



JOURNÉE D'HOMMAGE À MICHEL BUSTAMANTE

**Résistance géotechnique des
tirants d'ancrage et des micropieux**

Le 23/10/2025

Julien HABERT

SOMMAIRE

I. Problématique

- A. Tirants d'ancrages et micropieux : des similitudes... et des différences**
- B. Le positionnement PN ARSCOP**

II. Constitution d'une base d'essais

Essais de chargement statique/essais d'arrachement pour prévoir le frottement axial unitaire à partir des paramètres pressiométriques

III. Résultats et analyse de la base des données

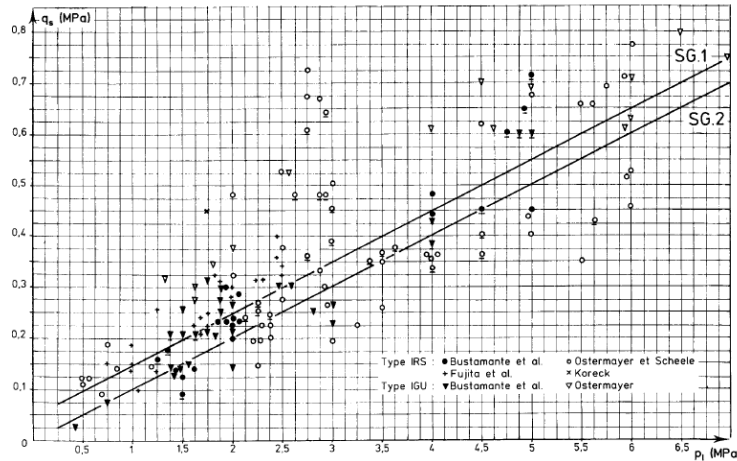
- A. Présentation des résultats**
- B. Analyse statistique**

IV. Conclusions et remarques

1. PROBLÉMATIQUE : A. DES SIMILITUDES...

Tirants d'ancrage et micropieux (post-)injectés

Éléments traités initialement de façon identique du point de vue du calcul



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

		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	$0,08 p_{IM} + 0,10$	
	Limons	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		1,5 à 1,6
	Grave	Grave sableuse		1,2 à 1,4		1,6 à 1,8
		Grave		1,3 à 1,4		1,8
Marnes 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	$0,12 p_{IM} + 0,08$	

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

Le frottement axial unitaire q_s évolue linéairement avec la pression limite pressiométrique Ménard p_{IM}

Grâce à la pression de post-injection qui suit la pression limite

1. PROBLÉMATIQUES : A. ... ET DES DIFFÉRENCES

Mais des évolutions des termes...

Tirants d'ancrage

Micropieux

IGU

IRS

Type III

Type IV

Injection Globale et Unitaire

Injection Répétitive et Sélective)

(« IGU »)

(« IRS »)

...et des conditions d'exécution

Pression d'injection

Type injection

Tirants d'ancrage

Micropieux

IGU / Type III (« IGU »)

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

$\geq 1 \text{ MPa}$
 $< p_{IM}$

IRS

$\geq p_{IM}$

$\geq p_{IM}$
mais $\leq 4 \text{ MPa}$

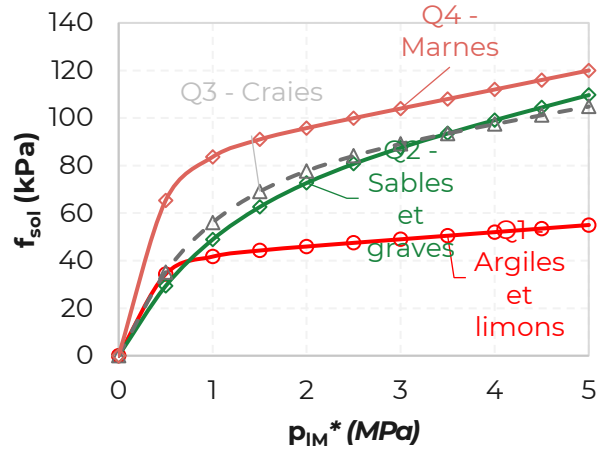
1. PROBLÉMATIQUES : A. ... ET DES DIFFÉRENCES

Et des évolutions des règles de calcul

Micropieux

NF P94-262:2012+A1:2018

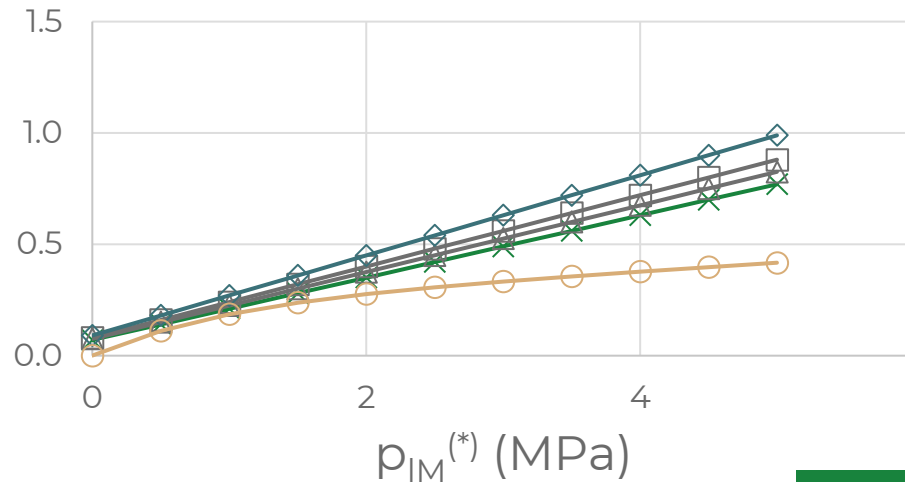
$$q_s = \alpha_{\text{pieu-sol}} f_{\text{sol}}$$



Type de sol ↓ α_{pieu}	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

$$R_s = \pi L_s B q_s$$

$\alpha q_{s,TA95}$ OU $q_{s,NF P94-262}$ (MPa)



Tirants d'ancrages scellés

Règles TA95 puis TA2020

		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		1,5 à 1,6
	Grave	Grave sableuse		1,2 à 1,4		1,6 à 1,8
		Grave		1,3 à 1,4		1,8
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 $p_{IM}+0,08$	

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

1.B. LE POSITIONNEMENT DU PN ARSCOP



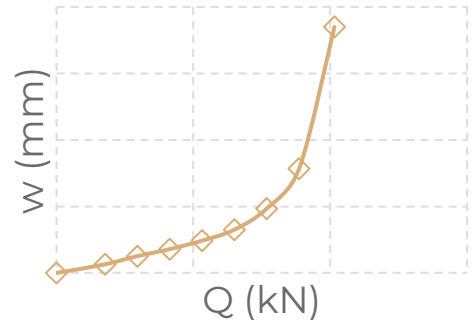
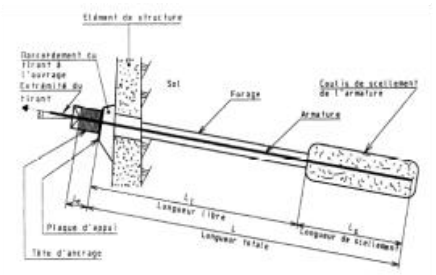
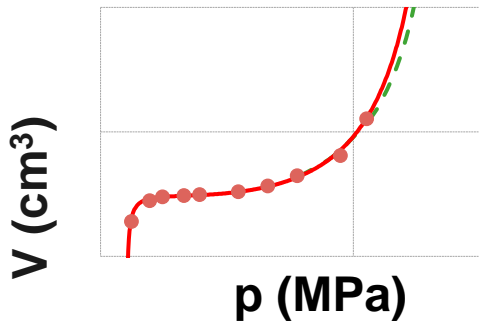
Projet national ARSCOP (Nouvelles Approches de Reconnaissance des Sols et de Conception des Ouvrages à partir du Pressiomètre)

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



1.B. LE POSITIONNEMENT DU PN ARSCOP

Des règles semi-empiriques

Nécessité de confirmer leur validité

Quantifier leur dispersion conformément aux prescriptions des eurocodes

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

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

← R_s Valeur issue du calcul (ie des abaques)

← $\gamma_{R,d}$ Facteur de modèle

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

2. CONSTITUTION D'UNE LA BASE D'ESSAIS DE CHARGEMENT

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.

Adossement aux essais utilisés pour établir les abaques initiaux (Bustamante et Doix, 1985)

=> Analyse statistique globale : précision et dispersion de la méthode d'estimation du frottement axial unitaire



2. CONSTITUTION D'UNE BASE D'ESSAIS DE CHARGEMENT

14 tirants instrumentés

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

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

Micropieux uniquement

Faible débit d'injection

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

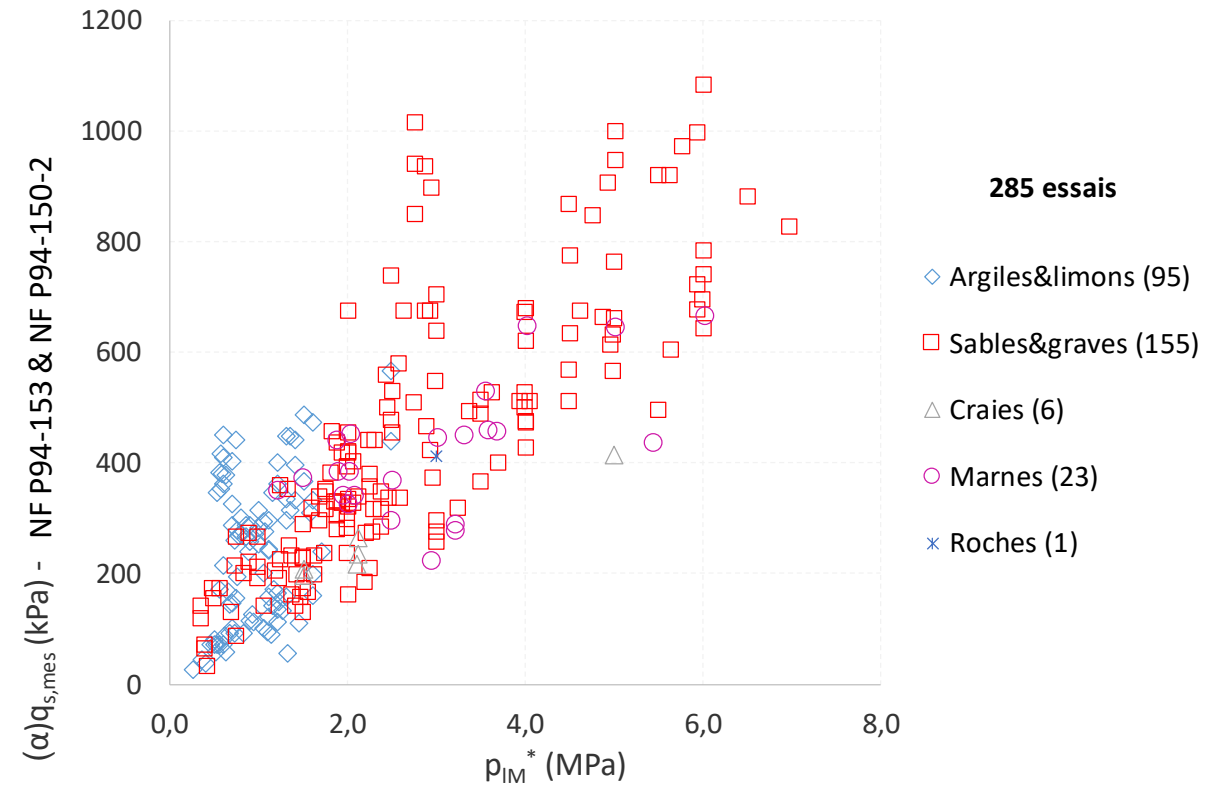
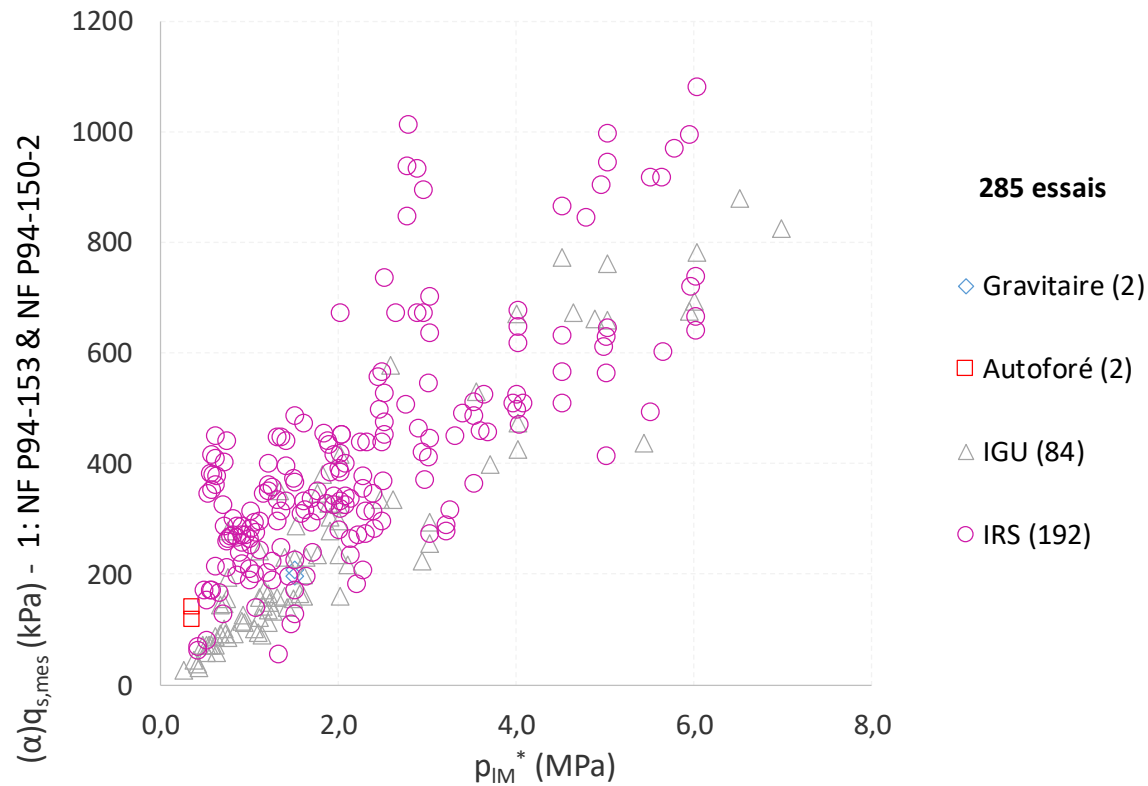
Diamètre de forage entre 90 et 250 mm

Longueurs scellées entre 4,75 et 18 m

3. RÉSULTATS OBTENUS

Variation du frottement axial unitaire mesuré :

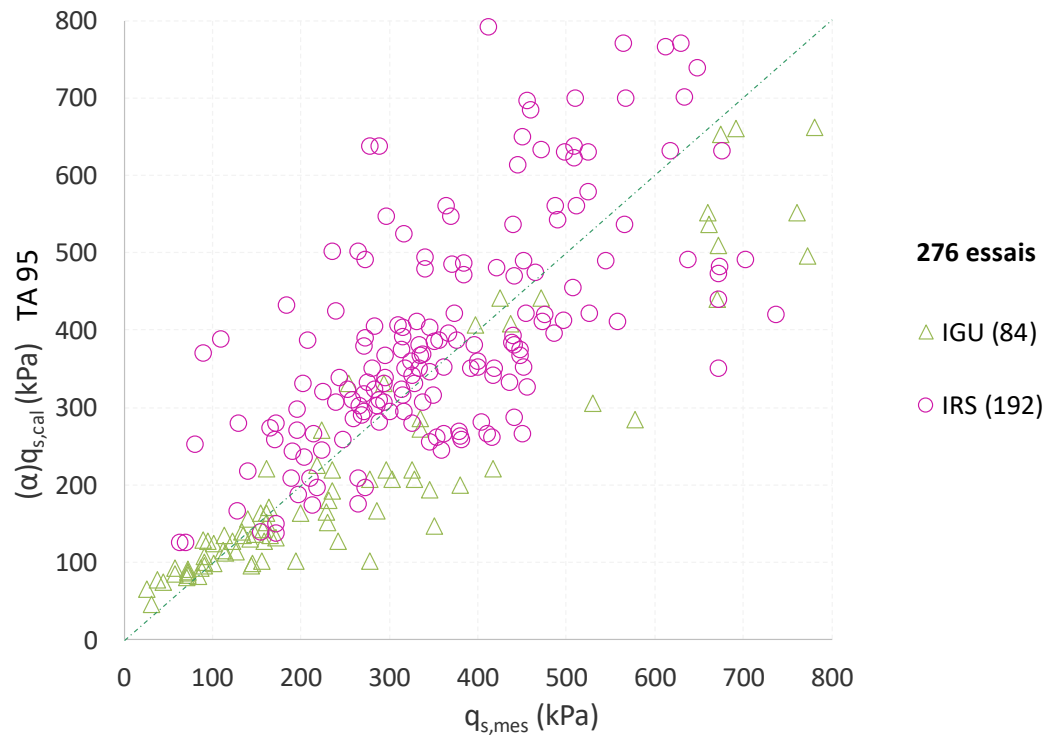
- par technique d'exécution
- par type de terrain



3. RÉSULTATS OBTENUS

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

- par technique d'exécution
- par type de terrain

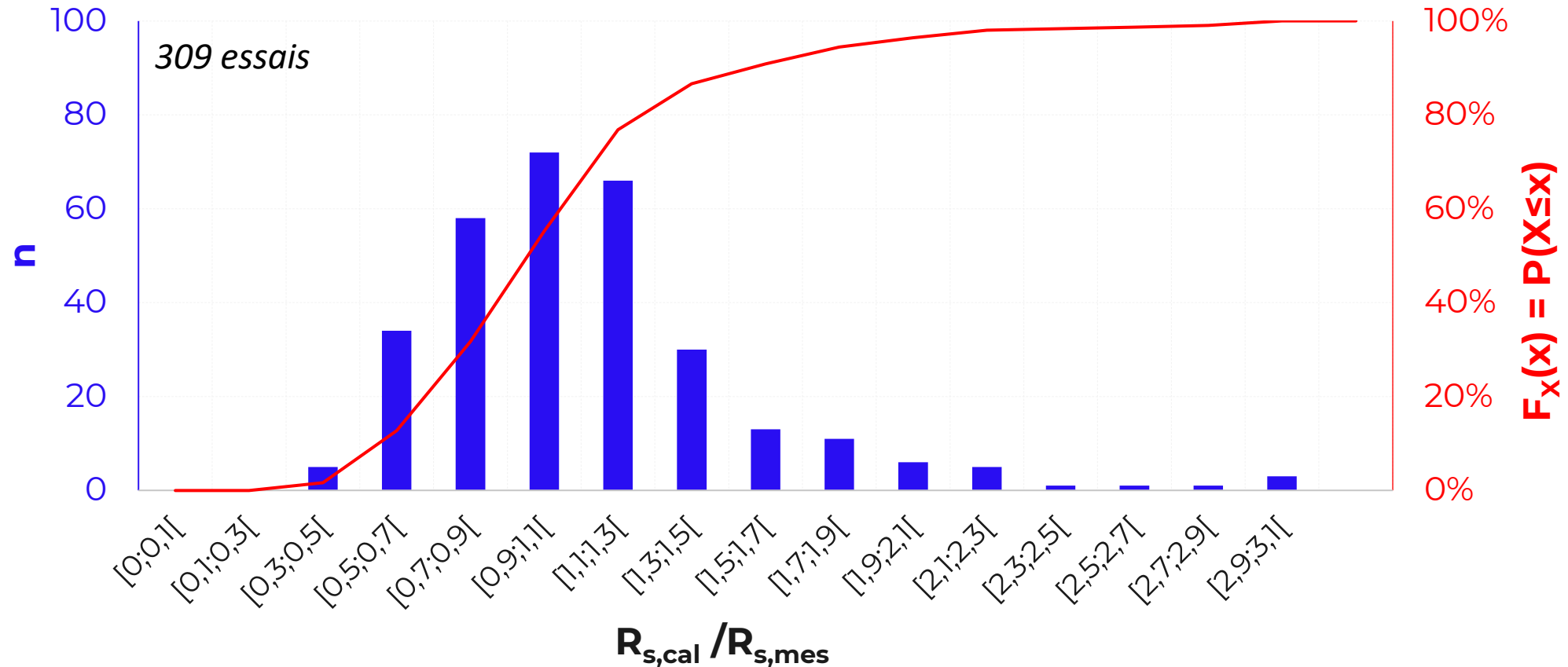


=> Des règles qui marchent bien, sans distinction des tirants ou des micropieux

3. ANALYSE STATISTIQUE

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

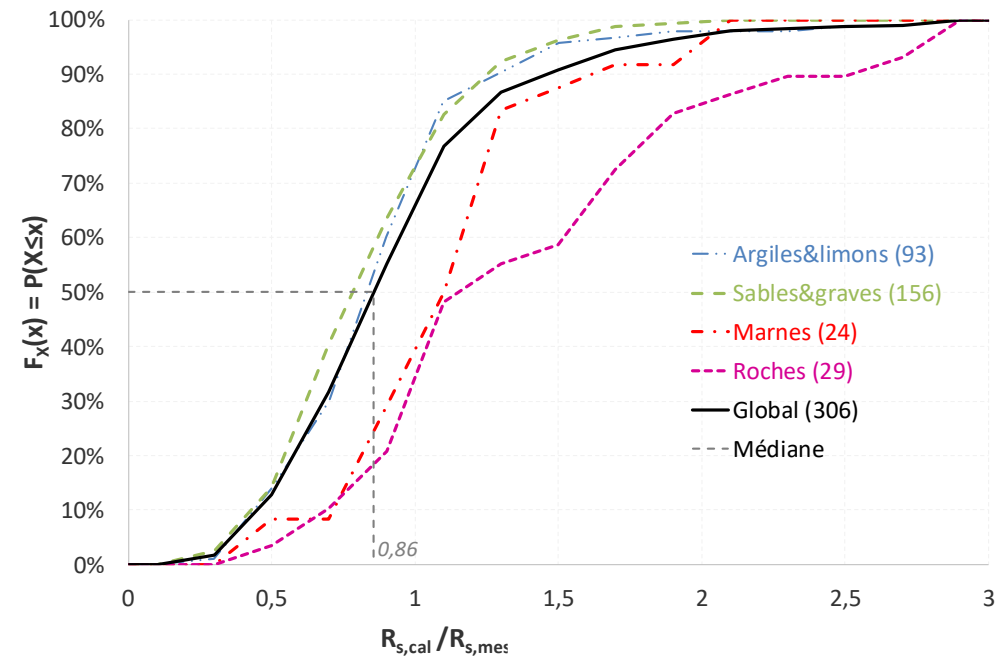
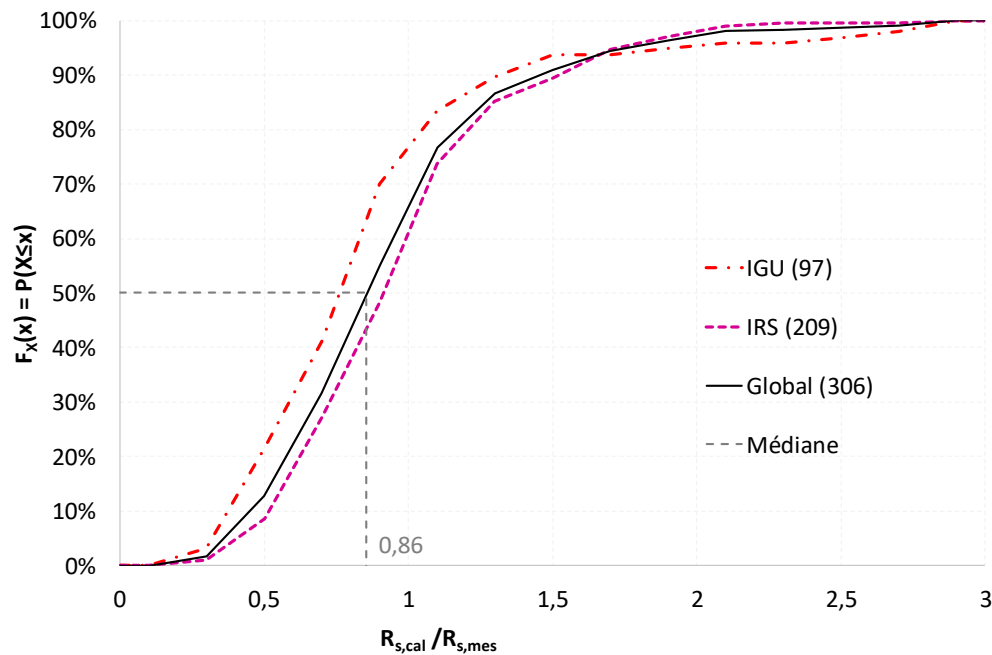
- Histogramme des effectifs
- Fonction de répartition



3. ANALYSE STATISTIQUE

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

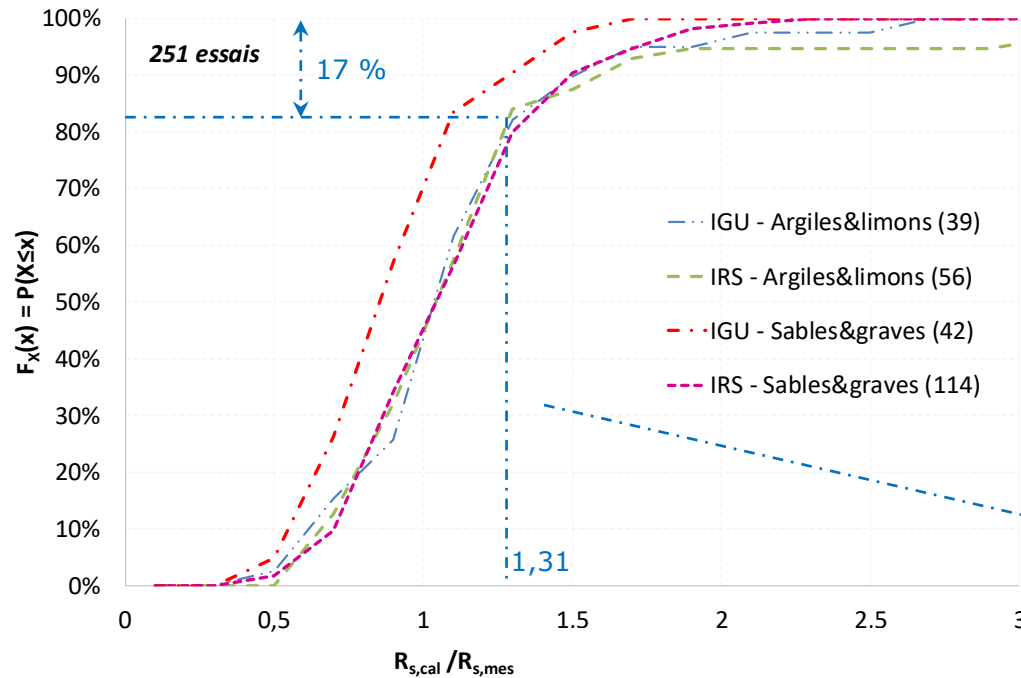
- par technique d'exécution
- par type de terrain



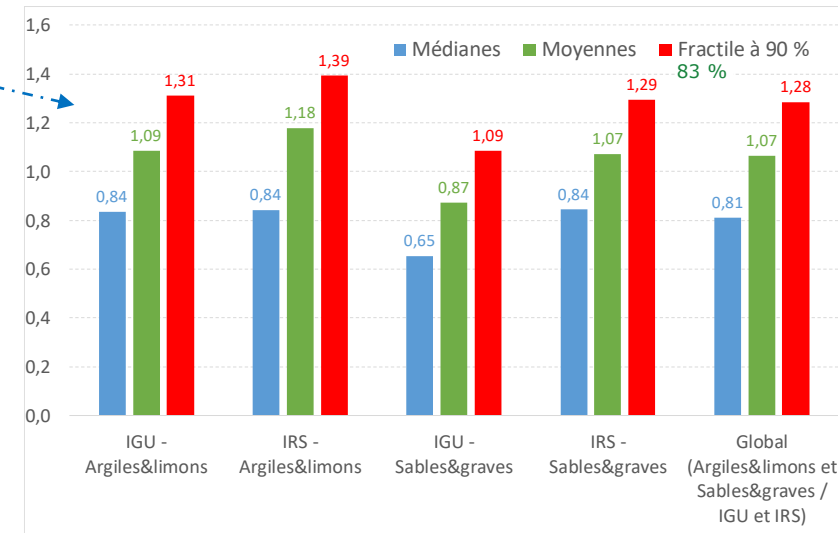
=> Des règles « bien calées », précises

3. ANALYSE STATISTIQUE

IGU et IRS, dans les sols fins et grossiers

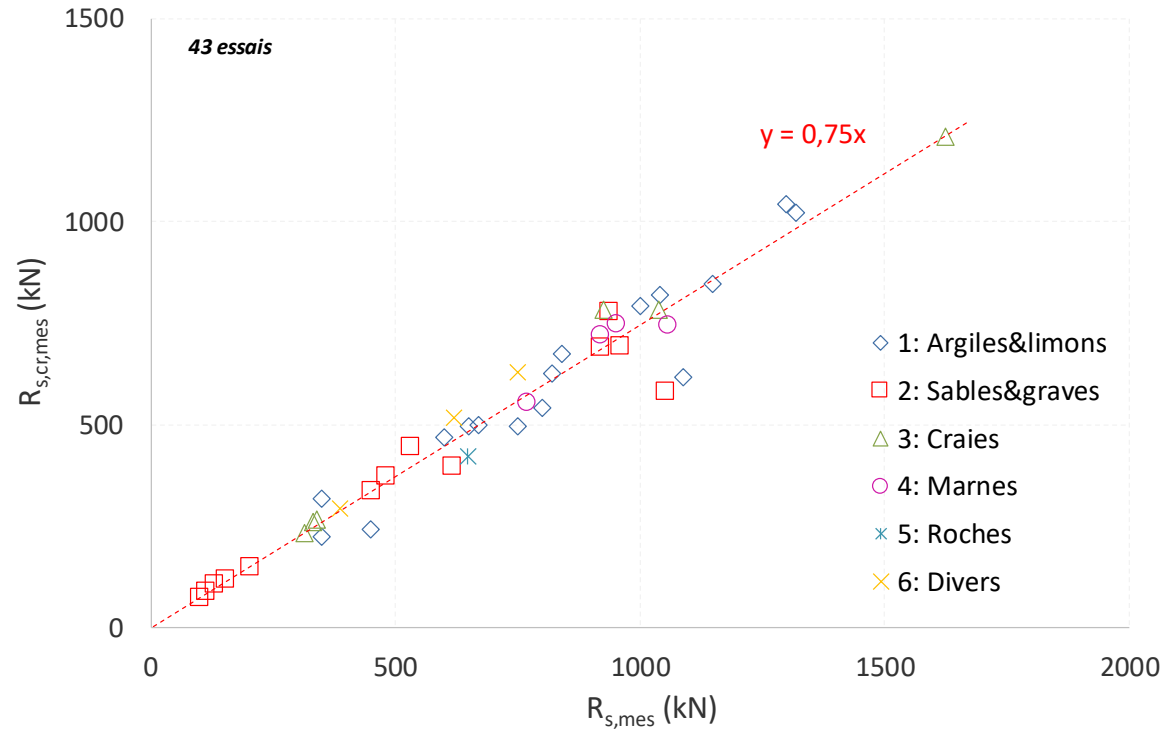


=> Une dispersion quantifiée, cohérente avec les facteurs de modèles proposés par les normes (1,4)



3. CHARGE CRITIQUE DE FLUAGE

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



$\Rightarrow R_{s,cr}/R_s = 0,75$ (proche de 0,70 retenu pour les fondations profondes)

4. CONCLUSIONS ET REMARQUES

Sous réserve des conditions d'exécution « strictes » (pressions, volumes et débits d'injection), les abaques de prédimensionnement à partir du pressiomètre sont

- **simples ($q_s = ap_{IM} + b$)**
- **Et bien calés!**

Pertinence « de nouveau » regrouper les micropieux injectés et tirants d'ancrages si réalisés effectivement de façon identique (quand c'est possible)

- => prNF P94-262:2027
- Micropieux de type III, micropieux IGU et micropieux IRS

La dispersion de la méthode 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 compris entre 1,3 à 1,4**.

La **charge critique de fluage** représente en moyenne **75 %** de la résistance.

MERCI DE VOTRE ATTENTION

