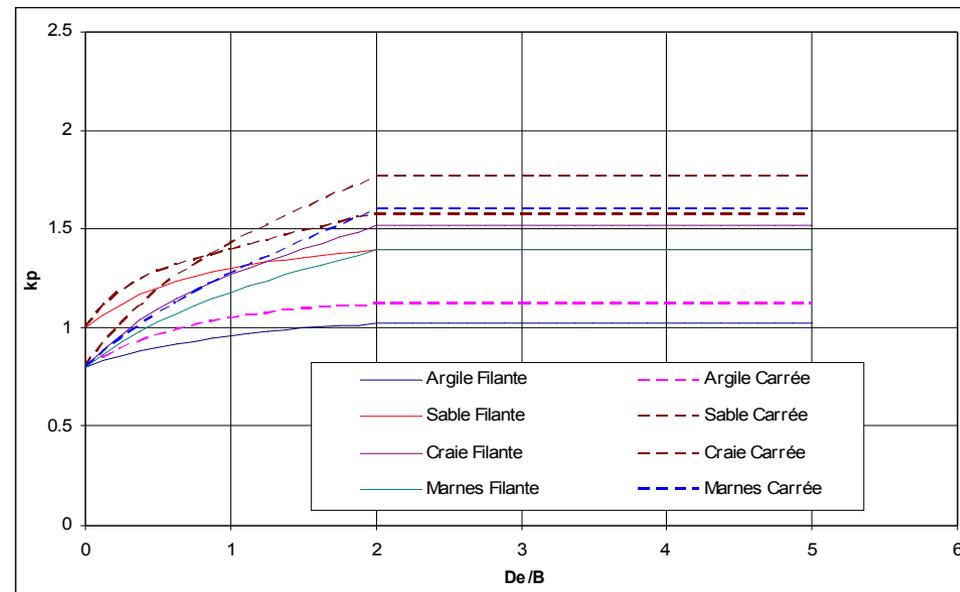
◆  $h_r = 3/2 B$  si  $e > B/4$

◆  $h_r$  varie entre 0 et  $3/2 B$  pour  $e$  compris entre  $B/2$  et  $B/4$

$$p_{le}^* = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n p_{l;k;i}}$$

■ Facteur de portance pressiométrique  $k_p$  fonction :

- ◆ Catégorie conventionnelle de terrain
- ◆ Rapport  $D_e/B$
- ◆ Forme de la semelle



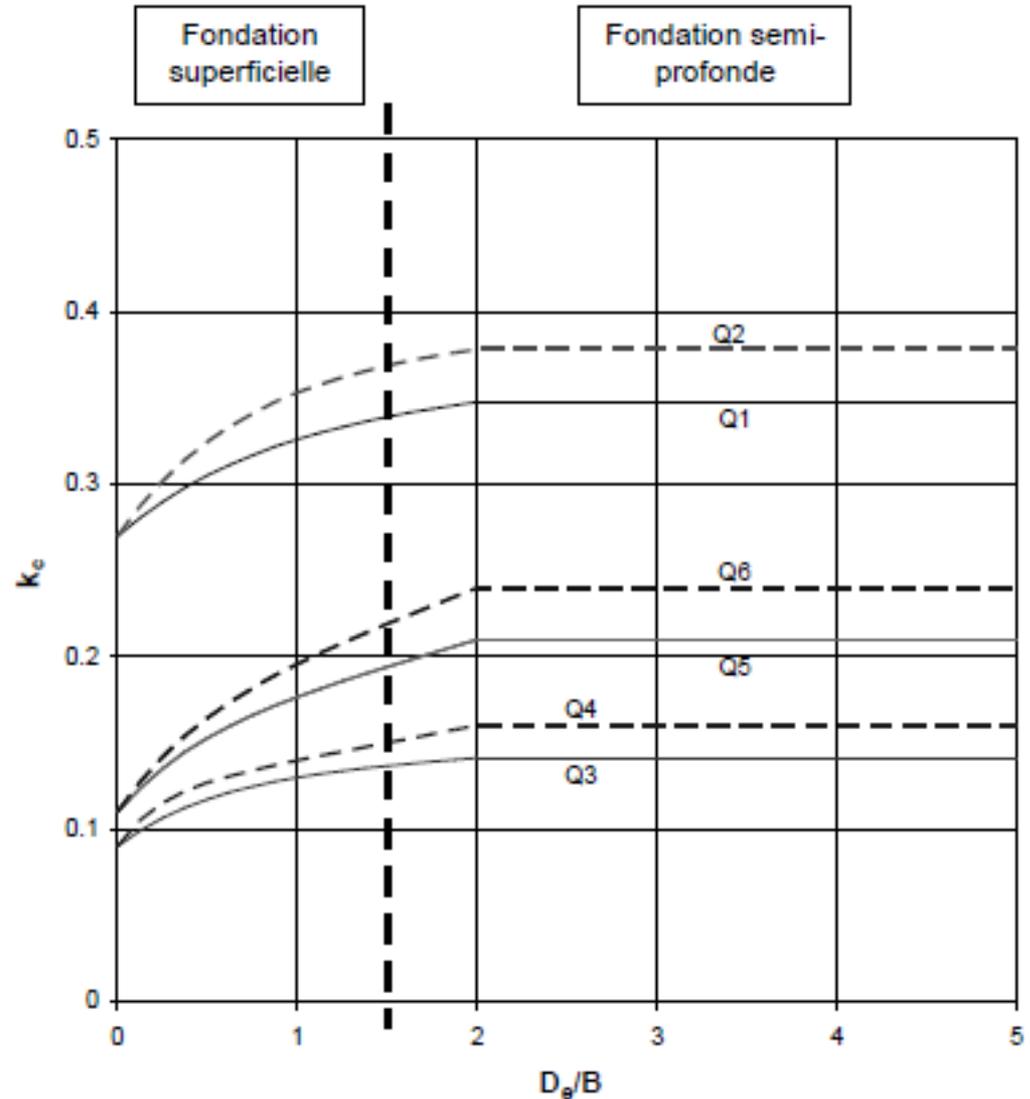
■ Surface **effective** de la semelle  $A'$  détaillée dans l'annexe Q (modèle de Meyerhof)

# Annexe F : portance par la méthode pénétrométrique

$$R_{v,k} = \frac{A' q_{net}}{\gamma_{R;d}}$$

$$q_{net} = k_c q_{ce} i_\delta i_\beta$$

Argiles et limons	Semelle filante - Q1
	Semelle carrée - Q2
Sables et graves	Semelle filante - Q3
	Semelle carrée - Q4
Craies	Semelle filante - Q5
	Semelle carrée - Q6
Marnes et marno-calcaires	Semelle filante - Q5
Roches altérées	Semelle carrée - Q6



# Réduction liée à l'inclinaison

- Les sols frottants et les sols cohérents sont entièrement traités :

- ◆ Sol fins ou cohérents

$$i_{\delta;c;D_e/B} = \left(1 - \frac{2\delta_d}{\pi}\right)^2$$

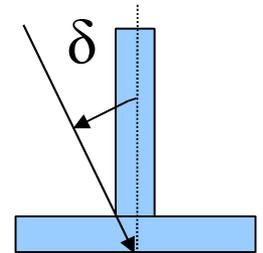
- ◆ Sols grenus ou frottants

$$i_{\delta;f;D_e/B} = \left(1 - \frac{2\delta_d}{\pi}\right)^2 - \frac{2\delta_d}{\pi} \left(2 - 3\frac{2\delta_d}{\pi}\right) e^{-D_e/B} \text{ pour } \delta_d < \pi/4$$

$$i_{\delta;f;D_e/B} = \left(1 - \frac{2\delta_d}{\pi}\right)^2 - \left(1 - \frac{2\delta_d}{\pi}\right)^2 e^{-D_e/B} \text{ pour } \delta_d \geq \pi/4$$

- ◆ Sols cohérents et frottants

$$i_{\delta;cf;D_e/B} = i_{\delta;f;D_e/B} + \left(i_{\delta;c;D_e/B} - i_{\delta;f;D_e/B}\right) \left(1 - e^{-\frac{\alpha c}{\gamma B \tan(\varphi)}}\right)$$



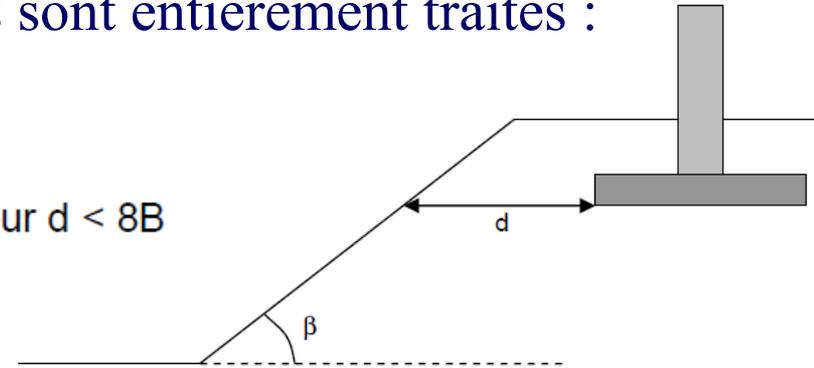
# Réduction liée à la proximité d'une pente

- Les sols frottants et les sols cohérents sont entièrement traités :

- Sol fins ou cohérents

$$i_{\beta;c;D_e/B} = 1 - \frac{\beta}{\pi} \left( 1 - \frac{d}{8B} \right)^2 \quad \text{pour } d < 8B$$

- Sols grenus ou frottants



$$i_{\beta;f;D_e/B} = 1 - 0,9(\tan \beta)(2 - \tan \beta) \left( 1 - \frac{d + D_e/\tan \beta}{8B} \right)^2 \quad \text{pour } d + \frac{D_e}{\tan \beta} < 8B$$

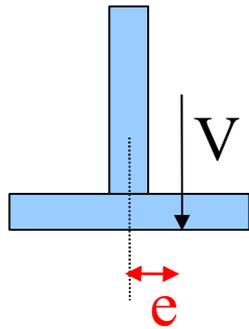
- Sols cohérents et frottants

$$i_{\beta;cf;D_e/B} = i_{\beta;f;D_e/B} + \left( i_{\beta;c;D_e/B} - i_{\beta;f;D_e/B} \right) \left( 1 - e^{-\frac{\alpha c}{\gamma B \tan(\varphi)}} \right)$$

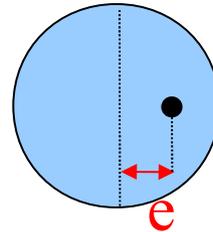
# ELU GEO

- ◆ Limitation de l'excentrement :

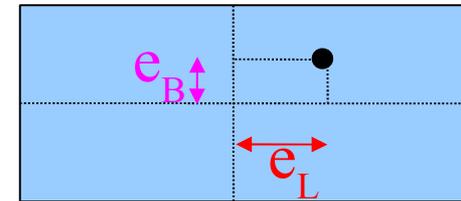
=> les vérifications concernent **directement la valeur de  $e$** , en fonction de la forme de la fondation



$$1 - \frac{2e}{B} \geq \frac{1}{15}$$



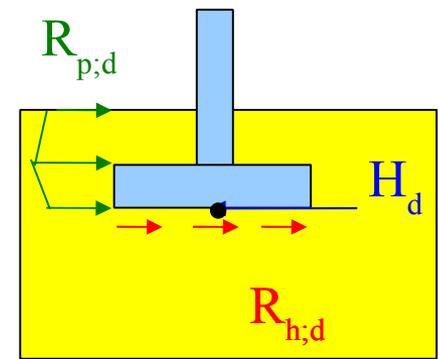
$$1 - \frac{2e}{B} \geq \frac{3}{40}$$



$$\left(1 - \frac{2e_B}{B}\right) \left(1 - \frac{2e_L}{L}\right) \geq \frac{1}{15}$$

- ◆ Précautions spéciales pour  $e > B/3$  (semelle filante) ou  $3R/5$  (semelle circulaire)

# ELU GEO



## ■ ELU de glissement

$$H_d \leq R_{h;d} + R_{p;d}$$

- ◆ Évaluation de la résistance par frottement sous la base  $R_{h;d}$

$$R_{h;d} = \frac{V_d \tan \delta_{a;k}}{\gamma_{R;h} \gamma_{R;d}}$$

$$R_{h;d} = \min \left\{ \frac{1}{\gamma_{R;h} \gamma_{R;d}} (A' c_{u;k}); 0,4 V_d \right\}$$

Tableau A.5 — Facteurs partiels de résistance ( $\gamma_R$ ) pour les fondations superficielles

Résistance	Symbole	Ensemble		
		R1	R2	R3
Portance	$\gamma_{R;v}$	1,0	1,4	1,0
Glissement	$\gamma_{R;h}$	1,0	1,1	1,0

=> La présente norme fixe  $\gamma_{R;d}$  égal à 1,1 soit  $\gamma_{R;d} \gamma_{R;v} = 1,21$

- ◆ Prise en compte de la butée possible (sous réserve de la **compatibilité des déplacements** nécessaires avec le structure portée)

$$R_{p;d} = \frac{R_{p;k}}{\gamma_{R;p}}$$

=> L'EC7 fixe  $\gamma_{R;p}$  égal à 1,4

# ELS

- ELS : tassement et limitation de la charge et de l'excentrement
  - ◆ Évaluation des tassements : 3 méthodes
    - **Deux méthodes « directes »**
      - Annexe H – Méthode « Ménard » (pressiomètre)
      - Annexe I – Méthode « Schmertmann » (pénétromètre)
    - **Une troisième méthode**, reposant sur la modélisation du sol comme un milieu continu
      - Deux cas envisagés : cas général, cas oedométrique (les déformations latérales sont nulles)
      - Cas général : corrélations  $E-E_M$ ,  $E-q_c$ , Boussinesq, raideur, MEF, etc.
    - Cas oedométrique : intégration des déformations, méthode oedométrique ( $C_s-C_c-C_\alpha$ )

# ELS

- **Troisième méthode** : dérivation de valeurs indicative du module d'Young pour les calculs de tassements à **l'ELS quasi-permanent** à partir du module pressiométrique Ménard

		$E/E_M$
Argiles	Normalement consolidées	4,5
	Surconsolidées	3
Limons	Normalement consolidés	4,5
	Surconsolidés	3
Sables	Lâches	4,5
	Denses	3
Graves	Lâches	6
	Serrées	4,5

# ELS

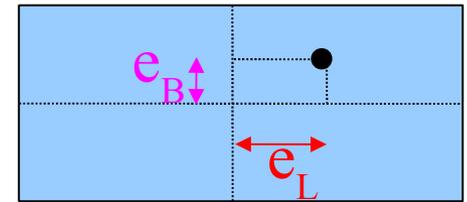
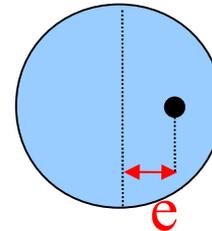
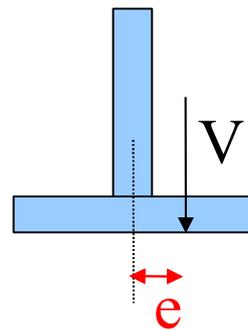
- Limitation de la charge

$$V_d - R_0 \leq R_{v;d}$$

$$R_{v;k} = \frac{A' q_{net}}{\gamma_{R;d}}$$

$\gamma_{R,v}$  égal à 2,3

- Limitation de l'excentrement : idem ELU, **directement sur la valeur de  $e$** , en fonction de la forme de la fondation



ELS QP

$$1 - \frac{2e}{B} \geq \frac{2}{3}$$

$$1 - \frac{2e}{B} \geq \frac{3}{4}$$

$$\left(1 - \frac{2e_B}{B}\right) \left(1 - \frac{2e_L}{L}\right) \geq \frac{2}{3}$$

ELS

caractéristiques

$$1 - \frac{2e}{B} \geq \frac{1}{2}$$

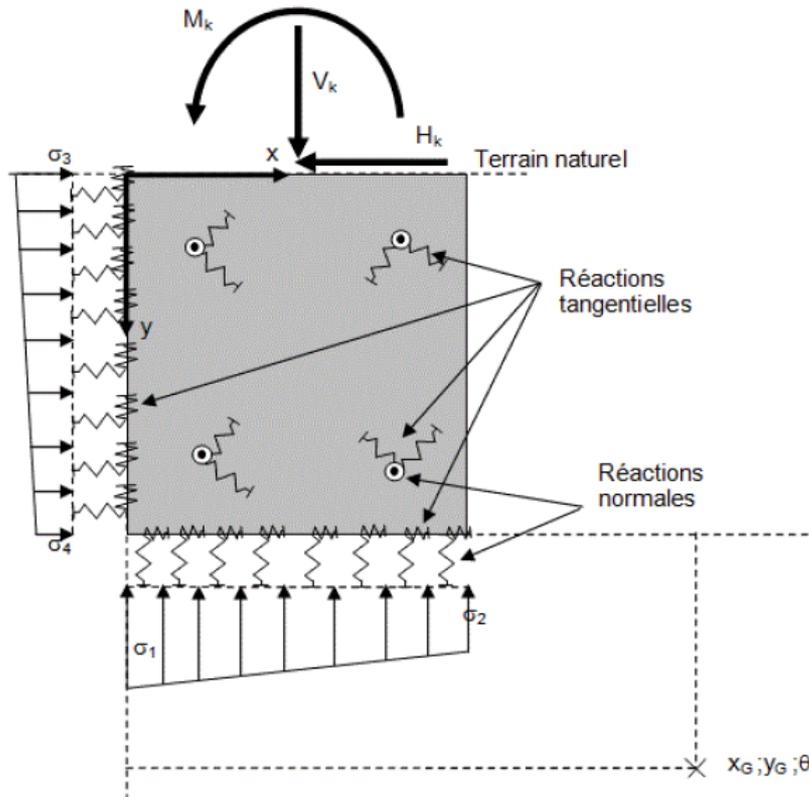
$$1 - \frac{2e}{B} \geq \frac{9}{16}$$

$$\left(1 - \frac{2e_B}{B}\right) \left(1 - \frac{2e_L}{L}\right) \geq \frac{1}{2}$$

# Synthèse des facteurs partiels

	Fondations superficielles		Murs de soutènement		F62TV		MUR SETRA	
	Portance	Glissement	Portance	Glissement	Portance	Glissement	Portance	Glissement
ELU	$\gamma_{R,v}=1.4$	$\gamma_{R,h}=1.1$	$\gamma_{R,v}=1.4$	$\gamma_{R,h}=1.1$	<b>2</b>	<b>1.2 à 1.5</b>	<b>1.5 à 2</b> suivant $i_\delta$	<b>1.0</b> suivant $i_\delta$
	$\gamma_{R,d}=1.2$	$\gamma_{R,d}=1.1$	$\gamma_{R,d}=1.0$	$\gamma_{R,d}=0.9$				
	<b>1.68</b>	<b>1.2</b>	<b>1.4</b>	<b>1.0</b>				
ELS	$\gamma_{R,v}=2.3$	—	$\gamma_{R,v}=2.3$	—	<b>3</b>	—	<b>2 à 3</b> suivant $i_\delta$	—
	$\gamma_{R,d}=1.2$		$\gamma_{R,d}=1.0$					
	<b>2.8</b>		<b>2.3</b>					

# Fondations semi-profondes



Valeurs des coefficients partiels $\gamma_{R;d}$			
Lois d'interaction locale			
ELU	Normale à la base de la fondation	Normale aux faces du fût	Tangentielles à l'ensemble des faces de la fondation
Phase durable et transitoire	2,0	1,4	1,1
Phase accidentelle	1,4	1,1	1,0