

# Norme NF P 94-262

Justification des ouvrages géotechniques – Normes d'application  
nationale de l'Eurocode 7

## **Fondations profondes**

Etat d'avancement au 20/01/2010

**François BAGUELIN    FONDASOL**

## Calendrier prévisionnel

- 26/01/2010 : présentation du projet à la CNJOG (\*) - décision de lancer ou non la mise à l'enquête probatoire
- mars 2010 : enquête probatoire
- avril-mai 2010 : dépouillement de l'enquête
- automne 2010 : publication de la norme par l'AFNOR

(\*) CNJOG = Commission de Normalisation de Justification des Ouvrages Géotechniques

## Les points marquants de la norme

1. Prise en compte des notions de l'Eurocode 7
2. Harmonisation et mise à jour des règles de calcul françaises
3. Mise au point d'autres aspects

## 1. Prise en compte des notions de l'Eurocode 7

- Les approches de calcul et les coefficients partiels
- Les valeurs caractéristiques et les coefficients  $\xi$

### L'annexe nationale de l'EC 7 a retenu pour la France les approches 2 et 3.

L'approche 2 est recommandée.

L'approche 3 peut être utilisée (stabilité générale d'un site, stabilité d'ensemble des écrans, des ouvrages en remblais renforcés, des massifs en sol cloué; analyses numériques d'interaction sol-structure)

### L'annexe nationale de l'EC 7 a retenu pour la France les valeurs recommandées dans l'annexe A.

Il s'agit des valeurs recommandées pour les facteurs partiels et de corrélation pour les ELU

# Approches et coefficients $\gamma$ de l'EC7

Approches retenues en France (Annexe Nationale)

Approche 2 : A1+M1+R2 applicable à la portance des pieux

Approche 3 : A1+M2+R3

Action A1	défavorable	favorable
$\gamma_G$	1.35	1
$\gamma_Q$	1.5	1

Matériau M1	1
-------------	---

Résistance		R2
Compression	$\gamma_t$	1.1
Traction	$\gamma_{s,t}$	1.15

## compression

	% G / Q	$\gamma_A$	$\gamma_A \times \gamma_t$
(a)	90/10	1.365	1.50
(b)	67/33	1.4	1.54

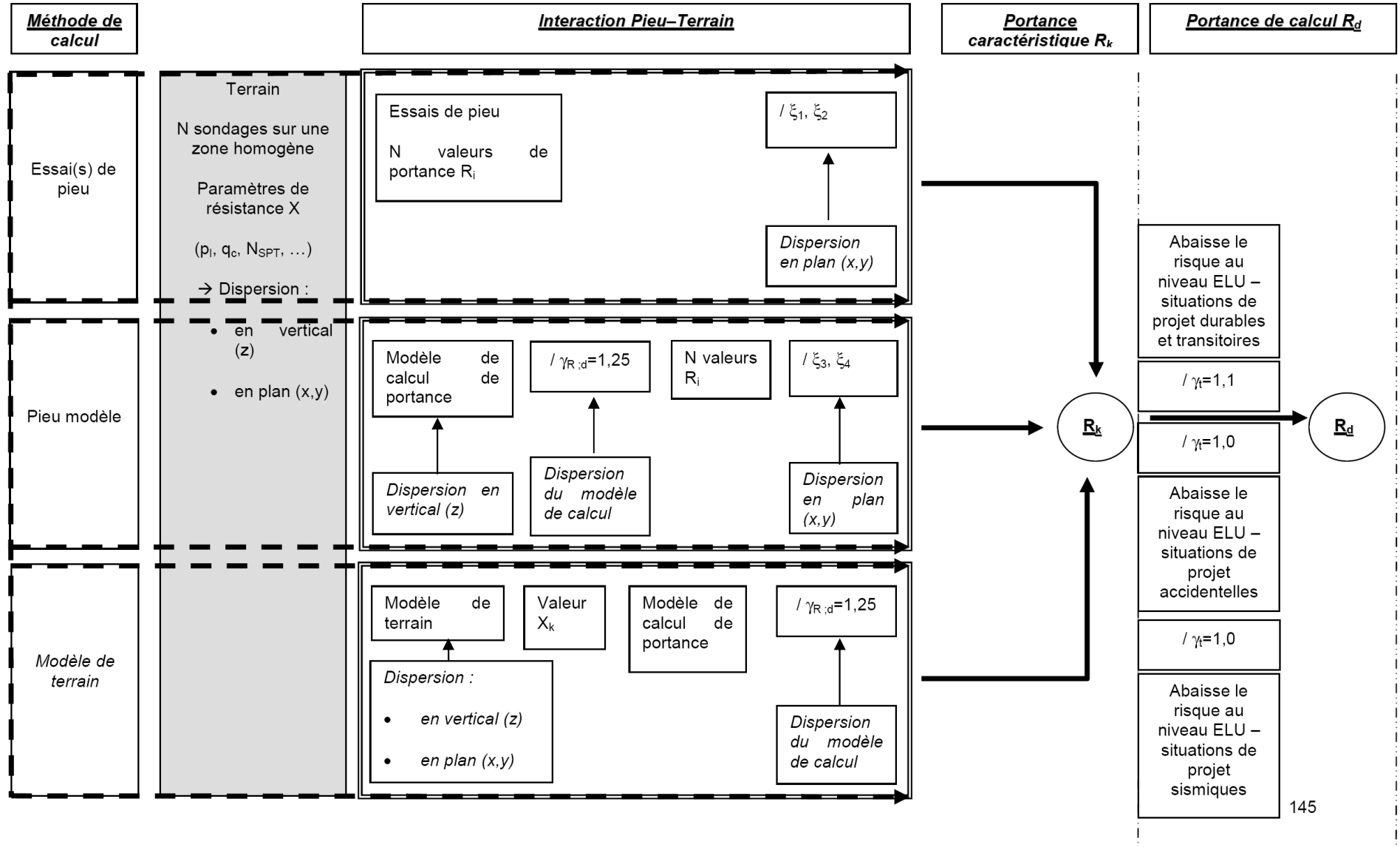
## traction

	% G / Q	$\gamma_A$	$\gamma_A \times \gamma_{ts,t}$
(a)	90/10	1.365	1.57
(b)	67/33	1.4	1.61

(a) : ratio typique des bâtiments

(b) : ratio typique des ponts

Schéma de calcul de la valeur de la résistance de portance d'un pieu



## Coefficient de modèle $\gamma_{Rd}$

But : prendre en compte la dispersion du modèle de calcul

Cas général :  $\gamma_{Rd} = 1,25$

méthode pressiométrique, méthode pénétrométrique pour pieux en compression

Cas particuliers

➤ Micropieux en compression :  $\gamma_{Rd} = 2$

en effet : 1. grande dispersion selon la méthode d'exécution

2. essai de chargement obligatoire

➤ Pieux en traction:  $\gamma_{Rd} = 1,35$

permet de retrouver la pondération de la norme « Ecrans »

D'où au final le coefficient global pour le cas général en compression :

% G / Q	$\gamma_A$	$\gamma_A \times \gamma_t$	$\gamma_{Rd}$	$\gamma_A \times \gamma_t \times \gamma_{Rd}$
90/10	1.365	1.50	1.25	<b>1.88</b>
67/33	1.4	1.54	1.25	<b>1.93</b>

## Portance $R_k$ déduite d'essais de chargement statique

On suppose que ces essais sont réalisés dans une zone homogène du point de vue stratigraphique et mécanique.

N essais  $\Rightarrow$  N valeurs  $R_i$

moyenne  $R_{moy}$       minimum  $R_{min}$

On applique les coefficients  $\xi_1$  et  $\xi_2$  :

$$R_k = \min [ R_{moy} / \xi_1 ; R_{min} / \xi_2 ]$$

N	1	2	3	4	$\geq 5$
$\xi_1$	1.40	1.30	1.20	1.10	1.00
$\xi_2$	1.40	1.20	1.05	1.00	1.00

Nota : le fascicule 62-V applique (annexe C1) :

\* 1,2 pour un essai

\* un coefficient basé sur le rapport  $Q_{max}/Q_{min}$  pour N essais



## Portance $R_k$ déduite d'essais de sol

Les règles de calcul sont fixées (pressiomètre, pénétromètre, etc.), avec leur coefficient de dispersion  $\gamma_{Rd}$ .

Deux méthodes sont possibles :

### 1. Le modèle de terrain

N sondages  $\rightarrow$  valeur caractéristique  $X_k$  du paramètre de sol  
( $X = p_l^*$ ,  $q_c$ , etc)

### 2. Le pieu modèle

type de pieu et géométrie fixés

N sondages  $\rightarrow$  N valeurs de portance  $R_i$   $\rightarrow$  facteurs de corrélation  $\xi_3$  et  $\xi_4$   $\rightarrow$  valeur caractéristiques  $R_k$

## Portance $R_k$ déduite d'essais de sol

### La méthode « modèle de terrain »

On établit un modèle de terrain, c'est-à-dire :

- la stratigraphie
- les valeurs caractéristiques ( $p_{l,k}^*$ ,  $q_{c,k}$ , etc) des différentes couches  
ou bien directement :
- les valeurs caractéristiques des frottements et résistance de points ( $q_{s,k}$ ,  $q_{b,k}$ ) des différentes couches

valeur caractéristique = valeur prudente, en principe au risque de mise en défaut de 5%

Ces valeurs caractéristiques sont ensuite entrées dans le modèle de calcul (pressiométrique ou pénétrométrique)

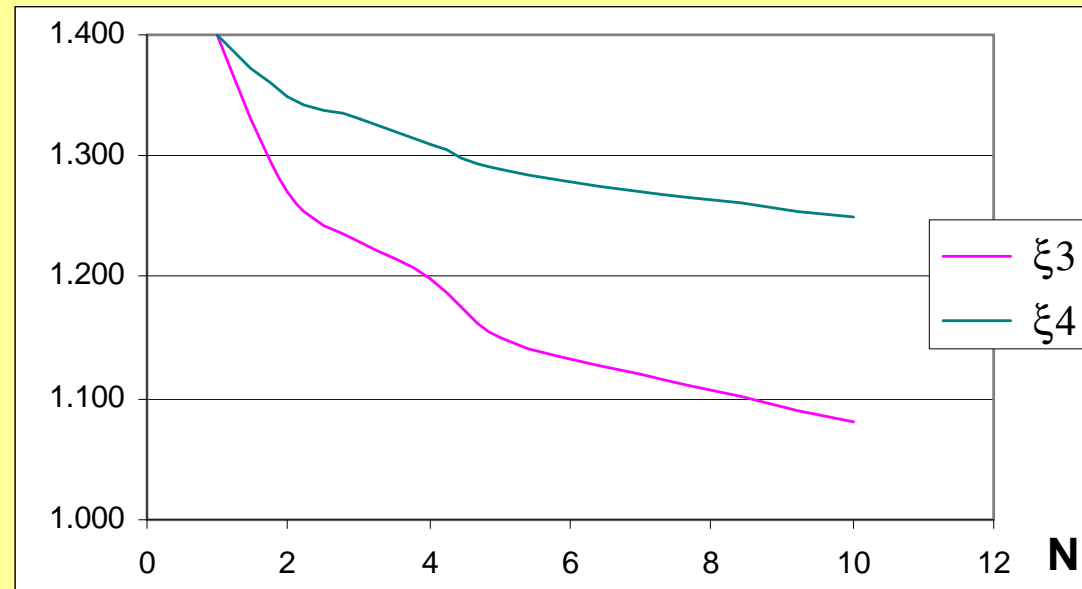
## Portance $R_k$ déduite d'essais de sol - la méthode « pieu modèle »

### Valeurs de $\xi_3$ et $\xi_4$ de l'EC 7

N	1	2	3	4	5	7	10
$\xi_3$	1.4	1.35	1.33	1.31	1.29	1.27	1.25
$\xi_4$	1.4	1.27	1.23	1.2	1.15	1.12	1.08

N sondages  $\Rightarrow$  N valeurs  $R_i$     moyenne  $R_{moy}$     minimum  $R_{min}$

$$R_k = \min [ R_{moy} / \xi_3 ; R_{min} / \xi_4 ]$$

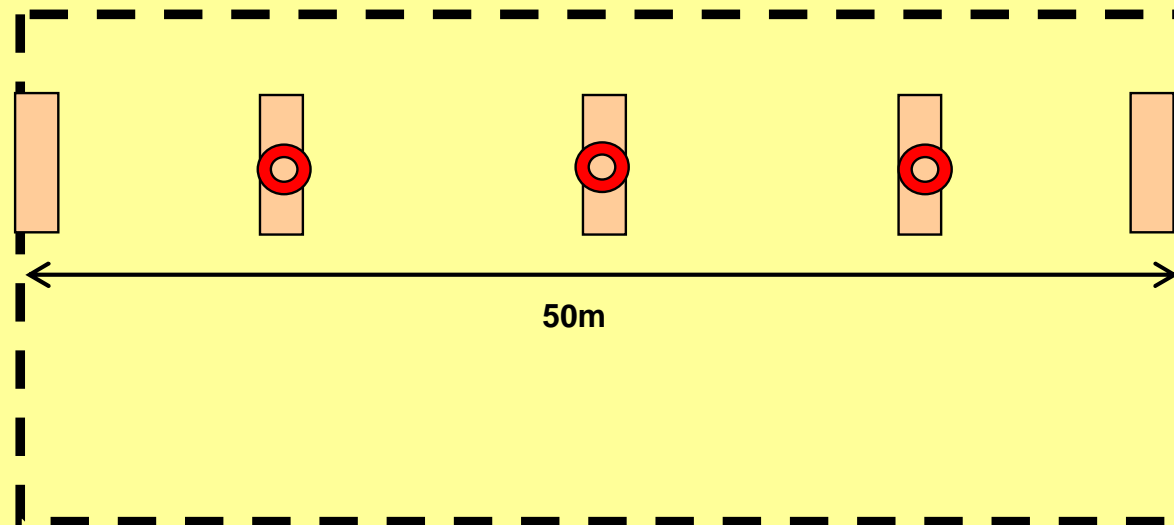


## ADAPTATION selon la densité des sondages : application aux ouvrages d'art

$$\xi_i(N, S) = 1 + [\xi'_i(N) - 1] \sqrt{\frac{S}{S_{réf}}}$$

$$S_{réf} = 2500 \text{ m}^2$$

**PS**    **5 Appuis**  
**3 sondages**



$$S = 50\text{m} \times 25\text{m} = 1\,250 \text{ m}^2$$

$$N = 3$$

$$\xi_3 = 1.23$$

$$\xi_4 = 1.16$$

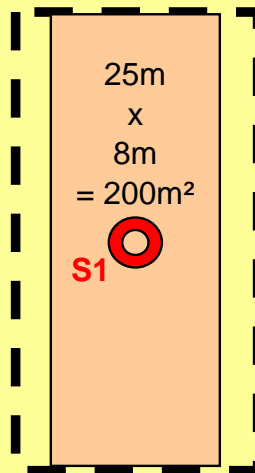
# ADAPTATION selon la densité des sondages : application aux ouvrages d'art

## Viaduc

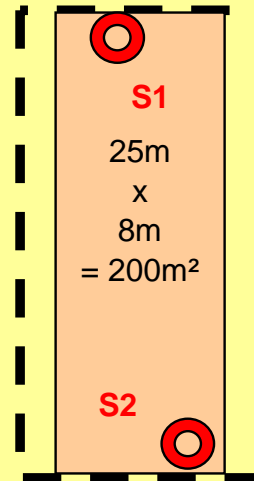
### 1 Appui

$L = 25 \text{ m}$   
 $l = 8 \text{ m}$   
 $S = 200 \text{ m}^2$   
 $l \text{ mini} = 12.5 \text{ m}$

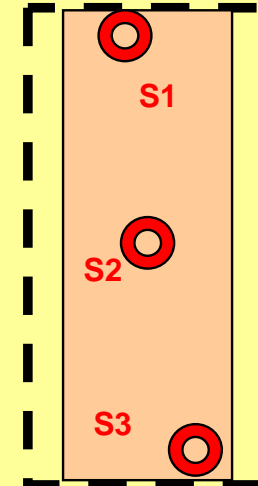
### 1 sondage



### 2 sondages



### 3 sondages



$S = 312.5 \text{ m}^2$   
 $N = 1$   
 $\xi_3 = 1.14$   
 $\xi_4 = 1.14$

$S = 312.5 \text{ m}^2$   
 $N = 2$   
 $\xi_3 = 1.12$   
 $\xi_4 = 1.10$

$S = 312.5 \text{ m}^2$   
 $N = 3$   
 $\xi_3 = 1.12$   
 $\xi_4 = 1.08$

## ADAPTATION selon la densité des sondages : application au bâtiment

### Bâtiment 30m x 20m

L = 30 m  
 $l$  = 20 m  
S = 600 m<sup>2</sup>  
 $l$  mini = 15 m  
**S = 600 m<sup>2</sup>**

	<b>1 sondage</b>	<b>2 sondages</b>	<b>3 sondages</b>
<b>S =</b>	<b>600</b>	<b>600</b>	<b>600</b>
<b>N =</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b><math>\xi_3</math> =</b>	<b>1.20</b>	<b>1.17</b>	<b>1.16</b>
<b><math>\xi_4</math> =</b>	<b>1.20</b>	<b>1.13</b>	<b>1.11</b>

	<b>5 sondages</b>	<b>7 sondages</b>	<b>10 sondages</b>
<b>S =</b>	<b>600</b>	<b>600</b>	<b>600</b>
<b>N =</b>	<b>5</b>	<b>7</b>	<b>10</b>
<b><math>\xi_3</math> =</b>	<b>1.14</b>	<b>1.13</b>	<b>1.13</b>
<b><math>\xi_4</math> =</b>	<b>1.07</b>	<b>1.06</b>	<b>1.06</b>

## Le choix de la méthode : pieu modèle ou modèle de terrain ?

Il est recommandé que le choix de la méthode soit fait :

- \* dès la phase avant-projet
- \* au plus tard à la phase projet

Le choix doit être guidé par des considérations relatives à la connaissance du site, à la dispersion et aux variations de ses caractéristiques

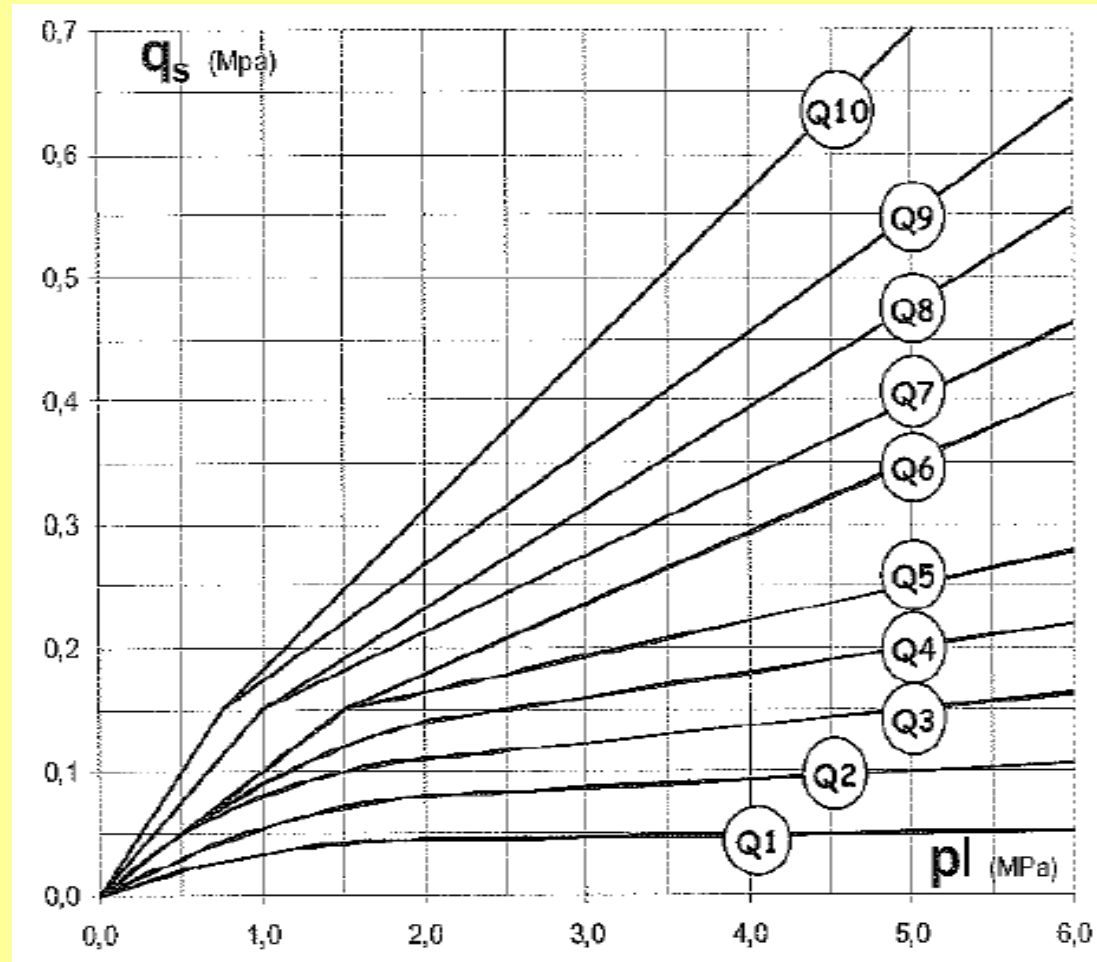
Et non par le degré plus ou moins conservatif de chacune des deux méthodes.

## Les points marquants de la norme

1. Prise en compte des notions de l'Eurocode 7
2. Harmonisation et mise à jour des règles de calcul françaises
  - Règles de calcul pressiométrique de la portance
  - Règles de calcul pénétrométrique de la portance
3. Mise au point d'autres aspects



Règles de calcul pressiométrique de la portance  
d'après Bustamante-Gianeselli (2006)



Courbes de frottement latéral unitaire limite

N°	Abréviation	Technique de mise en œuvre	N° de courbe de l'abaque				
			Argile Limon	Sable Grave	Craie	Marno-calcaire	Roche altérée
1	FS	Foré simple (pieux et barrettes)	2 ##	2* ##	5 ##	4	6
2	FB	Foré boue (pieux et barrettes)	2 ##	2 ##	5	4	6
3	FTP	Foré tubé (virole perdue)	1	1	1	2	1
4	FTR	Foré tubé (virole récupérée)	1 ##	2	4	4	4
5	FSR, FBR, PU	Foré simple ou boue avec rainurage ou puits	3	3*	5	4	6
6	FTC, FTCD	Foré tarière continue simple rotation ou double rotation	1	3	2	4	4
7	VM	Vissé moulé	3	5	4	4	4
8	VT	Vissé tubé	1	2	2	2	2
9	BPF**, BPR**	Battu béton préfabriqué ou précontraint	3 #	3 #	2	2	****
10	BE**	Battu enrobé (béton – mortier – coulis)	6	8	2	7	****
11	BM**	Battu moulé	2	3	6	5	****
12	BAF**	Battu acier fermé	2	2	1	2	****
13	BAO** #	Battu acier ouvert	2	1	1	2	****
14	HB** #	Profilé H battu	2 #	2 #	1	2	****
15	HBi** (°)	Profilé H battu injecté IGU ou IRS	6	8	7	7	****
16	PP** #	Palplanches battues	2	2	1	2	****
17	M1	Micropieu type I	1	1	1	2	6
18	M2	Micropieu type II	1	1	1	2	6
19	PIGU, MIGU	Pieu ou micropieu injecté (type III)	6	8	7	7	9
20	PIRS, MIRS	Pieu ou micropieu injecté (type IV)	9	9	9	9	10

\* si la tenue du sol le permet.

\*\* il convient de se reporter à la section E.7 pour le calcul du périmètre.

\*\*\*\* dans le cas où l'altération permet l'encastrement, il convient de choisir les valeurs proposées pour le marno-calcaire ou supérieures dans le cas d'un essai de chargement ou d'une autre référence.

# pour les pieux de type BAO, HB et PP, mis en œuvre par vibrofonçage, et pas par battage, il y a lieu de faire un abattement de 30% sur les valeurs de  $q_s$ .

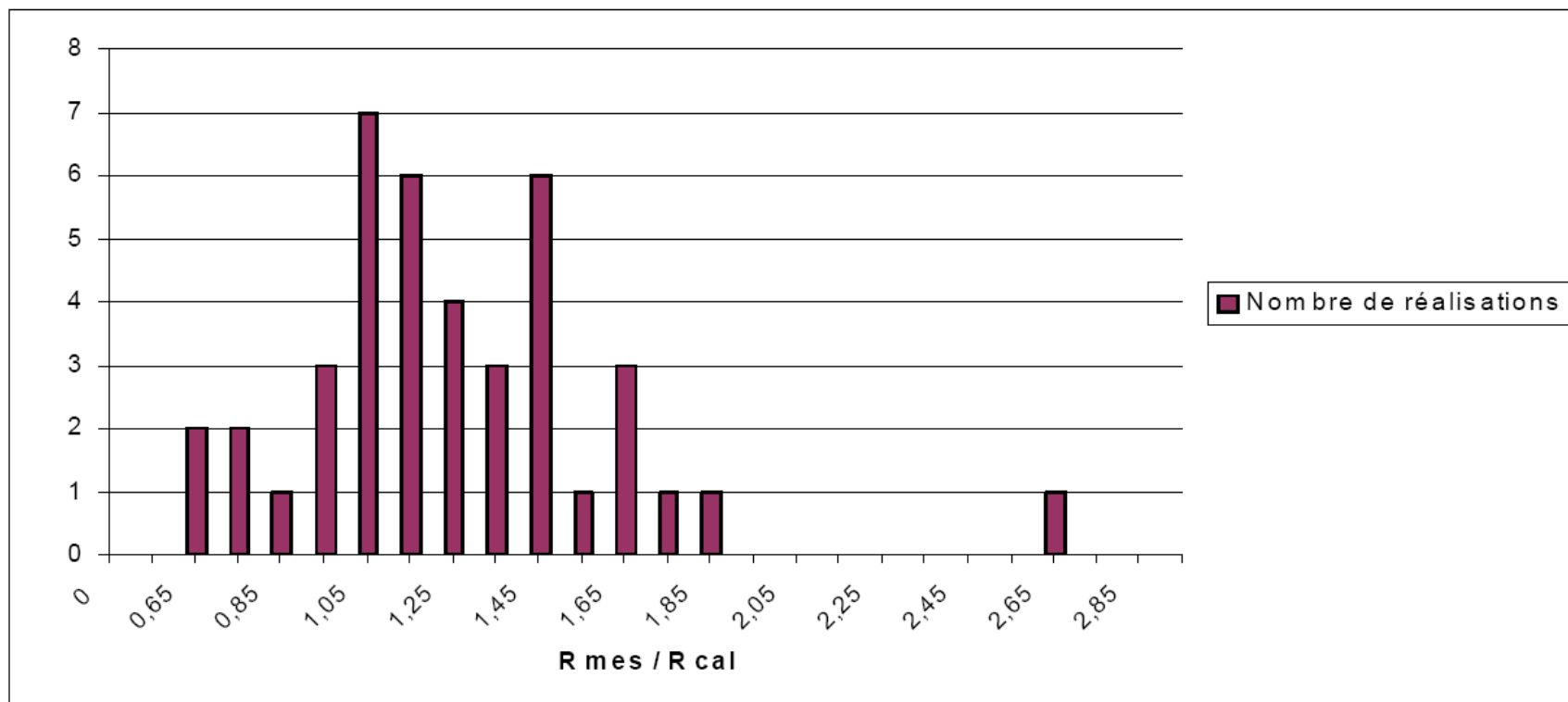
## pour les pieux de grande longueur appliquer l'abattement de l'article (2) de la présente section.

(°) pour les pieux HBi, injectés en mode IGU, les valeurs s'appliquent pour un nombre de tubes d'injection TAM (tubes à manchettes) d'au moins 4. Pour 2 TAM, il y a lieu de réduire le numéro de courbe de deux unités.

(a) D'autres valeurs peuvent être utilisées à condition de satisfaire les conditions de l'alinéa 10 de la section 1.

## Dispersion des méthodes pressiométriques

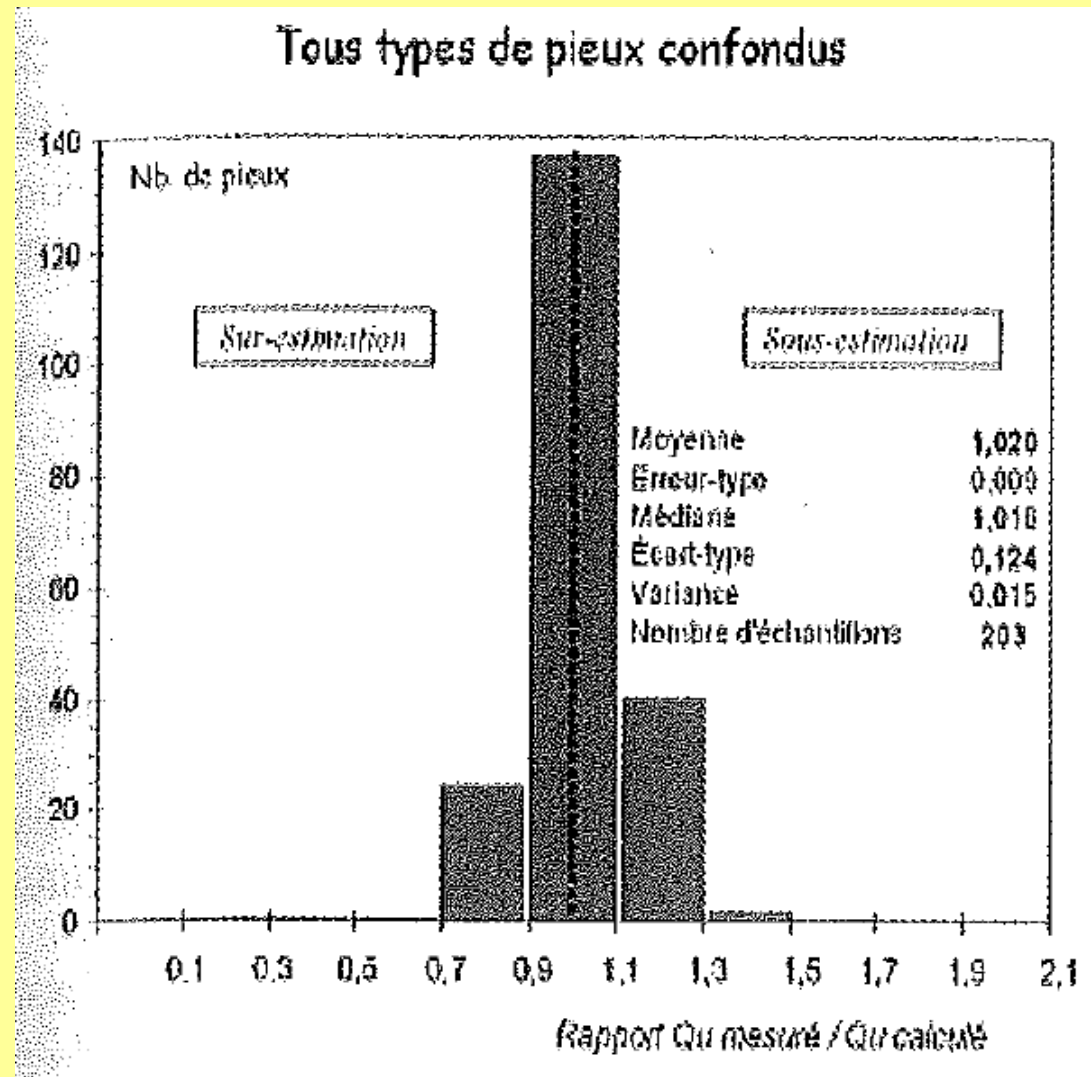
Fascicule 62-V



**Figure 1.** Valeurs de  $R_{c, \text{mes}} / R_{c, \text{cal}} = \eta$  pour 42 essais de chargement statique de pieux

## Dispersion des méthodes pressiométriques

Bustamante-Gianeselli 2006



## Règles de calcul pénétrométrique de la portance

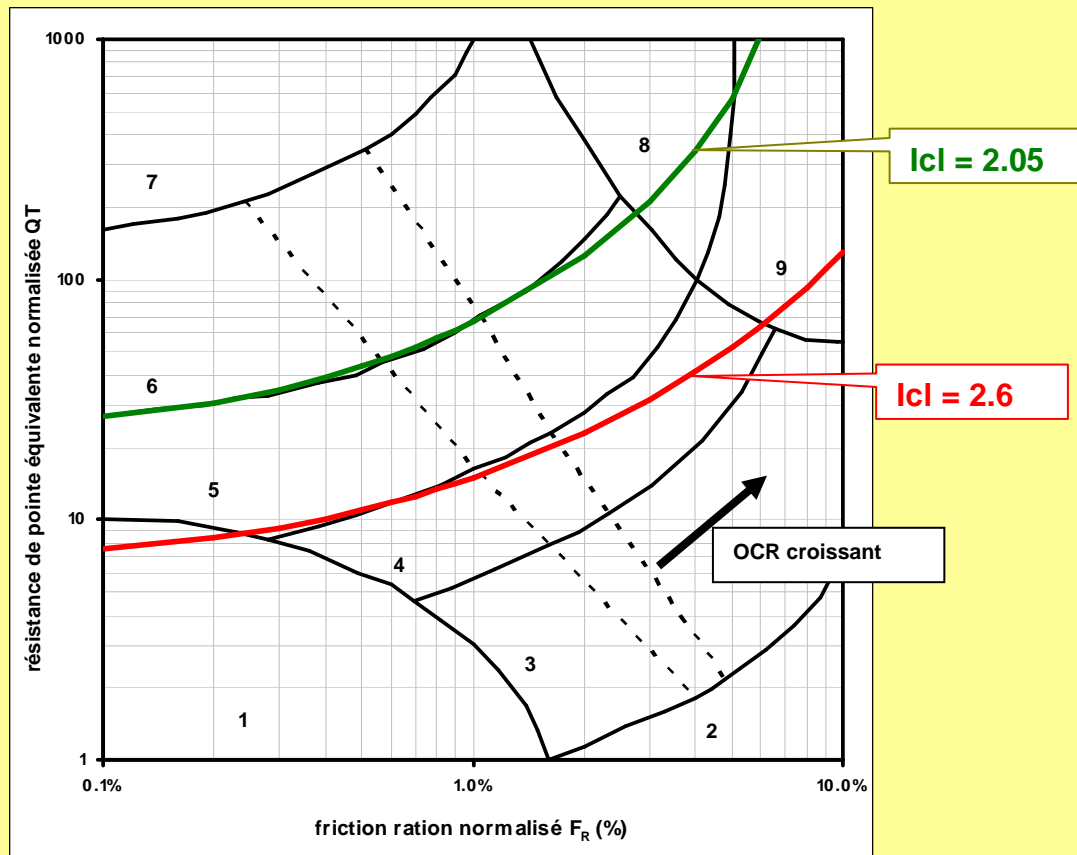
- Nouvelles règles
  - ✓ autonomes (et non pas déduites des règles pressiométriques par corrélation)
  - ✓ tenant compte des expériences nationales et étrangères ainsi que des règles de calcul belges et hollandaises
  
- Indice de classification des sols basé sur les caractéristiques pénétrométriques ( $q_c$  et  $F_R$ )
  
- Terme de pointe :  $k_{cmax}$
  
- Frottement latéral :  $q_s(z) = \alpha_{\text{pieu,sol}} \cdot f_{\text{sol}}[q_c(z)]$

$I_{cl}$  = indice de classification

$$I_{cl} = \sqrt{[3.47 - \log Q_T]^2 + [1.22 + \log F_R]^2}$$

$$Q_T = \frac{q_c - \sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}}$$

$$F_R = \frac{f_s}{q_c - \sigma_{v0}}$$



S1	Sols fins argileux ou silts sensibles
S2	Sols organiques et tourbes
S3	Argiles à argiles silteuses
S4	Silts argileux à argiles silteuses
S5	Sables silteux à silts sableux
S6	Sables propres à sables silteux
S7	Sables à sables graveleux
S8	Sols fins intermédiaires très raides
S9	Sables cimentés ou dilatants

Tableau G.3.1.2 – Catégories de sol pénétrométriques

Figure G.3.1 – Abaque de Robertson

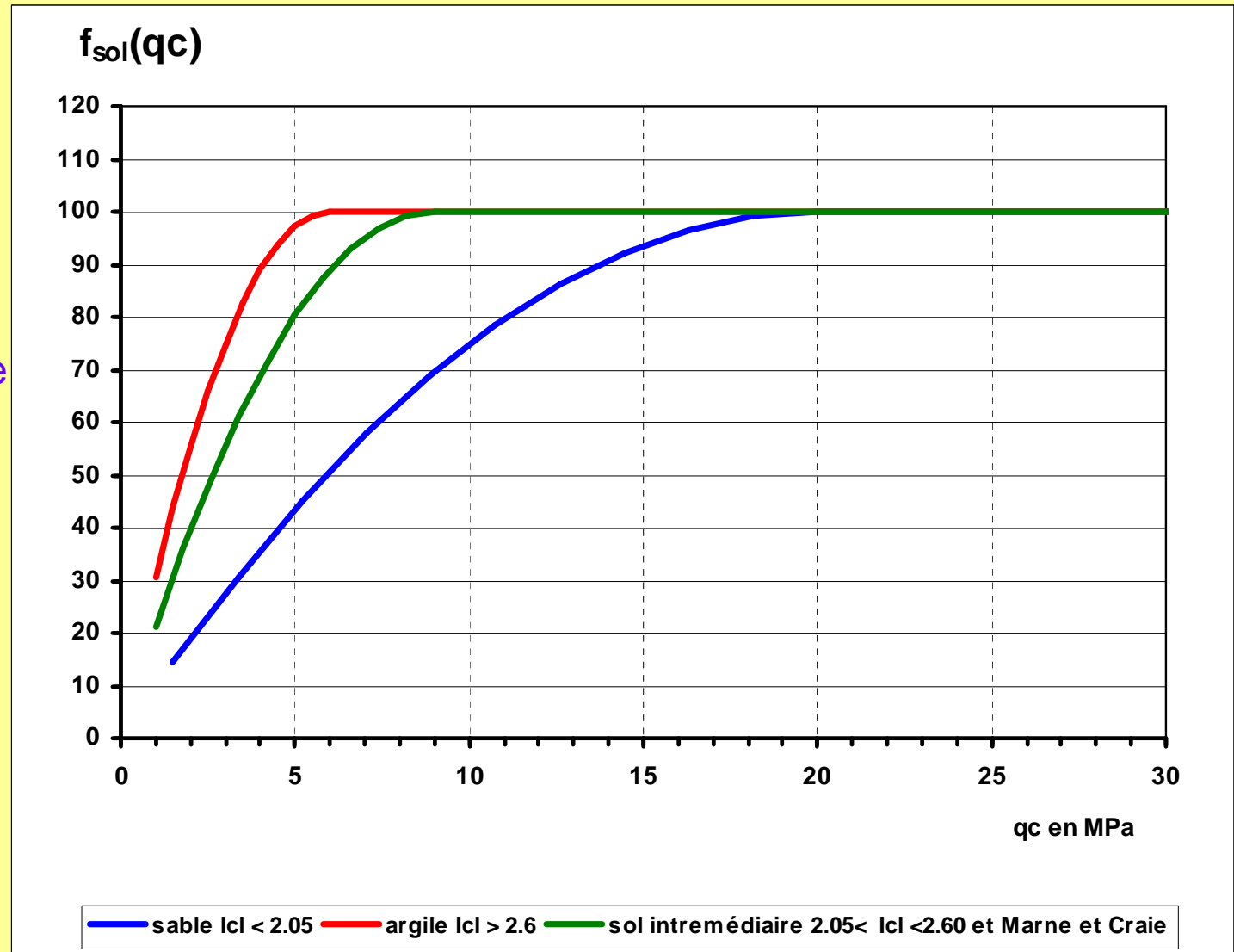
## Facteur de portance en pointe $k_{cmax}$

terme de pointe	type de sol			
	sable et grave	argile et sols intermédiaires	marne	craie
	$I_{cl} < 2.05$	$I_{cl} \geq 2.05$		
caractéristiques requises	$q_c > 1.5 \text{ MPa}$	$q_c > 1.0 \text{ MPa}$	$q_c > 1.0 \text{ MPa}$	
sol exclu de cette étude	$q_c < 1.5 \text{ MPa}$ (très lâche)	$q_c < 1.0 \text{ MPa}$ (très mou et mou)	$q_c < 1.0 \text{ MPa}$ (très molle et très tendre)	
$k_{cmax} ( q_p = k_{cmax} \cdot q_c )$				
pieux battus	0.5	0.5	0.5	0.6
pieu tarière continue	0.4	0.4	0.4	0.5
pieux forés	0.3	0.4	0.4	0.5

## Frottement latéral

$$q_s(z) = \alpha \text{ pieu, sol} \cdot f_{\text{sol}}[q_c(z)]$$

Courbes de référence  
 $f_{\text{sol}}[q_c(z)]$



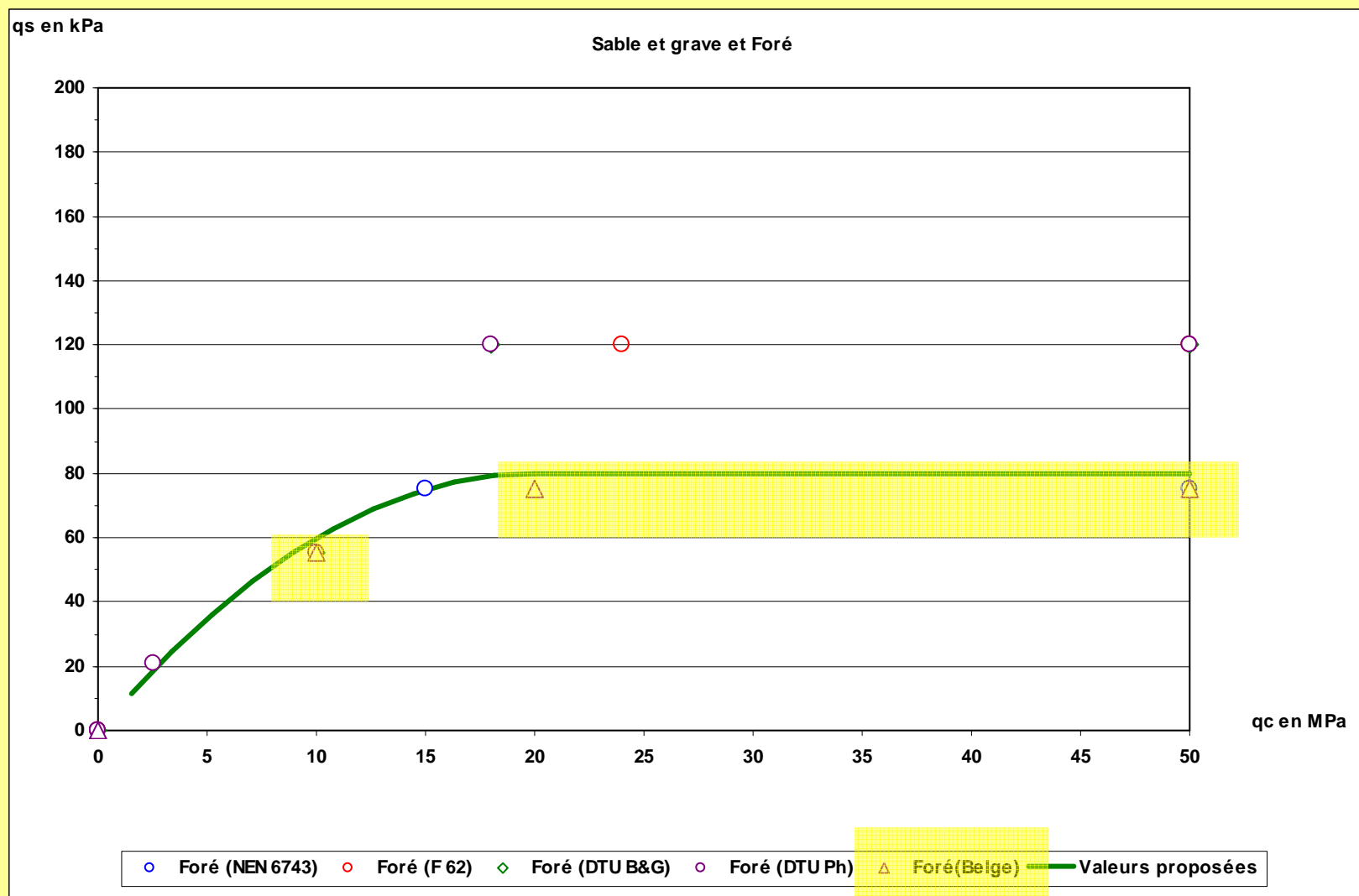


## Coefficient $\alpha$ pieu,sol

		Indice de classification			Marne et Craie
		$I_{cl} < 2.05$	$2.05 \leq I_{cl} \leq 2.6$	$I_{cl} > 2.6$	
Type de sol		sable	sol intermédiaire	argile	
Type de pieux		$\alpha_{\text{pieu,sol}}$	$\alpha_{\text{pieu,sol}}$	$\alpha_{\text{pieu,sol}}$	$\alpha_{\text{pieu,sol}}$
Avec refoulement	Béton préfabriqué battu	1.4	1.2	1	1.4
	Battu moulé en place	1.4	1.2	1	1.4
	Vissé	1.4	1.2	1	1.4
	Battu métallique	0.9	0.7	0.5	0.8**
sans refoulement	Tarière continue (avec enregistrement)	1.2	0.9	0.9	1.4
	Foré	0.8	0.6	0.4 ou 0.9 *	1
	Injecté basse pression	1.2	1.2	0.9	1.4
nouveaux pieux		à définir au cas par cas			
* foré rainuré à sec					
** essai de pieu recommandé					

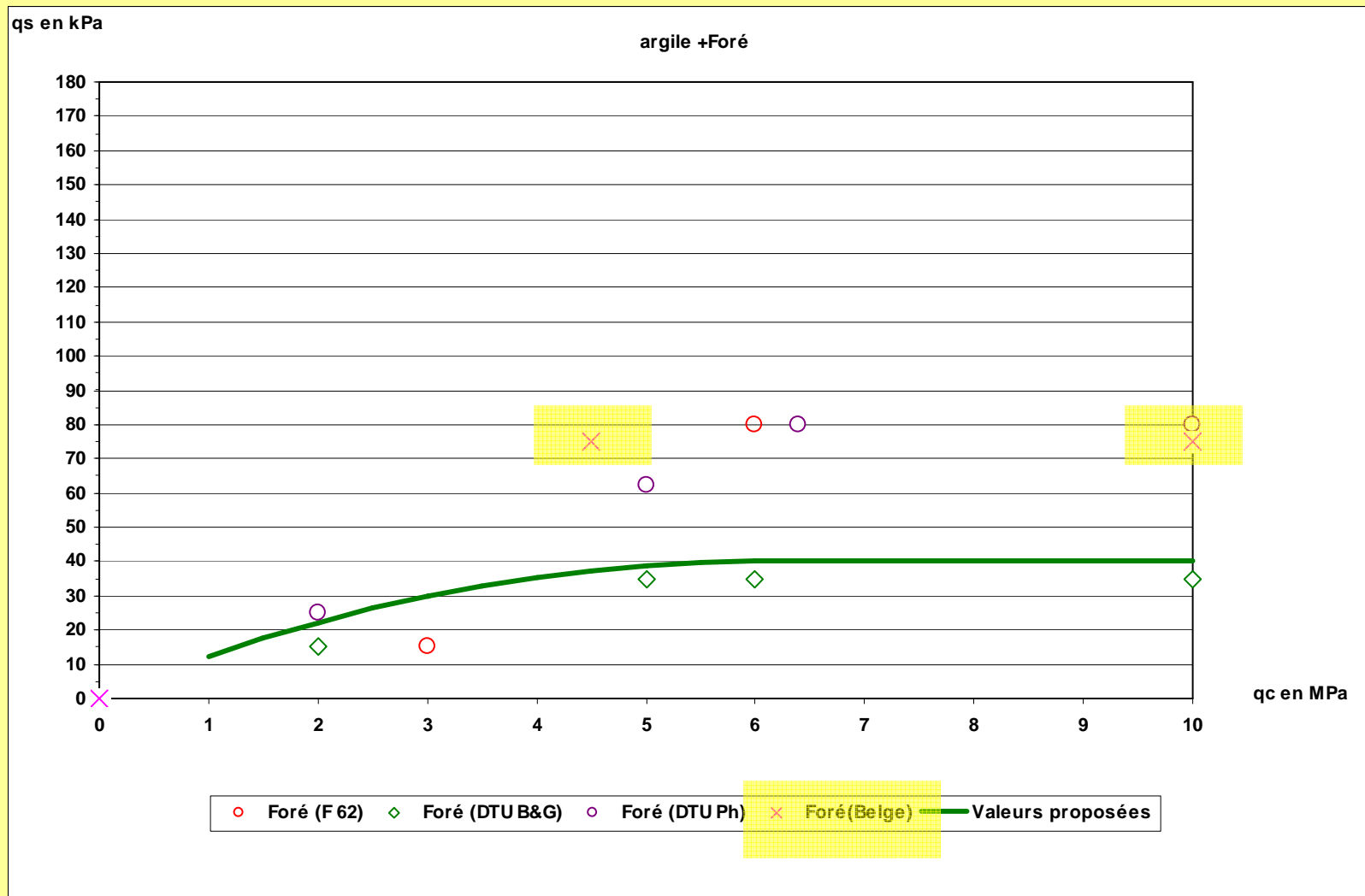
# Comparaison avec les règles anciennes et les règles belges

## Sables & graves – pieux forés



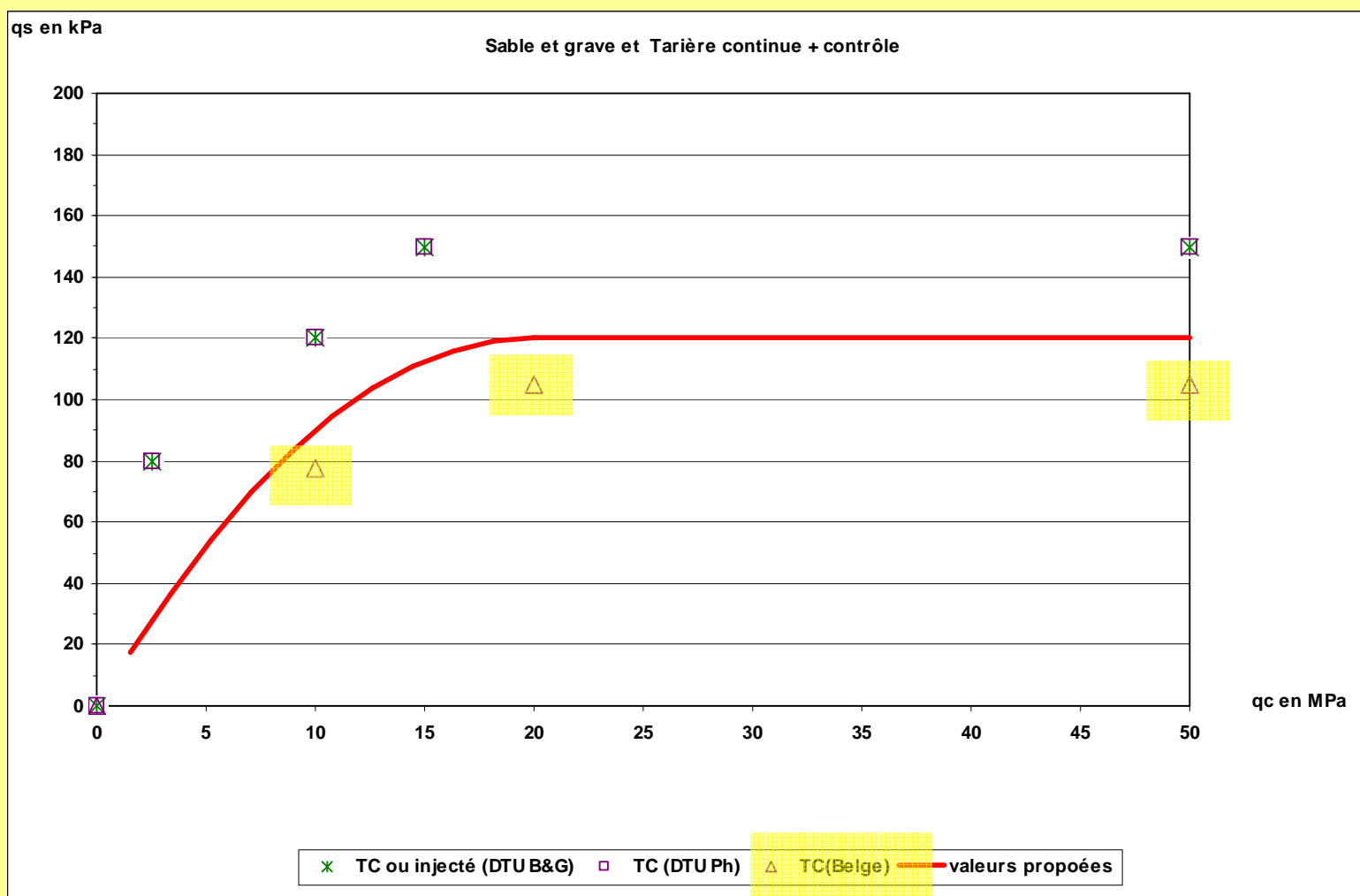
# Comparaison avec les règles anciennes et les règles belges

## Argiles – pieux forés



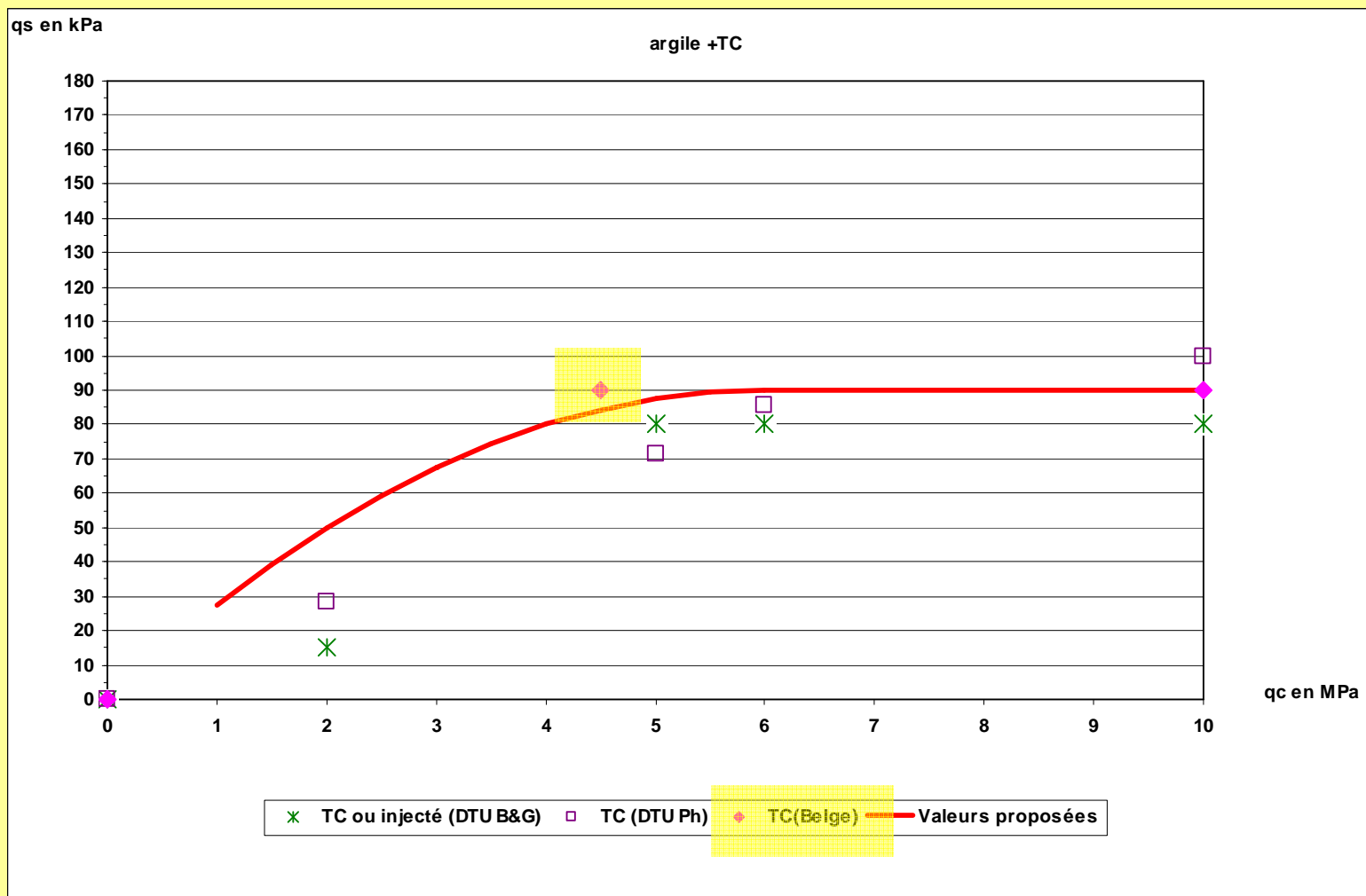
# Comparaison avec les règles anciennes et les règles belges

## Sables & graves – pieux tarière continue avec contrôle



# Comparaison avec les règles anciennes et les règles belges

## Argiles – pieux tarière continue avec contrôle



# Les points marquants de la norme

1. Prise en compte des notions de l'Eurocode 7
2. Harmonisation et mise à jour des règles de calcul françaises
3. Mise au point d'autres aspects
  - Classement des types de pieux:
  - Encastrement
  - Pieux en traction
  - Effet de groupe

### 3. Mise au point d'autres aspects

- Classement des types de pieux : adapté aux règles de calcul de portance
- Encastrement : règles pour l'encastrement partiel
- Pieux en traction :
  - vérification du cône d'arrachement
  - effet de groupe
  
- Effet de groupe

## Effet de groupe

- Effet local
  - Abandon de Converse-Labarre
  - généralisation de la règle des sols cohérents (pas d'effet pour un entraxe  $> 3$  diamètres)
  - réduction applicable seulement au frottement
  
- Effet d'ensemble (sol mou sous-jacent) : vérification conservée



**FIN**

## Adaptation des coefficients $\xi$ de l'EC 7

selon la densité des sondages

(Annexe E de la NF P 94-262)

$$\xi_i(N, S) = 1 + [\xi'_i(N) - 1] \sqrt{\frac{S}{S_{\text{réf}}}}$$

$$S_{\text{réf}} = 2500 \text{ m}^2$$

- $\xi'$  désignent les valeurs initiales  $\xi$  des tableaux de l'EC 7
- les  $\xi$  sont les valeurs corrigées.

Idées de base :

1. un seul sondage réalisé au droit d'un appui de surface restreinte ne doit pas donner lieu à une réduction significative, telle que le facteur 1,4 de l'EC 7 ( $\xi_1$  ou  $\xi_3$ ).
2. nécessité de proposer une règle « continue »

## ADAPTATION selon la densité des sondages

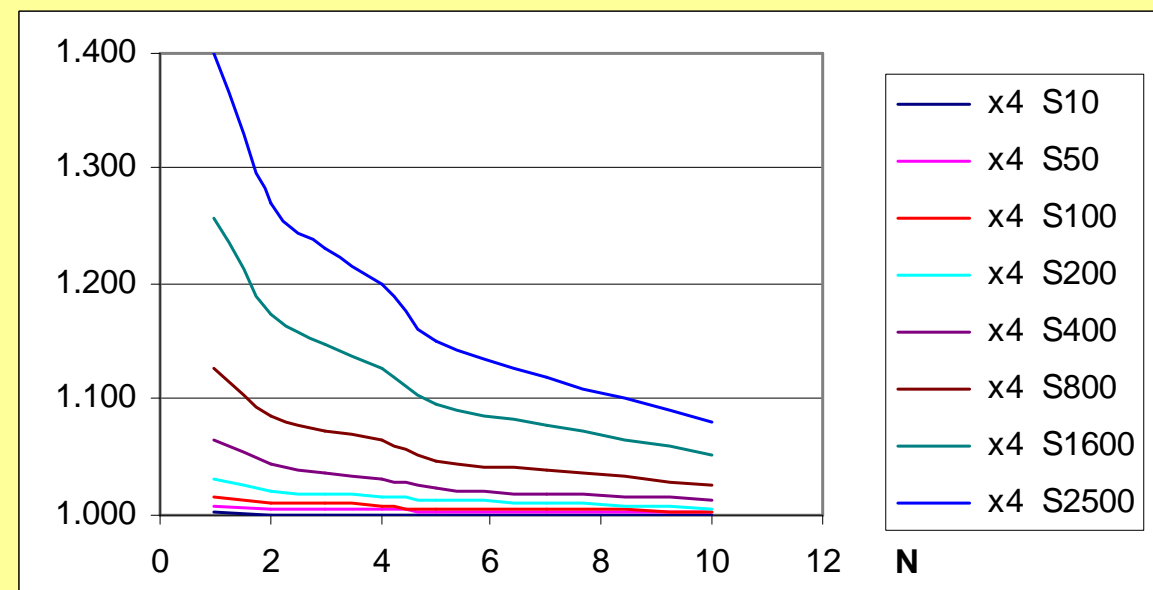
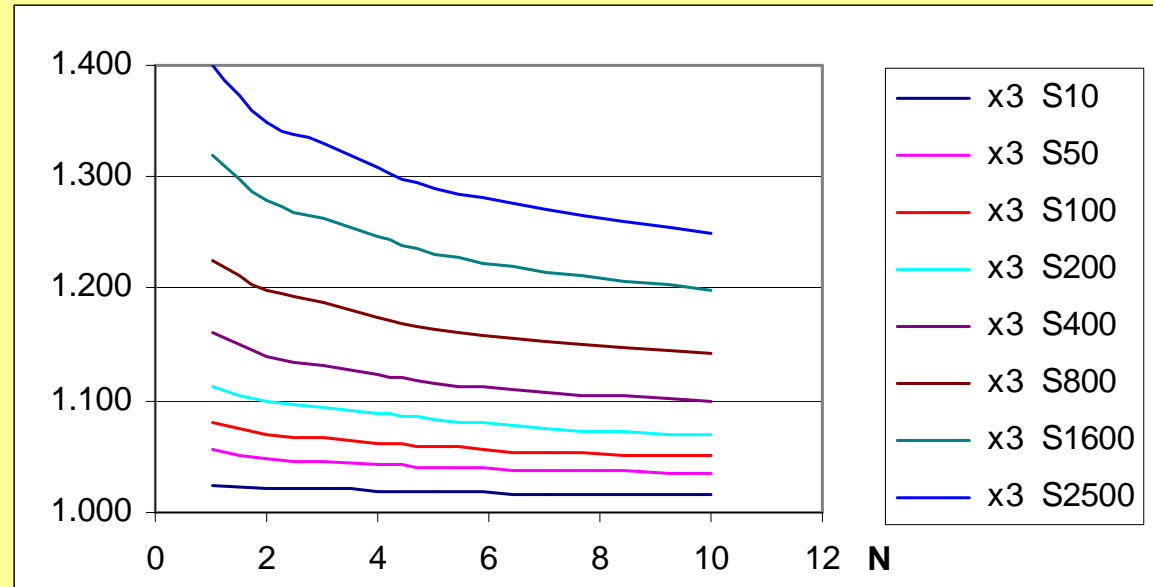
$$\xi_i(N, S) = 1 + [\xi'_i(N) - 1] \sqrt{\frac{S}{S_{réf}}}$$

$$S_{réf} = 2500 \text{ m}^2$$

### Définition de la surface S

Rectangle :

- englobant les appuis et les sondages
- d'élancement < 2



## ADAPTATION selon la densité des sondages : application aux ouvrages d'art

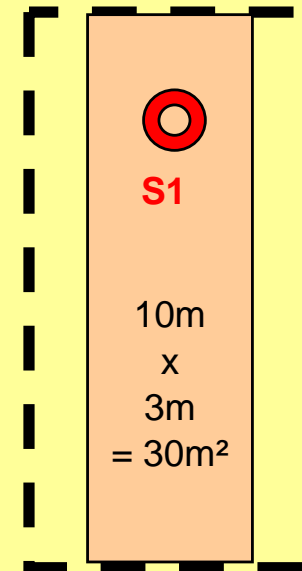
$$\xi_i(N, S) = 1 + [\xi'_i(N) - 1] \sqrt{\frac{S}{S_{\text{réf}}}}$$

$$S_{\text{réf}} = 2500 \text{ m}^2$$

**PS**

**1 Appui  
1 sondage S1**

L =	10 m
ℓ =	3 m
S =	30 m <sup>2</sup>
ℓ mini =	5 m
<b>S =</b>	<b>50 m<sup>2</sup></b>
<b>N =</b>	<b>1</b>
ξ <sub>3</sub> =	1.06
ξ <sub>4</sub> =	1.06



## ADAPTATION selon la densité des sondages : application au bâtiment

### Bâtiment 100m x 30m

L =	100 m
ℓ =	30 m
S =	3000 m <sup>2</sup>
ℓ mini =	50 m
<b>S =</b>	<b>5000 m<sup>2</sup></b>

	<b>1 sondage</b>	<b>2 sondages</b>	<b>3 sondages</b>
<b>S =</b>	<b>5 000</b>	<b>5 000</b>	<b>5 000</b>
<b>N =</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
$\xi_3 =$	<b>1.57</b>	<b>1.49</b>	<b>1.47</b>
$\xi_4 =$	<b>1.57</b>	<b>1.38</b>	<b>1.33</b>
	nb de sondages insuffisant	nb de sondages insuffisant	nb de sondages insuffisant

	<b>5 sondages</b>	<b>7 sondages</b>	<b>10 sondages</b>
<b>S =</b>	<b>5 000</b>	<b>5 000</b>	<b>5 000</b>
<b>N =</b>	<b>5</b>	<b>7</b>	<b>10</b>
$\xi_3 =$	<b>1.41</b>	<b>1.38</b>	<b>1.38</b>
$\xi_4 =$	<b>1.21</b>	<b>1.17</b>	<b>1.17</b>

## Règles de calcul pressiométrique de la portance d'après Bustamante-Gianeselli (2006)

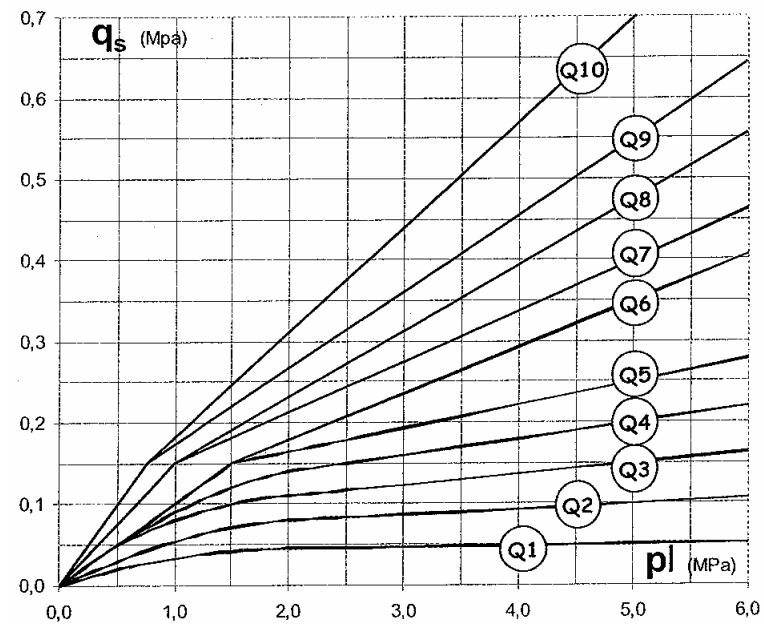


Figure 2. Méthode pressiométrique. Abaques pour le calcul de  $q_s$

Tableau II. Techniques et caractéristiques des pieux étudiés

Code	N°	nb.	$\varnothing^{(1)}$ (mm)	H <sup>(2)</sup> (m)	Technique de mise en œuvre
1	1	8	500/2000	11,5/23	Foré simple (pieu et barrette), <b>FS</b>
	2	64	270/1800	6/78	Foré boue (pieu et barrette), <b>FB</b>
	3	2	270/1200	20/56	Foré tubé (virole perdue), <b>FTP</b>
	4	28	420/1100	5,5/29	Foré tubé (virole récupérée) <b>FTR</b>
	5	4	520/880	19/27	Foré simple ou boue avec rainurage ou puits, <b>FSR, FBR, PU</b>
2	6	50	410/980	4,5/30	Foré tarière continue simple rotation <b>FTC</b> ou double rotation <b>FTCD</b>
3	7	48	310/710	5/19,5	Vissé moulé, <b>VM</b>
	8	1	650	13,5	Vissé tubé, <b>VT</b>
4	9	30	280/520	6,5/72,5	Battu béton préfabriqué ou précontraint, <b>BPF, BPR</b>
	10	15	250/600	8,9/20	Battu enrobé (béton – mortier – coulis), <b>BE</b>
	11	19	330/610	4/29,5	Battu moulé, <b>BM</b>
	12	27	170/810	4,5/45	Battu acier fermé, <b>BAF</b>
5	13	27	190/1220	8/70	Battu acier ouvert, <b>BAO</b>
6	14	23	260/600	6/64	Profilé H battu, <b>HB</b>
	15	4	260/430	9/15,5	Profilé H battu injecté, <b>HBI</b>
7	16	15	-	3,5/12,5	Palplanches battues, <b>PP</b>
1	17		80/140	4/12	Micropieu type I, <b>M1</b>
	18	8	120/810	8,5/37,5	Micropieu type II, <b>M2</b>
8	19	23	100/1220	8,5/67	Pieu ou micropieu injecté mode IGU (type III), <b>PIGU, MIGU</b>
	20	20	130/660	7/39	Pieu ou micropieu injecté mode IRS (type IV), <b>PIRS, MIRS</b>

<sup>(1)</sup> diamètre théorique  $\varnothing$  mini. et maxi. <sup>(2)</sup> longueurs minimum et maximum dans le sol h

# Les points marquants de la norme

## 1. Prise en compte des notions de l'Eurocode 7

- Les approches de calcul et les coefficients partiels
- Les valeurs caractéristiques et les coefficients  $\xi$

## 2. Harmonisation et mise à jour des règles de calcul françaises

- Règles de calcul pressiométrique de la portance
- Règles de calcul pénétrométrique de la portance

## 3. Mise au point d'autres aspects

- Classement des types de pieux
- Effet de groupe
- Encastrement
- Pieux en traction