



cfms

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

« Regards croisés sur la pratique de la géotechnique à l'international
- 1^{ère} édition »

**Rapport d'étonnement sur la conception des
fondations d'ouvrage d'art en Angleterre**



Julien Habert

11 OCTOBRE 2022

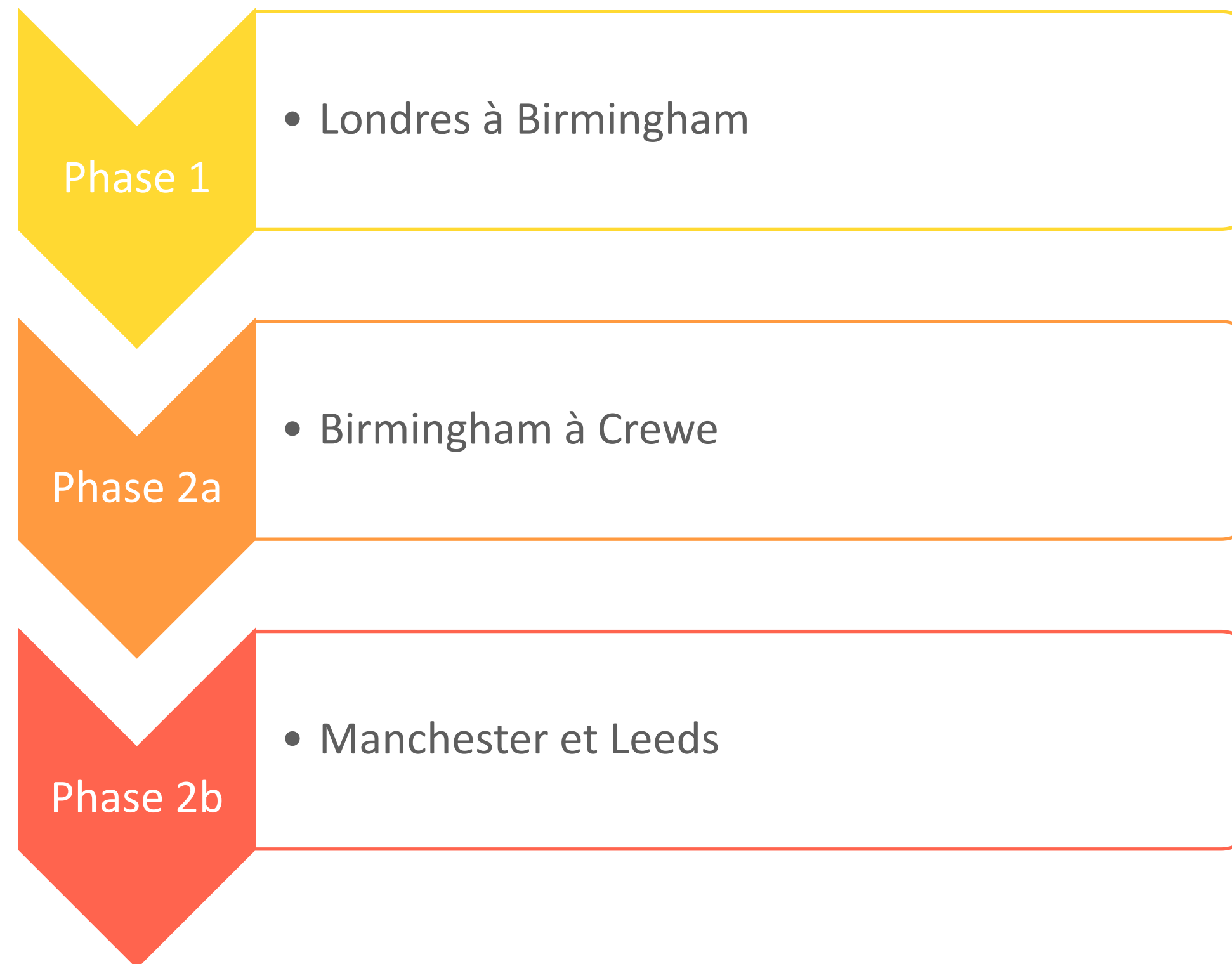
0. Sommaire

1. Présentation du projet : fondations des ouvrages sur une section de ligne à grande vitesse HS2 (High-Speed 2) en Angleterre

2. Méthodologie de conception

- 2.1 Organisation des justifications
- 2.2 Fondations superficielles
- 2.3 Fondations profondes

1. Présentation du projet HS2



540 km au total
(Phase 1 + Phase 2)

18 trains par heure

Vitesse considérée :
360 km/h

Londres à
Birmingham en 50
minutes

Mise en service
phase 1 : 2029-2033

1. Présentation du projet HS2

Area	Lot Number	Name	Length (m)	Awarded to
Area South	S1	Euston Tunnels and Approaches	9,505	SCS JV
	S2	Northolt Tunnels	16,295	SCS JV
	C1	Chiltern Tunnels and Colne Valley Viaduct	18,935	Align JV
Area Central	C2	Northern Portal Chiltern Tunnels to Brackley	47,590	EK JV
	C3	Brackley to South Portal of Long Itchington Wood Green Tunnel	31,200	EK JV
Area North	N1	Long Itchington Wood Green Tunnel to Delta Junction and Birmingham Spur	39,355	BBV JV
	N2	Delta Junction to WCML Tie-In	49,733	BBV JV

EK : groupement constructeur : Eiffage + Kier + Ferrovial construction and Bam Nuttall



ASC : groupement concepteur : Arcadis UK + Setec + COWI

Terrasol :

- Detailed design pour les fondations des ouvrages d'art sur 20 km

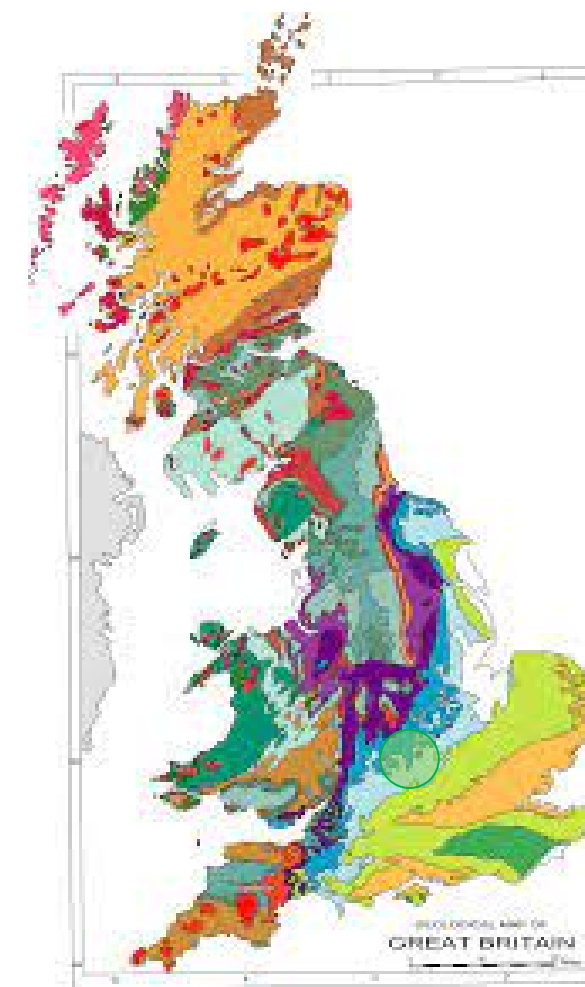
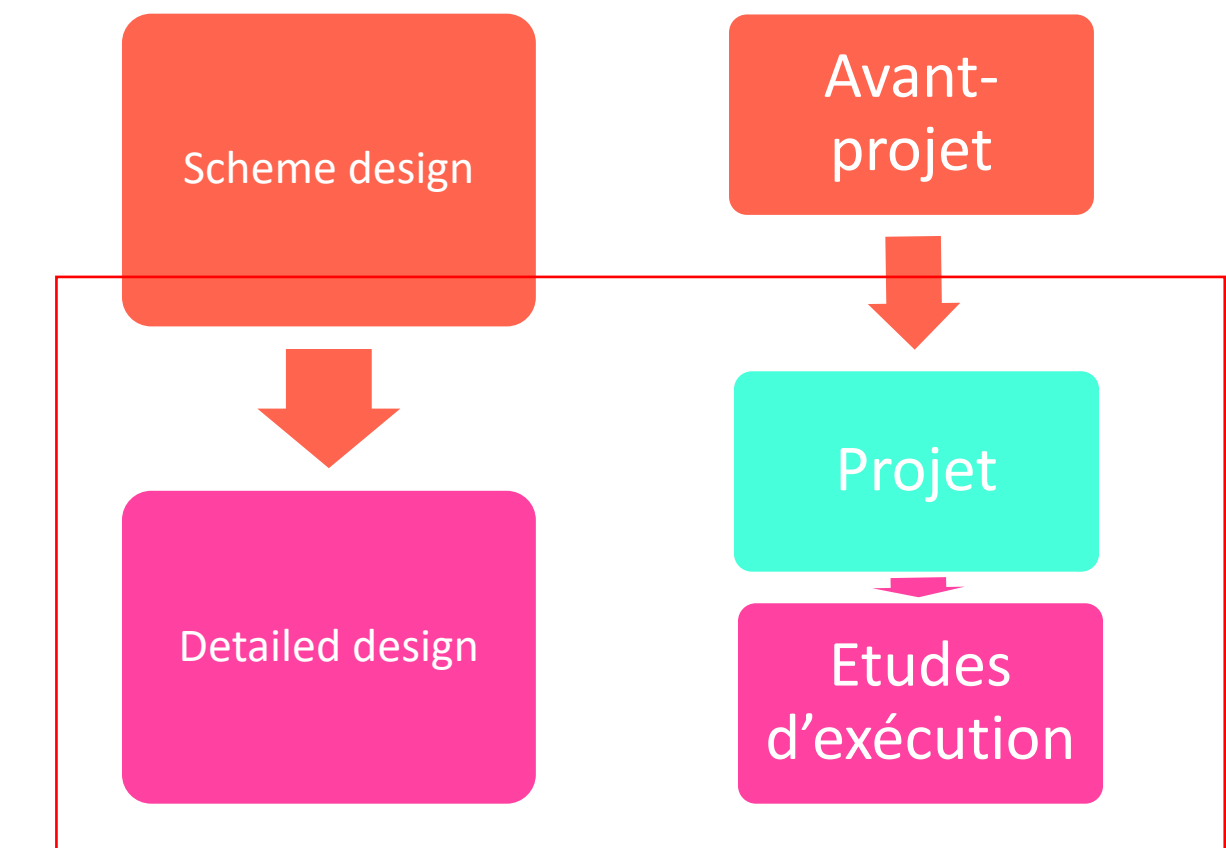
- 4 viaducs

- 21 passages supérieurs

- Ouvrages en terre



Source: Department for Transport



Contexte géologique et géotechnique section Terrasol : formations secondaires argileuses et marneuses
Très faible sismicité

2. Méthodologie de conception

2.1 Organisation des justifications



2.2 Fondations superficielles



2.3 Fondations profondes

2.1 Organisation des justifications

Contexte normatif et documents de référence

Eurocodes

Eurocode 7

BS 1997-1:2004+A1:2013_NA+A1:2014 :
annexe nationale britannique à
l'Eurocode 7

Code of practice for
foundations : BS8004:2015

(« équivalent » des normes d'application
de l'EC7, NF P94-261 et -262)

Autres documents « normatifs » : PD
6694 pour les soutènements

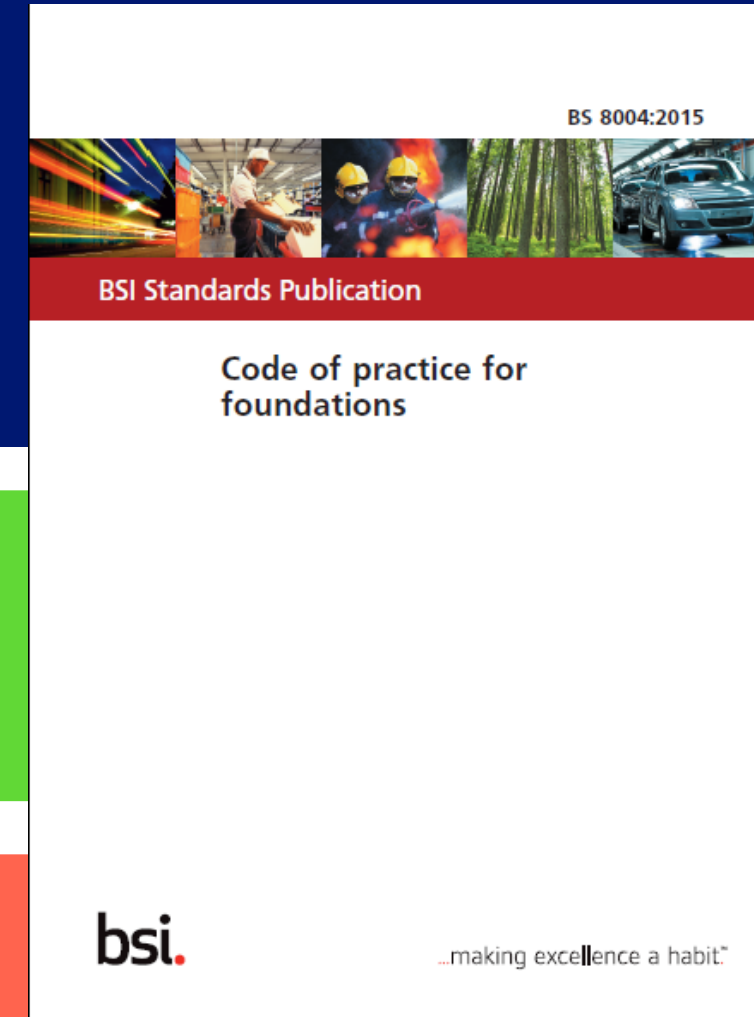
De nombreux documents de référence complémentaires

Documents CIRIA

Documents américains édités par la
FHWA

Ouvrages de référence

2.1 Organisation des justifications



Remarques sur BS8004:2015 (114 p)

Document non-autoporteur

Beaucoup de références
externes (même pour la
portance)
: 109 références externes

Coefficients de sécurité non
donnés (cf. BS 1997-1\NA)

Méthodes de calcul de la portance des fondations fournies "en partie"

(CIRIA, FHWA, etc.)

Fondations superficielles

Fondations profondes

Portance

Glissement

Renversement

Portance

Peu de choses concernant le
comportement des pieux
sous charge latérale

2.1 Organisation des justifications

BS 1997-1:2004+A1:2013_NA+A1:2014 : annexe nationale britannique à l'Eurocode 7

Gestion de la sécurité à l'ELU : approche de calcul 1 (DA – Design Approach)

Deux calculs (C1 et C2) systématiquement

DA1 C1

DA1 C2

A1+M1+R1

A2+M2+R1

Actions pondérées

A2 actions « non pondérées »

Facteurs partiels

ELU

ELS

ELU EC7 – Rappel des 3 approches de calcul

Approche de calcul 1 (DA1)

Approche de calcul 2 (DA2)

Approche de calcul 3 (DA3)

A1 + M1 + R1

A2 + M2 + R1

A1 + M1 + R2

A1* ou A2** + M2 + R3

Actions			
Nature	γ_F	A1	A2
Permanente	Défavorable	1,35	1,00
	Favorable	1,00	1,00
Variable	Défavorable	1,50	1,30
	Favorable	0,00	0,00

* actions structurales
** actions géotechniques

Propriétés des terrains			
Propriété concernée	γ_M	M1	M2
Angle de frottement interne ϕ'	$\gamma_{\phi'}$	1,00	1,25
Cohésion effective c'	$\gamma_{c'}$	1,00	1,25
Cohésion non drainée c_u	γ_{c_u}	1,00	1,40

Résistances				
Ouvrage concerné	γ_R	R1	R2	R3
Cas général	γ_R	1,00	Dépend du mécanisme, défini au cas par cas	1,00
Exemple de la portance des fondations superficielles	γ_{Rv}	1,00	1,40	1,00

2.2 Fondations superficielles

Fondations superficielles

Portance

Méthodes basées sur les paramètres de résistance au cisaillement

Vérifications systématiques à long et court terme

Modification du facteur de pesanteur ou de surface N_γ

Pas de facteur de modèle

Glissement

Méthodes basées sur les paramètres de résistance au cisaillement

Facteur de modèle additionnel recommandé pour correspondre aux niveaux de sécurité des anciens règlements

Renversement

Vérifications en termes de moment au coin aval des semelles

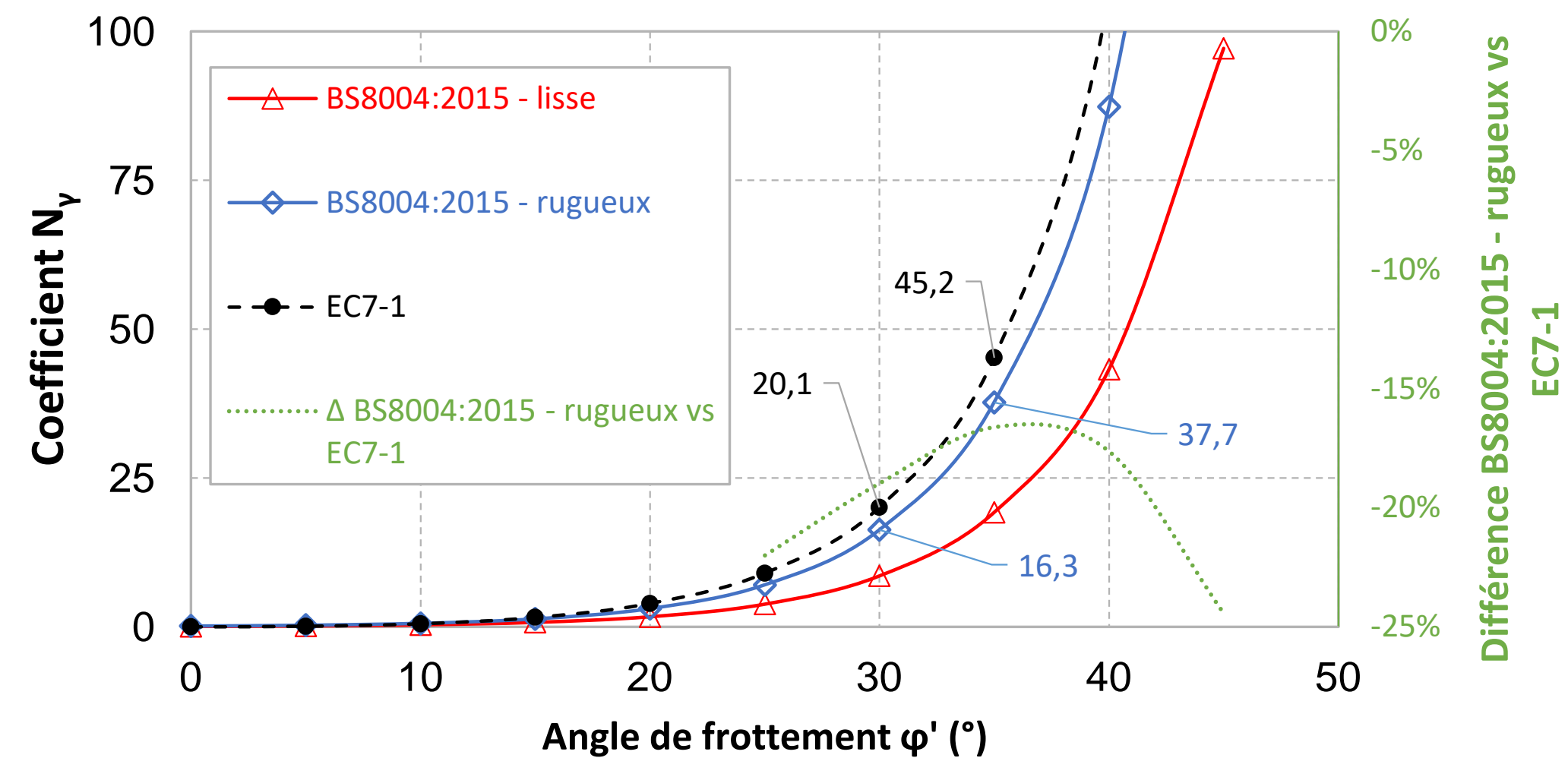
Pas de critère sur l'excentrement

$$R'_v/A' = c' N_c b_c s_c i_c d_c g_c r_c + q' N_q b_q s_q i_q d_q g_q r_q + 0.5 \gamma' B' N_\gamma b_\gamma s_\gamma i_\gamma d_\gamma g_\gamma r_\gamma$$

a is 0.0663 for a smooth foundation or 0.1054 for a rough foundation;

b is 9.3 or 9.6 for a smooth or rough foundation, respectively (when φ is entered in radians); alternatively, $b = 0.162$ or 0.168 , respectively (when φ is entered in degrees);

$$N_\gamma = \begin{cases} a \times e^{b \times \varphi} & \text{for } \varphi > 0^\circ \\ 0 & \text{for } \varphi = 0^\circ \end{cases}$$



2.2 Fondations superficielles : obtention des paramètres mécaniques

Paramètres mécaniques : résistance au cisaillement

Essais triaxiaux

Estimations basées sur géométrie

Corrélations avec essais in situ

Angularité

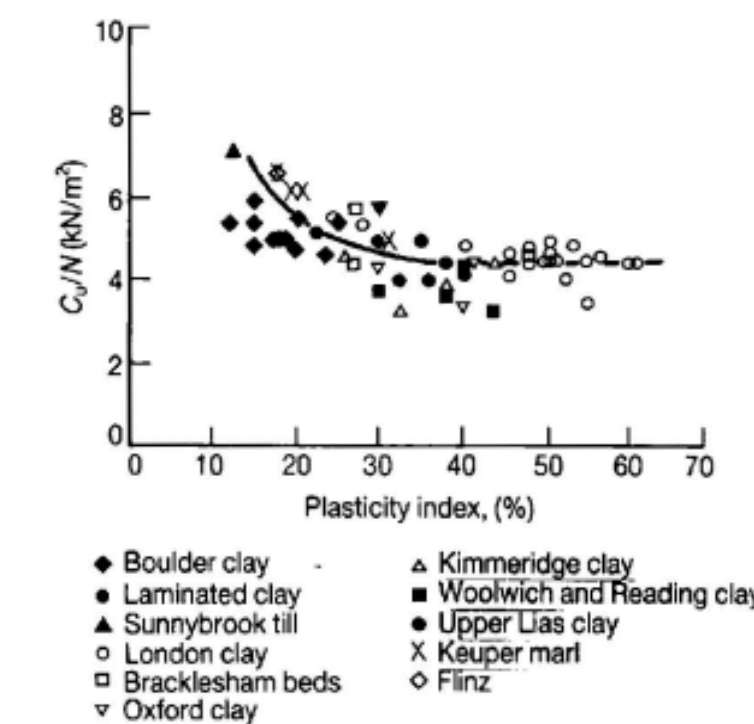
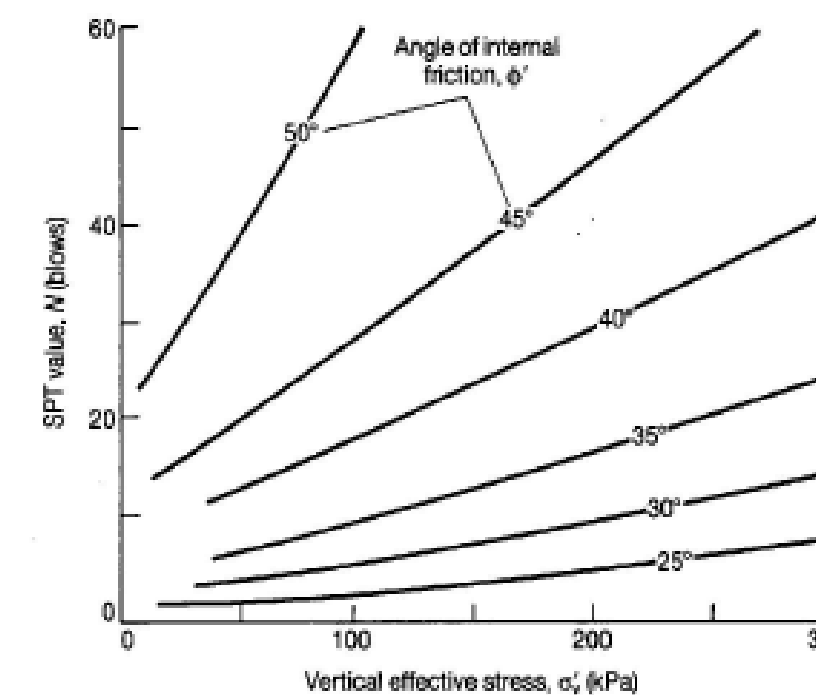
Granulométrie
(coefficient d'uniformité)

SPT

Pénétromètre statique

$$\varphi'_{cv,k} = 30^\circ + \varphi'_{ang} + \varphi'_{PSD}$$

Soil property	Determined from	Classification	Parameter ^{D)}
Angularity of particles ^{A)}	Visual description of soil	Rounded to well-rounded	$\varphi'_{ang} = 0^\circ$
		Sub-angular to sub-rounded	$\varphi'_{ang} = 2^\circ$
		Very angular to angular	$\varphi'_{ang} = 4^\circ$
Uniformity coefficient, C_u ^{B)}	Soil grading	$C_u < 2$ (evenly graded)	$\varphi'_{PSD} = 0^\circ$
		$2 \leq C_u < 6$ (evenly graded)	$\varphi'_{PSD} = 2^\circ$
		$C_u \geq 6$ (medium to multi graded)	$\varphi'_{PSD} = 4^\circ$
		High C_u (gap graded), with C_u of fines < 2 ^{E)}	$\varphi'_{PSD} = 0^\circ$
		High C_u (gap graded), with $2 \leq C_u$ of fines < 6 ^{E)}	$\varphi'_{PSD} = 2^\circ$
Density index, I_D ^{C)}	Standard penetration test blow count, corrected for energy rating and overburden pressure $(N_1)_{60}$	$I_D = 0\%$	$\varphi'_{dil} = 0^\circ$
		$I_D = 25\%$	$\varphi'_{dil} = 0^\circ$
		$I_D = 50\%$	$\varphi'_{dil} = 3^\circ$
		$I_D = 75\%$	$\varphi'_{dil} = 6^\circ$
		$I_D = 100\%$	$\varphi'_{dil} = 9^\circ$



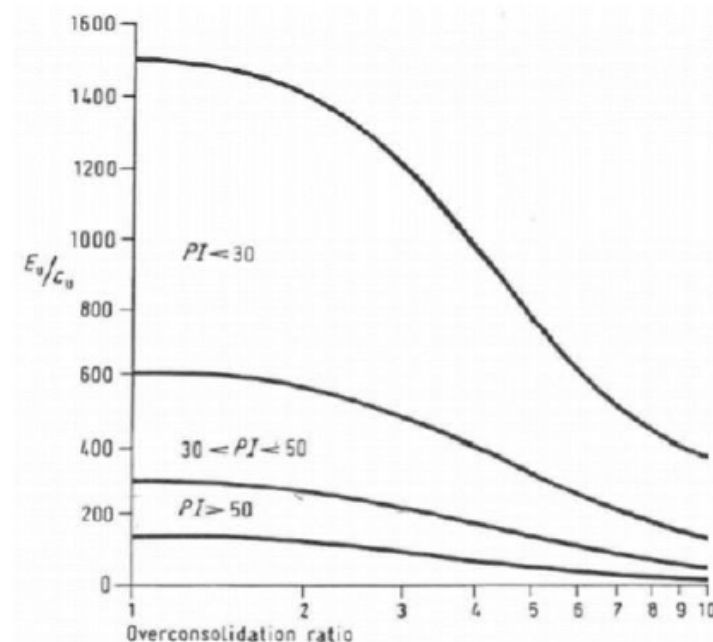
2.2 Fondations superficielles

Estimation des déplacements

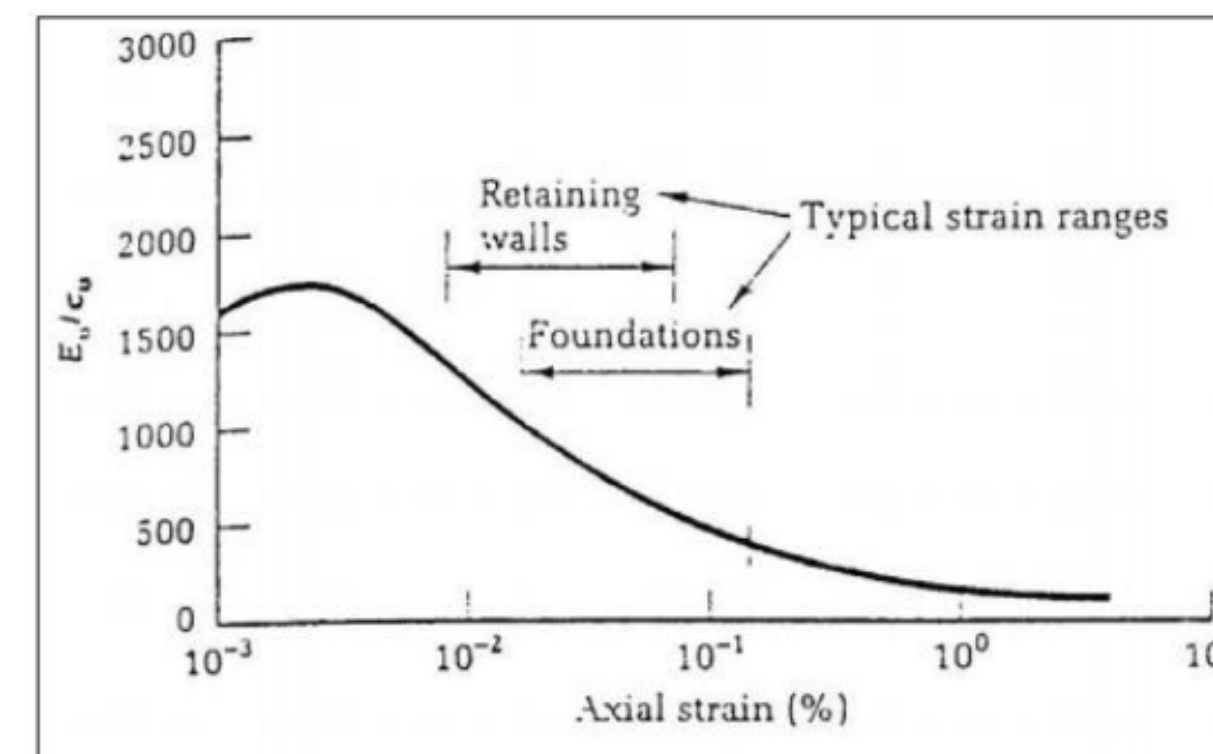
Méthodes « analytiques » basées sur la théorie de l'élasticité

Méthode semi-empirique pour les sables détaillée dans l'EC-7

Méthodes numériques



Correlation of Undrained Young's Modulus Using OCR and Plasticity Index (after Jamiolkowski et. al.)



Correlation of Undrained Young's Modulus and Axial Strain (after Jardine et. al., 1985)

2.3 Fondations profondes

Estimation de la portance

Pile type	Soil type	Typical coefficient, k_s (A), (B)
Large displacement Precast concrete (solid) Closed-ended tubular steel Timber Driven cast-in-place concrete	(all)	1.0-1.2
Small displacement H-section steel bearing piles Open-ended tubular steel Helical steel	(all)	80% of large displacement value
Replacement ^Q	Continuous flight auger (CFA)	Clean medium-coarse sand 0.9 Fine sand 0.7-0.8 Silty sand 0.6-0.7 Interlayered silt and sand 0.5-0.6
	Bored cast-in-place concrete Micro piles ^{D)}	0.7

Pile type	Coefficient k_s
Large displacement Precast concrete (solid) Closed-ended tubular steel Driven cast-in-place concrete Timber	0.67 0.9 0.85
Small displacement Steel bearing piles of H-section Open-ended tubular steel Helical steel piles	0.67
Replacement Continuous flight auger (CFA) Bored cast-in-place concrete Micro piles	0.67 ^{A)} or 1.0 ^{B)} 1.0

				$\delta = \min \begin{cases} k_\delta \times \varphi'_{pk} \\ \varphi'_{cv} \end{cases}$	$q'_{b} = N_q \times \sigma'_{v,b}$
				$\beta = \begin{cases} (1 - \sin\phi)\tan\phi \\ 1.5(1 - \sin\phi)\tan\phi \sqrt{R_{oc}} \end{cases}$	$N_c = 9 \times k_1 \times k_2$
					$k_1 = \frac{2}{3} \left(1 + \frac{L}{6B} \right)$
					$k_2 = f(\text{pile type}, C_u)$
				$q_b = c_b q_{c,b} \quad c_{b,0,1} = f(\text{pile type, soil type})$	
				$q_s = n_b p_{ref} N_{SPT} \quad n_{b,0,1} = f(\text{pile type, soil type})$	
				$q_s = k_1 p_{ref} \left(\frac{q_u}{p_{ref}} \right)^{k_2}$	$q_b = k_3 p_{ref} \left(\frac{q_u}{p_{ref}} \right)^{k_4}$

Pile type	Undrained shear strength of soil, c_u (kPa)	k_2	$9 \times k_2$
Bored, CFA ^{A)}	≤ 25	0.72	6.5
	50	0.89	8
	≥ 100	1.0	9
Driven ^{B)}		1.11	10

$$0.4 \leq \alpha_{repl} = k_1 \left(1 - k_2 \log_e \frac{c_u}{p_{ref}} \right) \leq 1.0$$

$$\alpha_{disp} = 0.5 (c_u / \sigma'_v)^{-m}$$

2.3 Fondations profondes

Toujours deux calculs

DA1 C1

DA1 C2

A1+M1+R1

A2+M2+R4 (au lieu de R1)

DA1 C2 (R4) toujours dimensionnante

Deux jeux de coefficients R4

Explication explicite de l'ELS pré suppose:

Essais de chargement statiques

Estimation explicite des tassements

Facteur de modèle

1,4

1,2 si essais de chargement statiques

=> Niveau de sécurité global : 2,8 à l'ELU
(contre 1,9 - 1,35 x 1,1x1,1x1,15 - PMT NF P94-262)

			R1		R4		
			EC7-1:2004	BS8004:2015	EC7-1:2004	BS8004:2015	
						explicit SLS verification	
				Without	With		
Displacement pile	Base	γ_h	1,00	1,0	1,3	1,7	1,5
	Shaft	γ_s	1,00	1,0	1,3	1,5	1,3
	Total in compression	γ_t	1,00	1,0	1,3	1,7	1,5
	Total in traction	γ_{st}	1,25	1,0	1,6	2,0	1,7
Bored piles (except CFA)	Base	γ_h	1,25	1,0	1,6	2,0	1,7
	Shaft	γ_s	1,00	1,0	1,3	1,6	1,4
	Total in compression	γ_t	1,15	1,0	1,5	2,0	1,7
	Total in traction	γ_{st}	1,25	1,0	1,6	2,0	1,7
CFA	Base	γ_h	1,10	1,0	1,5	2,0	1,7
	Shaft	γ_s	1,00	1,0	1,3	1,6	1,4
	Total in compression	γ_t	1,10	1,0	1,4	2,0	1,7
	Total in traction	γ_{st}	1,25	1,0	1,6	2,0	1,7

2.3 Fondations profondes : comportement transversal

Sujet non traité par la norme BS:8004:2015

Diverses approches dans HS2, plus liées aux logiciels retenus

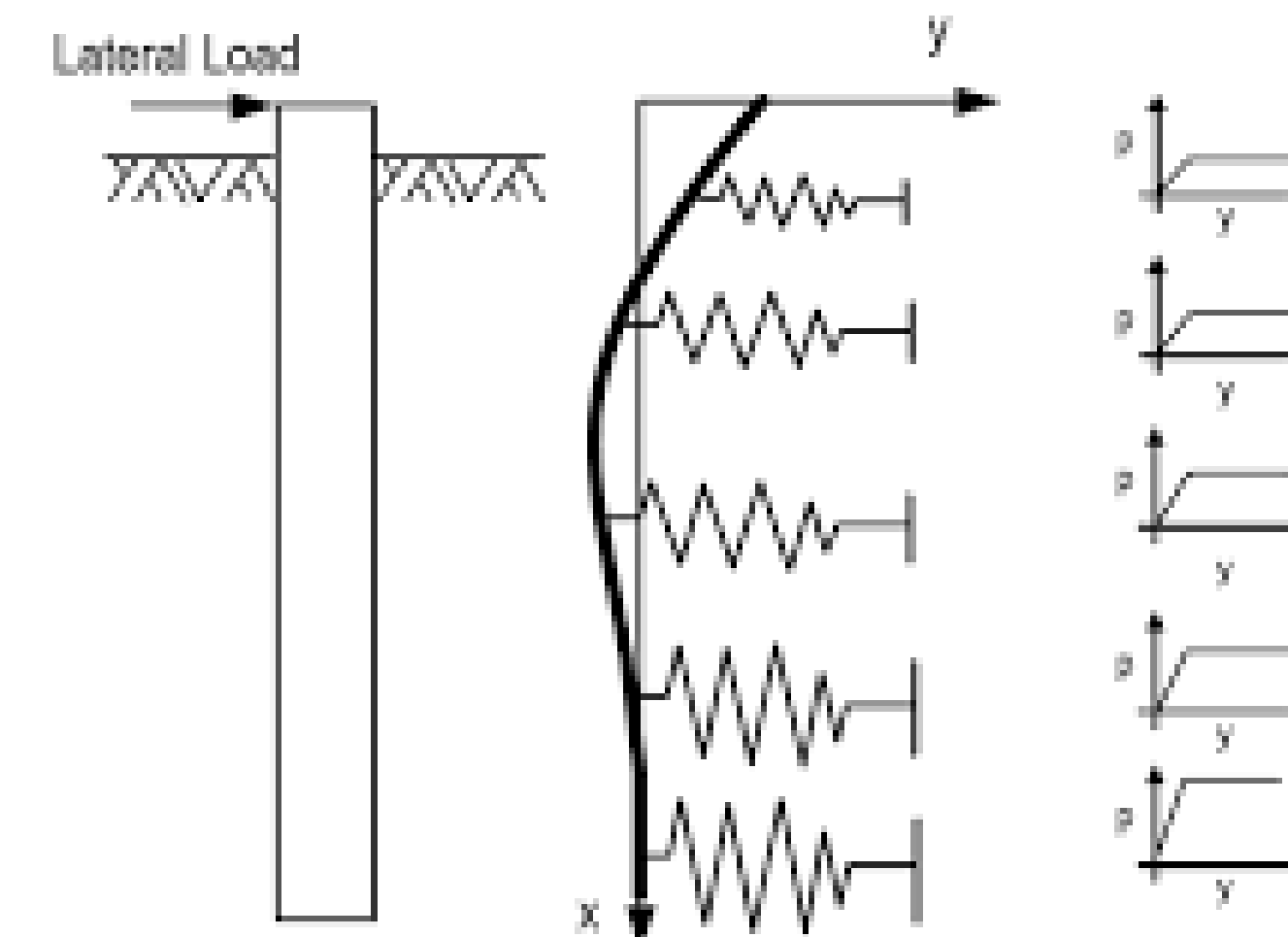
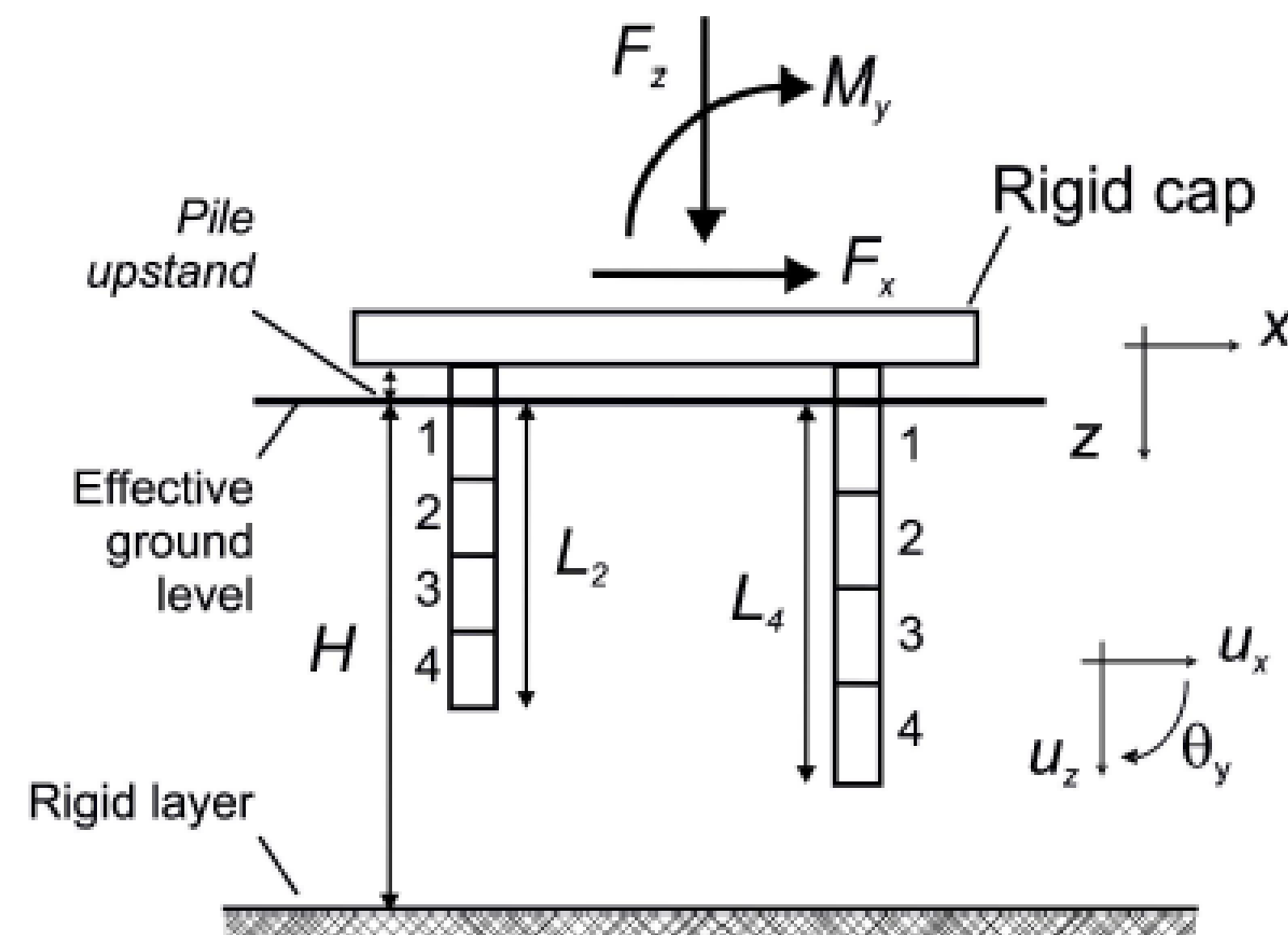
Approches milieux continus

Fonctions de transfert (p-y):

Calcul avec facteurs d'interaction aux éléments de frontière (Boundary element analysis - BEM)

Elements finis (FEM)

Méthodes hybrides pour groupe de pieux



2.3 Fondations profondes : comportement transversal

Méthodes aux fonction de transfert

De nombreuses méthodes disponibles

Effets de la durée de la charge non couverts explicitement

Exemple des argiles

Argiles molles

Argiles raides

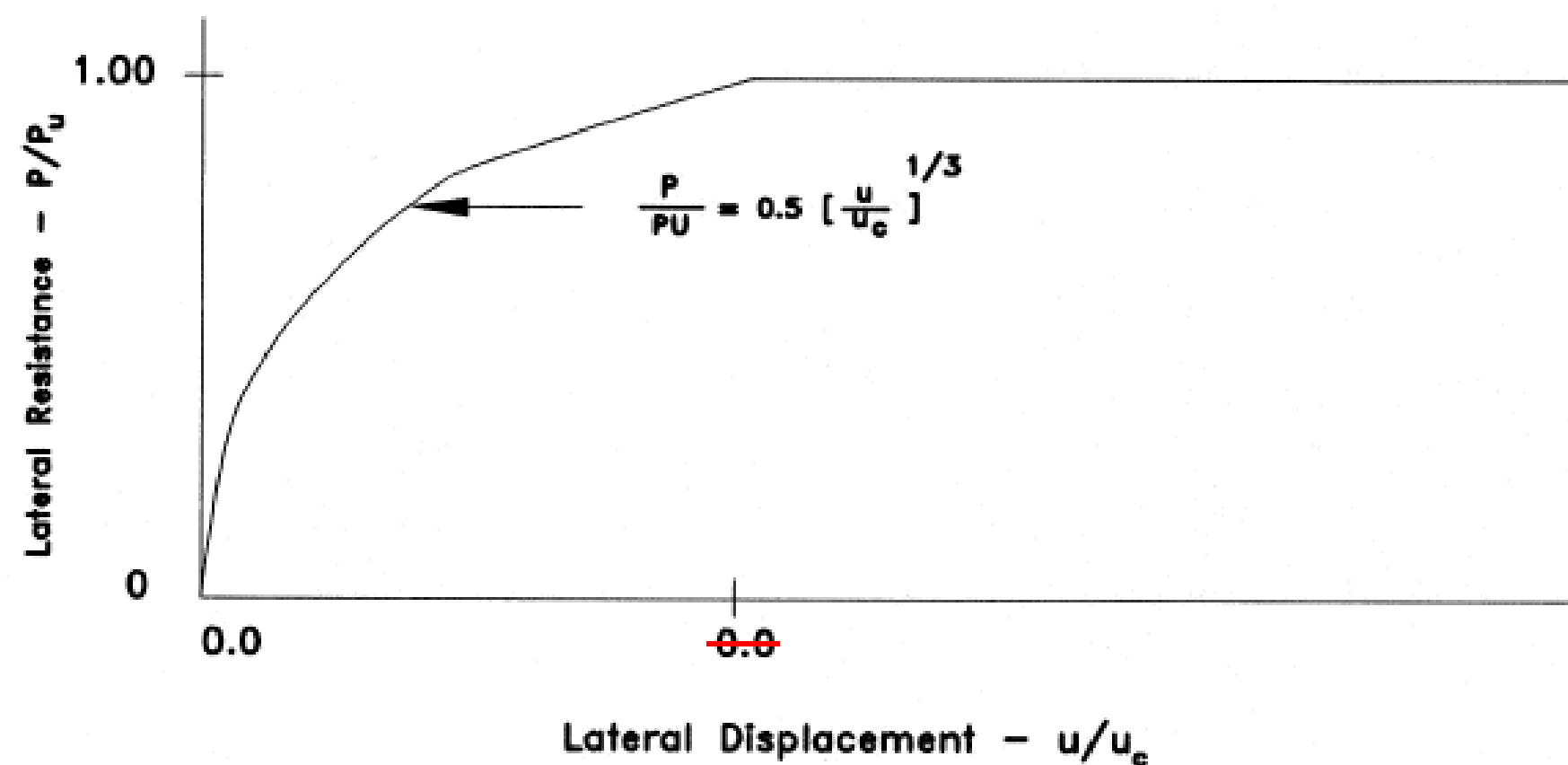
Matlock (1970)

Reese and Sullivan (1980)

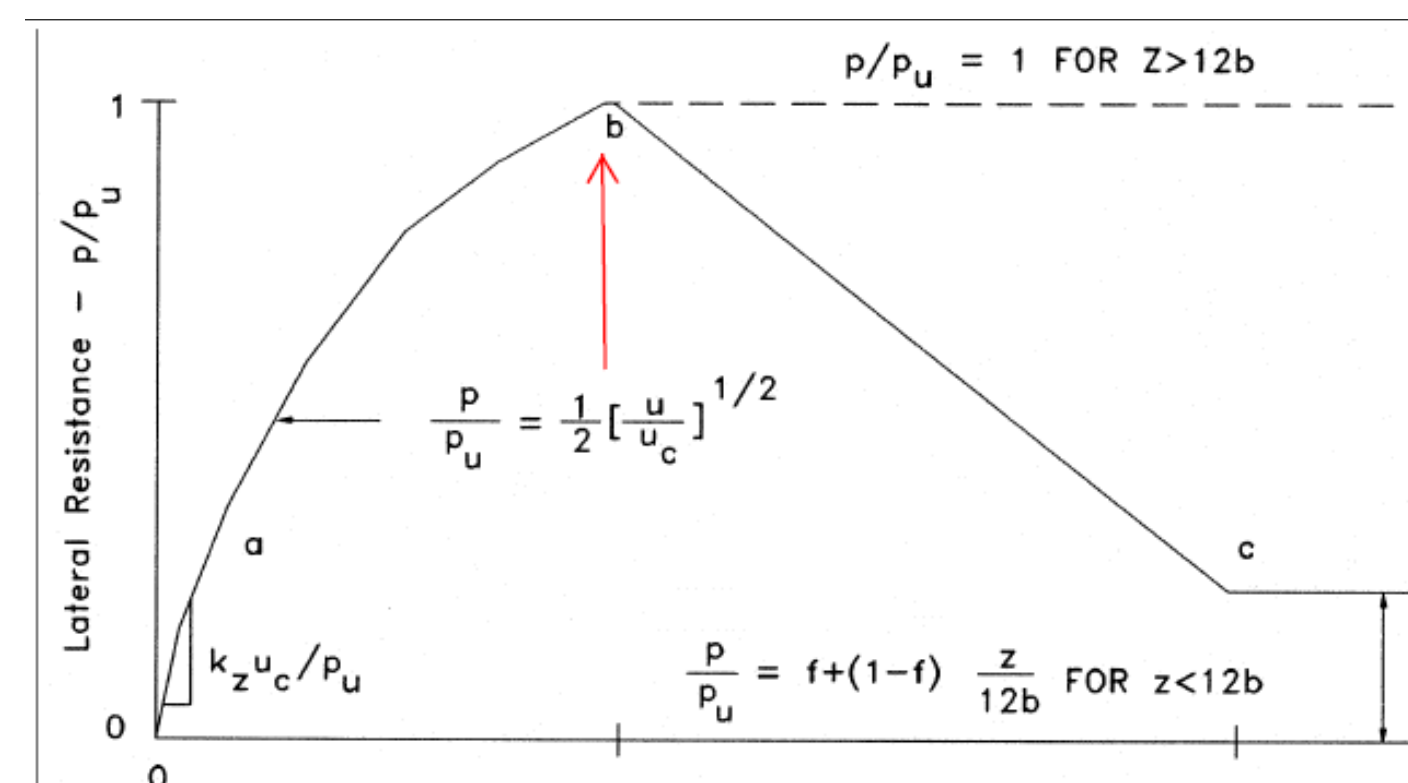
Reese, Cox and Koop (1975)

Reese and Welch (1975)

Reese ad Sullivan (1980)



$$\frac{dp}{du} = \infty$$



$$\frac{dp}{du} (u = 0) \text{ très important}$$

$$p_u = f(C_w z/B) \quad p_u = 9 \text{ à } 12C_u \text{ (si } z/B > 12)$$

2.3 Fondations profondes : gestion de l'ELS

Deux approches

Estimation des tassements

Vérification en termes de résistance

Voir sujets précédent sur approches disponibles

Basée sur la seule résistance au frottement R_s

$$F_{c,rep} \leq \frac{R_{s,k}}{\gamma_{s,SLS}}$$

$$\gamma_{s,SLS} \geq 1,2$$

2.3 Fondations profondes : sujets divers

Essais de chargement statique des pieux

Essais préalables : 5 essais sur 80 km, dans formations géologiques principales

Essais de contrôle : 1/130 pieux testés

(sur les pieux de l'ouvrage ou lors de la phase de production)

Exécution

Référence aux recommandations SPERW – 2016 de l'ICE
(ICE Specification for Piling and Embedded Retaining Walls, Third edition)

Tolérances d'implantation plus sévères que la norme NF EN 1536 => 75 mm



Essais d'intégrité

Impédance systématique

Auscultations soniques

Méthodes thermiques
Thermal Integrity Profile (TIP)

...laissées de côté pour des raisons de « health and safety »

Merci de votre attention