

L'optimisation
de la conception
des procédés
et des performances



nouvelles **A**pproches de **R**econnaissance
des **S**ols et de **C**onception des **O**uvrages
géotechniques avec le **P**ressiomètre



Interprétation et dimensionnement

Minh Tuan Hoang, Julien Habert (Terrasol)

1. Contexte et objectifs

2. Construction de la base de données

3. Résultats et analyse

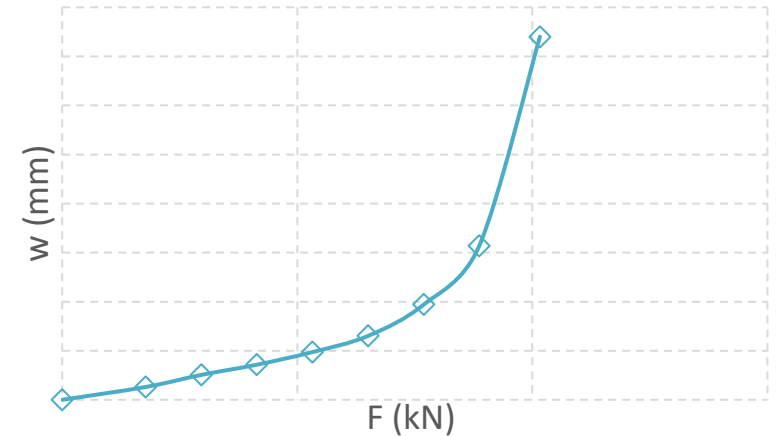
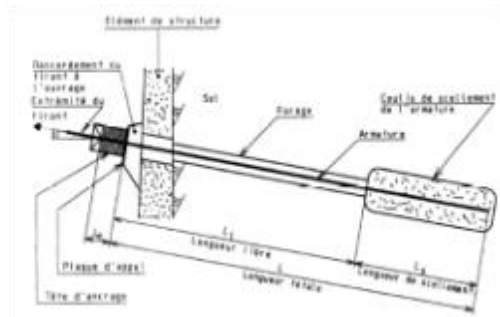
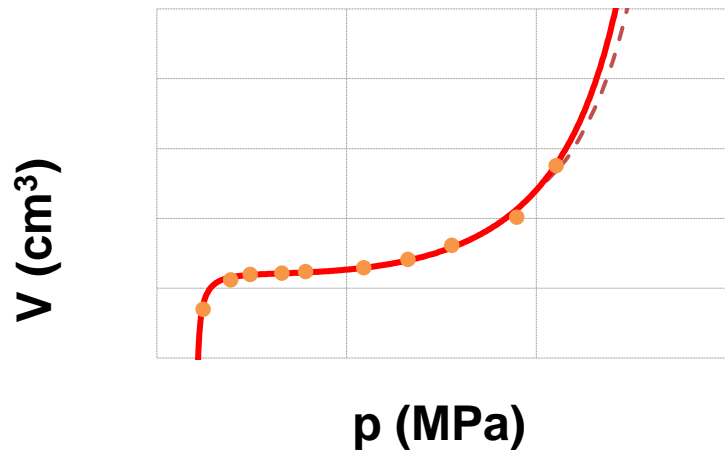
4. Conclusions

Valoriser les règles pressiométriques semi-empiriques

Travail initié pour les micropieux...

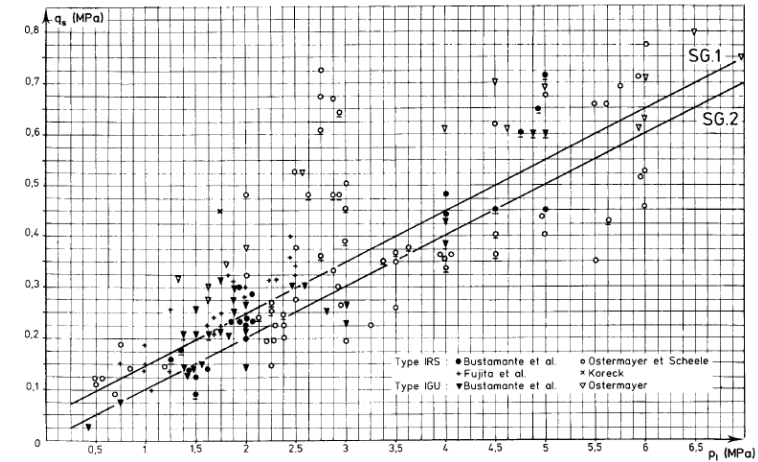
Estimation du comportement axial des ouvrages en traction (résistance/ charge critique de fluage/ déplacements)

...finalement étendu également aux tirants d'ancrage scellés



		IGU		IRS		
		α	q_s (MPa)	α	q_s (MPa)	
Sols fins		Argile	0,06 $p_{IM}+0,04$	1,8 à 2,0	0,08 $p_{IM}+0,10$	
		Limon		1,4 à 1,6		
Sols grenus	Sable	Sable	0,10 p_{IM}	1,4 à 1,5	0,10 $p_{IM}+0,05$	
		Sable graveleux		1,5 à 1,6		
	Grave	Grave sableuse		1,2 à 1,3		1,6 à 1,8
		Grave		1,2 à 1,4		
	Marne et craie			1,1 à 1,2		0,05 $p_{IM}+0,10$
Rocher altéré ou fragmenté		1,1	0,10 $p_{IM}+0,06$	1,2	0,12 $p_{IM}+0,08$	

$$R_s = \pi L_s (\alpha B) q_s,$$



Bustamante et Doix, 1985, BLPC, Une méthode pour le calcul des **tirants** et des **micropieux injectés**

Des règles semi-empiriques... encore utilisées aujourd'hui

Nécessité de confirmer leur validité

Quantifier leur dispersion conformément aux prescriptions des eurocodes

Valeur caractéristique de la résistance (probabilité fixée de mise en défaut)

$$R_{s,k} = \frac{R_s}{\gamma_{R,d}}$$

Annotations: R_s (blue arrow) is 'Valeur issue du calcul (ie des abaques)'; $\gamma_{R,d}$ (red arrow) is 'Facteur de modèle'.

(En phase de prédimensionnement uniquement car tous les tirants d'ancrage sont réceptionnés)

Différentes règles en vigueur pour des ouvrages « relativement similaires »

Micropieux
NF P94-262:2012

Tirants d'ancrages scellés
Règles TA2020

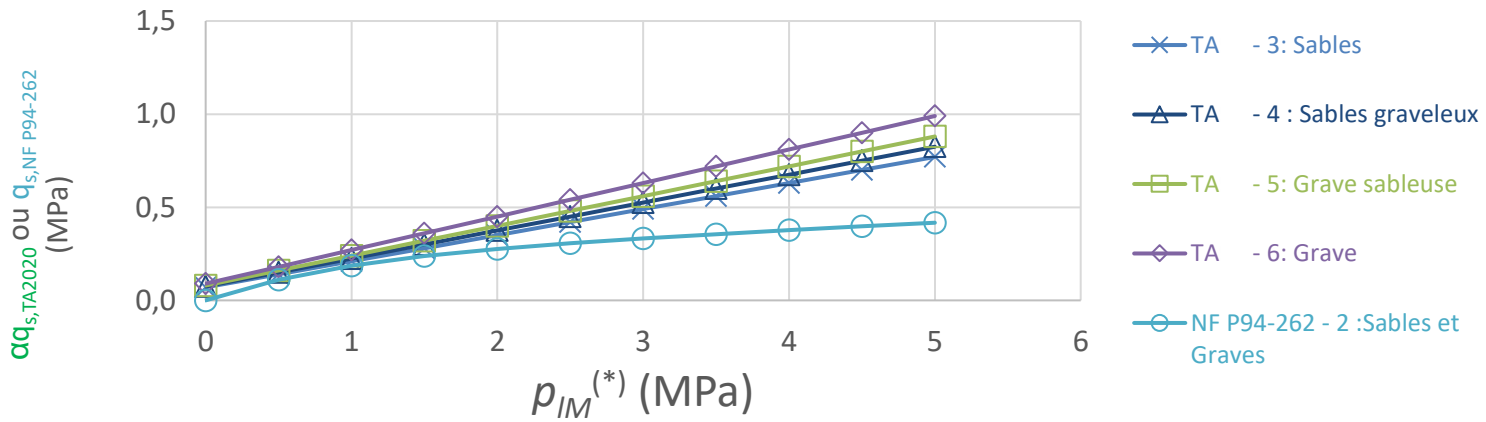
$$q_s = \alpha_{\text{pieu-sol}} f_{\text{sol}}$$

	Micropieu type III	Micropieu type IV
Argile et limon	2,7	3,4
Sable et grave	2,9	3,8
Craie	2,4	3,1
Marne	3,1	3,1

		IGU		IRS	
		α	q_s (MPa)	α	q_s (MPa)
Sols fins	Argile	1,2	0,06 $p_{IM} + 0,04$	1,8 à 2,0	0,08 $p_{IM} + 0,10$
	Limon	1,1 à 1,2		1,4 à 1,6	
Sols grenus	Sable	Sable	0,10 p_{IM}	1,4 à 1,5	0,10 $p_{IM} + 0,05$
		Sable graveleux		1,2 à 1,3	
	Grave	Grave sableuse		1,2 à 1,4	
		Grave		1,3 à 1,4	
Marne et craie		1,1 à 1,2	0,05 $p_{IM} + 0,10$	1,8	0,07 $p_{IM} + 0,13$
Rocher altéré ou fragmenté		1,1	0,10 $p_{IM} + 0,06$	1,2	0,12 $p_{IM} + 0,08$

$$R_s = \pi L_s B q_s$$

$$R_s = \pi L_s (\alpha B) q_s$$



Analyse des essais de chargement à la rupture (préalables et de conformité) disponibles à la SNCF, à RTE et au Cerema

350 essais analysés... mais seulement une cinquantaine d'essais conservée

Conditions géotechniques complexes, conditions d'injection difficilement renseignées, charge maximale d'essai insuffisante, etc.

Ajout des essais utilisés pour établir les abaques TA95

Analyse statistique globale



Classement des conditions d'exécution?

=> classement des tirants d'ancrage scellés (différents des micropieux type III et IV)

IGU

IRS

Pression d'injection

Entre $0,5 p_{IM}$ et p_{IM}

Supérieur à p_{IM}

Faible débit d'injection

Volumes d'injection en accord avec valeurs de l'augmentation de diamètre α

Diamètre de forage entre 90 et 250 mm

Longueurs scellées entre 4,75 et 18,00 m

Nombre de mesures	Gravitaire	Autoforé	IGU	IRS	Sous-total
Argiles & limons	21	11	39	56	<u>127</u>
Sables & graves	1	4	42	114	<u>161</u>
Craies	2	0	1	3	<u>6</u>
Marnes	0	0	5	19	<u>24</u>
Roches altérées	2	0	10	20	<u>32</u>
Diverses	2	4	2	0	<u>8</u>
<u>Sous-total</u>	<u>28</u>	<u>19</u>	<u>99</u>	<u>212</u>	<u>358</u>

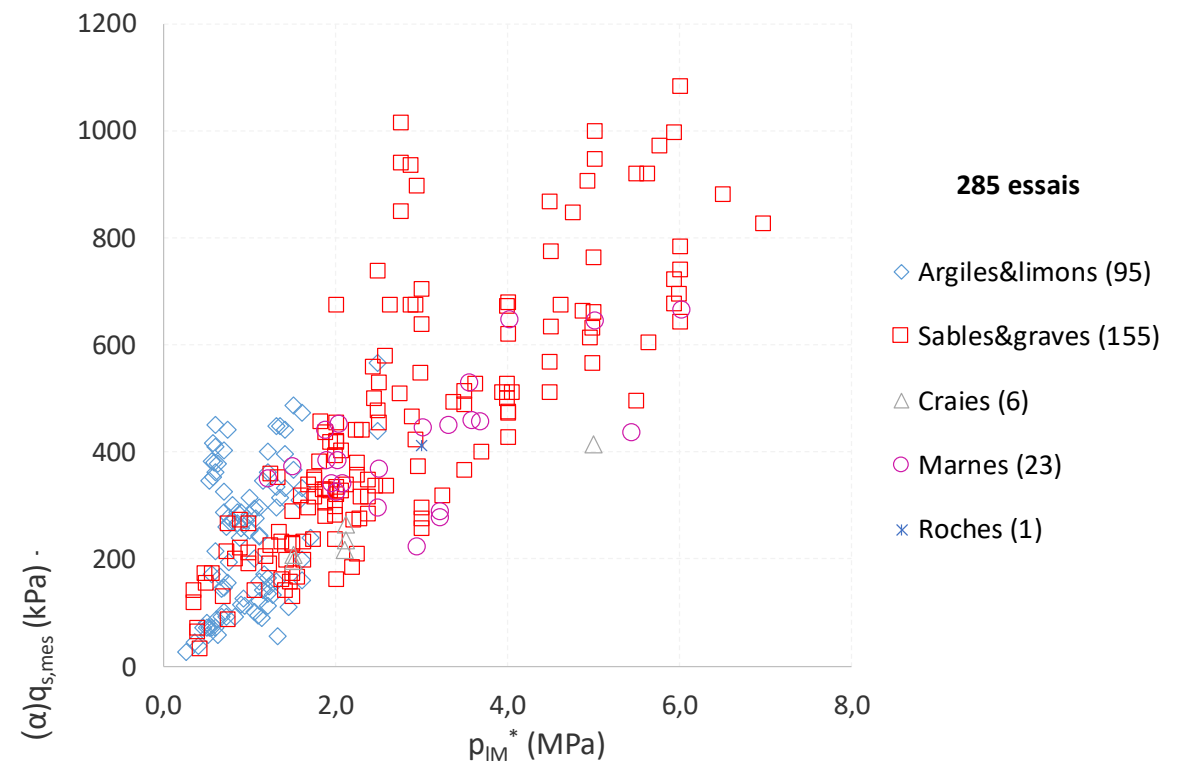
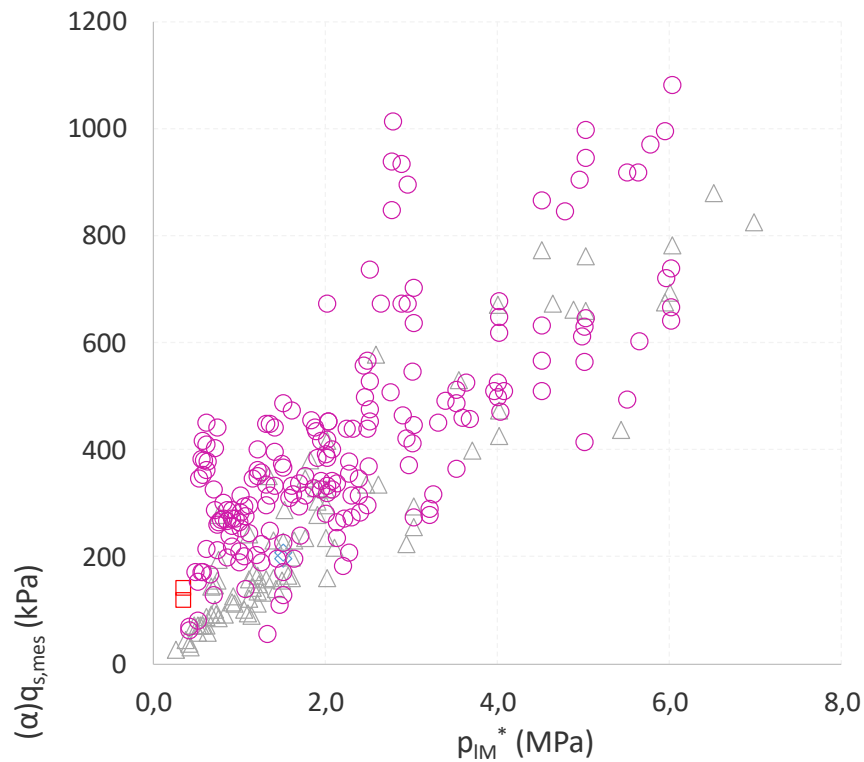
Certaines mesures sont des mesures globales (scellement dans terrains différent / caractéristiques mécaniques différentes)

*Micropieux
uniquement*

14 éléments instrumentés

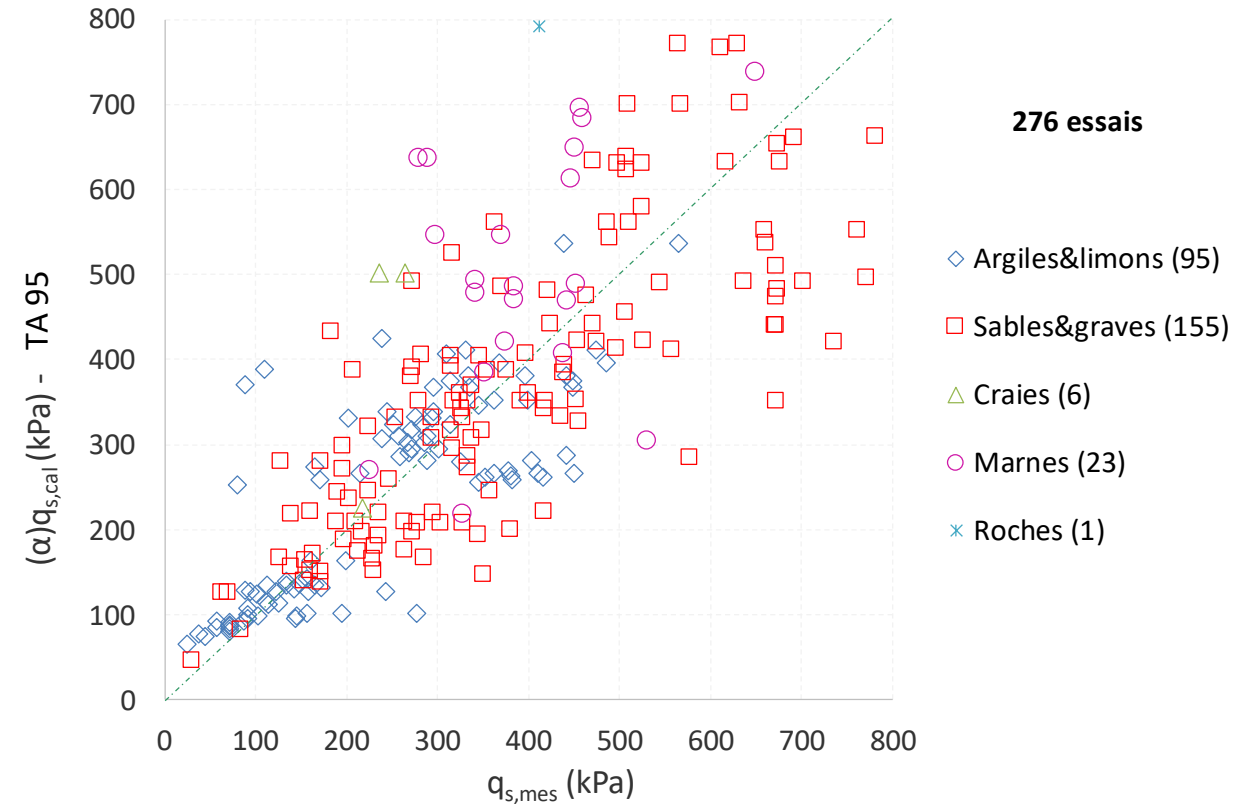
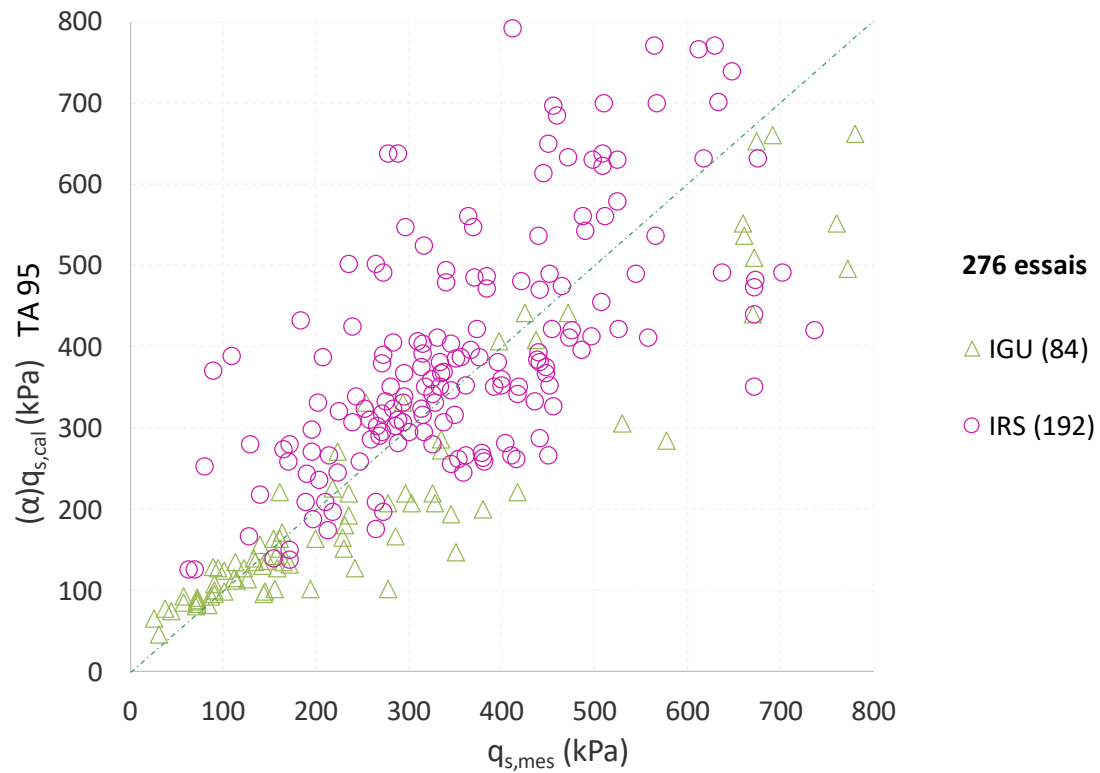
Variation du frottement axial unitaire mesuré :

- par technique d'exécution
- par type de terrain



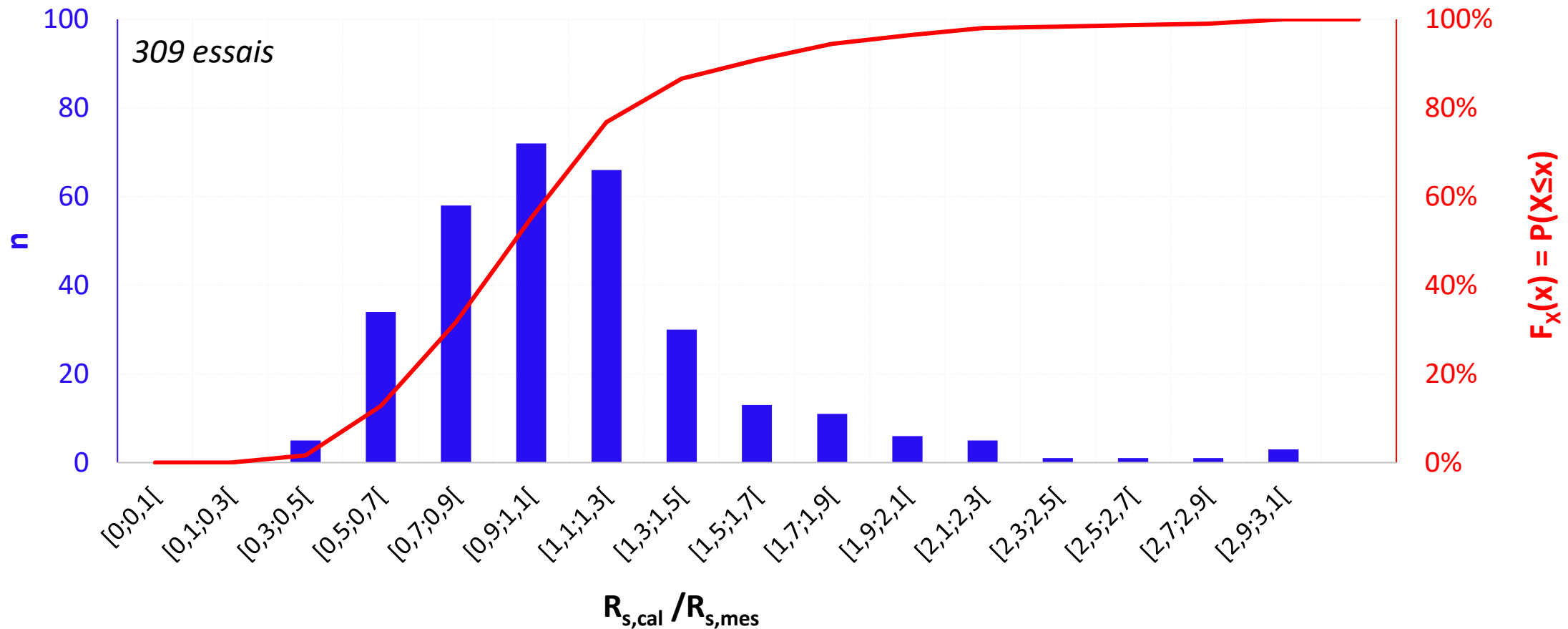
Comparaison des mesures ($q_{s,mes}$) aux valeurs calculées avec les abaques ($q_{s,cal}$):

- par technique d'exécution
- par type de terrain



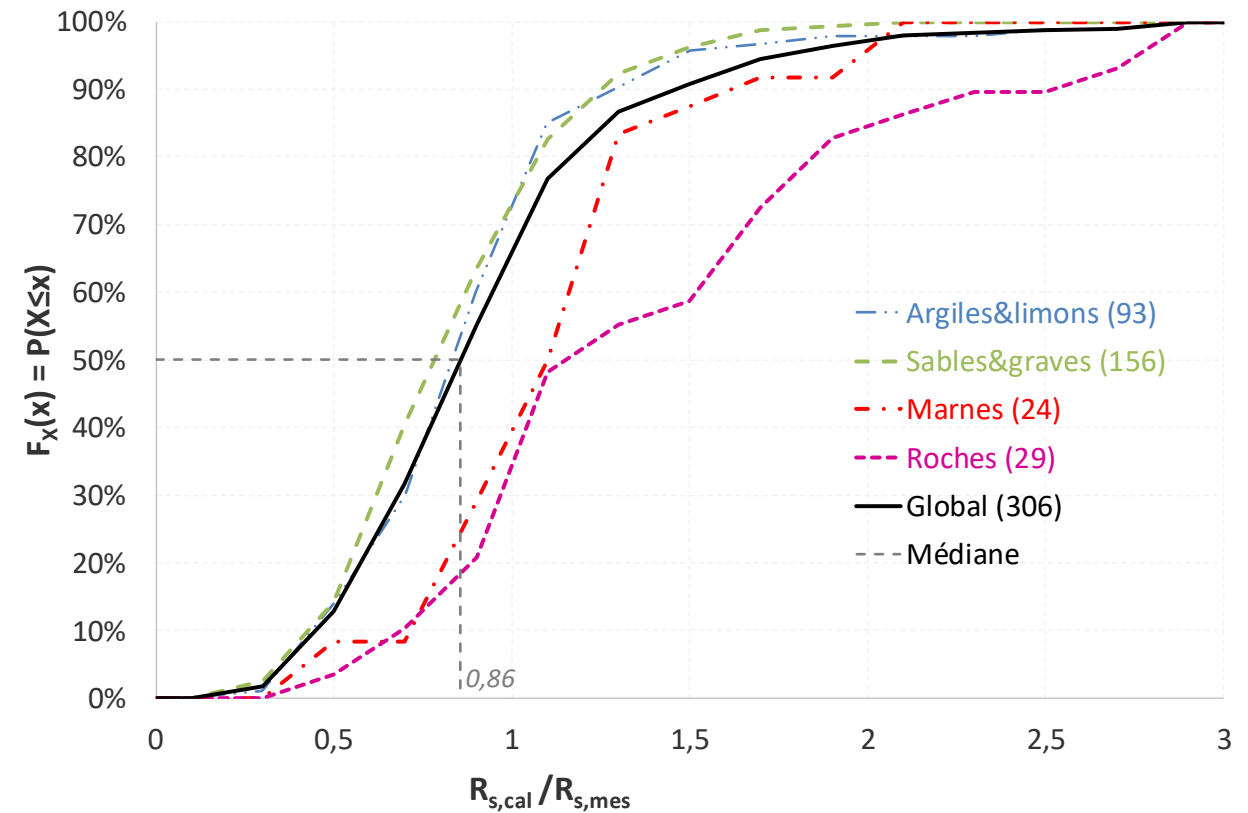
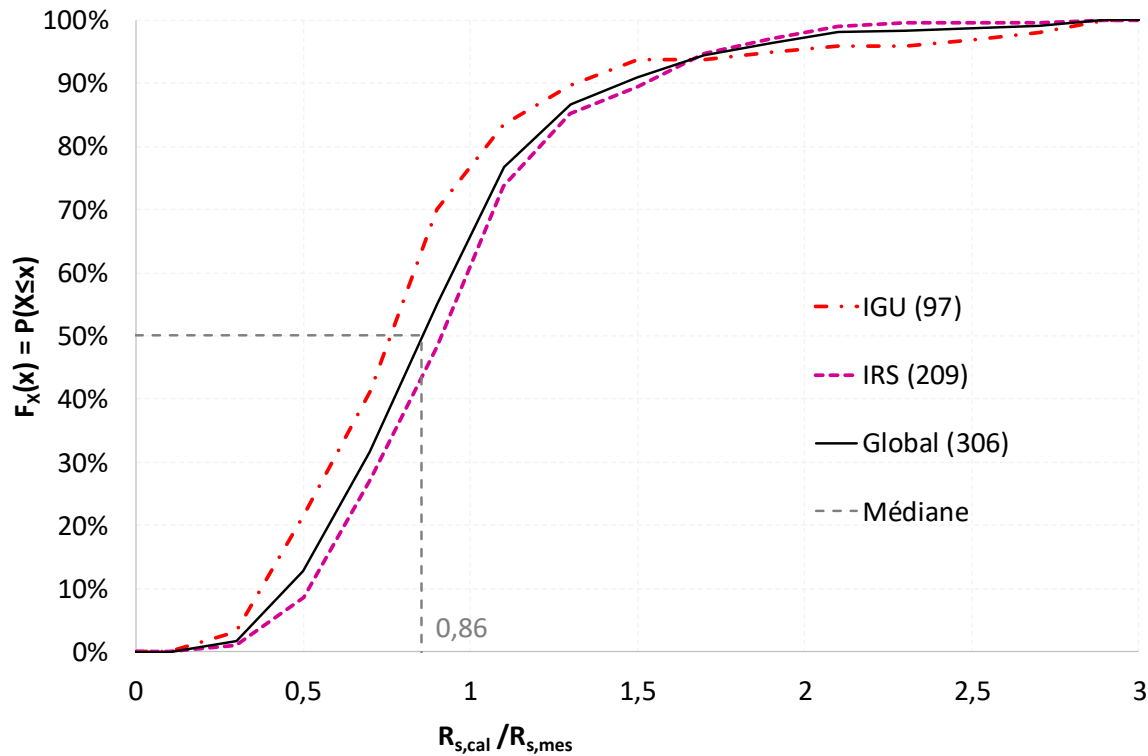
Rapport entre les résistances calculées et mesurées ($R_{s,cal}/R_{s,mes}$)

- Histogramme des effectifs
- Fonction de répartition

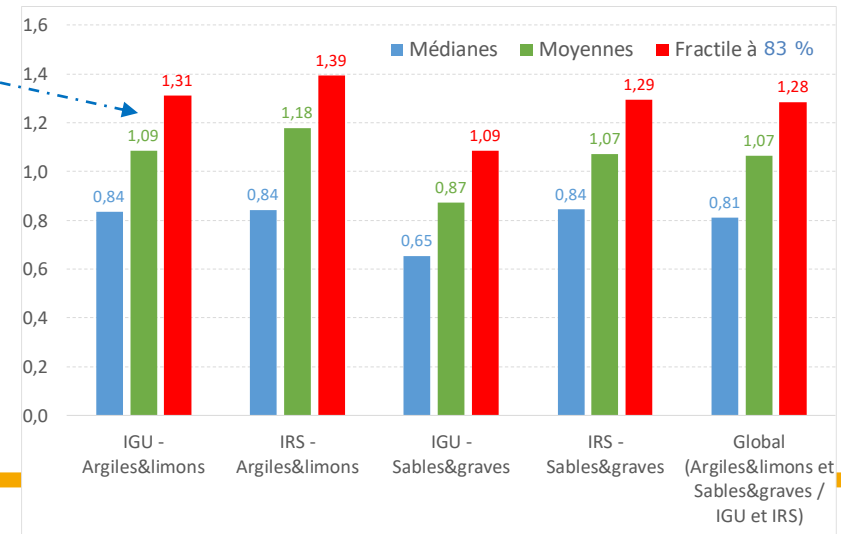
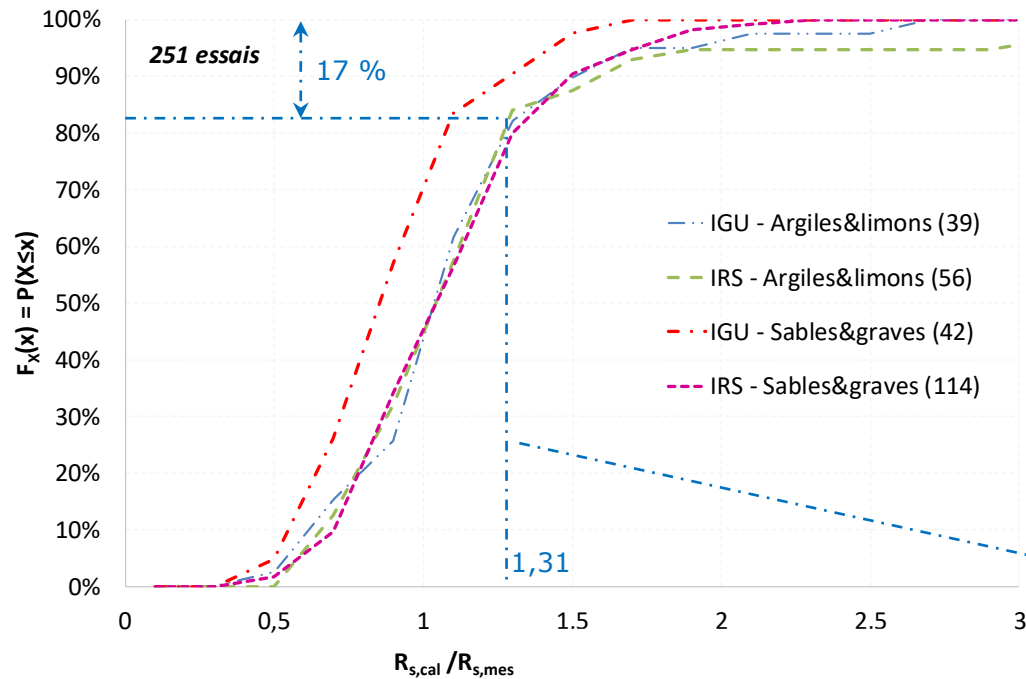


Fonctions de répartition du rapport entre les résistances calculées et mesurées ($R_{s,cal}/R_{s,mes}$):

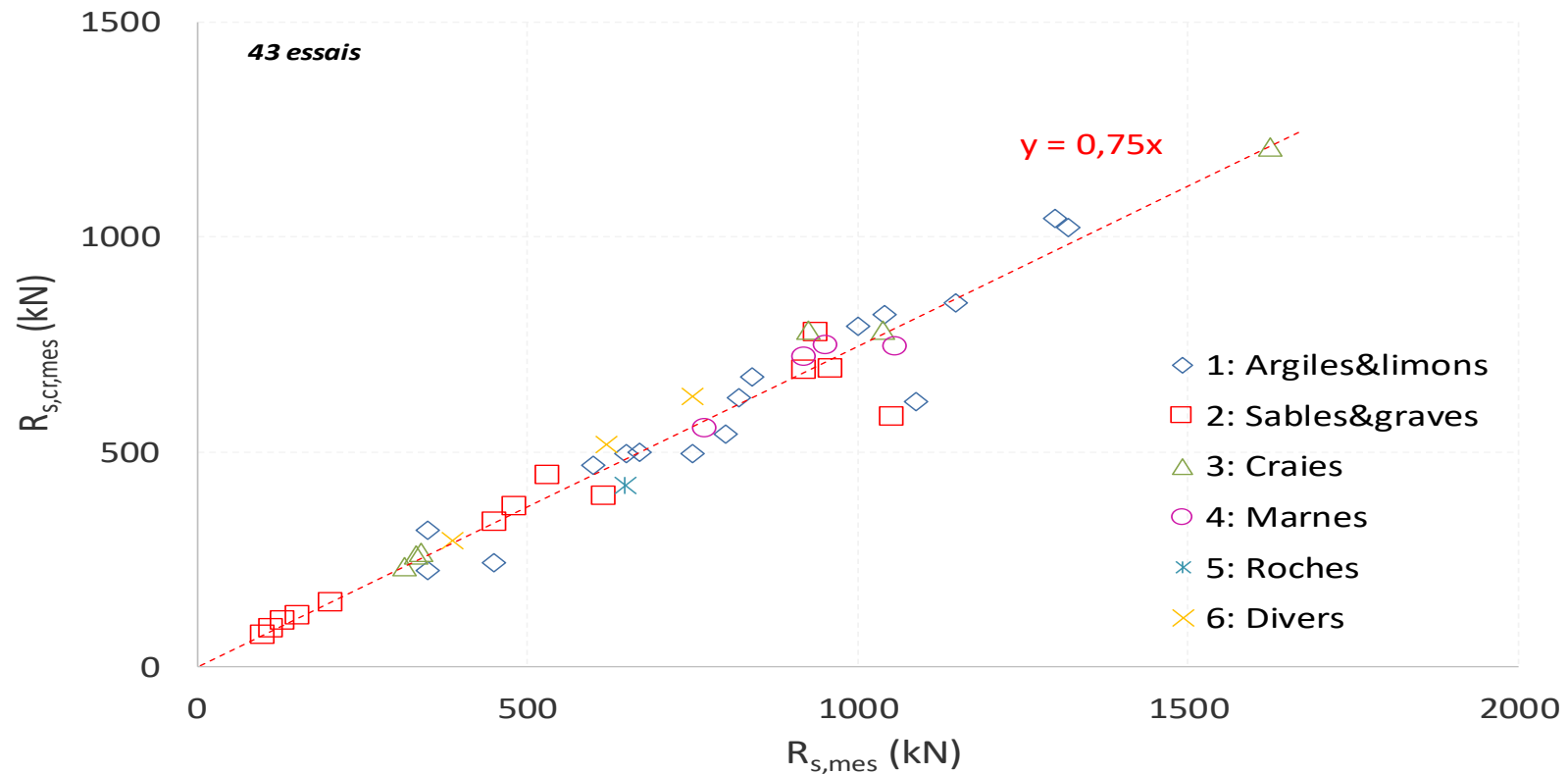
- par technique d'exécution
- par type de terrain



... au facteur de modèle qui permet de surestimer la résistance avec une probabilité désormais acceptable



Rapport entre la charge critique de fluage $R_{s,cr}$ (vérifications ELS) et la résistance R_s



$\Rightarrow R_{s,cr}/R_s = 0,75$ (proche de 0,7 conventionnellement utilisé)

Sous réserve des conditions d'exécution « strictes » associées aux tirants IGU et IRS (pressions, volumes et débits d'injection), les abaques de prédimensionnement, **simples ($q_s = ap_{IM} + b$)** sont **bien calés!**

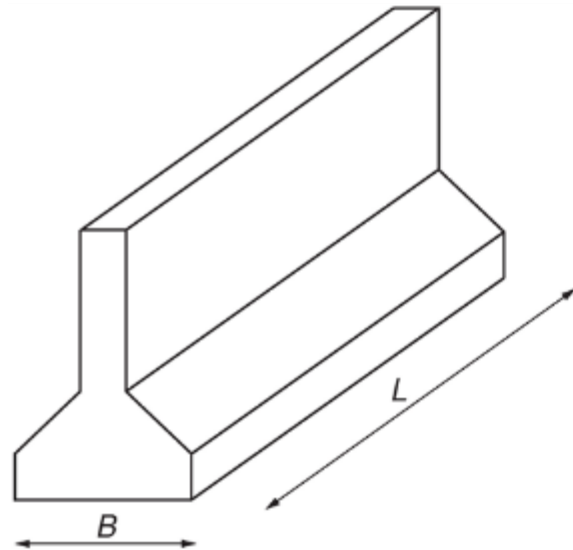
La dispersion est **quantifiée et limitée.**

Pour les sols fins et grossiers, quel que soit le type d'injection sous-pression (IRS et IGU), une mise en défaut similaire à celle des fondations profondes (83 %) peut être couverte par un **facteur de modèle entre 1,3 à 1,4.**

La **charge critique de fluage** représente en moyenne **75 %** de la résistance (ultime / limite).

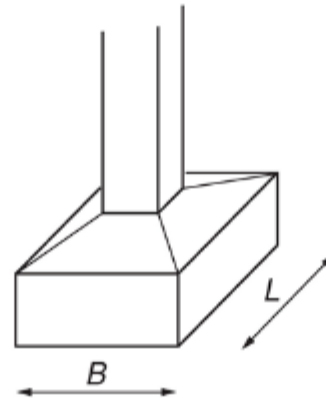
- ▶ Estimation des tassements à partir du pressiomètre
- Cas élémentaires : Modèles semi-empiriques dérivés du pressiomètre (méthode directe)
 - ❖ Semelle isolée/filante : Modèle de Ménard
 - ❖ Pieu isolé : Modèle de Frank et Zhao
 - ❖ Ecran de soutènement : Modèle de Schmitt
 - Peuvent servir de base de calage (dans domaine de validité = gamme de déformation)
- Cas complexes : Modèles numériques ou semi-analytiques dérivés de la théorie de l'élasticité (méthode indirecte)
 - ❖ Approche forfaitaire : $E = k E_M/a$ par couche
 - ❖ **Approche élastique non linéaire ARSCOP : $E = f(E_M, \epsilon)$**

► Type des fondations superficielles



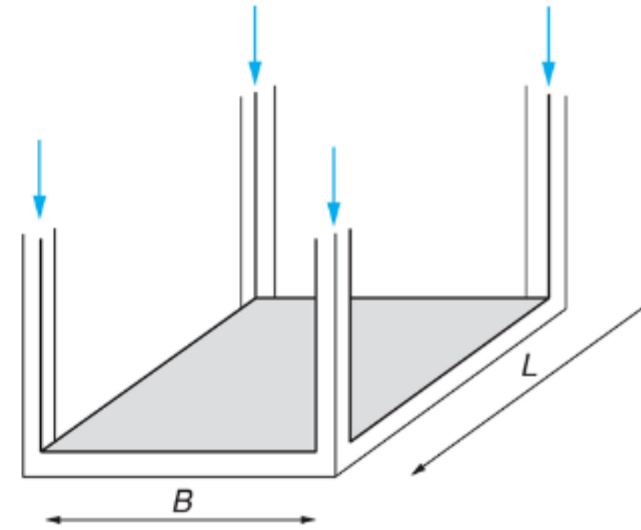
$B \times L \ll$ aire de l'ouvrage porté

(a) semelle filante



$B < L$

(b) semelle isolée



$B \times L$: aire de l'ouvrage porté

(c) radier (ou dallage)

Fondation relativement indéformable
par rapport au terrain

Fondation relativement déformable
par rapport au terrain

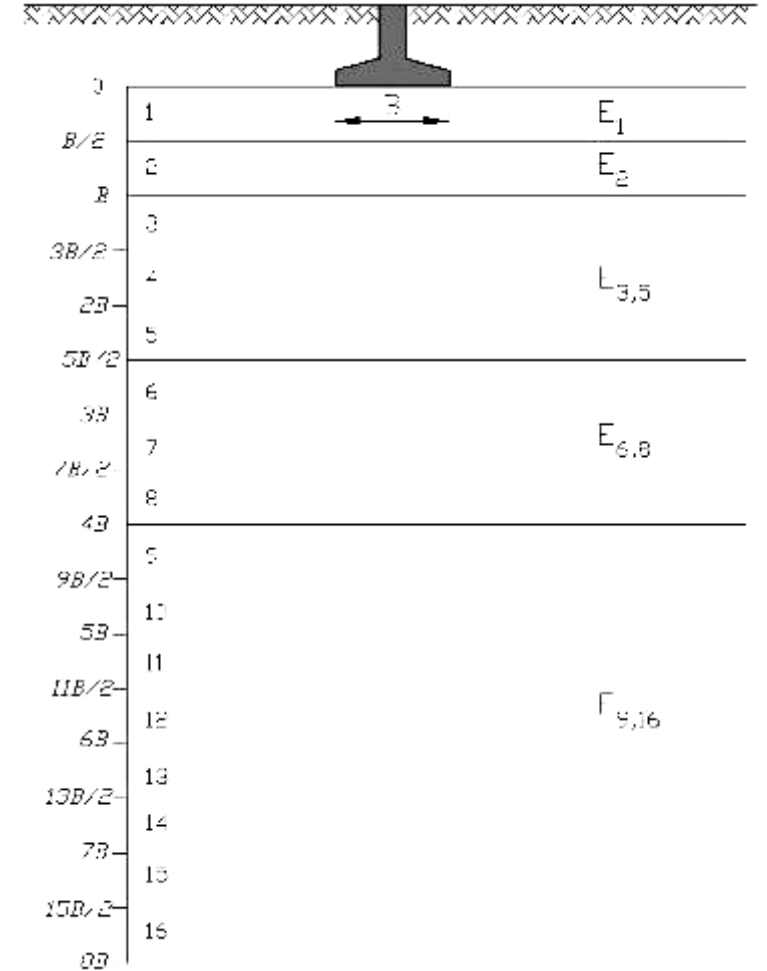
► Semelle isolée : modèle de Ménard

$$s = \frac{q - q_0}{9} \left(\frac{\lambda_c B \alpha}{E_c} + 2 \frac{B_0}{E_d} \left(\frac{\lambda_d B}{B_0} \right)^\alpha \right)$$

$$E_c = E_1$$

$$\frac{1}{E_d} = \frac{0,25}{E_1} + \frac{0,30}{E_2} + \frac{0,25}{E_{3,5}} + \frac{0,10}{E_{6,8}} + \frac{0,10}{E_{9,16}}$$

L/B	Circle	Square	2	3	5	20
λ_c	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.50
λ_d	1.00	1.12	1.53	1.78	2.14	2.65

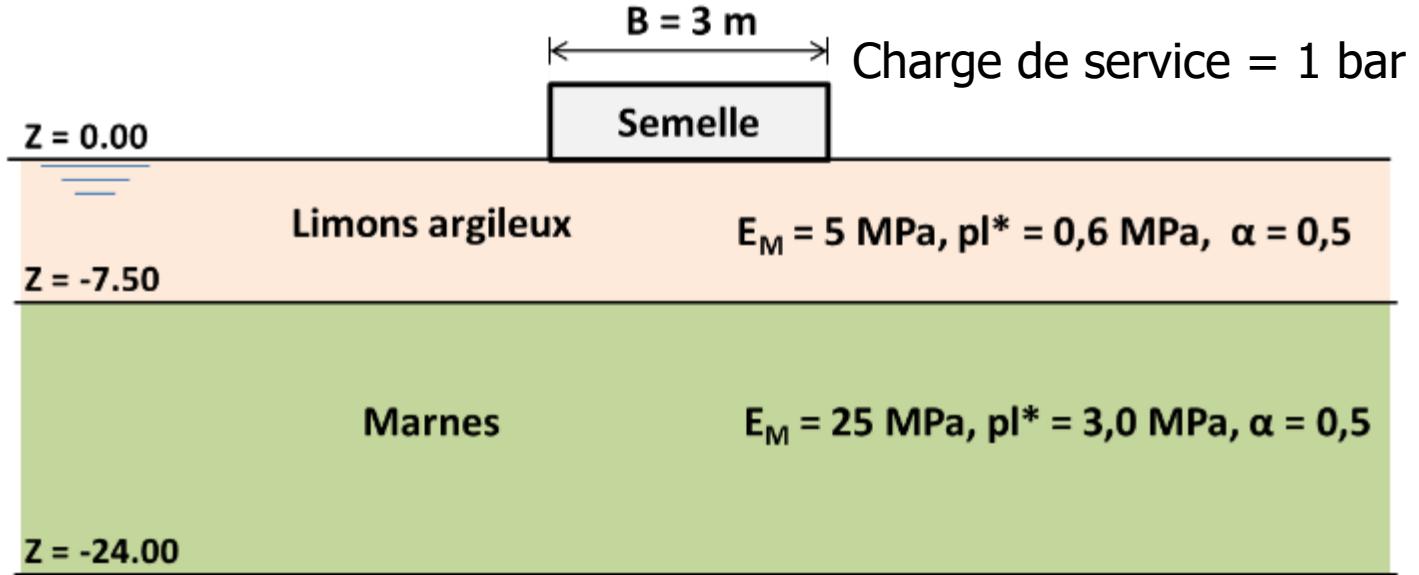


► Exemple d'une semelle isolée : modèle de Ménard

$$s = \frac{q - q_0}{9} \left(\frac{\lambda_c B \alpha}{E_c} + 2 \frac{B_0}{E_d} \left(\frac{\lambda_d B}{B_0} \right)^\alpha \right)$$

$$E_c = E_1$$

$$\frac{1}{E_d} = \frac{0,25}{E_1} + \frac{0,30}{E_2} + \frac{0,25}{E_{3,5}} + \frac{0,10}{E_{6,8}} + \frac{0,10}{E_{9,16}}$$



L/B	Circle	Square	2	3	5	20
λ_c	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.50
λ_d	1.00	1.12	1.53	1.78	2.14	2.65

$$E_1 = E_2 = E_{3,5} = 5 \text{ MPa}$$

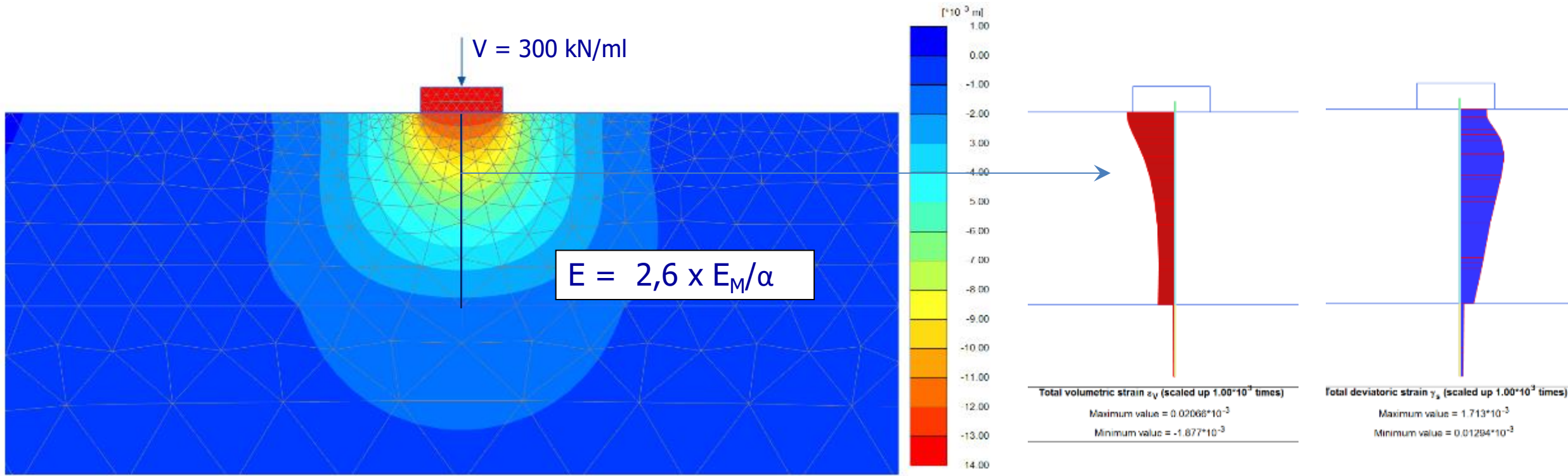
$$E_{6,8} = E_{9,16} = 25 \text{ MPa}$$

$$E_c = 5,00 \text{ MPa} / E_d \sim 5,95 \text{ MPa}$$

$$\lambda_c = 1,50 / \lambda_d = 2,65 / \alpha = 0,5$$

$$s \sim 1,3 \text{ cm}$$

► Exemple d'une semelle isolée : confrontation au modèle de Ménard

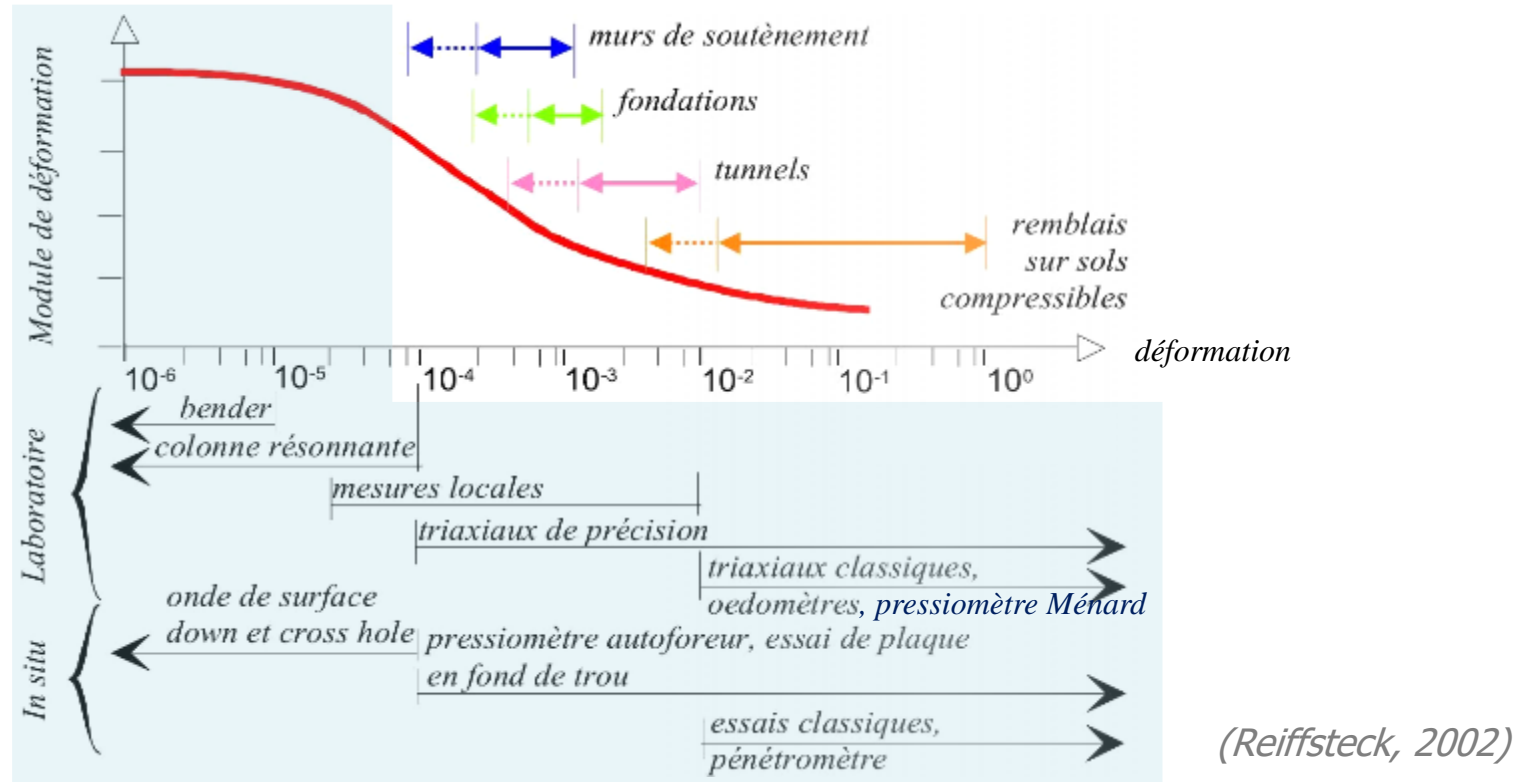


Tassement de 1,3 cm pour $E = 2,6 \times E_M/\alpha$

Déformation volumique
de l'ordre de 10^{-3}

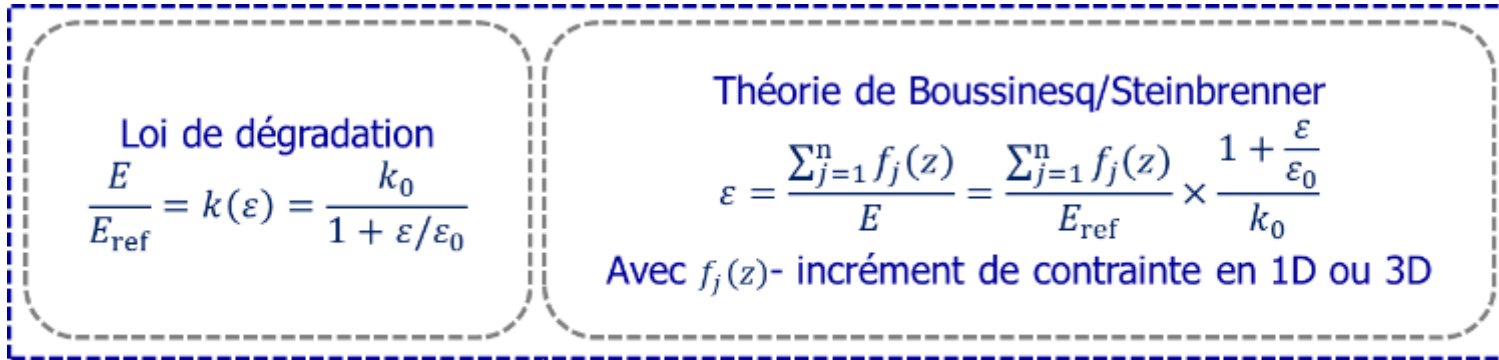
Distorsion
de l'ordre de 10^{-3}

► Notion de la décroissance/dégradation du module de déformation



- ❑ Variation du module avec la déformation traduite par la notion de courbe de « dégradation »
- ❑ Niveau de déformation des ouvrages géotechniques courants : 10^{-4} (0,1cm/10m) à 10^{-2} (10cm/10m)

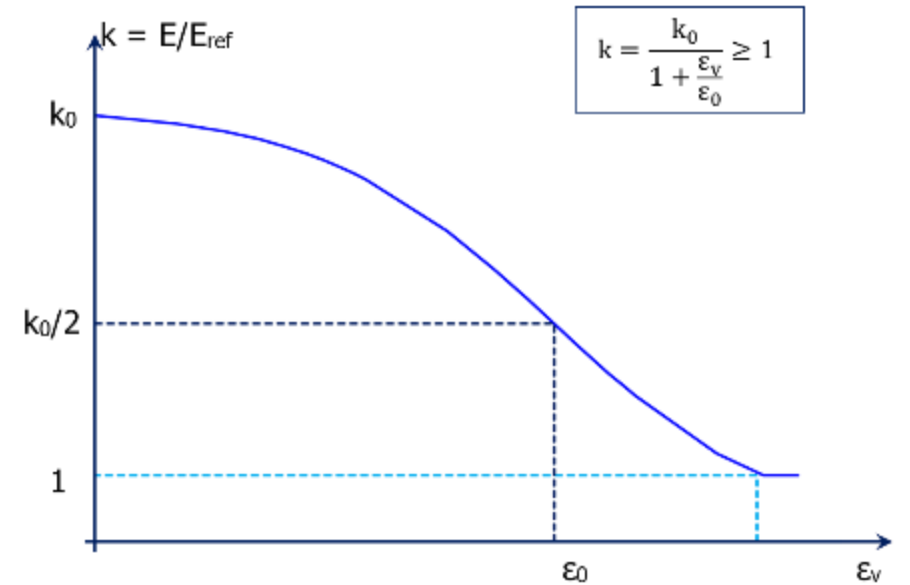
► Mise en œuvre d'un modèle élastique non linéaire



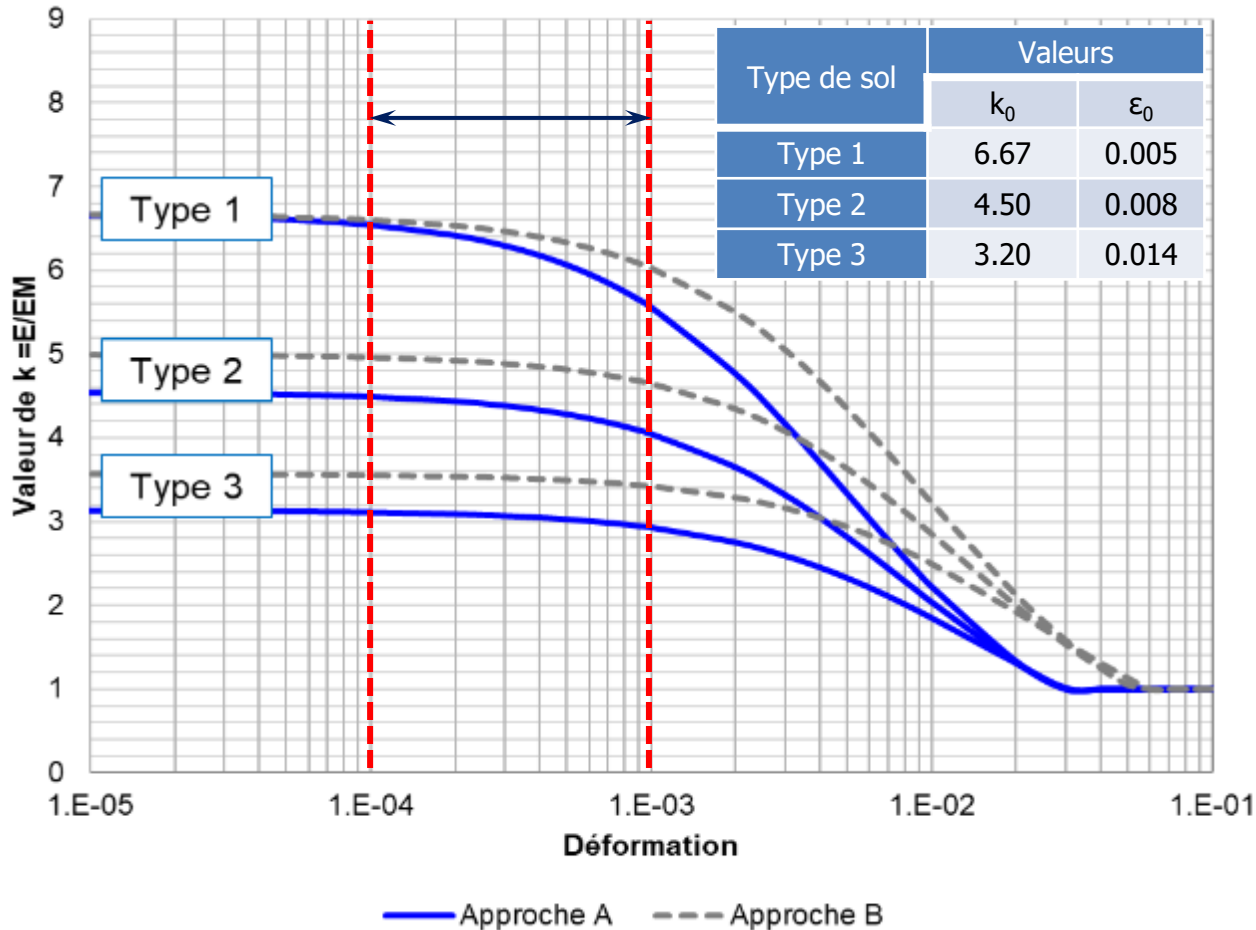
$$\varepsilon = \frac{\frac{\sum_{j=1}^n f_j(z)}{E_{ref}} \times \frac{1}{k_0}}{1 - \frac{\sum_{j=1}^n f_j(z)}{E_{ref}} \times \frac{1}{\varepsilon_0 k_0}}$$

→ $s = \varepsilon \times H$

Mise en œuvre d'un modèle élastique non-linéaire simplifié



► Loi non linéaire à partir du pressiomètre



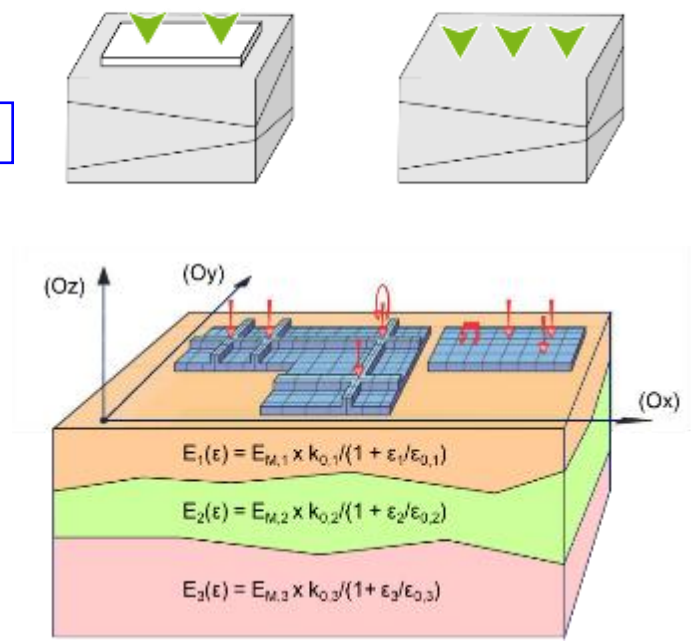
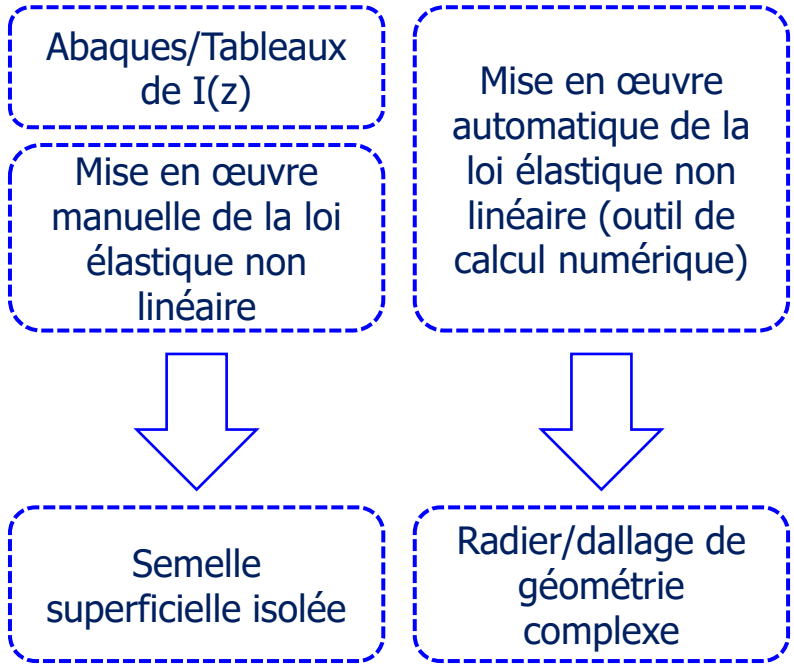
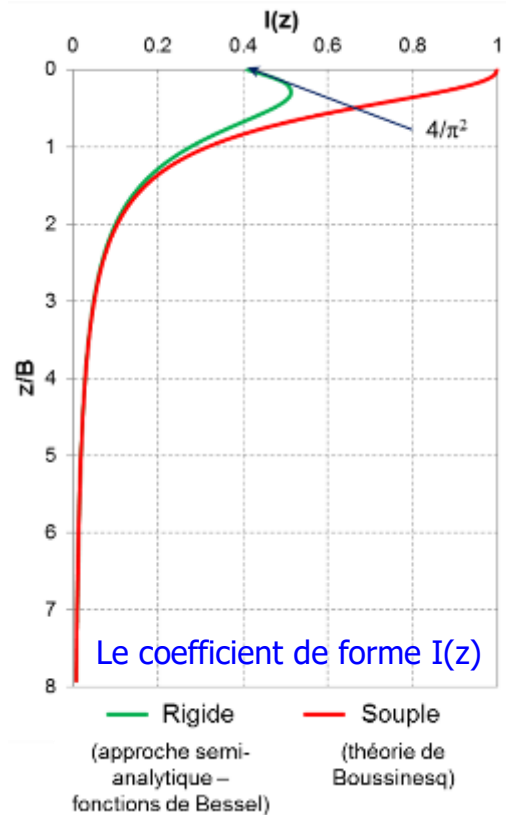
$$\frac{E}{E_M} = k(\varepsilon) = \frac{k_0}{1 + \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}}$$

Où k_0 et ε_0 sont deux paramètres calés à partir du modèle de Ménard pour semelle isolée

Type de sol	Type
Sables et graves Roche très fracturée	1
Sables, graves serrés Limons	2
Argiles, argiles surconsolidées Roche peu fracturée	3

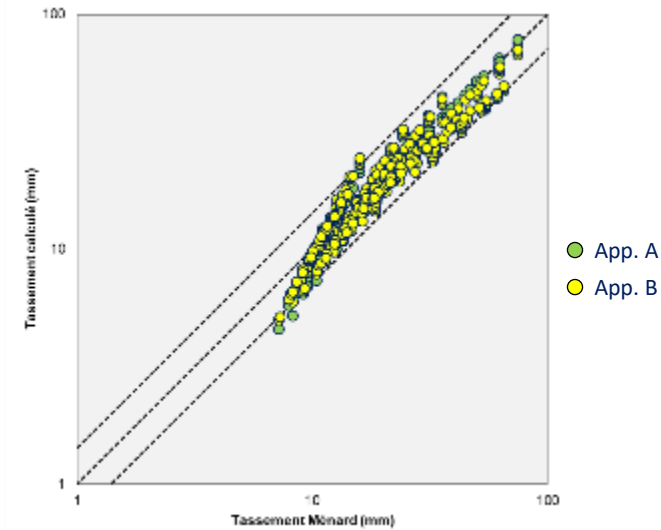
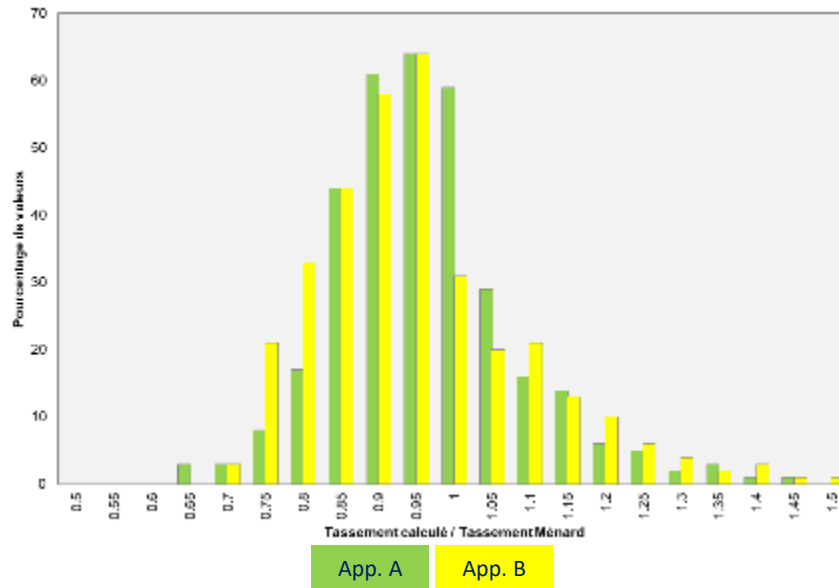
- ❑ Calage à partir du modèle de Ménard (semelle isolée)
- ❑ Validation : REX centrales EDF, IGH, remblai de préchargement

► Vers une approche de calcul unifiée du tassement

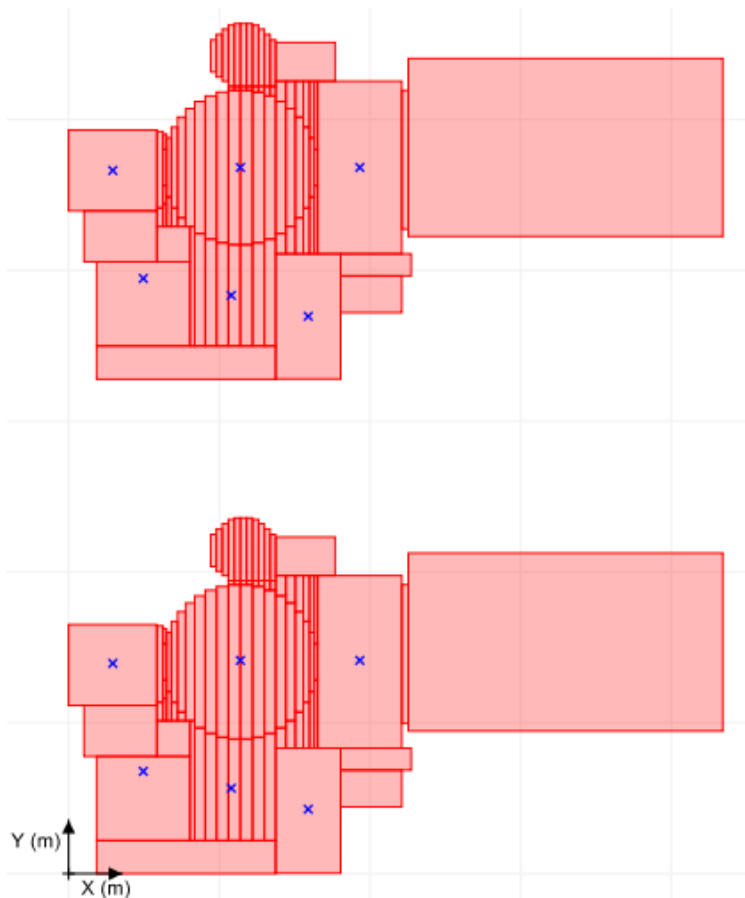


► Cas des semelles isolées : Comparaison avec le modèle de Ménard

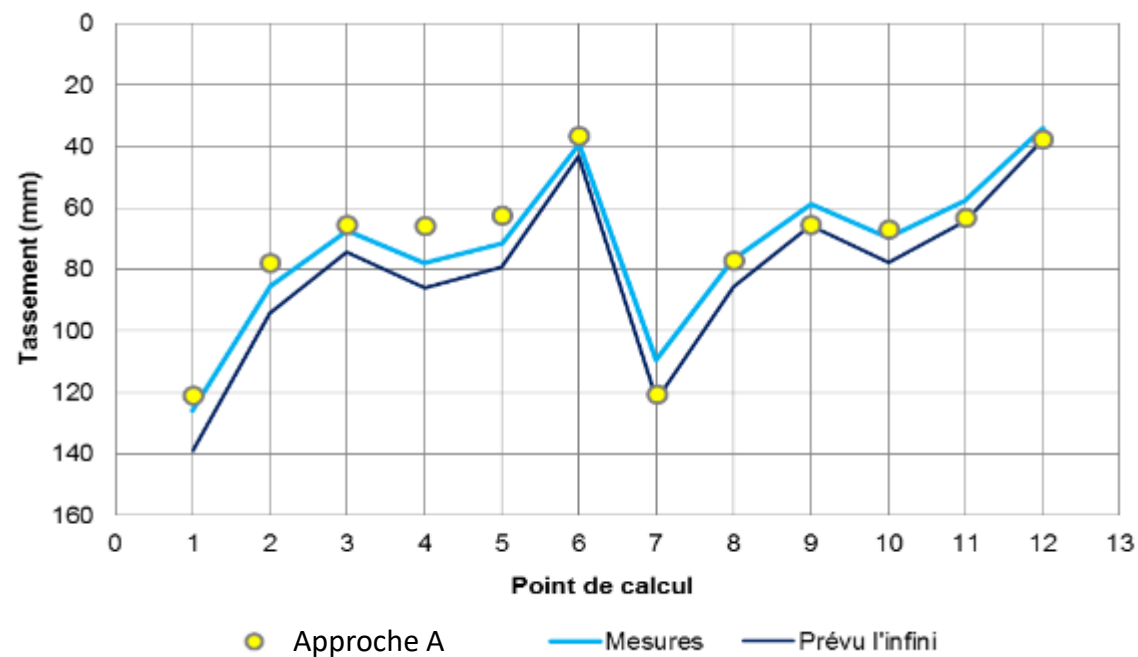
Géométrie	$Q = 300 \text{ kPa}$
	$B = 1.5 \text{ m}, 2 \text{ m}, 2.5 \text{ m et } 3 \text{ m}$
	$L/B = 1, 2, 3, 5, 10, 15 \text{ et } 20$
Ex 1	$E_M = 10 \text{ MPa et } p_l^* = 1 \text{ MPa}$
Ex 2	$E_M = 10 \text{ MPa et } p_l^* = 1 \text{ MPa pour } 0 \leq z/B < 4.5$ $E_M = 20 \text{ MPa et } p_l^* = 2 \text{ MPa pour } z/B > 4.5$
Ex 3	$E_M = (10+z/B) \text{ MPa et } p_l^* = (1+z/B) \text{ MPa}$



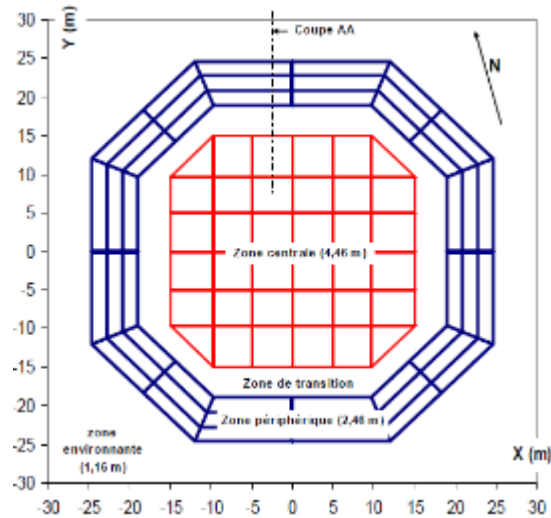
► Cas d'une installation nucléaire sur radier général



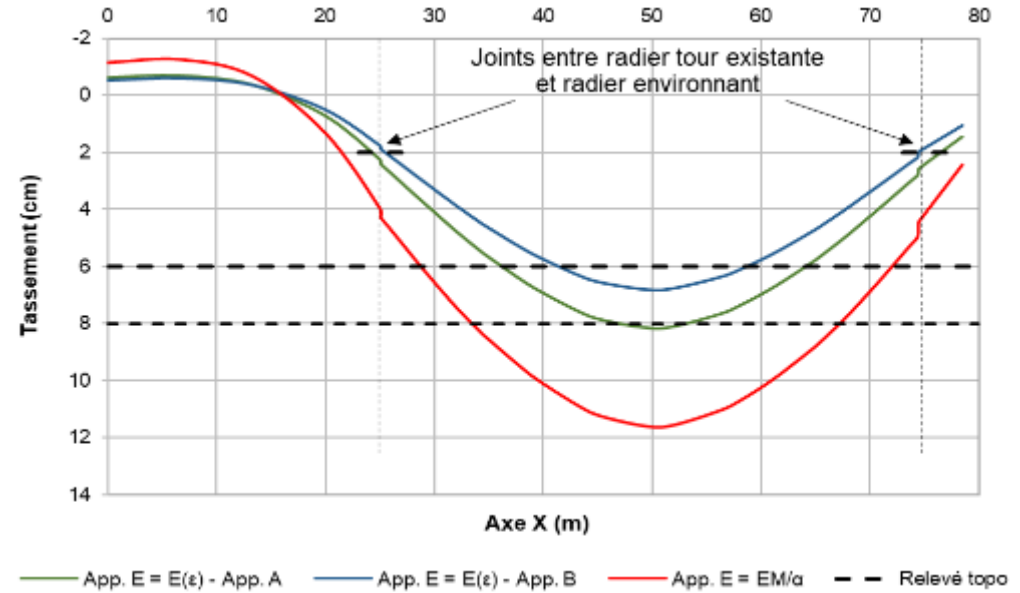
Formation	E_M (MPa)	p_f (MPa)	p_l (MPa)	α
Remblais	8.8	0.6	1.3	–
Sables et graves	20.0	1.0	2.2	0.33
Sables jaunes	37.0	2.7	4.2	0.33
Argiles sableuses	51.9	3.0	4.3	0.67
Argiles compactes	54.8	3.4	4.3	0.67
Sables grossiers	76.1	4.1	4.5	0.50



► Cas d'un IGH sur radier général : CB21 (200 m)



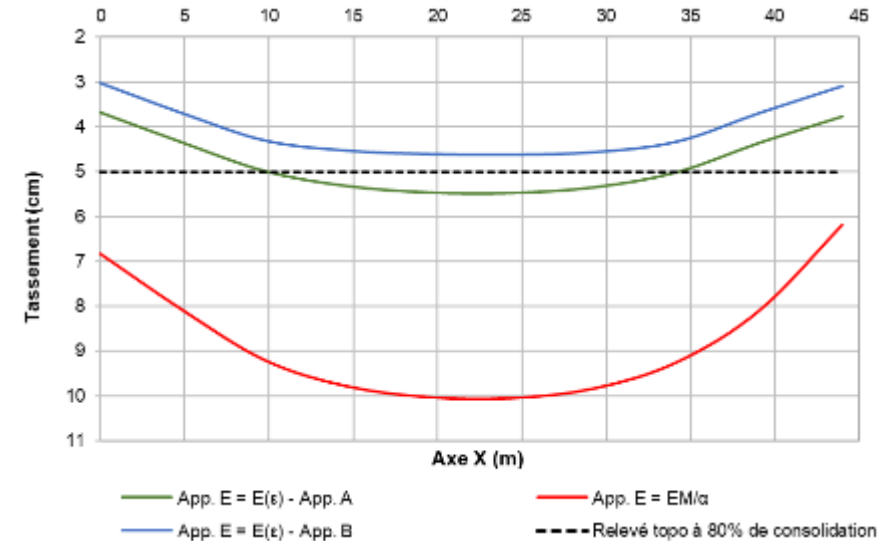
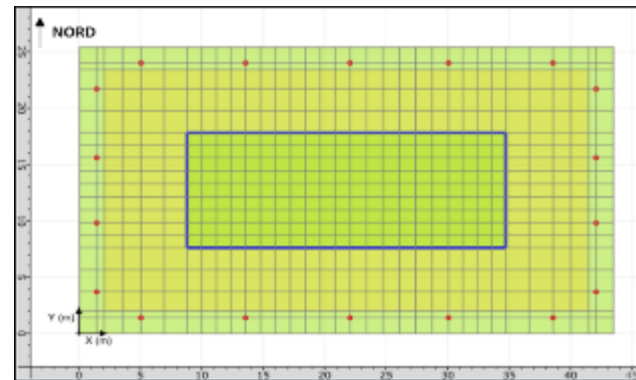
Type de sol	Base de couche (mNGF)	E_M (MPa)	ρ_i^* (MPa)
Sables et graviers	17.2	28	3.2
Sables supérieurs	5.8	68	5.1
Fausses Glaises	0.4	17	2.1
Sable d'Auteuil	-6.3	50	5.1
Argiles Plastiques	-22.3	36	3.4



► Cas d'un IGH sur radier général : Aurore (100 m)



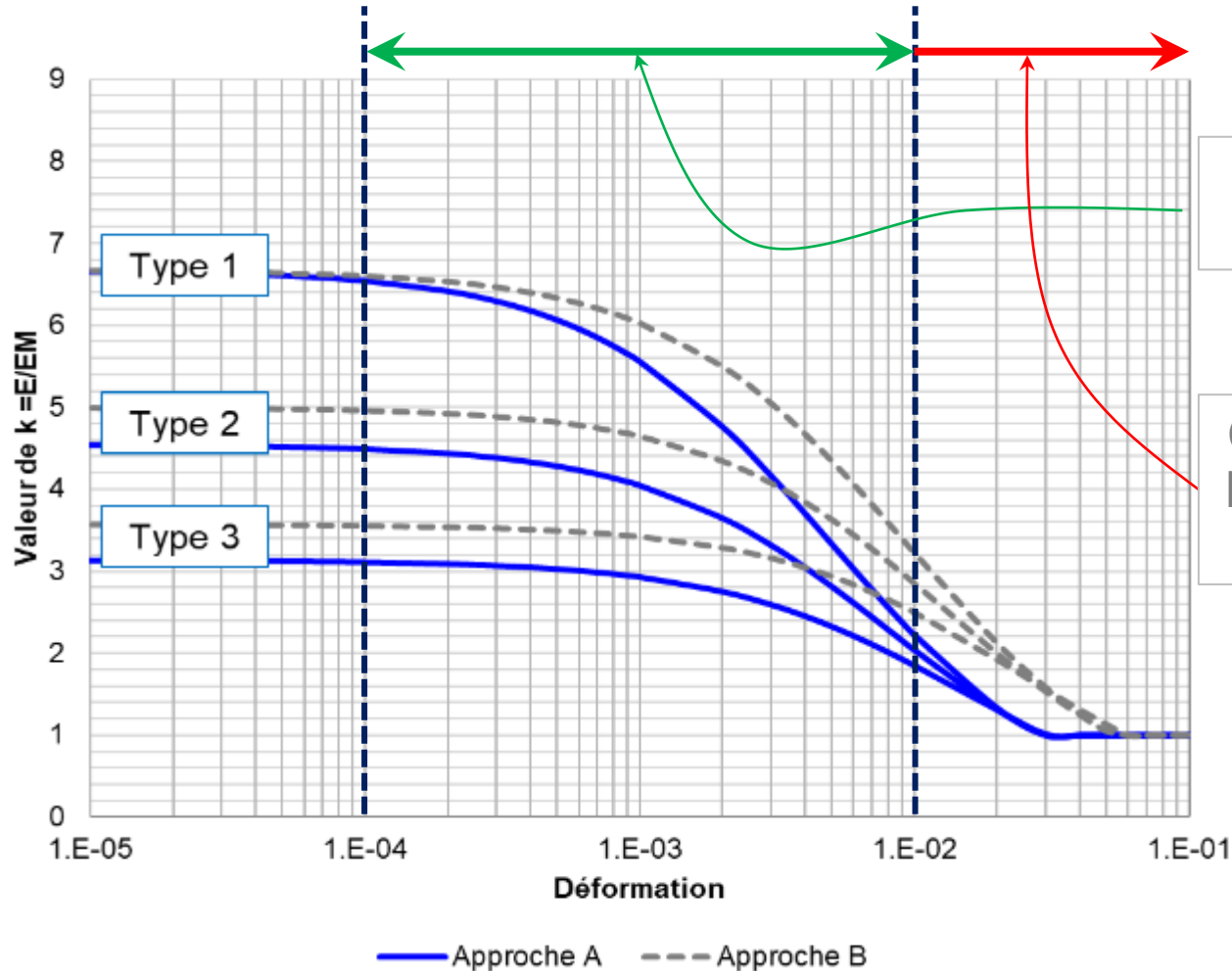
Formation	Cote base (NGF)	E_M (MPa)	p_l (MPa)
Alluvions Anciennes	20	35	3.8
Alluvions Anciennes (Zone colluvionée)	18	25	2.7
Calcaire Grossier	13	75	4.4
Sables supérieurs	1	90	4.5
Fausses Glaises (Faciès silto-argileux)	-4	25	2.7
Fausses Glaises (Faciès silto-sableux)	-8	75	4.5
Sables d'Auteuil	-10	60	4.7
Argiles Plastiques	-25	20	1.7
Marno-calcaire de Meudon	-40	140	4.6



► Récapitulatif

Type d'ouvrage	Ouvrage	Type de sol concerné	Tassement calculé (mm)	Tassement mesuré (mm)
Centrales nucléaires	Site n°1	Sables, sables graves et argiles	37 à 121 mm	38 à 139 mm
	Site n°2	Calcaires altérés et compacts	30 mm	26 à 31 mm
	Site n°3	Sables, limons, argiles des Flandres	125 à 310 mm	132 à 281mm
	Site n°4	Marnes altérées et compactes	41 à 95 mm	48 à 92 mm
	Site n°5	Calcaires altérées et compactes	266 à 389 mm	286 à 290 mm
Tours de grande hauteur	CB1	Sables, sables graves et argiles plastiques	72 à 86 mm	60 à 80 mm
	Majunga	Calcaire grossier, sables denses et argiles plastiques	43 à 54 mm	55 mm
	Aurore	Calcaire grossier, sables denses et argiles plastiques	45 à 55 mm	50 mm
	Trinity	Calcaire grossier, sables et argiles plastiques	20 à 33 mm	20 à 35 mm
Remblais	R4	Sables et argiles des Flandres	33 mm	30 à 40 mm
	R5	Sables et argiles des Flandres	46 à 50 mm	43 à 46 mm
Réservoir	N°2	Argiles	349 mm	337 mm
	N°4	Argiles	216 mm	220 mm

► Domaine d'application



Gamme de déformation des ouvrages courants :
 10^{-4} (0,1cm/10m) à 10^{-2} (10cm/10m)

Gamme de déformation élevée (au-delà de 10^{-2}) :
 l'approche nécessite d'être complétée par d'autres
 essais spécifiques

► Conclusion sur l'évaluation des tassements

- Les lois de décroissance proposées à partir du pressiomètre rendent compte d'un comportement élastique non linéaire du terrain permettant une approche de calcul unifiée des tassements sous les semelles et les radiers.
- Des bases expérimentales pour caler ces lois de décroissance sont disponibles et pérennisées.
- Les lois peuvent être étendues à l'étude d'une fondation superficielle quelconque dès lors que les déformations induites par celle-ci restent compatibles avec la gamme de déformation sur laquelle le calage des courbes proposées a été mené, soit pour des déformations comprises entre 10^{-4} à 10^{-2} .
- Ces lois peuvent également être étendues à d'autres ouvrages, sous réserve toujours de vérifier que les déformations induites par celle-ci restent compatibles avec la gamme de déformation sur laquelle le calage des courbes proposées a été mené.

Merci de votre attention