

# Journée d'hommage à Michel Bustamante

FNTP, Maison des Travaux Publics, Paris

Le 23 octobre 2025



## *Des essais de chargement aux méthodes de calcul de la capacité portante des pieux : 55 ans d'évolution*

Sébastien Burlon – Cerema

Roger Frank - ENPC-IPParis

Julien Habert - Setec Terrasol

Fabien Szymkiewicz - Université Gustave Eiffel

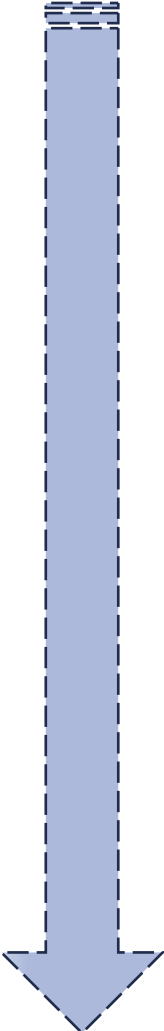


setec

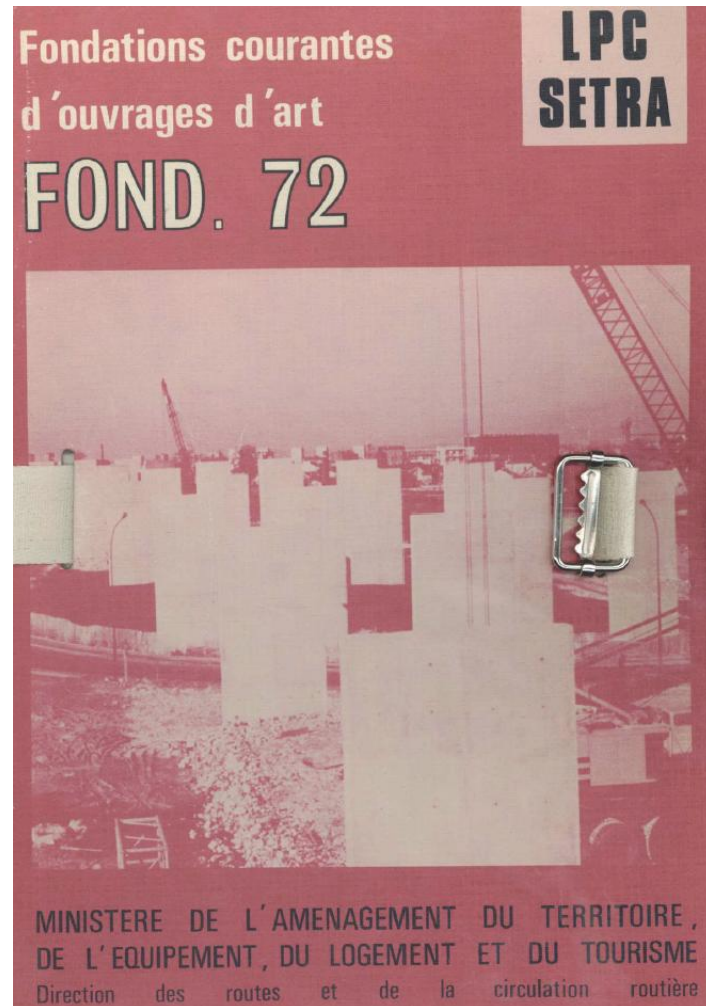


- Quelques dates clefs de l'évolution de nos méthodes de calcul de la portance
- Interprétation et apports des essais de chargement
- Construction d'une méthode calcul de la portance des pieux - Évaluation de son incertitude

## Quelques dates clefs

- 
- 1972 : Fond 72
  - 1972 : Appareillage amovible pour la mesure des relations contraintes-déplacements dans les pieux. Bull. Liaison Labo. P. et Ch., 57, mai-juin, 59–62. (J.F Jézéquel)
  - 1974 : Publication de l'article « La capacité portante des pieux » Annales de l'I.T.B.T.P. (conférence du 2 avril 1974)
  - **1981 : Prévion de la capacité portante des pieux isolés sous charge verticale. Règles pressiométriques et pénétrométriques. Bull. Liaison Labo. P. et Ch., 113, mai-juin, 83–108.**
  - 1978, 1983, 1992 : DTU 13.2
  - **1982 : Pile bearing capacity predictions by means of static penetrometer CPT. Proceedings of the Second European Symposium on Penetration Testing (ESOPT II)**
  - 1984 : Document SETRA-LCPC (ce sont les règles du Fascicule 62 Titre V)
  - 1993 : Fascicule 62 Titre V (stabilisé dès 1988)
  - 1999 : Current French design practice for axially loaded piles, Ground Engineering, March, pp. 38-44.
  - 2006 : Conférence ELU-ULS
  - 2009 : Pile design at failure using the Ménard pressuremeter: an update. Expo'09 (IFCEE'09), Orlando, Florida, 15–19 March, ASCE, Geotechnical Special Publication No. 186, pp 127–134.
  - 2010 - 2013 : NF P 94-262 - Réinterprétation de la base d'essais de chargement - modèle unique pour les ponts et les bâtiments
  - 2027 : NF P 94-262 - Quelques légers ajustements (craie, pieux bois, pieux battus ouverts)

# Un point de départ



Avant 1972 : différentes contributions -  
dont J.Kerisel, H.Cambefort, L.Ménard

Après 1972 : les travaux menés au LCPC  
avec F.Baguelin, M.Bustamante, R.Frank et J.F.Jézéquel

(issu à plus de 95 % des règles de Ménard)

# Avant 1972... Au moins trois contributions

Caquot, A. et Kerisel, J. (1955) Traité de Mécanique des Sols (3<sup>ème</sup> Edition de l'ouvrage : Equilibre des massifs à frottement interne – Stabilité des terres pulvérulentes ou cohérentes par A.Caquot), Gauthier-Villars, Paris.

## Caquot et Kerisel

Le calcul des pieux apparaît extrêmement compliqué à formaliser, il est vu comme un problème de mobilisation du sol dans sa masse et tend à minimiser le rôle de l'interface sol-pieu.

On peut constater une certaine évolution ou remise en cause avec les différentes versions du Traité de Mécanique des Sol (1949, 1955, 1966)

Les deux questions qui se posent à propos de  $s_3(\varphi, \alpha)$  sont les suivantes :

a. Les déplacements verticaux sont-ils de nature à mobiliser tout ou partie de la butée ?

b. Le frottement est-il suffisant pour que l'on puisse prendre  $\alpha = -\varphi$ .

En ce qui concerne la première question, il apparaît bien tout de suite que nous avons à faire une distinction capitale entre les pieux moulés dans le sol, pour lesquels il y a substitution du volume de la matière portante à un volume sensiblement égal de sol, et les pieux battus, au cours du battage desquels un volume de sol égal à celui de la matière portante est refoulé dans le sol autour du pieu. Pour les premiers, il est évident, a priori, que tout au moins au début de l'application des charges, la butée provoquant le frottement latéral ne peut être mobilisée. Nous savons en effet, d'après les expériences de butée, que les déplacements nécessaires pour mobiliser la butée contre un écran sont loin d'être négligeables même lorsqu'ils sont dirigés perpendiculairement à un écran. Le déplacement vertical d'un pieu

# Avant 1972... Au moins trois contributions

## Cambefort

L'instrumentation des pieux et notamment de leur fût est la voie à suivre pour déduire des modèles de calcul simples à mettre en œuvre pour la portance et le tassement des pieux.

Vers le milieu des années 1960, le mécanisme de transfert de charge est compris. L'importance de la charge fluage est aussi mentionnée.

Il manque un modèle de prévision de la capacité portante et des tassements.

Cambefort H. (1964) Essai sur le comportement en terrain homogène des pieux isolés et des groupes de pieux. Annales de l'I.T.B.T.P., Décembre 1964.

Cambefort H. et Chadeisson R (1961) Critère pour l'évaluation de la force portante d'un pieu. 5<sup>ème</sup> Conférence Internationale de Mécanique des sol et des Travaux de Fondation (Paris)

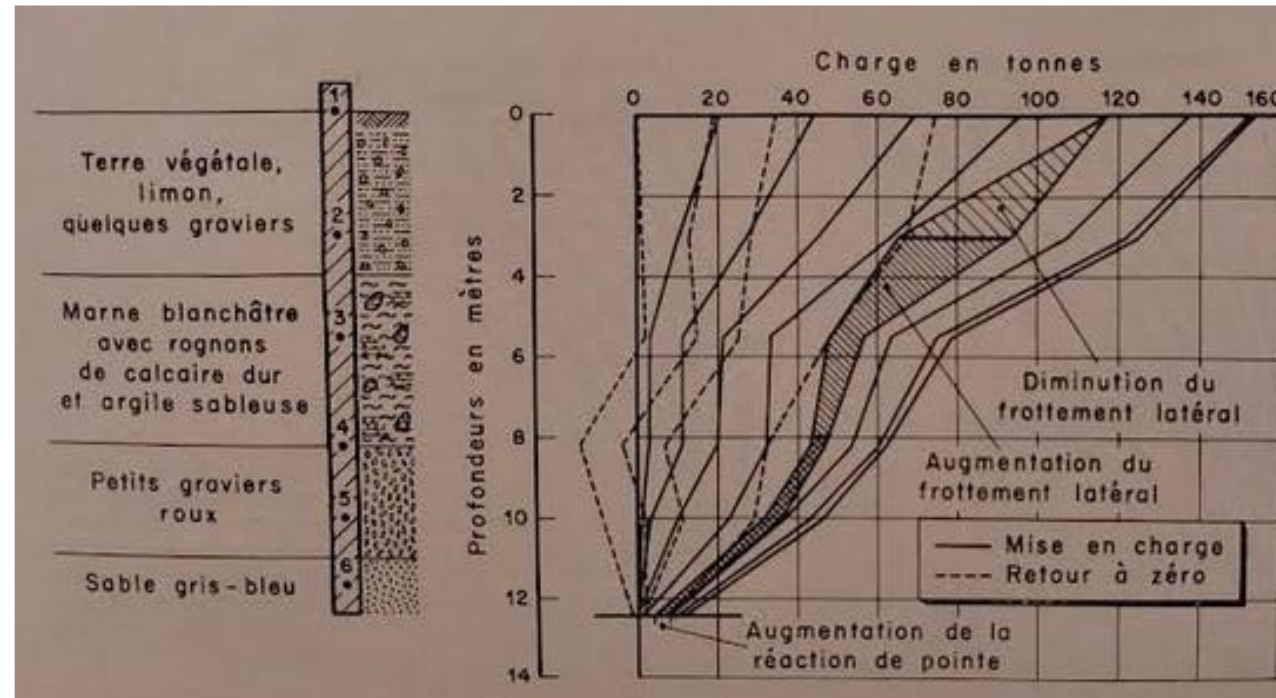


FIG. 18. — Essais de Montereau (pieu n° 1). Noter l'apparition très progressive du frottement dans les marnes entre 5,50 m et 8 m et l'évolution du frottement et de la charge en pointe sous la charge de 115 tonnes maintenue pendant plusieurs heures.

# Avant 1972... Au moins trois contributions

Ménard. L. (1963) Calcul de la force portante des fondations sur la base des résultats des essais pressiométriques. Sols Soils n° 5. Juin 1963

## Ménard

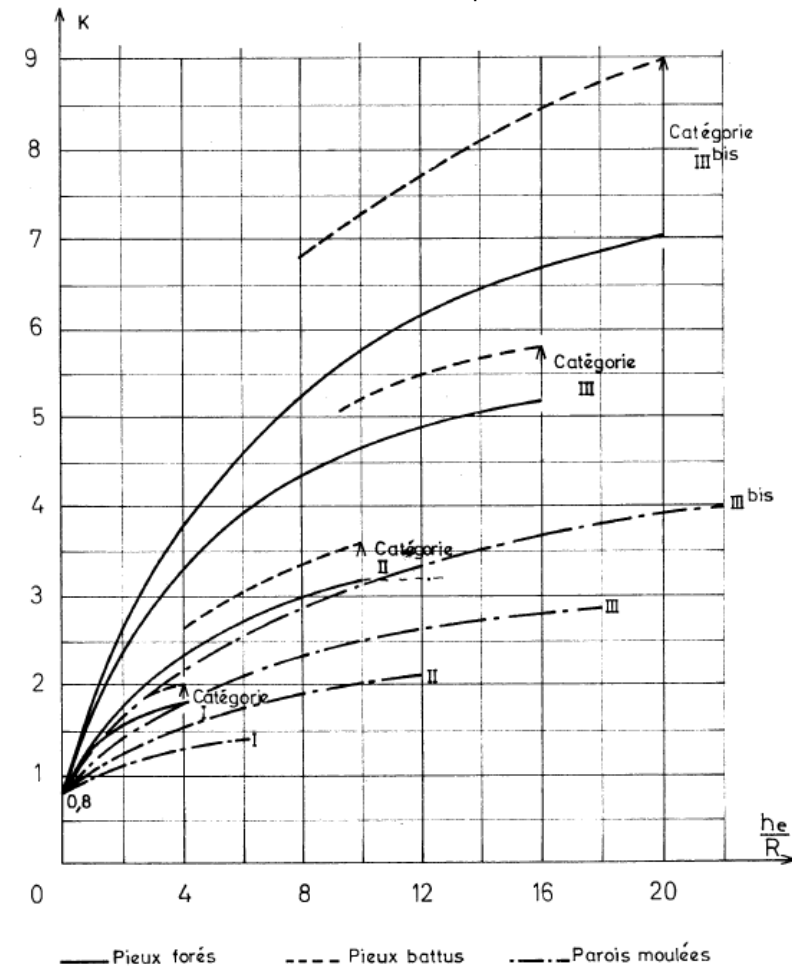
De premiers modèles de calcul sont proposés en liant nature des terrains, technique de pieux et pression limite nette.

Un rôle trop important est encore donné à la pointe. Le frottement axial est sous-estimé pour les pression limites fortes.

Type de sols et de pieux pour l'utilisation des règles de Ménard

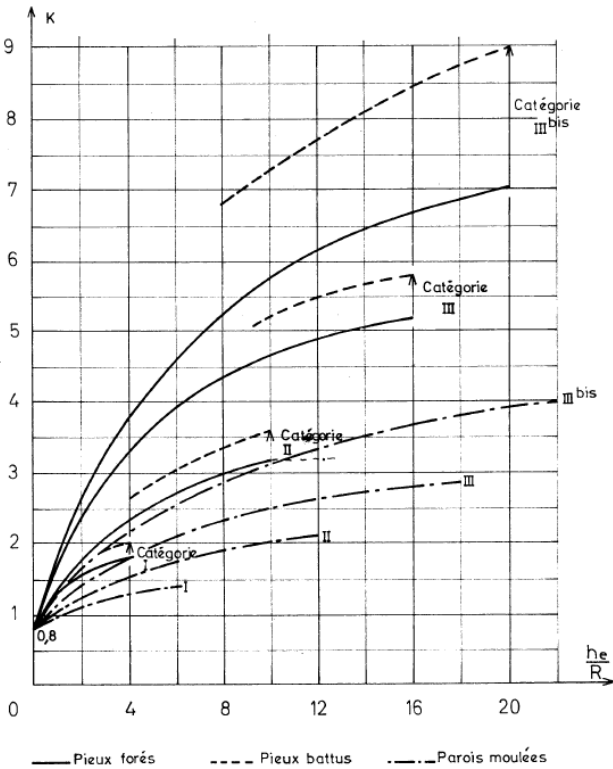
Planes des pressions limites $p_l$ (bars)	Nature du sol	Catégories
0 - 12 0 - 7	Argile Limon	I
18 - 40 12 - 30 4 - 8 10 - 30	Argile raide et marne Limos compacts Sables compressibles Roche tendre ou altérée	II
10 - 20 40 - 100	Sable et gravier Roche	III
30 - 60	Sable et gravier très compact	III bis

Facteur de pointe  $k_p$  vers 1970



# Évolution des règles de 1972 à 1993 – Facteur de pointe $k_p$ ( $R_b = k_p \cdot p_l^*$ )

## Fond 72



## DTU 13.2

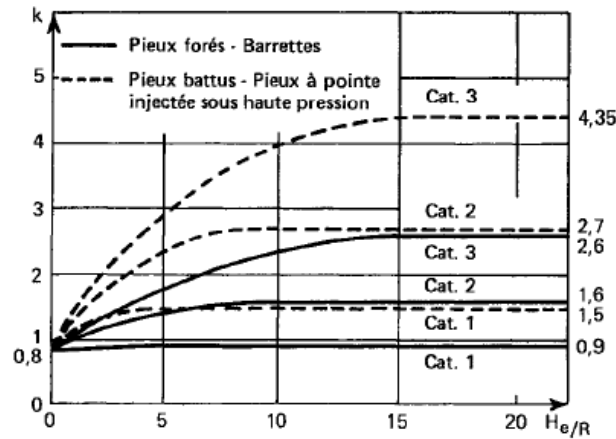


Figure 3 (d'après M. Bustamante et L. Gianceselli)

Bustamante M et Gianceselli, L. (1981) Prédiction de la capacité portante des pieux isolés sous charge verticale. Règles pressiométriques et pénétrométriques. Bull. Liaison Labo. P. et Ch., 113, mai-juin, 83–108

## Fascicule 62 Titre V

Nature des terrains		Éléments mis en œuvre sans refoulement du sol	Éléments mis en œuvre avec refoulement du sol
ARGILES - LIMONS	A	1,1	1,4
	B	1,2	1,5
	C	1,3	1,6
SABLES - GRAVES	A	1,0	4,2
	B	1,1	3,7
	C	1,2 (***)	3,2
CRAIES	A	1,1	1,6
	B	1,4	2,2
	C	1,8	2,6
MARNES, MARNO-CALCAIRES		1,8	2,6
ROCHES ALTÉRÉES <sup>(1)</sup> (***)		1,1 à 1,8	1,8 à 3,2

*Effet de la profondeur d'encastrement  
Distinction Foré / Battu*

*Pas d'effet de la profondeur d'encastrement  
Distinction Foré / Battu*

# Évolution des règles de 1993 à 2012 – Facteur de pointe $k_p$ ( $R_b = k_p \cdot p_l^*$ )

## Fascicule 62 Titre V

Nature des terrains		Éléments mis en œuvre sans refoulement du sol	Éléments mis en œuvre avec refoulement du sol
ARGILES - LIMONS	A	1,1	1,4
	B	1,2	1,5
	C	1,3	1,6
SABLES - GRAVES	A	1,0	4,2
	B	1,1	3,7
	C	1,2 (***)	3,2
CRAIES	A	1,1	1,6
	B	1,4	2,2
	C	1,8	2,6
MARNES, MARNO-CALCAIRES		1,8	2,6
ROCHES ALTÉRÉES <sup>(1)</sup> (***)		1,1 à 1,8	1,8 à 3,2

*Pas d'effet de la profondeur d'encastrement  
Distinction Foré / Battu*

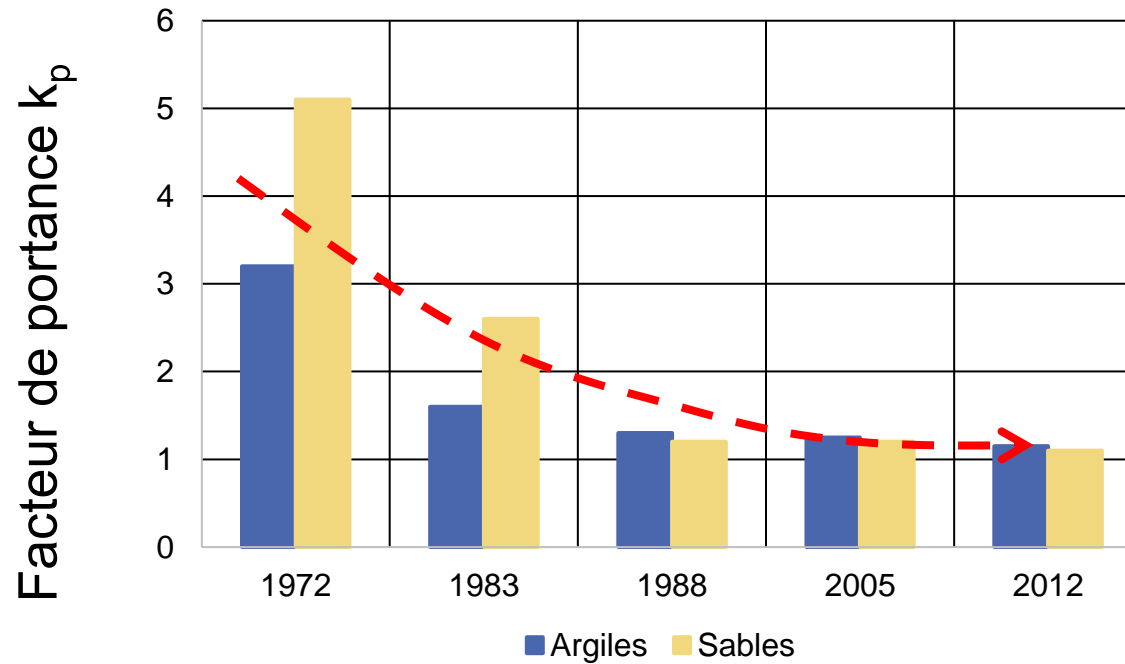
## NF P 94-262

Type de sol	Argiles Limons Sols intermédiaires	Sols intermédiaires Sables	Craie	Marne et calcaire- marneux	Roche altérée et fragmentée
Type de pieu					
Foré	1,15	1,1	1,45	1,45	1,45
CFA	1,3	1,65	1,6	1,6	2,0
Vissé moulé	1,55	3,2	2,35	2,1	2,1
Battu fermé	1,35	3,1	2,3	2,3	2,3
Battu ouvert	1,0	1,9	1,4	1,4	1,2
Pieu H	1,2	3,1	1,7	2,2	1,5
Palplanches	1,0	1,0	1,0	1,0	1,2
Micropieux	1,15	1,1	1,45	1,45	1,45

*Effet de la profondeur d'encastrement  
Beaucoup plus de techniques couvertes*

# Évolution des règles de 1972 à 2012 – Facteur de pointe $k_p$ ( $R_b = k_p \cdot p_l^*$ )

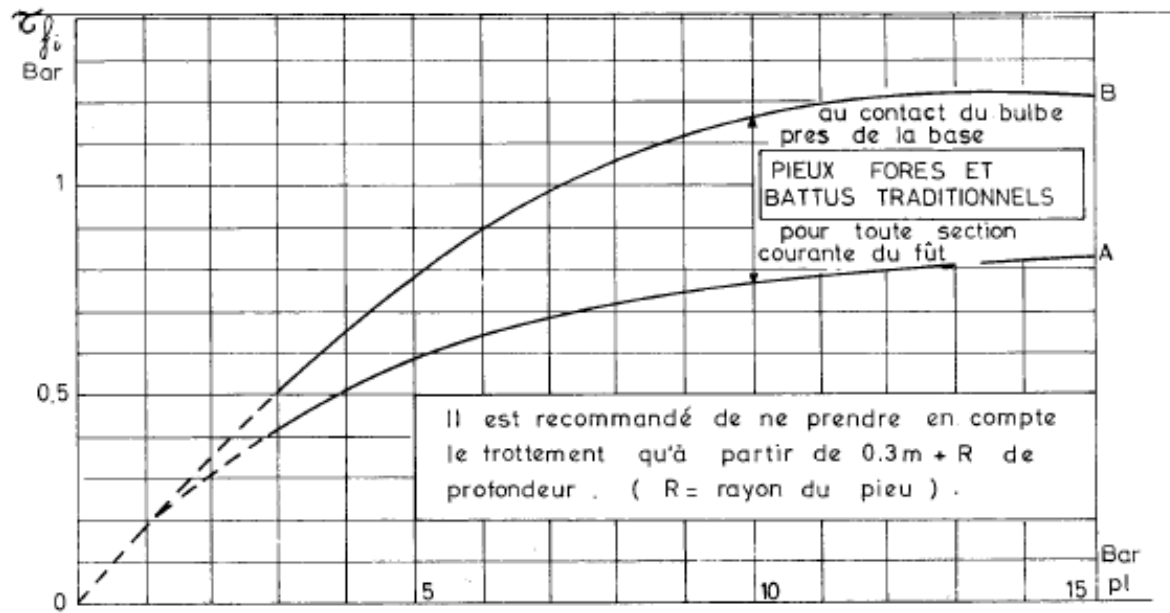
## Pieu foré à la boue



$$R_b = k_p \cdot p_l^*$$

# Évolution des règles de 1972 à 2012 – Résistance de frottement axial $q_s$

## Fond 72

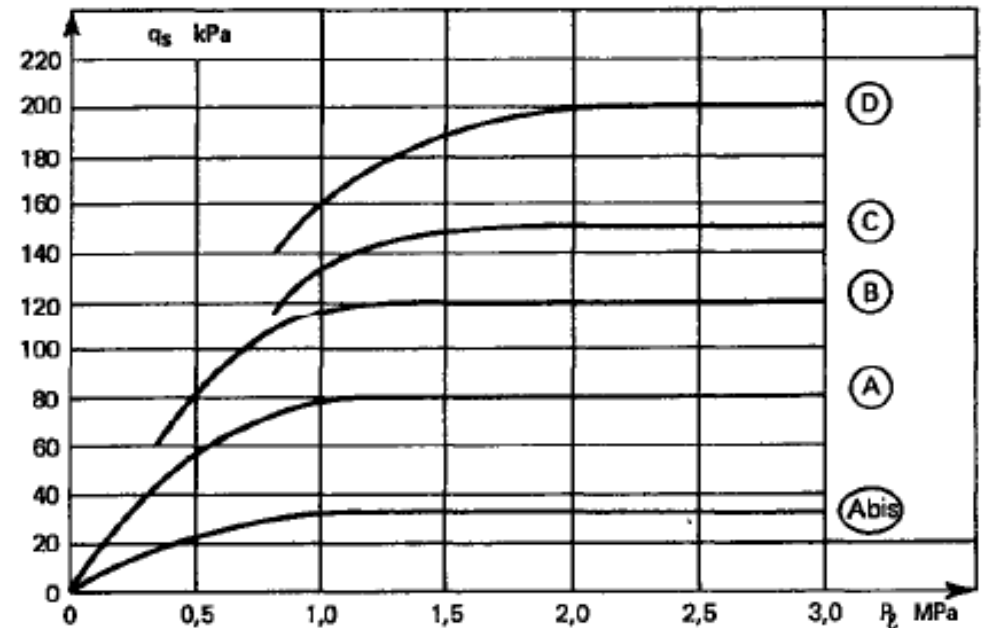


*Augmentation du frottement axial près de la base du pieu*

## DTU 13.2

Bustamante M et Gianceselli, L. (1981) Prédiction de la capacité portante des pieux isolés sous charge verticale. Règles pressiométriques et pénétrométriques. Bull. Liaison Labo. P. et Ch., 113, mai-juin, 83–108

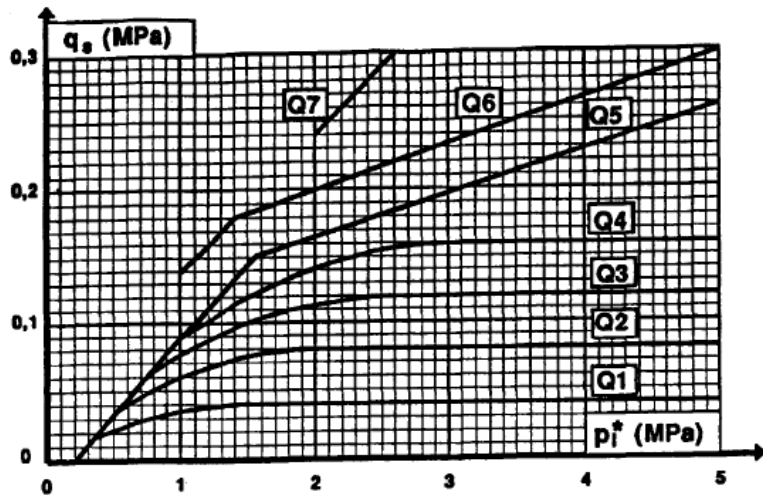
Frottement latéral unitaire limite



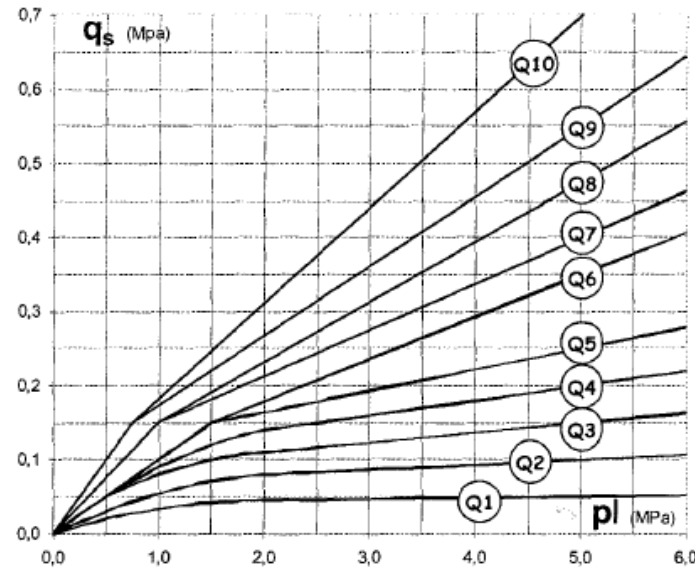
Une même courbe peut être utilisée pour des pieux et des terrains différents si bien que le résultat peut paraître irrationnel

# Évolution des règles de 1972 à 2012 – Résistance de frottement axial $q_s$

## Fascicule 62 Titre V

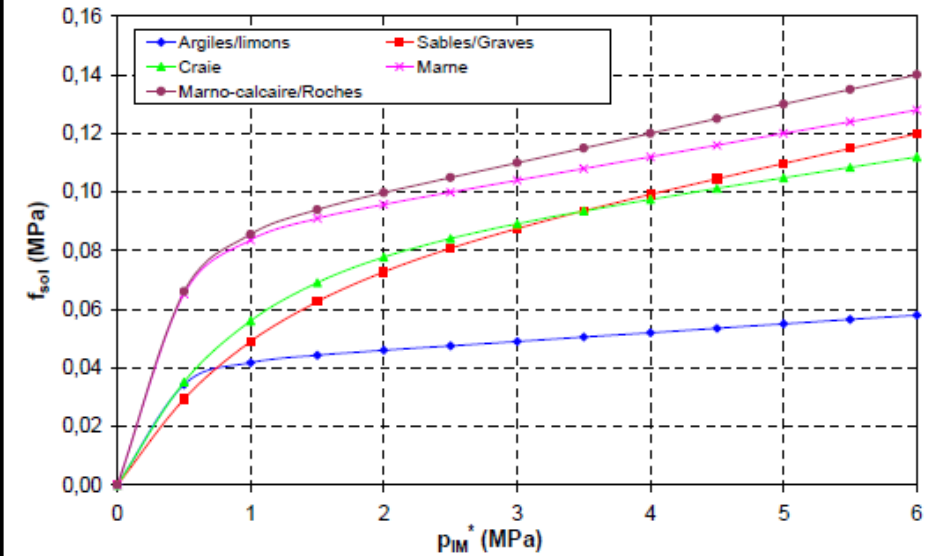


## B&G



Bustamante M. et Ganeselli L. (2006).  
Règles de calcul de la portance des pieux  
aux ELU – Méthode pressiométrique,  
Congrès ELU-ULS, Editions du LCPC.

## NF P 94-262



Baguelin, F., Bustamante, M., Burlon, S., Frank, L., Ganeselli, R., Habert, J. et Legrand, S. (2012).  
Justification de la portance des pieux avec la norme  
« fondations profonde » NF P 94-262 et le pressiomètre.  
JNGG., Bordeaux 2012, 564–577

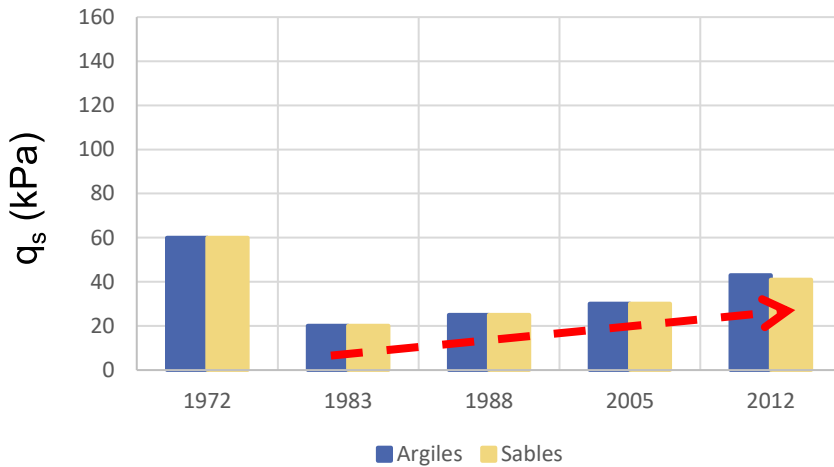
Une même courbe peut être utilisée pour des pieux et des terrains différents  
si bien que le résultat peut paraître irrationnel

Introduction des courbes  $f_{sol}$   
et des coefficients  $\alpha_{pieu-sol}$

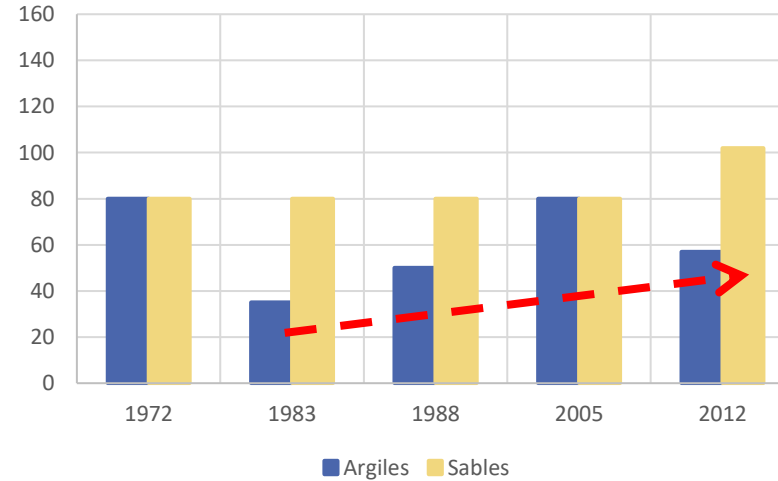
# Évolution des règles de 1972 à 2012 – Résistance de frottement axial $q_s$

Pieu foré à la boue  
Évolution du frottement axial  $q_s$  (kPa) sur 40 ans

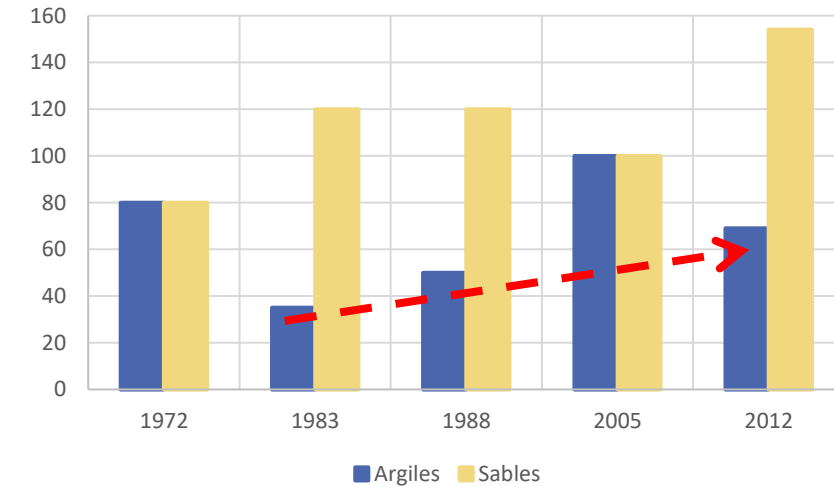
$p_l^* = 0.5$  MPa



$p_l^* = 2.0$  MPa



$p_l^* = 5.0$  MPa



# Évolution des règles de 1972 à 2012 – Portance et Fluage

« **Coefficient global équivalent** » appliqué sur la résistance de base ou de frottement (intégrant les coefficients sur les actions quand ceux-ci existent) :

**noir** : sur la capacité portante -  $Q_{rep} < R_c/F$

**rouge** : sur la résistance de fluage -  $Q_{rep} < R_{c,cr}/F$

		FOND 72	DTU 13.2	Fascicule 62 Titre V puis NF P 94-262	
ELU	Résistance de pointe	2.65	2.65	1.89	
	Résistance de frottement	1.76	1.76	1.89	
ELS	Résistance de pointe	3.0	3.0	1.4 (ELS QP) (2.8)	1.1 (ELS car) (2.2)
	Résistance de frottement	2.0	2.0	1.4 (ELS QP) (2.0)	1.1 (ELS car) (1.58)

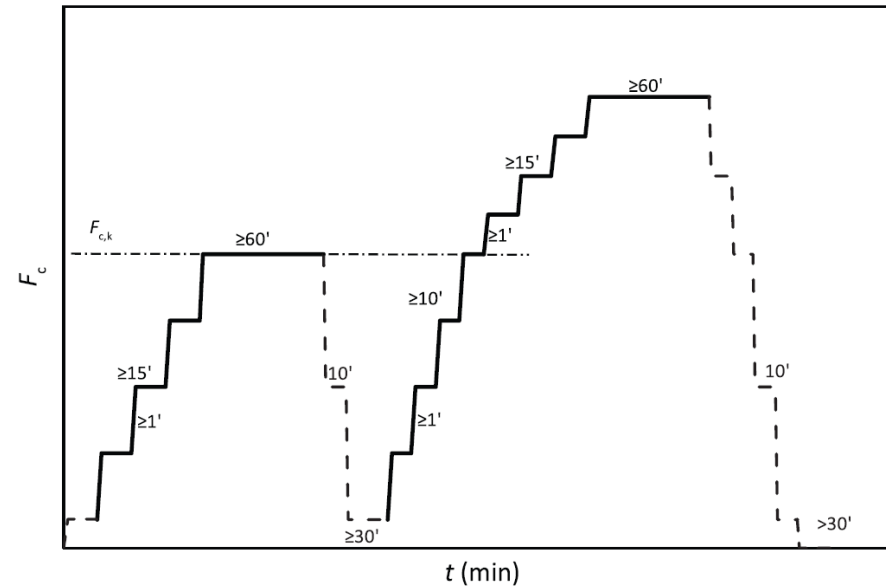
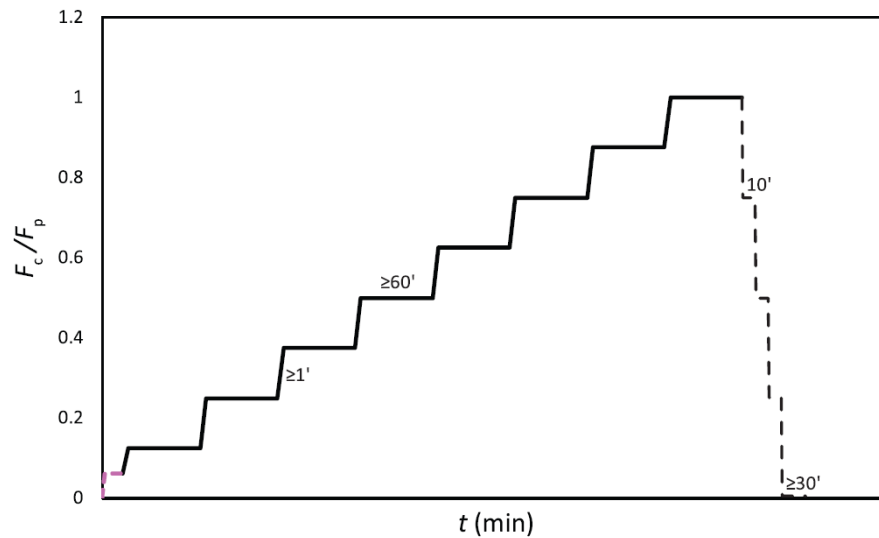
**A partir de 1993, introduction de la résistance de fluage**

(30 ans après l'article de Cambefort et Chadeisson)

# L'essai de chargement statique : un essai simple... en apparence

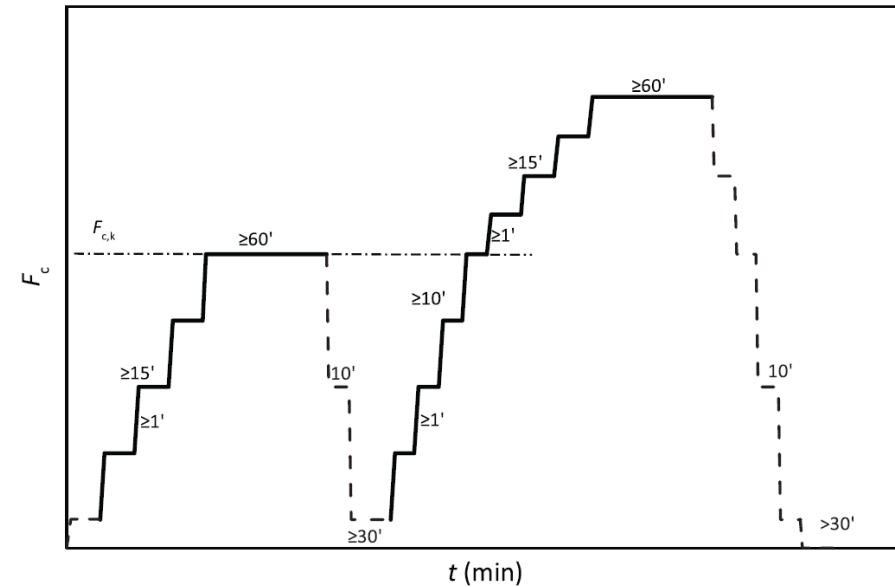
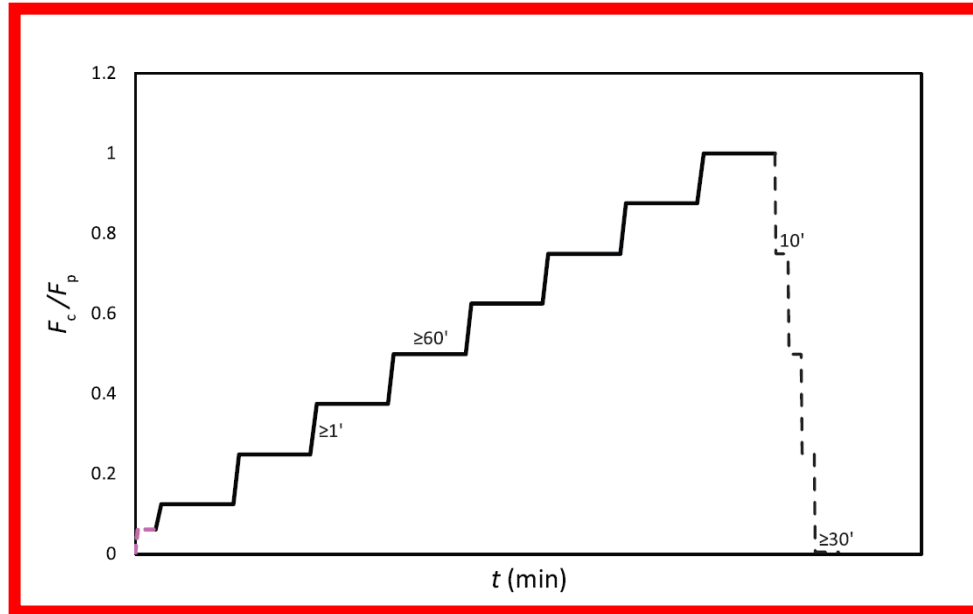


# Quel protocole d'essai ?



Deux procédures d'essais selon la norme ISO 22477-1

# Quel protocole d'essai ?



Deux procédures d'essais selon la norme ISO 22477-1

# Quel protocole d'essai ?

Quel protocole d'essai ?

Deux procédures d'essais selon la norme ISO 22477-1

Mais une multitude d'autres procédures possibles...

	NFP 94-150-1 [3]	NF EN 61773 [7]	ICE Specifications [6]	SIA 267/1 [5]	EA Piling [4]	GCP-18 [10]	ASTM D1143_07 [9]	NF EN ISO 22477-1 [8]
Cycles (number)	Multi-cyclic (2)	1 or more	1 or more	Multi-cyclic (3)	Multi-cyclic (2)	Multi-cyclic (3)	1 or more	1 or 2
Typical length of a load step	60 min	3 to 10 min	10 to 360 min	90 min	N/A	30 min	20 to 60 min	60
Shortening of a load step				No				Yes
Criterion for the shortening				/				Disp. rate
Prolonging a load step	no				Yes			
Criterion for lengthening		/	Overall head displacement	D, load applied			Overall duration	
					+ displacement rate			
step of equal magnitude	yes	no	no	No	no	no	no	not if multi-cyclic

# Quel est le but de l'essai ?

Quel est le but de l'essai ?

- Valider une portance ?
- Contrôler un tassement sous la charge de service ?
- Dériver des paramètres de dimensionnement ?

En fonction des besoins et des moyens mis en œuvre, les informations dérivées d'un essai de chargement varient fortement :

- La courbe charge-enfoncement
- La charge de fluage et le taux de fluage

# Quel est le but de l'essai ?

Quel est le but de l'essai ?

- Valider une portance ?
- Contrôler un tassement sous la charge de service ?
- Dériver des paramètres de dimensionnement ?

En fonction des besoins et des moyens mis en œuvre, les informations dérivées d'un essai de chargement varient fortement :

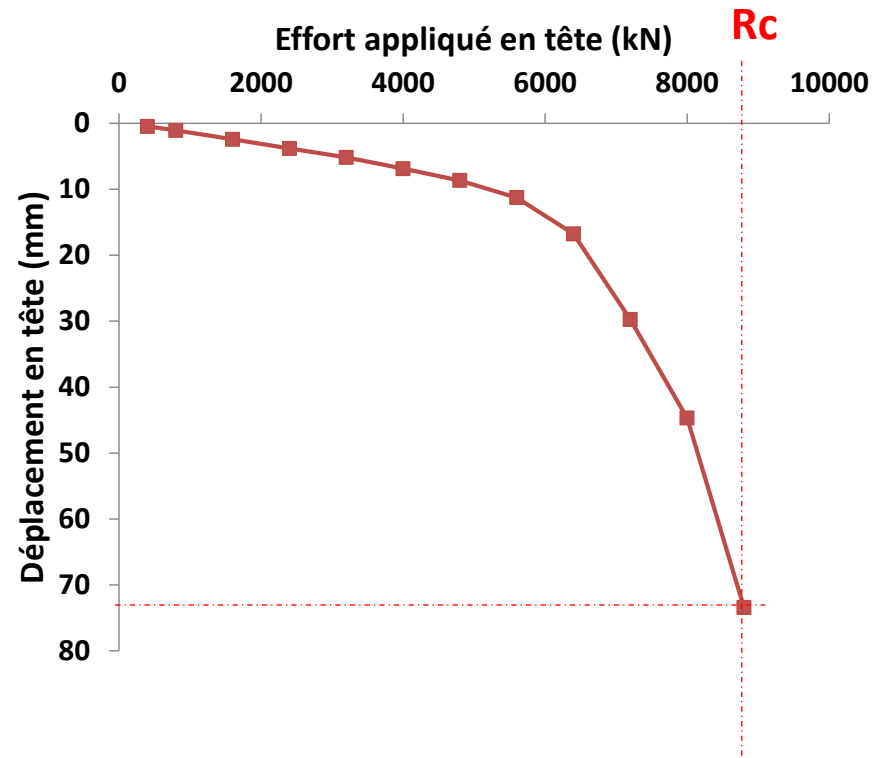
- La courbe charge-enfoncement
- La charge de fluage et le taux de fluage

Et si on instrumente le pieu :

- Les déformations le long du pieu
- La distribution des efforts le long du pieu
- La mobilisation des frottements axiaux unitaires au cours de l'essai
- La mobilisation de la résistance de pointe au cours de l'essai

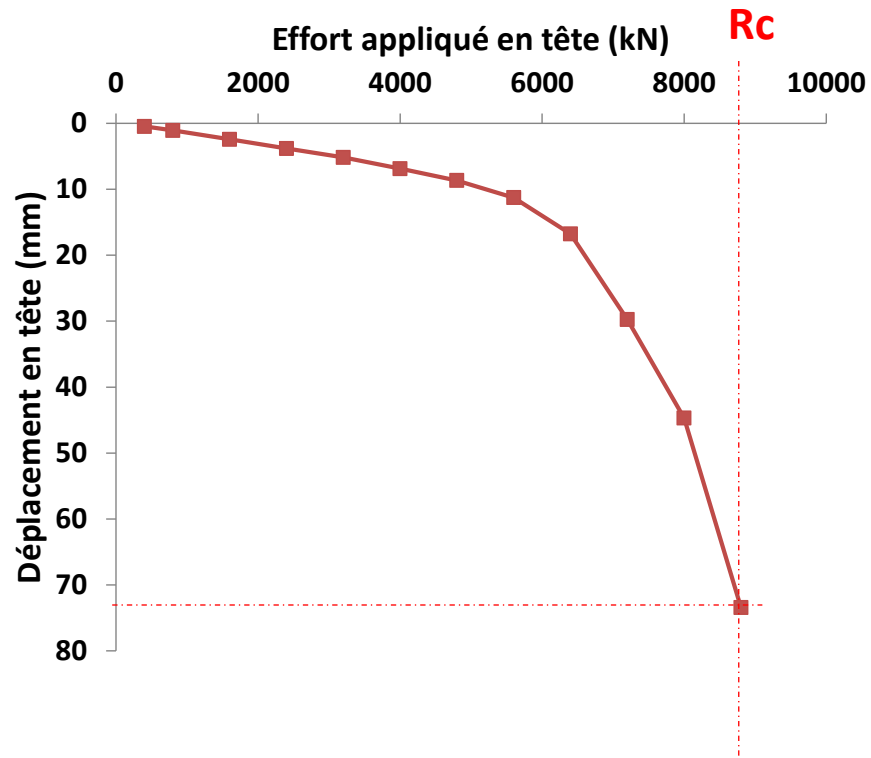
# La courbe charge-enfoncement : portance et fluage

Détermination de la portance

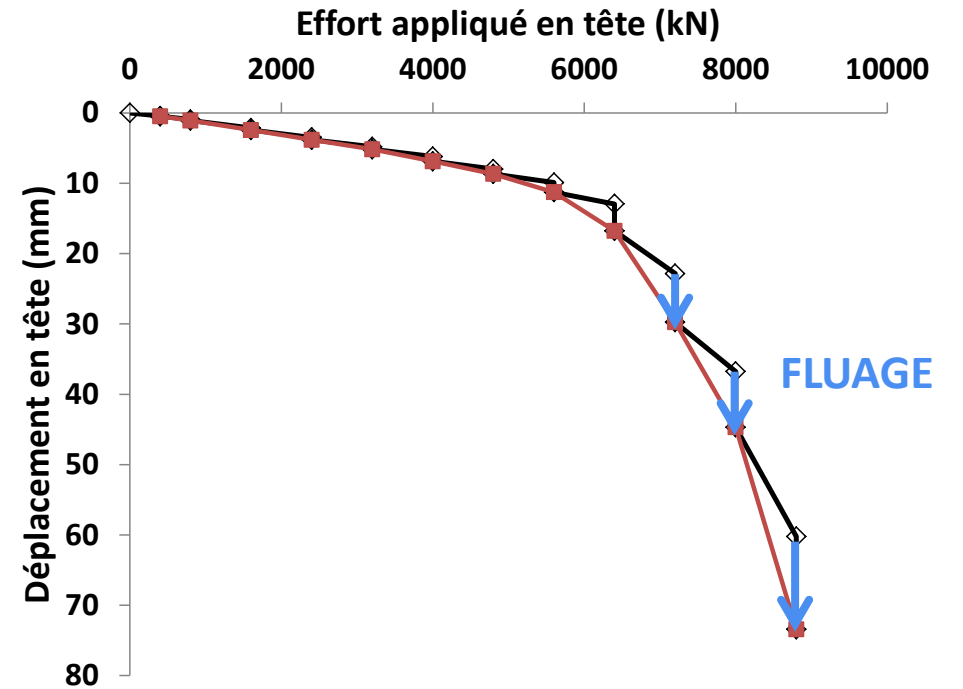


# La courbe charge-enfoncement : portance et fluage

La courbe charge-enfoncement

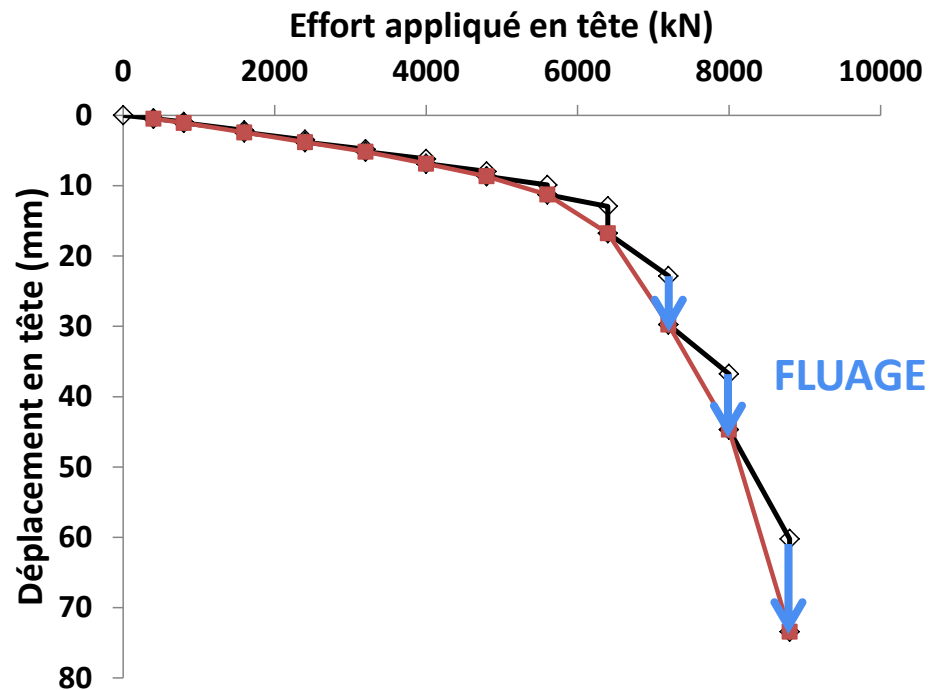


La courbe charge-enfoncement avec les effets du temps – le fluage  
La portance dépend du temps

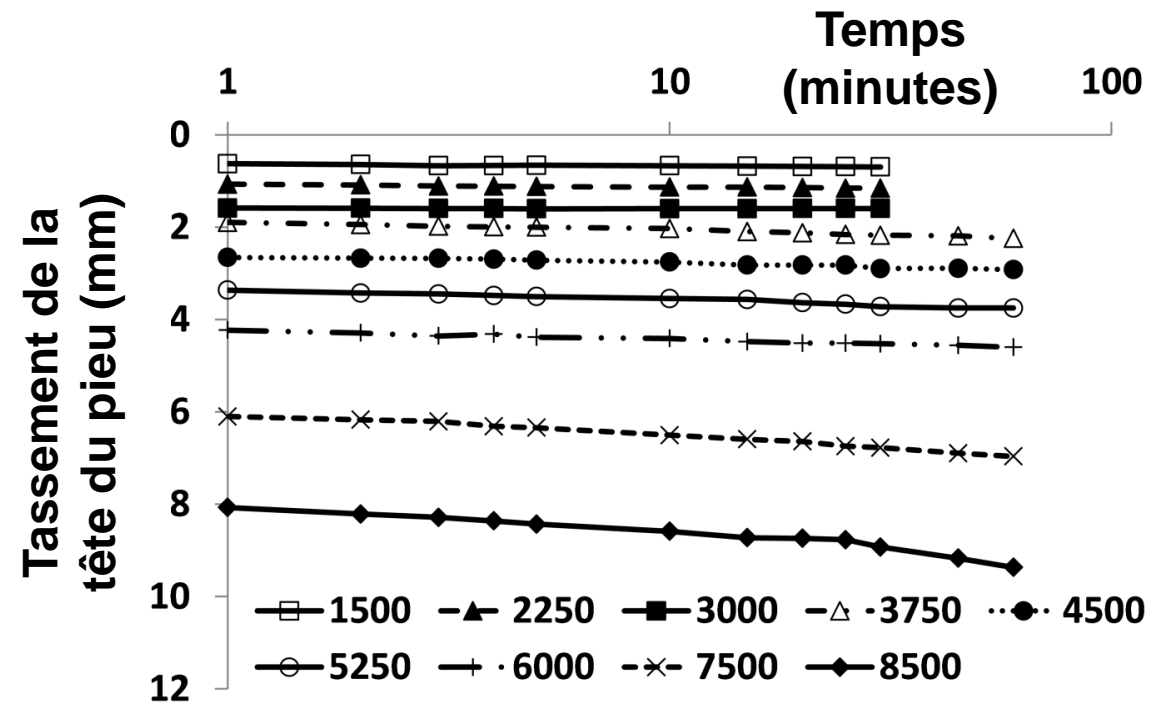


# La courbe charge-enfoncement : portance et fluage

La courbe charge-enfoncement

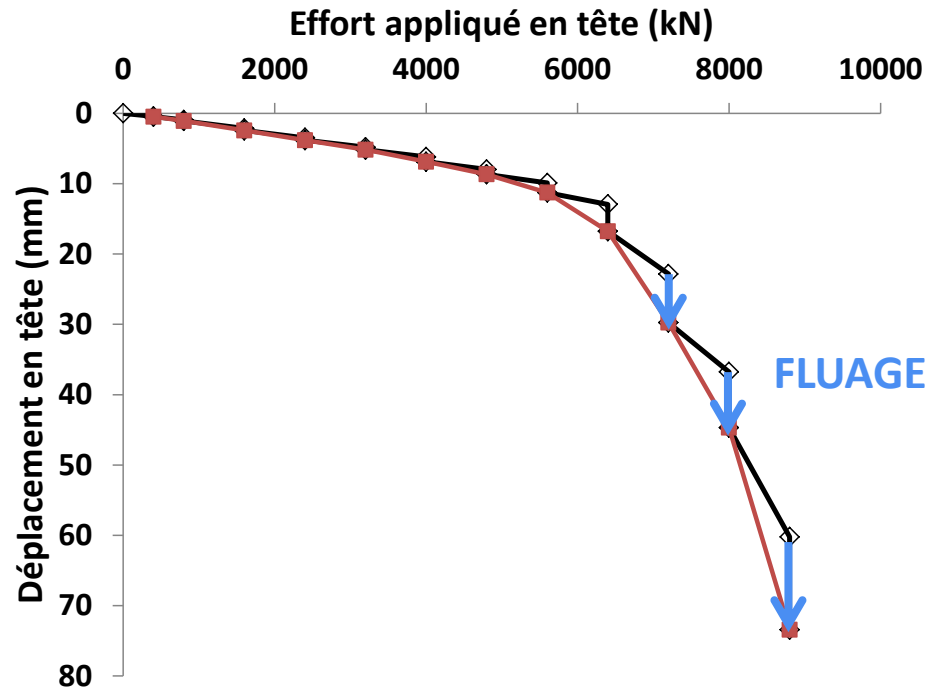


Les paliers de fluage

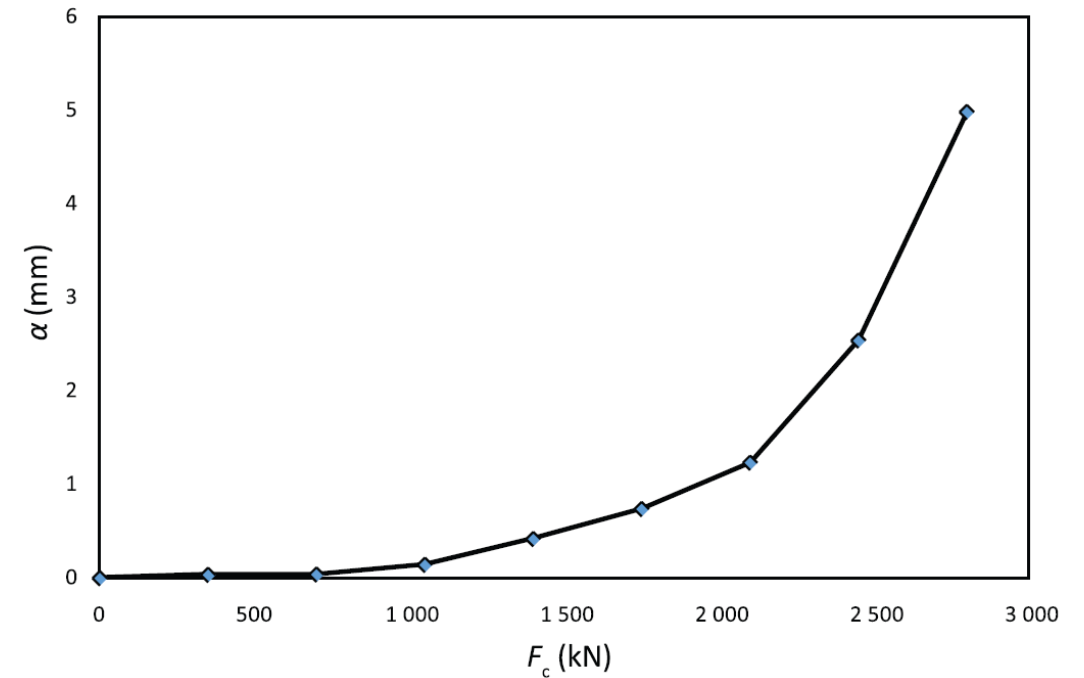


# La courbe charge-enfoncement : portance et fluage

La courbe charge-enfoncement avec les effets du temps – le fluage

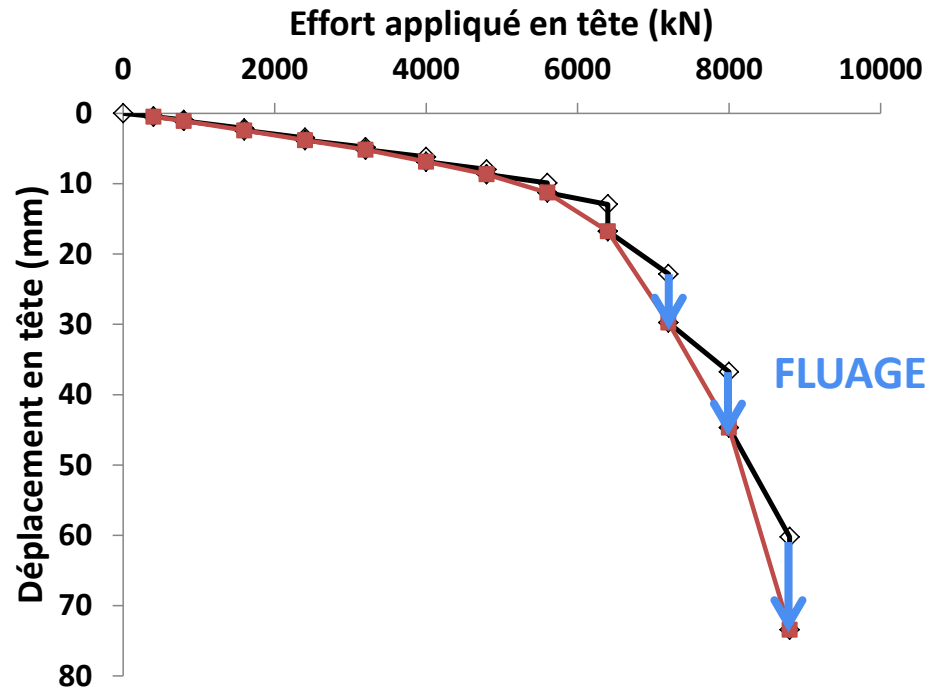


La vitesse de fluage (en théorie)

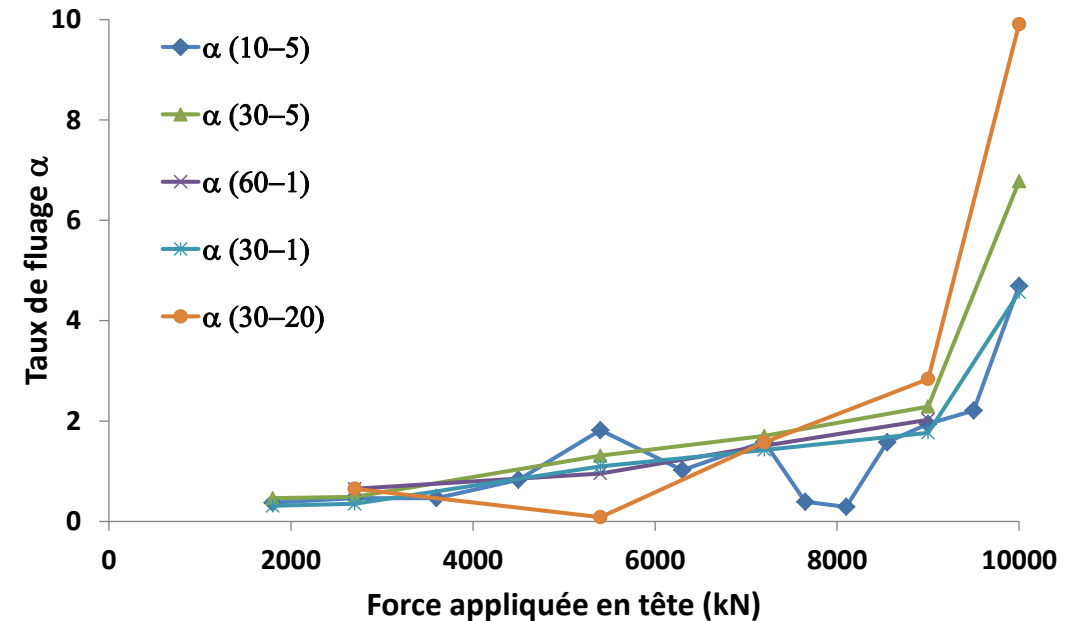


# La courbe charge-enfoncement : portance et fluage

La courbe charge-enfoncement avec les effets du temps – le fluage

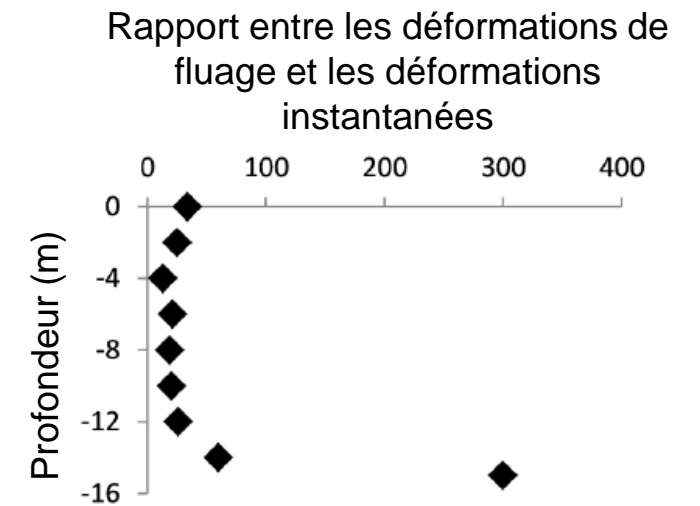
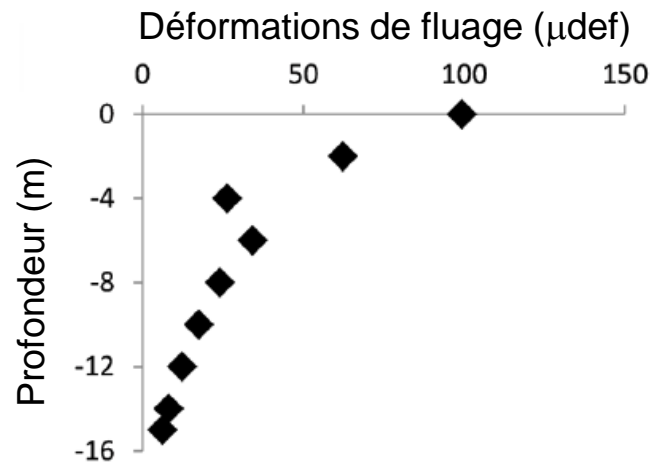
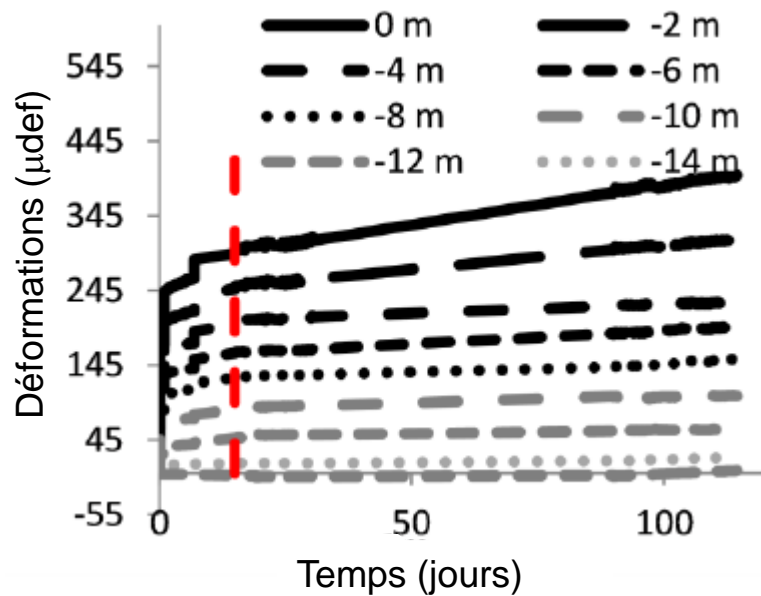


La vitesse de fluage (en pratique)



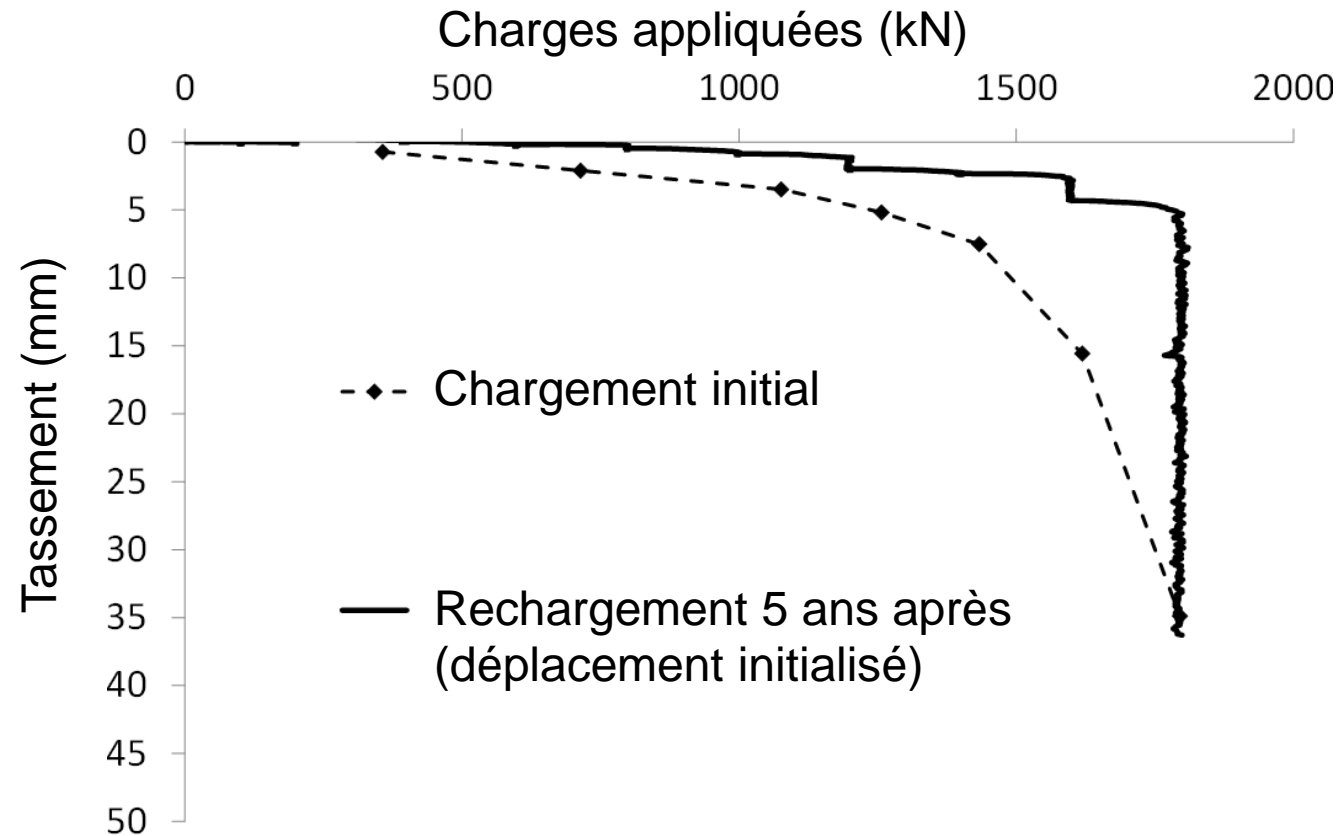
# Fluage et effets du temps

Attention au fluage lors de mesures sur le long terme !

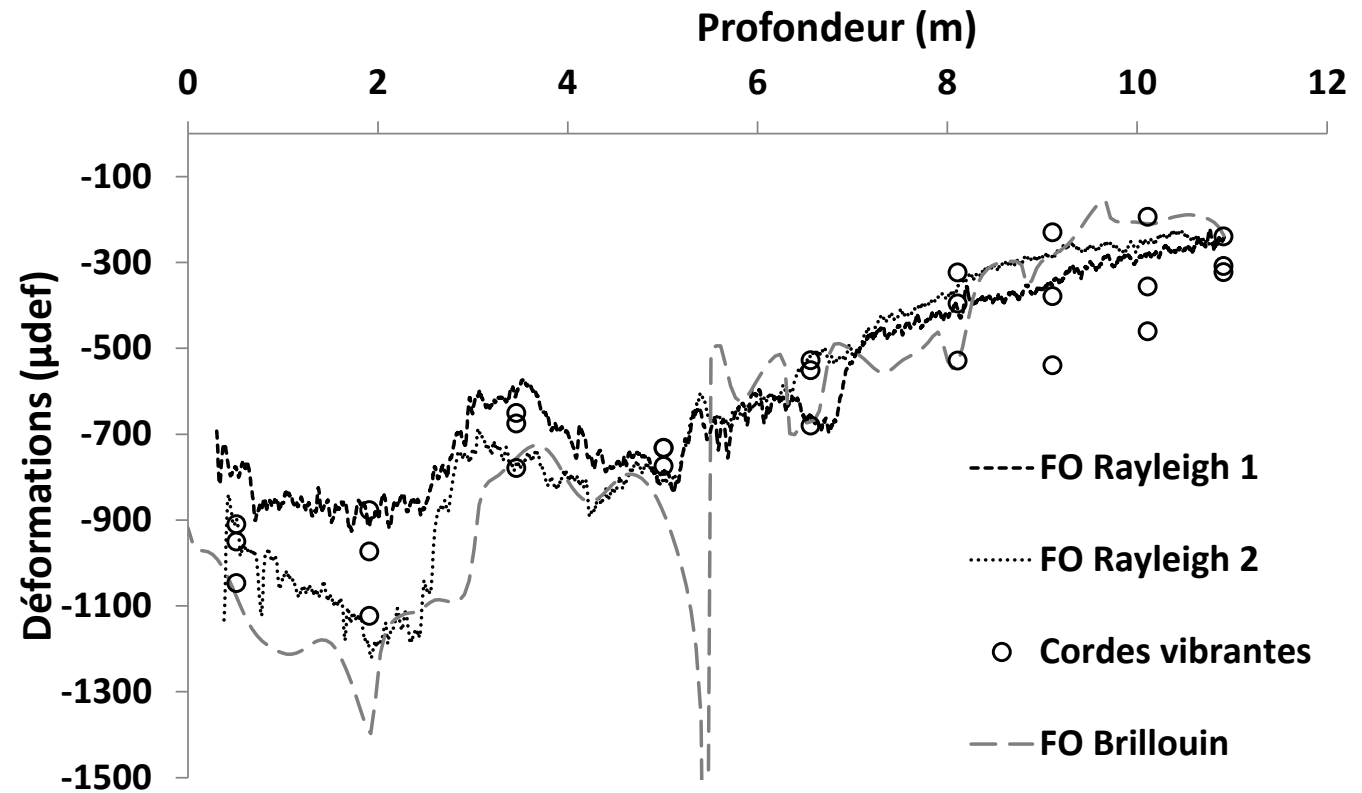
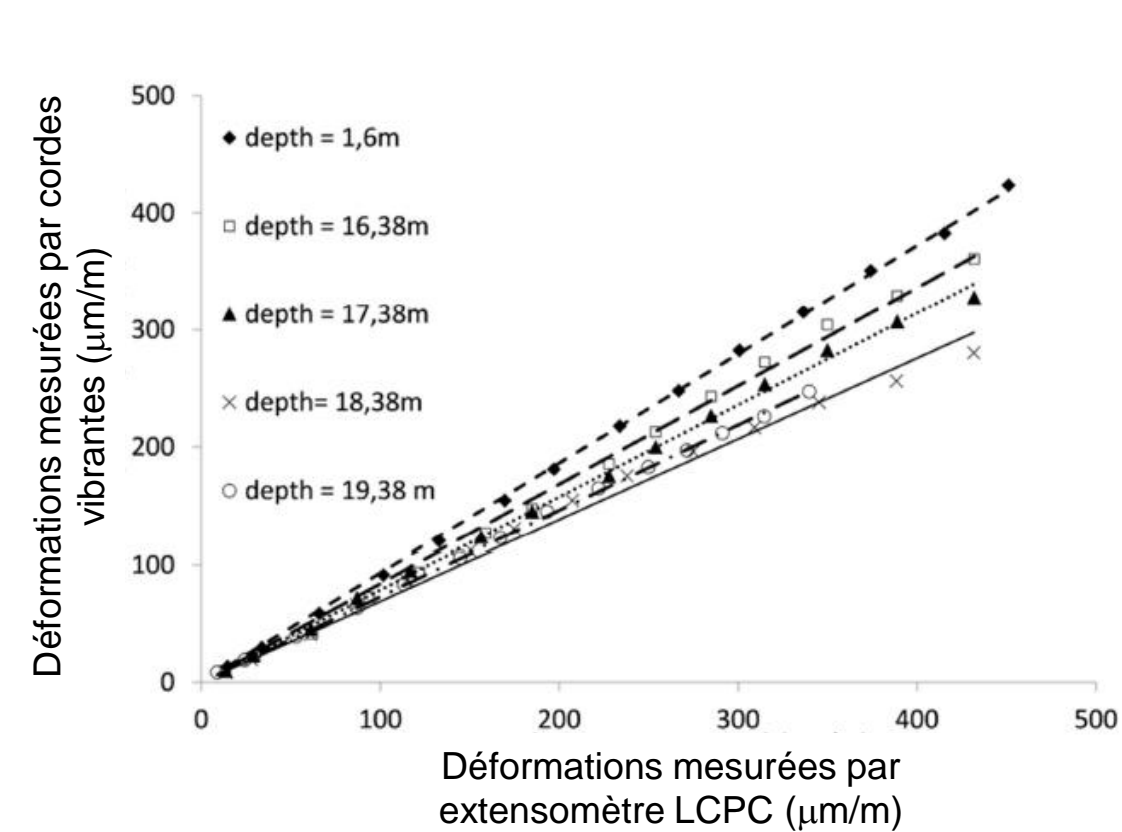


# Répétitivité de la mesure de la capacité portante

Pieu d'essai sur une parcelle entre l'UGE et l'ENPC



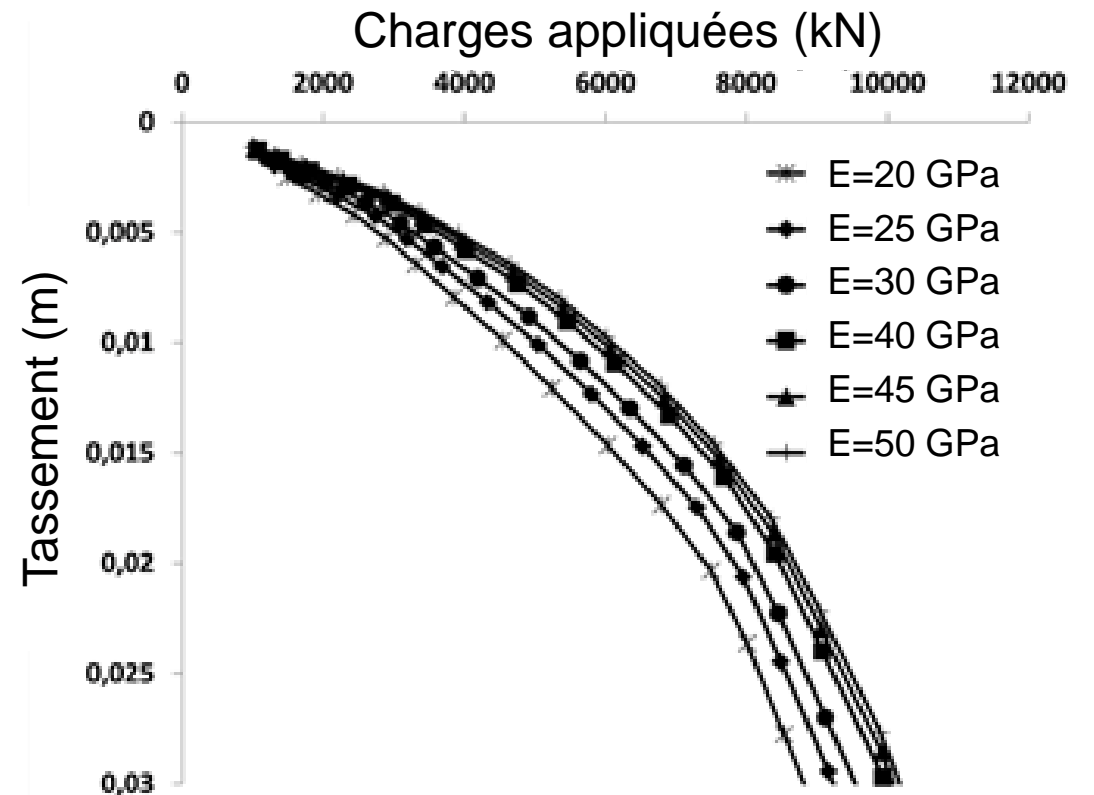
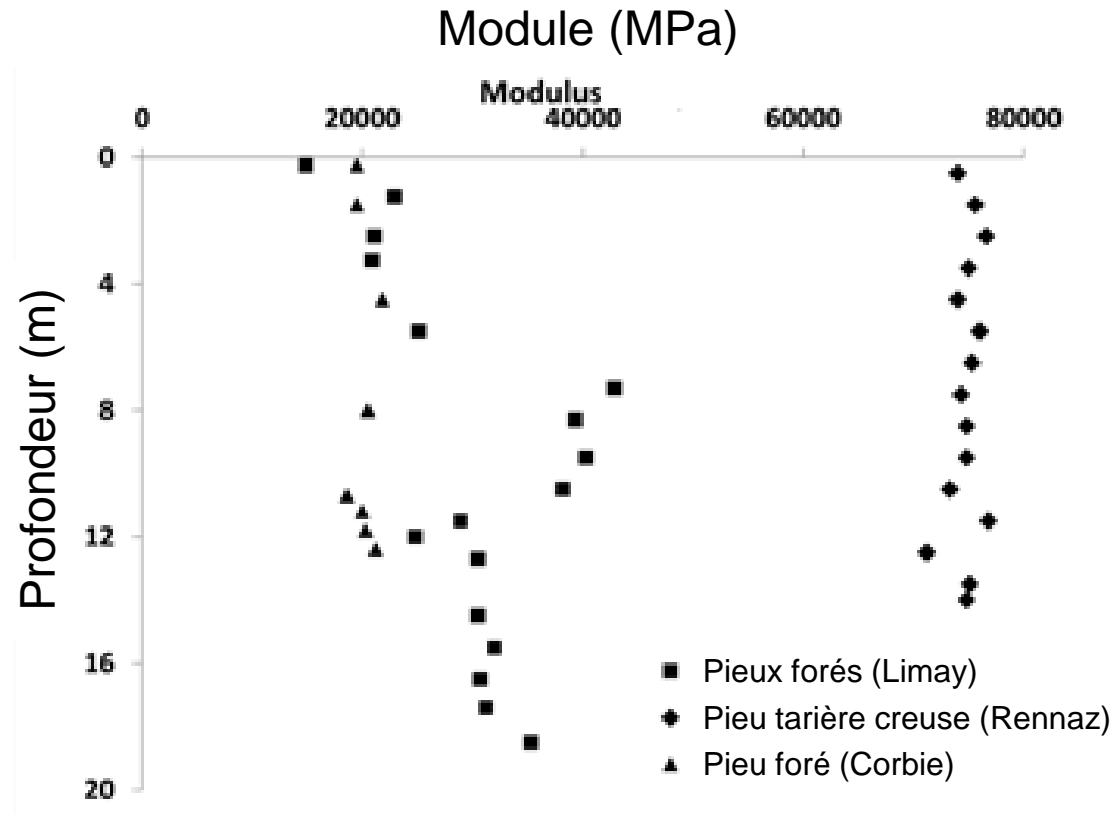
# Mesure des déformations par différentes techniques



Les différents systèmes de mesures de déformation donnent des mesures sensiblement équivalentes,

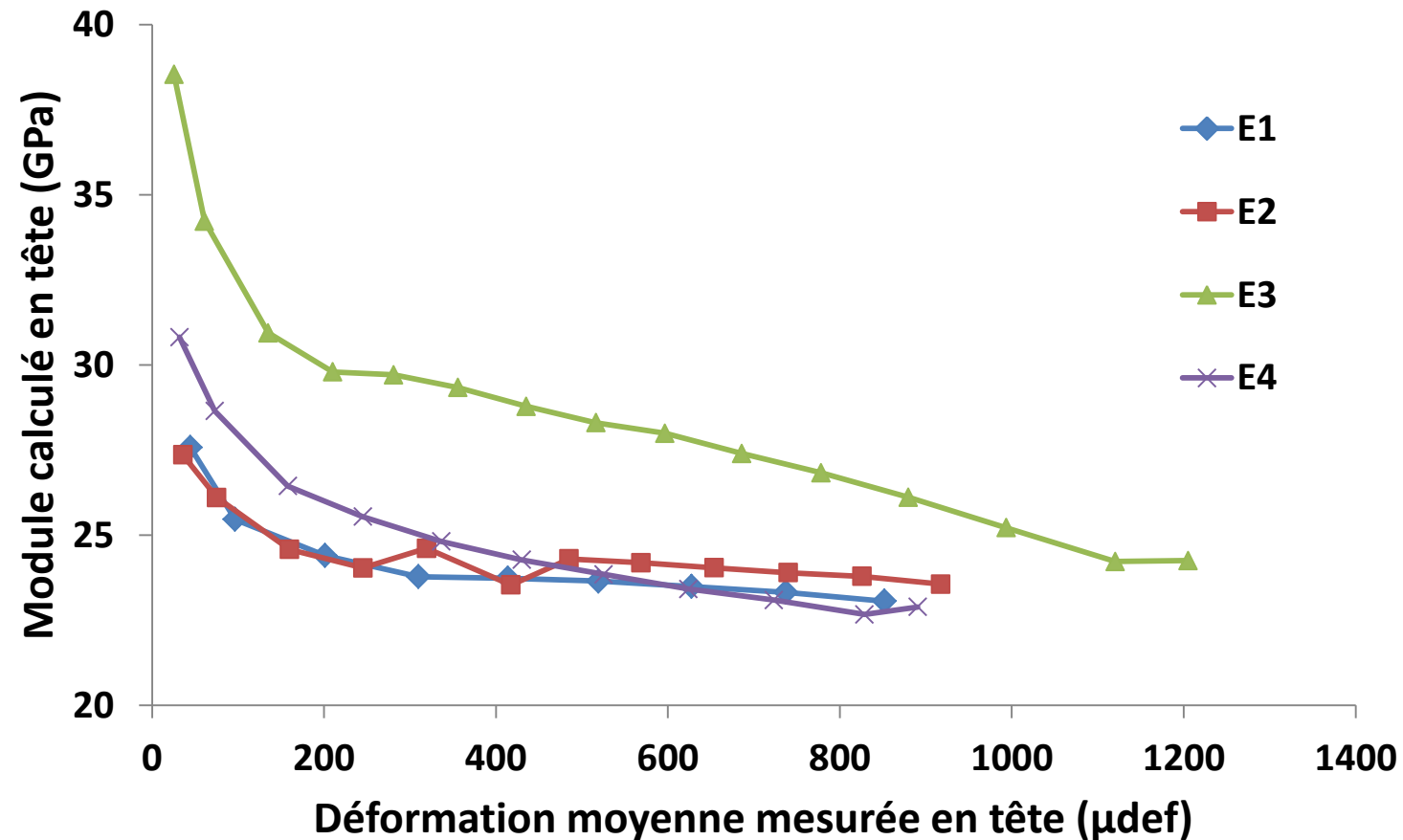
# Quel module pour interpréter un essai de chargement ?

Mesures réalisées par l'UGE

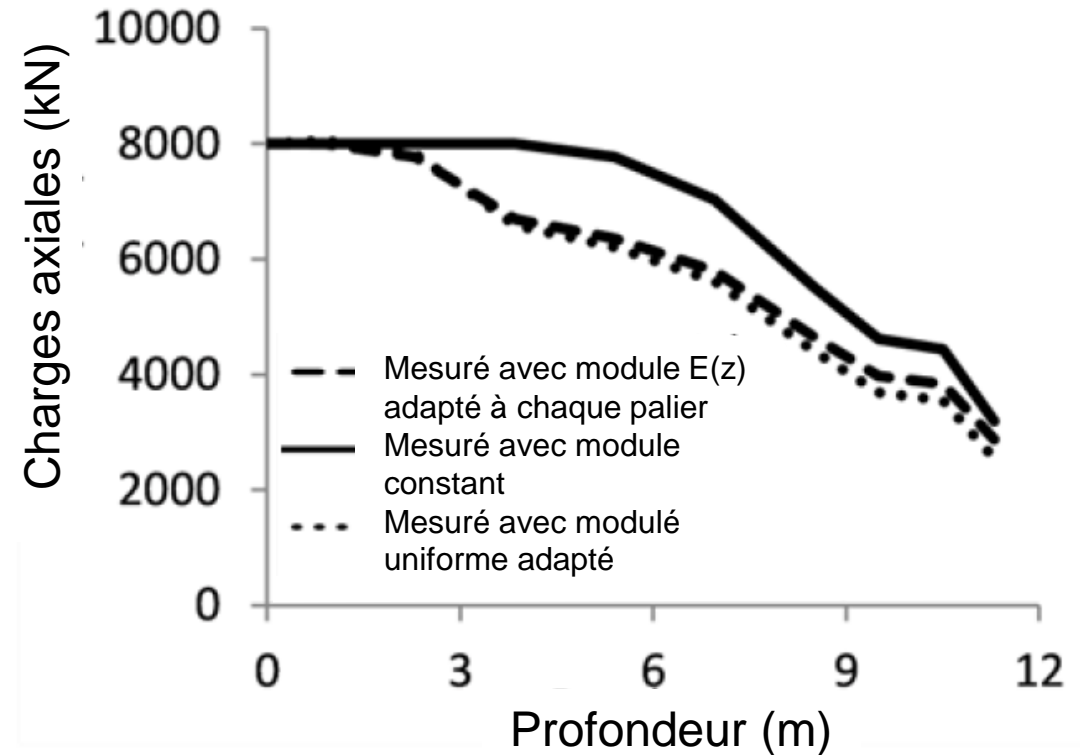
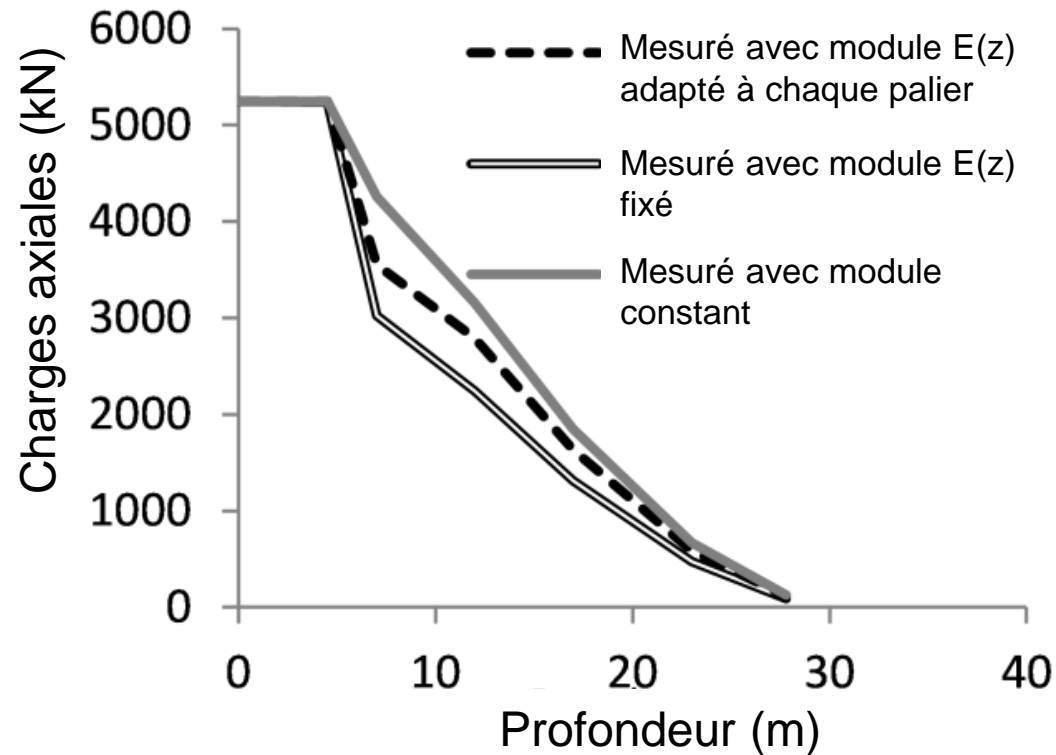


# Quel module pour interpréter un essai de chargement ?

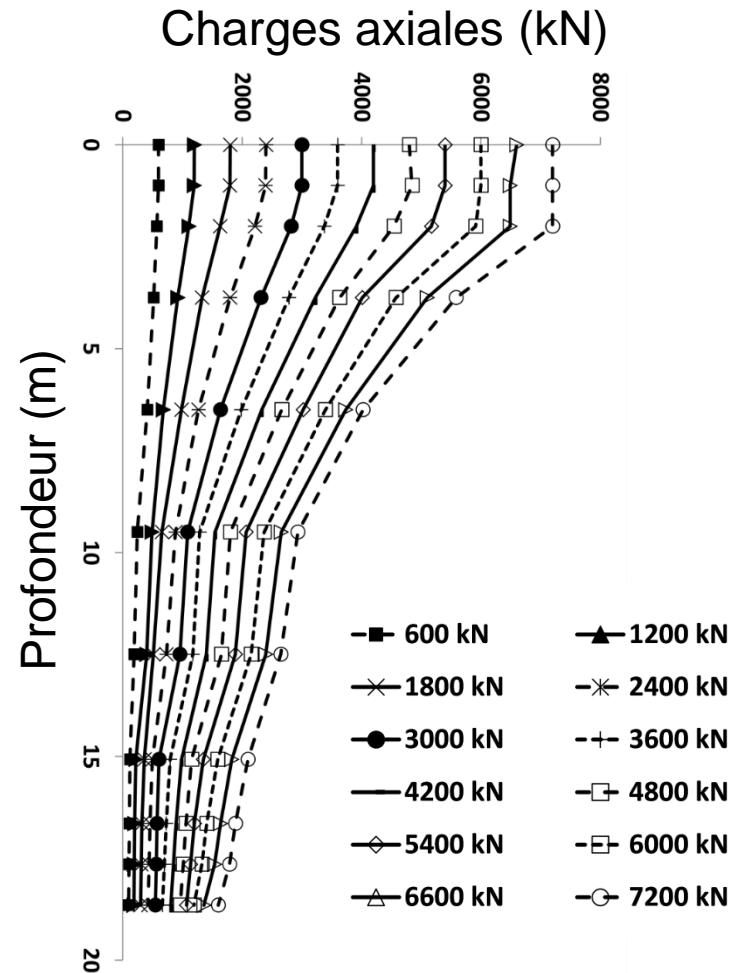
Mesures de l'évolution du module de déformation en tête du pieu en fonction de la charge appliquée



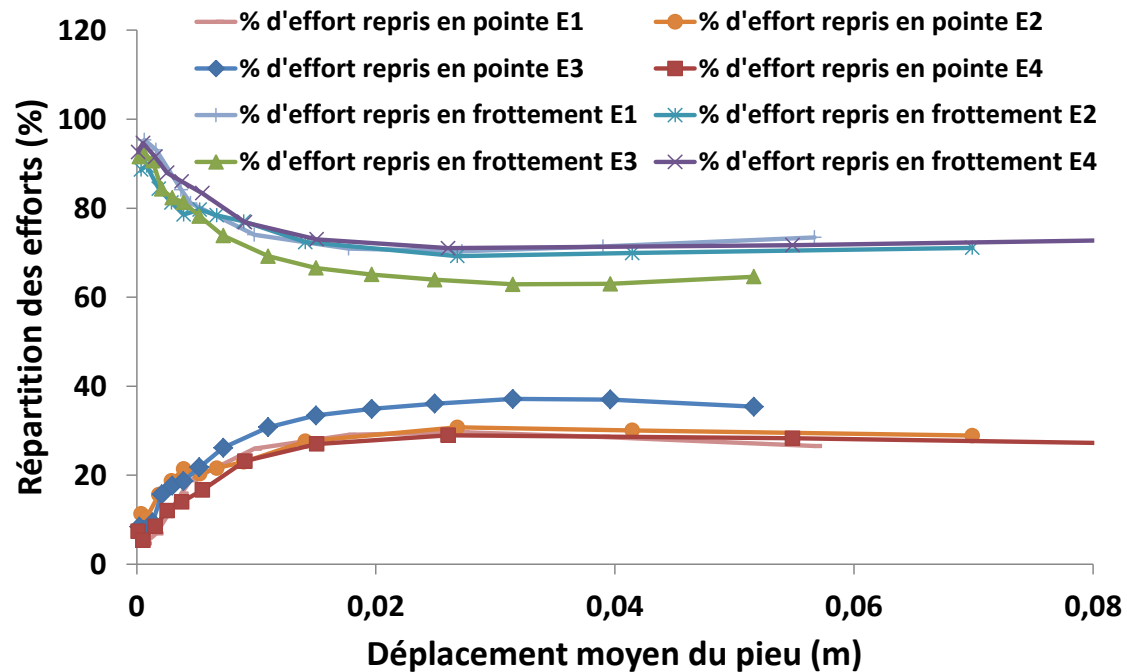
# Effet du module de déformation sur la répartition des efforts dans le pieu



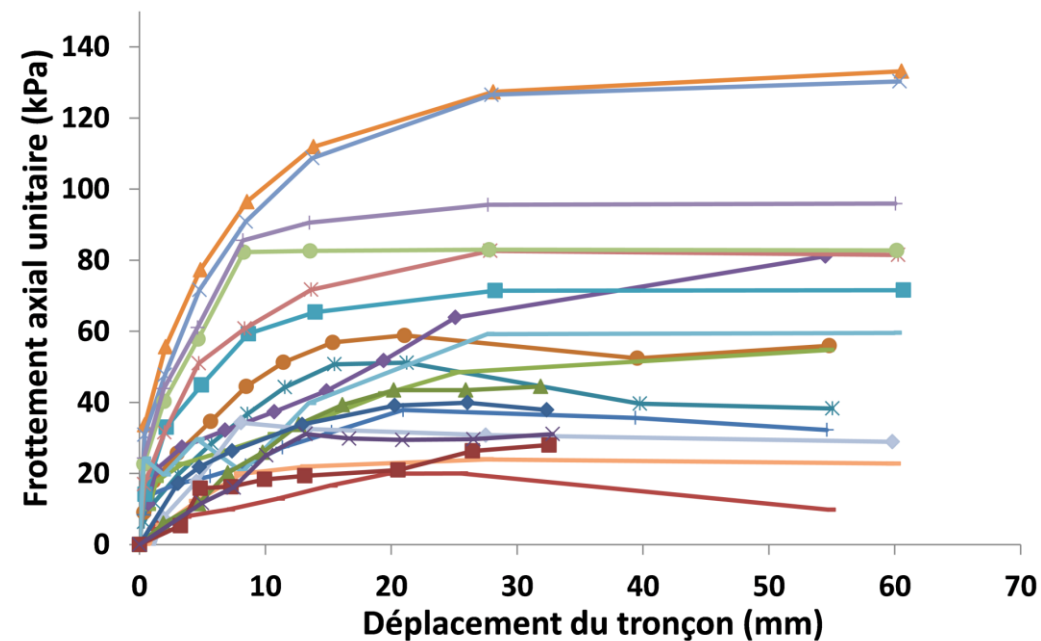
# Distribution des efforts axiaux avec la profondeur



# Courbes de mobilisation des résistances et des frottements axiaux

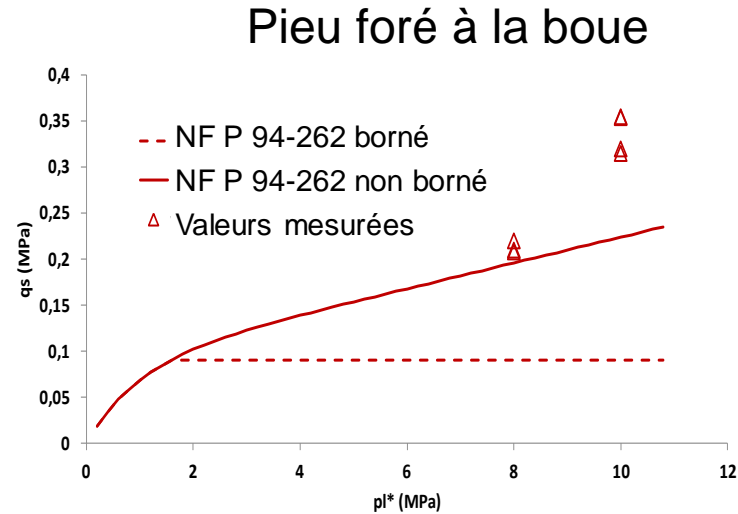


Frottements axiaux mobilisés, maximaux et limites

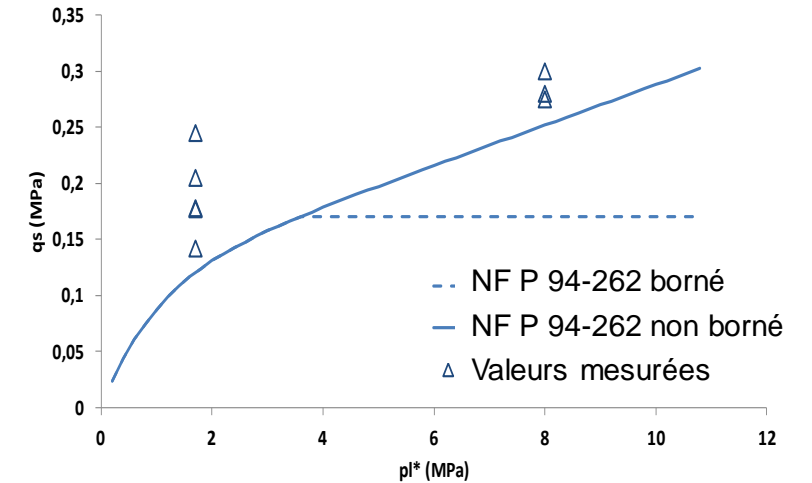


# Les frottements axiaux limites

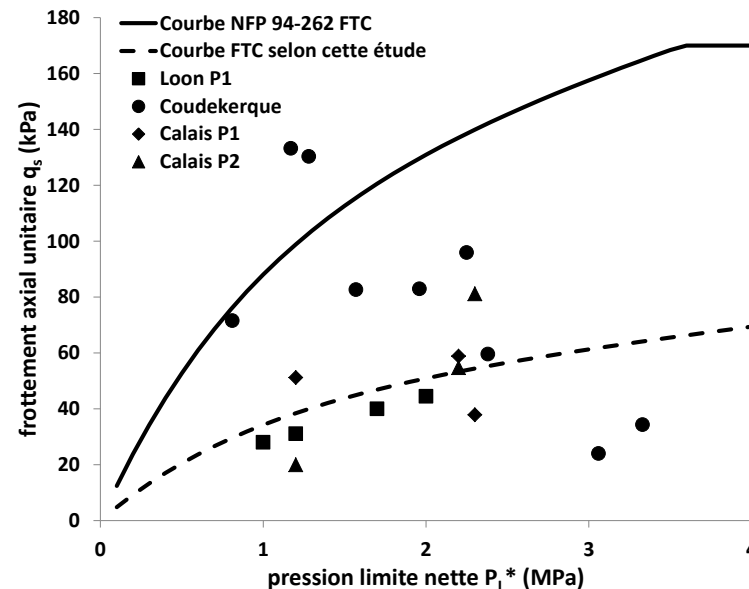
Exemple : Sable de Cuise  
 ➤ la norme sous-estime les valeurs mesurées



### Pieu foré à la tarière creuse (sous cahier des charges - Starsol)



Exemple : Sables homométriques flandriens  
 ➤ la norme surestime les valeurs mesurées



Pieu foré à la tarière creuse

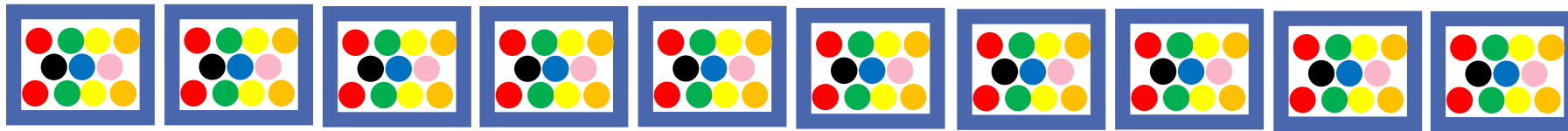
# Comment bâtir un modèle de calcul de la portance ?

Le modèle de calcul doit permettre d'évaluer les grandeurs importantes pour le dimensionnement d'un pieu :  $R_c$ ,  $R_b$ ,  $R_s$ ,  $R_{c;cr}$ .

L'évaluation du frottement axial  $q_s$  est très difficile et son incertitude est importante.

L'incertitude sur une grandeur locale est beaucoup plus importante que l'incertitude sur une grandeur globale.

*10 boîtes remplies de 10 boules numérotées de 1 à 10 :*



- *Quelle est la probabilité de tirer une valeur comprise entre 5 et 6 dans la boîte n°4 ou n°8 ? (20 %)*
- *Quelle est la probabilité d'obtenir une moyenne comprise entre 5 et 6 entre tirant une boule dans chaque boîte ? (40%, 76 % avec 50 boîtes, 90 % avec 100 boîtes, ...)*

# Comment bâtir un modèle de calcul de la portance

## Calcul de la contrainte de rupture $q_b$

À partir de données pressiométriques :

$$q_b = k_p p_{le}^* = f(p_l^*, \text{sol}, \text{pieu})$$

À partir de données pénétrométriques :

$$q_b = k_c q_{ce} = f(q_c, \text{sol}, \text{pieu})$$

Pour les sols fins, à partir de la cohésion non drainée  $c_U$  :

$$q_b = N_c c_U \text{ (en général, } N_c = 9c_U)$$

Pour les sols pulvérulents, à partir de l'angle de frottement  $\varphi'$  et de la cohésion  $c'$  :

$$q_b = c' N_c + q_0 N_q$$

## Calcul du frottement axial unitaire $q_s$

À partir de données pressiométriques :

$$q_s = f(p_l^*, \text{sol}, \text{pieu})$$
$$q_s = \alpha_{\text{pieu-sol}}(\text{sol}, \text{pieu}) \cdot f_{\text{sol}}(p_l^*, \text{sol})$$

À partir de données pénétrométriques :

$$q_s = f(q_c, \text{sol}, \text{pieu})$$
$$q_s = \alpha_{\text{pieu-sol}}(\text{sol}, \text{pieu}) \cdot f_{\text{sol}}(q_c, \text{sol})$$

Pour les sols fins, à partir de la cohésion non drainée  $c_U$  :

$$q_s = \alpha \cdot c_U \text{ (Tomlinson, API, Imperial College)}$$

Pour les sols pulvérulents, à partir de l'angle de frottement  $\varphi'$  et de la cohésion  $c'$  :

$$q_s = K \tan \delta \cdot \sigma'_v + c'$$

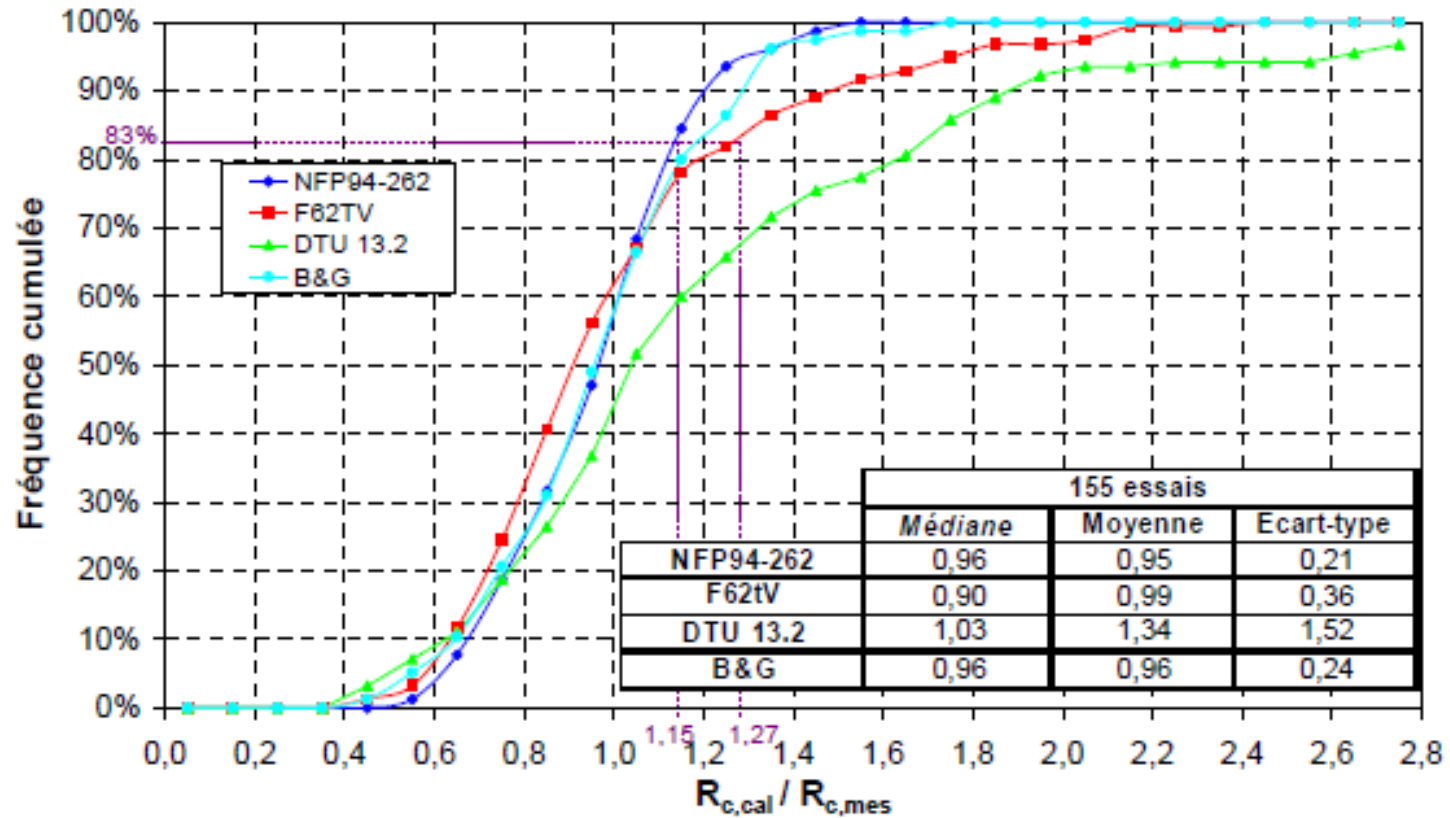
# Comment bâtir un modèle de calcul de la portance ?

Type de sol	Classe du pieu								Groupe de pieux		Total
	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	
Argile Limon	10	13	8	18	9	4	8	0	67	3	70
Sable Grave	4	8	14	14	5	1	4	3	48	5	53
Craie	4	0	4	9	1	2	4	0	21	3	24
Marne et Calcaire Marneux	8	1	3	0	0	1	3	4	15	5	20
Roche altérée et fragmentée	4	0	0	0	0	0	0	3	4	3	7
Total	30	22	29	41	15	8	19	10	155	19	174

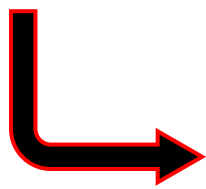
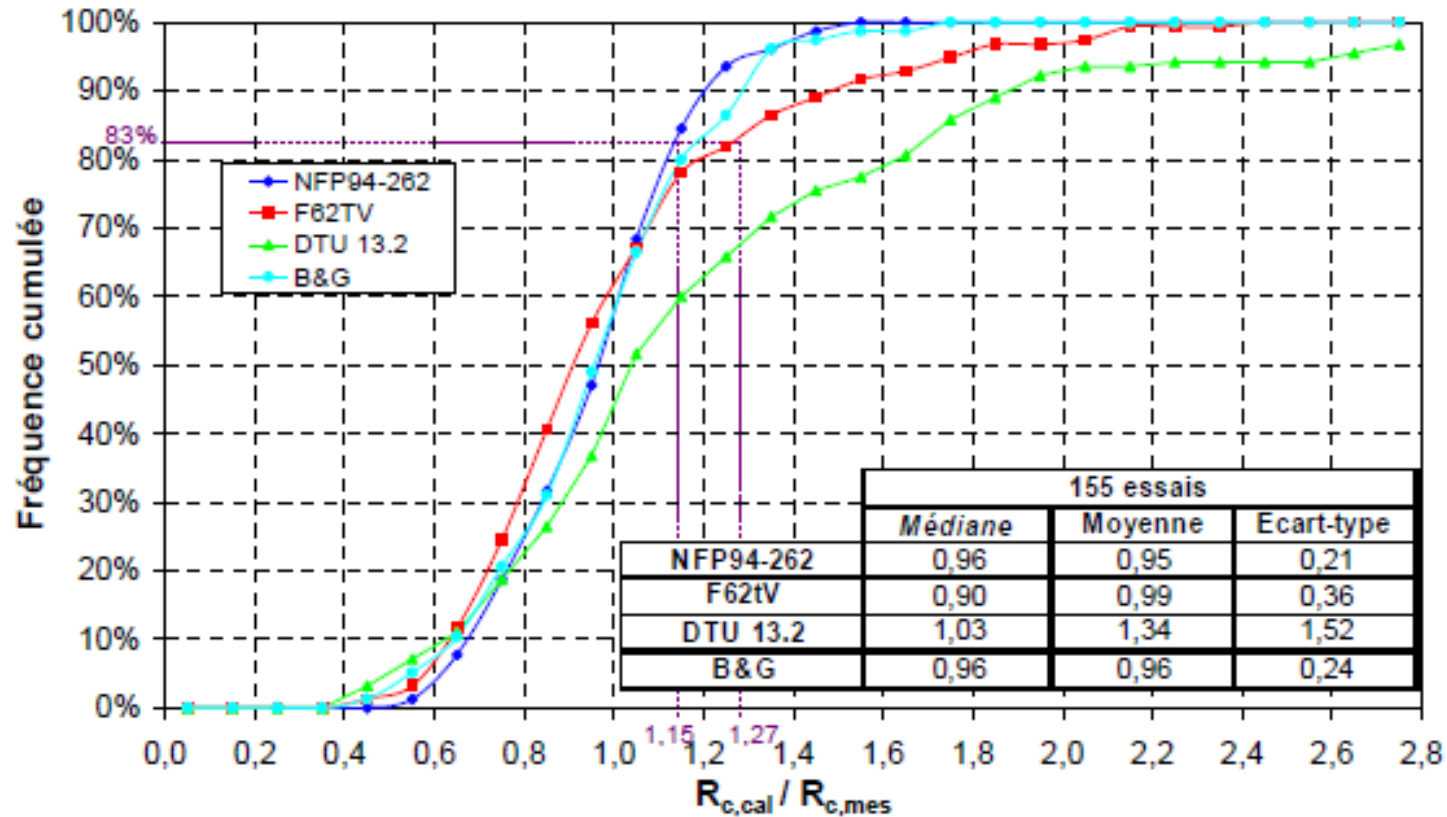
Baguelin, F., Bustamante, M., Burlon, S., Frank, R., Habert, J. et Legrand, S. (2012). Justification de la portance des pieux avec la norme « fondations profonde » NF P 94-262 et le pressiomètre. JNGG., Bordeaux 2012, 564–577

Burlon, S., Frank, R., Baguelin, F., Habert, J. and Legrand, S. (2014) Model factor for the bearing capacity of piles from pressuremeter test results A Eurocode 7 approach. Géotechnique, 64(7), 513-525.

# Comment bâtir un modèle de calcul de la portance ?



# Comment bâtir un modèle de calcul de la portance ?

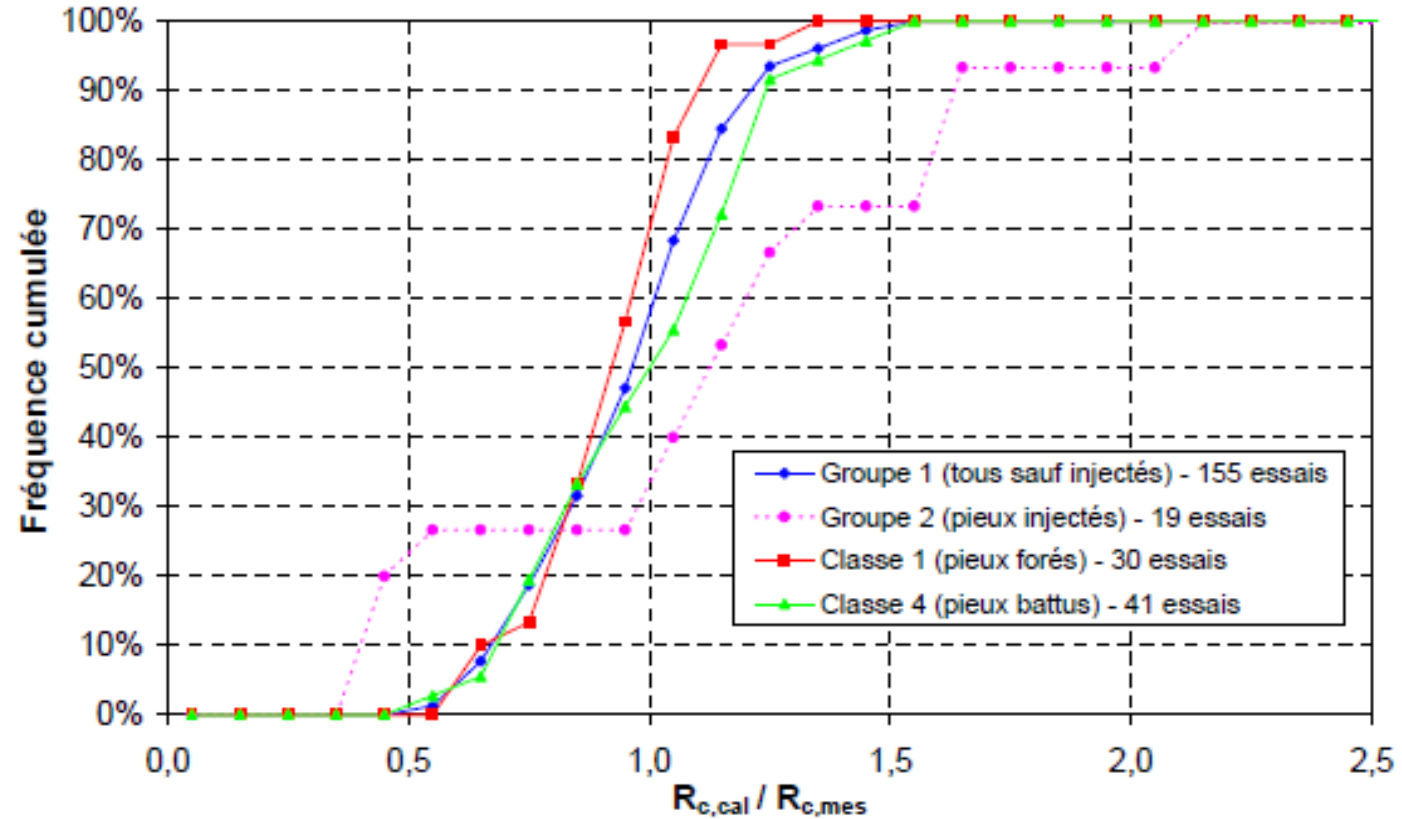


$$1.27 = 1.4 \text{ (F62TV)} / 1.1 \text{ (EC7)}$$

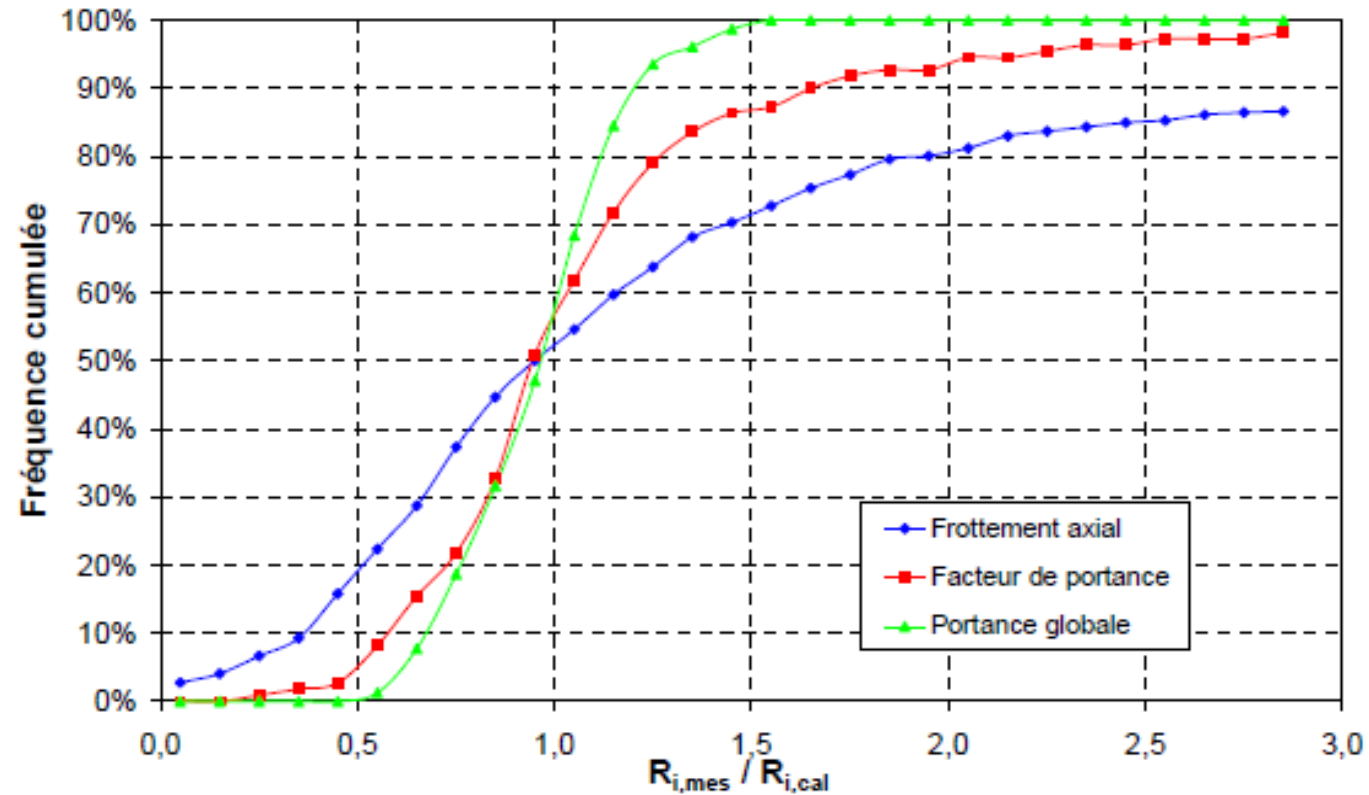
1.15 pour le modèle de portance de la norme NF P 94-262 correspond à un niveau de sécurité équivalent au modèle de portance du F62TV avec 1.27

Le coefficient  $\gamma_{Rd2}=1.1$  avait été ajouté pour ne pas modifier le coefficient global équivalent.

# Comment bâtir un modèle de calcul de la portance ?



# Comment bâtir un modèle de calcul de la portance ?



# Comment bâtir un modèle de calcul de la portance ?

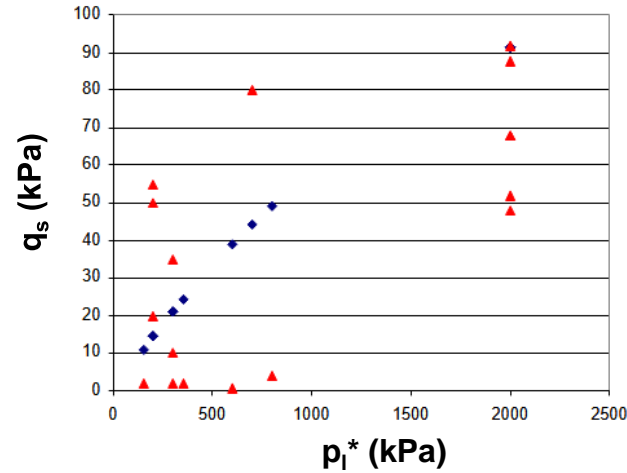


frottements axiaux estimés  
(NF P 94-262)

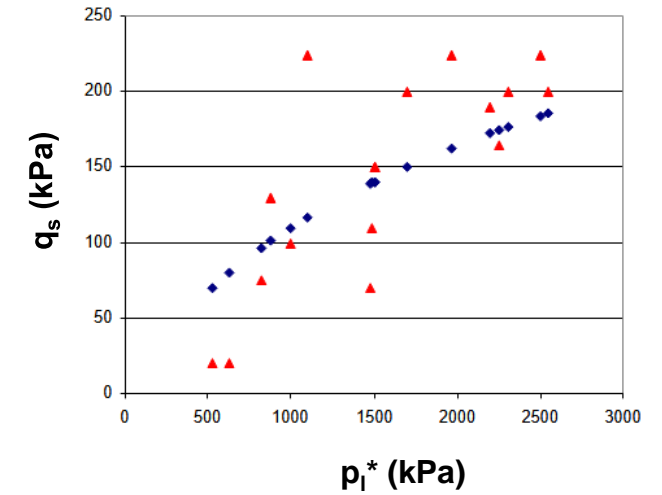


frottements axiaux mesurés

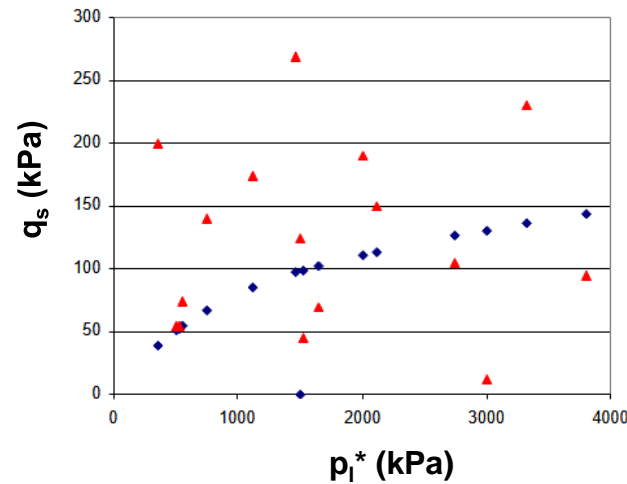
Argiles - Limons - Pieu foré à la boue



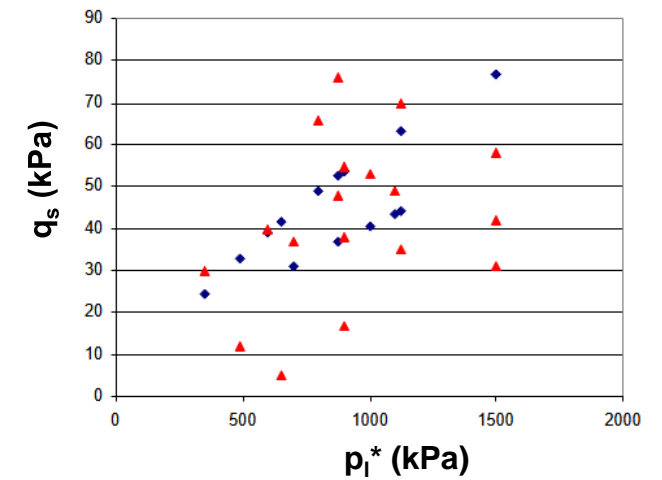
Sables - graves - Pieu vissé moulé



Sables - graves - Pieu foré à la boue

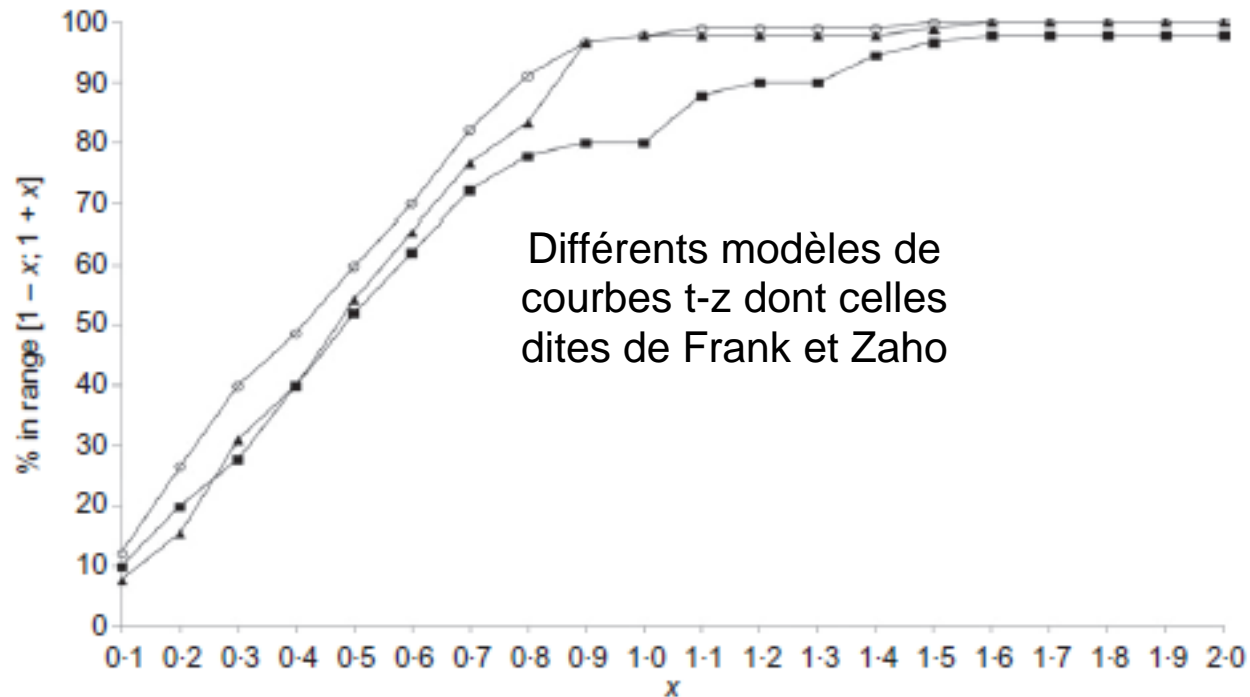


Argiles - Limons - Pieu battus acier ouverts



# Utilisation des courbes t-z

Abchir, Z., Burlon, S., Frank, R., Habert, J. and Legrand, S. (2016) t-z curves for piles from pressuremeter test results. Géotechnique, 66(2), 137-148.



A partir de la base d'essais du LCPC (90), ce graphique indique le pourcentage de pieux sous charge de service compris dans l'intervalle :

$$s_{\text{mesuré}}/s_{\text{calculé}} \cdot (1 \pm x)$$

Pour  $x=0.3$ , on trouve 30 % des pieux de la base d'essais.

Pour  $x=0.5$ , on trouve 50 % des pieux de la base d'essais.

Pour la portance, pour  $x=0.3$ , on trouve 85 % des pieux de la base d'essais.

Les courbes t-z (celles de Frank et Zhao ou d'autres) ont une probabilité très faible de pouvoir être mesurées expérimentalement. En revanche, l'estimation du tassement qu'elles permettent est bien plus fiable. Les courbes t-z sont avant tout un outil d'estimation du tassement d'un pieu.

# Conclusions et Perspectives

Depuis 1972, sous l'impulsion de F.Baguelin avec M.Bustamante, R.Frank et J.F.Jézéquel, nos connaissances sur le comportement des pieux ont fait des progrès significatifs : portance, tassements, technique de mise en œuvre, instrumentation, fluage, charges cycliques, effets de groupe, etc.

M.Bustamante, accompagné de L.Gianeselli et B.Doix, fut un contributeur essentiel à ces travaux menés au LCPC .

Les collaborations entre l'administration et les entreprises de fondations spéciales ont été très nombreuses. La base d'essais de chargement de pieux du LCPC en est le résultat.

A nous désormais de poursuivre ce travail pour mieux construire et mieux réparer les fondations profondes de nos ouvrages !

# Merci de votre attention !

