



Instrumentation des essais de chargement sur pieux

CFMS – Journée d'hommage à M.Bustamante

M.Marou – FUGRO France

A.Reynaud – GINGER CEBTP

23/10/2025



Introduction : les essais statiques sur fondations profondes

3 méthodes de dimensionnement des fondations profondes (norme NF P94-262) :

- Méthode terrain
- Pieu modèle
- Essais de pieux

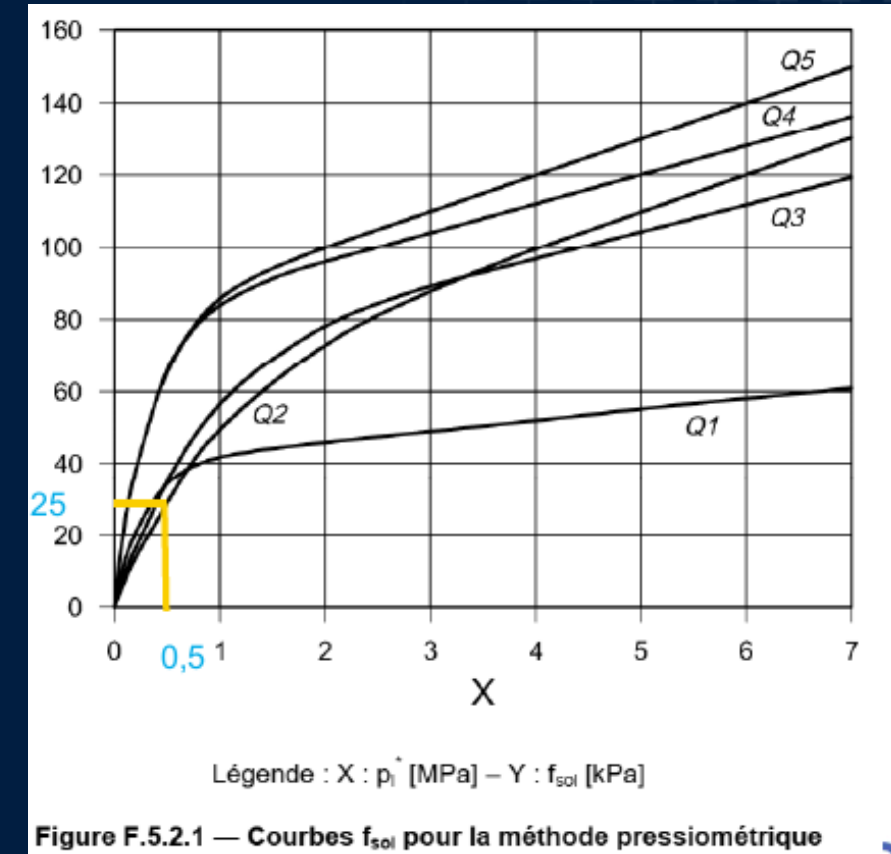


Introduction : les essais statiques sur fondations profondes

La quasi-totalité des fondations profondes en France sont dimensionnées à partir d'essais in situ (CPT et pressiomètre) et des deux méthodes (modèle terrain ou pieu modèle) :

Ces abaques (p_l^* ou q_c ; f_{sol}) et $\alpha_{\text{pieu-sol}}$ ont pu être créées grâce aux nombreux essais de pieux réalisés par Mr Bustamante et ses équipes.

C'est également le cas pour le coefficient de portance k_p .



Introduction : les essais statiques sur fondations profondes

A1

Pieux en traction

Tableau 8.9.2 – Essais à réaliser pour des fondations profondes sollicitées en traction à l'ELS quasi-permanent ($F_{t;d} > 0,15R_s$)

Classe de conséquence	Catégorie géotechnique	Pieux de classe 1 à 7 hormis les pieux de catégorie 10 et 15 (Annexe A)	Micropieux de classe 1bis et 8, pieux de classe 8 et pieux de catégorie 10 et 15 (Annexe A)
1	1	—	Essai de contrôle
	2	Essai de contrôle	
2	2	Essai de conformité et Essai de contrôle	
	3	Essai préalable dans les sols argileux ($I_p > 20$)	
3	2 ou 3	Essai de conformité et Essai de contrôle	

NOTE 1 – Pour les fondations supportant des ponts, les principes de l'annexe Q sont à appliquer. En particulier, pour les cas de charge à l'ELS quasi-permanent, la résultante des efforts axiaux s'exerçant sur les fondations profondes ne doit pas rendre compte d'un état de traction.

NOTE 2 – Les essais de conformité peuvent être considérés comme des essais de contrôle.

NOTE 3 – L'essai de conformité est mené en phase exécution sur une fondation profonde hors ouvrage à une charge d'essai égale à la valeur estimée de la résistance limite géotechnique lors de la conception.

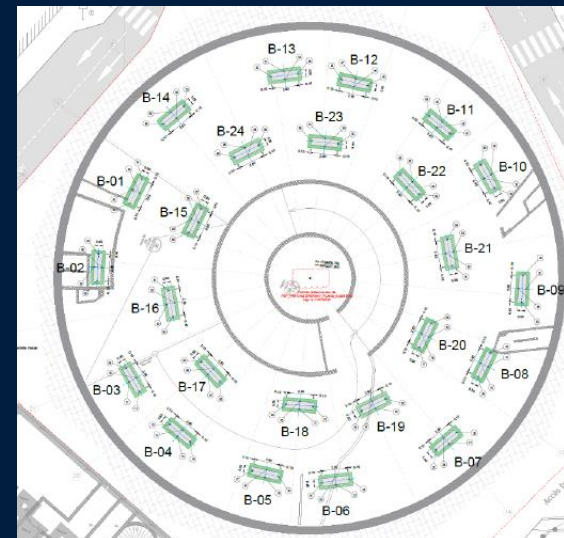
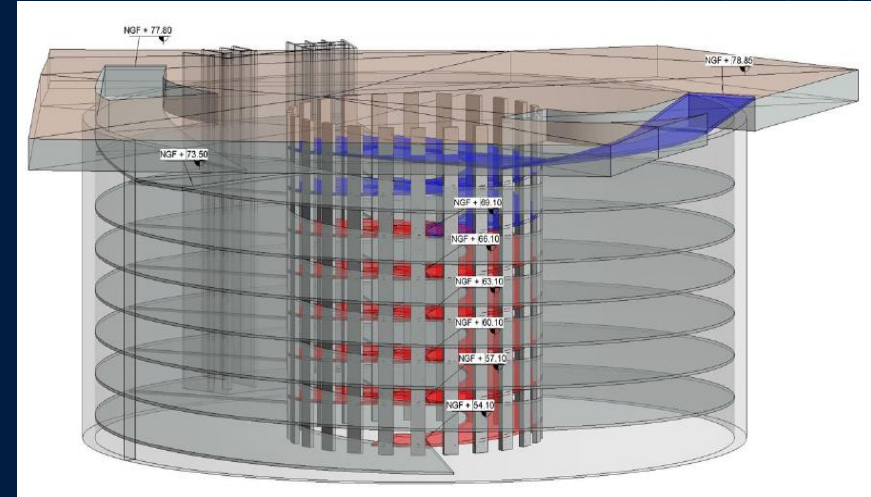
ELS_{qp}

Si $F_{t;d} > 0,15.R_s$

R_s : résistance de frottement axial



Pour les pieux en traction à ELS_{qp} essais demandés



Introduction : les essais statiques sur fondations profondes

Méthode pressiométrique – pieux forés et tarière creuse

		ELS quasi permanent	
		pointe	frottement
Compression	Non ancré dans la craie	2,8 $\frac{1,1 \times 1,15 \times 1,1}{0,5}$	2,0 $\frac{1,1 \times 1,15 \times 1,1}{0,7}$
	Ancré dans la craie	3,4 $\frac{1,1 \times 1,4 \times 1,1}{0,5}$	2,4 $\frac{1,1 \times 1,4 \times 1,1}{0,7}$
Traction	Non ancré dans la craie	–	3,3* $\frac{1,5 \times 1,4 \times 1,1}{0,7}$
	Ancré dans la craie	–	4,0* $\frac{1,5 \times 1,7 \times 1,1}{0,7}$

*6.7 = 1/0.15 si absence d'essais

$\gamma_{r,d1} * \gamma_{r,d2}$ remplacé par ξ

On applique les coefficients ξ_1 et ξ_2 :

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

N	1	2	3	4	≥ 5
ξ_1	1.40	1.30	1.20	1.10	1.00
ξ_2	1.40	1.20	1.05	1.00	1.00

Sécurité 2.2 au lieu de 4 par la méthode essai de pieu au lieu de la méthode modèle terrain malgré la réalisation d'un essai statique

Sécurité 2.2 au lieu de 4 par la méthode essai de pieu au lieu de la méthode modèle terrain malgré la réalisation d'un essai statique

Rappel normatif : norme d'exécution NF EN ISO 22477 : chargement en tête ou avec vérins embarqués

ISSN 0233-3901

norme française **NF EN ISO 22477-1**
Décembre 2018

Indice de classement : P 94-822-1

ICS : 93.020

**Reconnaissance et essais géotechniques —
Essais des structures géotechniques —
Partie 1 : Essais de pieux : essai de chargement
statique en compression**

E : Geotechnical investigation and testing — Testing of geotechnical structures — Part 1: Testing of piles: static compression load testing
D : Geotechnische Erkundung und Untersuchung — Prüfung von geotechnischen Bauwerken und Bauwerksteilen — Teil 1: Pfahlprobelastungen durch statische axiale Druckbelastungen

Norme française

homologuée par décision du Directeur Général d'AFNOR en mai 2019.
Remplace la norme homologuée NF P94-150-1, de décembre 1989.

Correspondance

La Norme européenne EN ISO 22477-1:2018 est mise en application avec le statut de norme nationale par publication d'un texte identique et reproduit intégralement la Norme internationale ISO 22477-1:2018.
La version anglaise de cette norme française a été prépubliée dès que la norme européenne a été disponible, en décembre 2018.

Résumé

Le présent document établit les spécifications relatives à l'exécution des essais de pieux sous charge statique, au cours desquels un pieu unique est soumis à une charge de compression axiale statique afin de définir son comportement charge-déplacement. Il s'applique aussi bien aux pieux verticaux qu'aux pieux inclinés et couvre tous les types de pieux. Les essais envisagés dans ce document sont limités aux essais de chargement par paliers. Les essais de chargement de pieux à vitesse de pénétration constante et les essais de chargement cyclique ne sont pas couverts par la présente norme.

Descripteurs

Thésaurus International Technique : géotechnique, sol, structure, pieu de fondation, charge statique, essai de compression, essai statique, contrainte axiale, mesurage, déplacement, durée.

Modifications

Par rapport au document remplacé, adoption de la norme européenne.

Corrections

Édité et diffusé par l'Association Française de Normalisation (AFNOR) — 11, rue Francis de Pressensé — 93571 La Plaine Saint-Denis Cedex
Tél. : + 33 (0)1 41 62 60 00 — Fax : + 33 (0)1 49 17 90 00 — www.afnor.org

© AFNOR — Tous droits réservés

Version de 2018-12-P

ISO 22477-1:2018(F)

Annexe B
(informative)

Essai de chargement bidirectionnel

B.1 Essai de chargement bidirectionnel:

L'objectif de l'essai de chargement bidirectionnel consiste à utiliser une section de l'élément de fondation comme réaction pour charger une autre section. Dans un essai de chargement bidirectionnel, un ou plusieurs niveaux de vérins sont installés dans le pieu.

La résistance totale est la résistance par frottement au-dessus du vérin intégré à laquelle on ajoute la résistance par frottement et la résistance de pointe en dessous du vérin intégré. La capacité mobilisée totale est par conséquent limitée à:

- deux fois le minimum de la réaction au-dessus et en dessous du vérin intégré;
- la capacité maximale ou l'expansion maximale du dispositif de chargement.

Un essai de chargement bidirectionnel par compression axiale à un seul niveau (réalisé avec un seul vérin ou un seul niveau de vérins) fournit des mesures distinctes et directes de:

- la résistance à la compression en dessous du vérin intégré (y compris la résistance de pointe et le frottement latéral);
- le frottement latéral mobilisé au-dessus du vérin intégré.

NOTE La résistance latérale au-dessus du vérin intégré peut différer de celle mesurée en compression.

Il est préférable d'utiliser un vérin de chargement spécialement conçu pour tolérer un certain niveau d'inclinaison et de mouvement latéral du système de piston, de sorte que la pression exercée soit convertie en une force sans générer de frottement dans le système de piston.

B.2 Nombre de vérins

Afin d'assurer une mobilisation complète de la capacité de compression axiale, le vérin bidirectionnel doit être placé à un niveau qui correspond au point d'équilibre à l'intérieur du pieu, de sorte que la réaction au-dessus du vérin soit égale à la réaction en dessous.

Pour positionner le dispositif de chargement au niveau souhaité à l'intérieur du pieu, on doit le fixer sur un cadre porteur ou sur la cage d'armature.

Plusieurs niveaux de vérins peuvent être utilisés dans les conditions suivantes:

- pour fournir des informations sur la répartition du frottement latéral;
- pour assurer une mobilisation complète de la résistance de pointe, en permettant des déplacements plus importants.

— Les essais réalisés avec plusieurs niveaux de vérins nécessitent une planification minutieuse afin de garantir une réaction suffisante de chaque section du pieu pour chaque palier de chargement.

B.3 Installation des vérins intégrés

Il est préférable de minimiser toute variation de la construction du pieu d'essai par rapport à la normale.

22

© ISO 2018 — Tous droits réservés

Instrumentation des essais de chargement sur pieux

1. Les différents systèmes de réaction
2. Mesurer les charges
3. Mesurer les déplacements
4. Cas des essais horizontaux

Systemes de reaction



Archimède



2 MN



4 MN



5.5 MN



10 MN



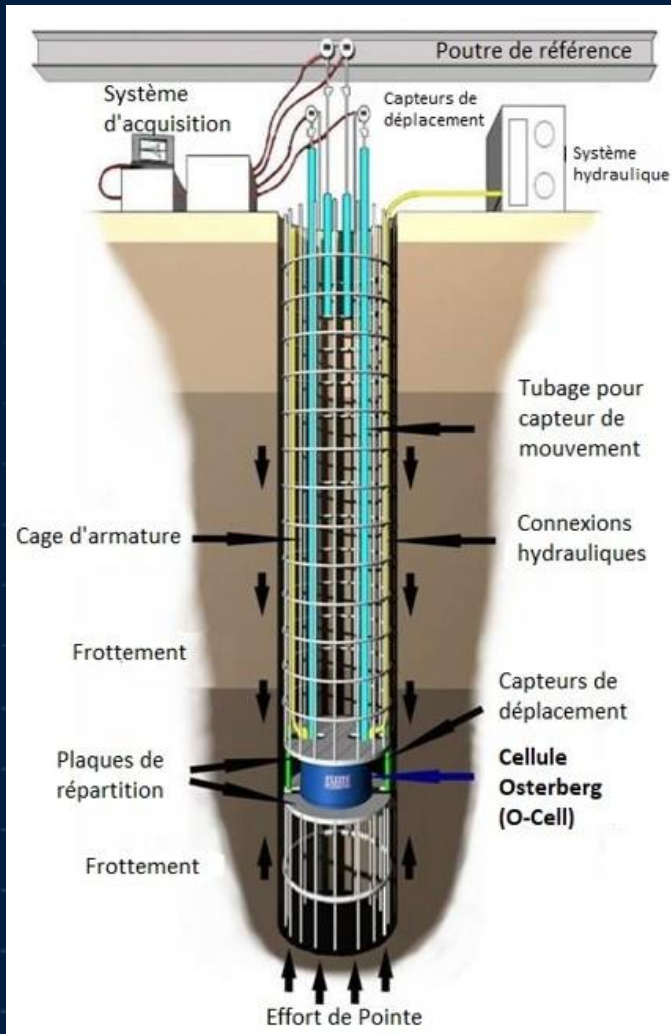
12 MN

Systemes de réaction



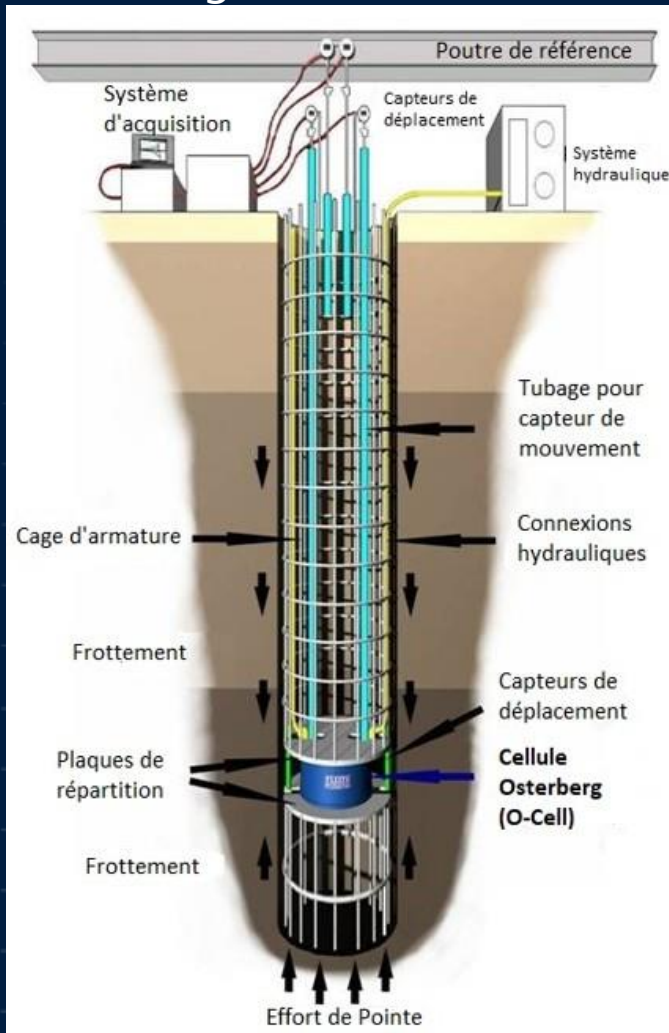
Lié à rupture d'une barre d'ancrage

Essai par vérins embarqués

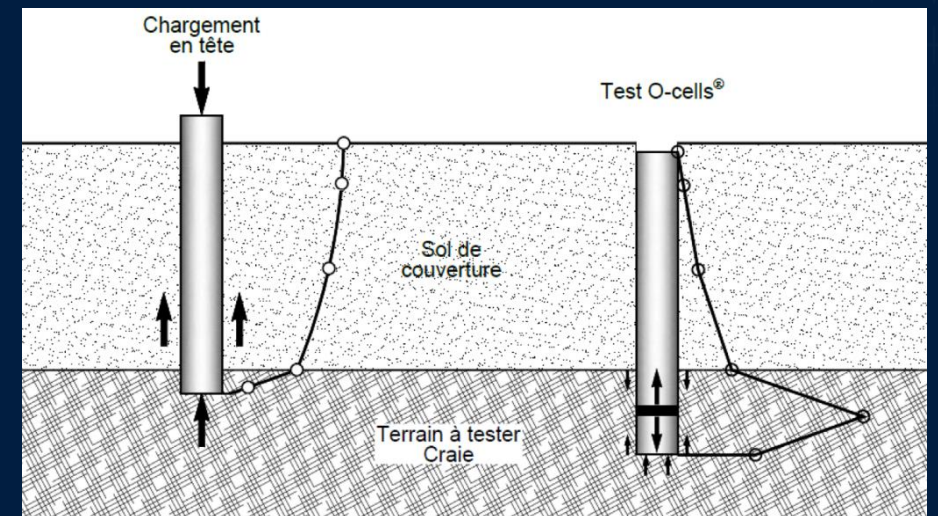


Essai par vérins embarqués

Avantages

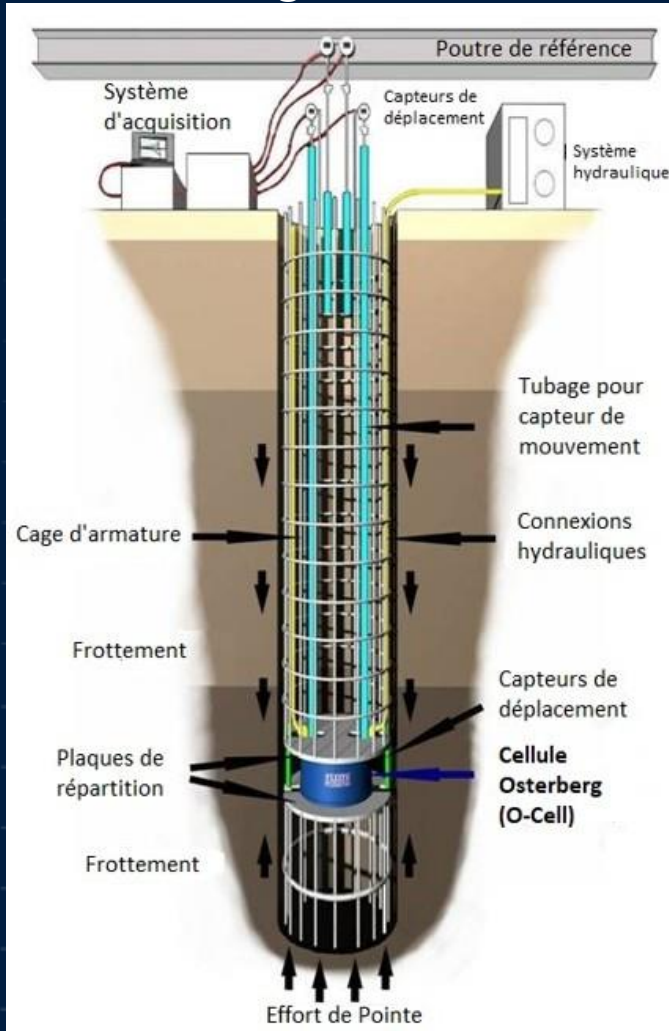


- Sécuritaire, encombrement limité
- Capacité de chargement très élevée (>100 MN devient possible)
- La charge est appliquée directement dans les couches d'intérêt



Essai par vérins embarqués

Désavantages



- L'équipement est noyé dans le béton
- L'interprétation du comportement sous chargement en tête nécessite de l'ingénierie
- L'essai induit une séparation du pieu mais possibilité d'injecter du coulis en fin d'essai pour utiliser les pieux d'essai pour l'ouvrage

Instrumentation des essais de chargement sur pieux

1. Les différents systèmes de réaction
2. Mesurer les charges
3. Mesurer les déplacements
4. Cas des essais horizontaux

Mesurer les charges

Capteurs d'effort ou de pression

Avantages :

- Mesure directe de la charge ou de la pression
- Capteur généralement récupérable

Désavantages :

- Mesure généralement au point d'application uniquement



Mesurer les charges

Jauges de déformation

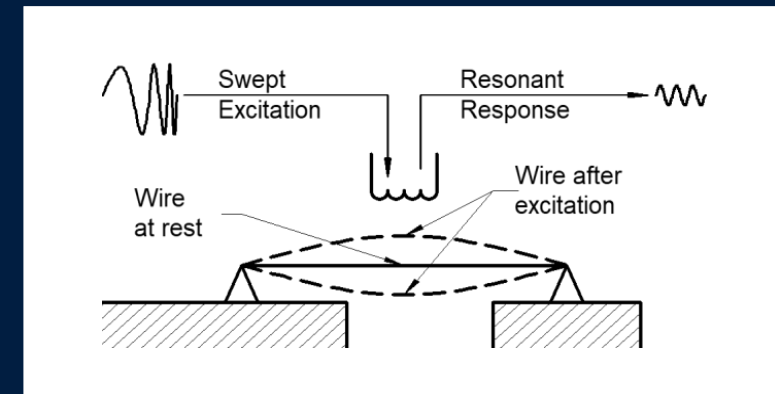
Avantages :

- Facilité d'installation
- Possibilité de mesure multiples dans le pieu

Désavantages :

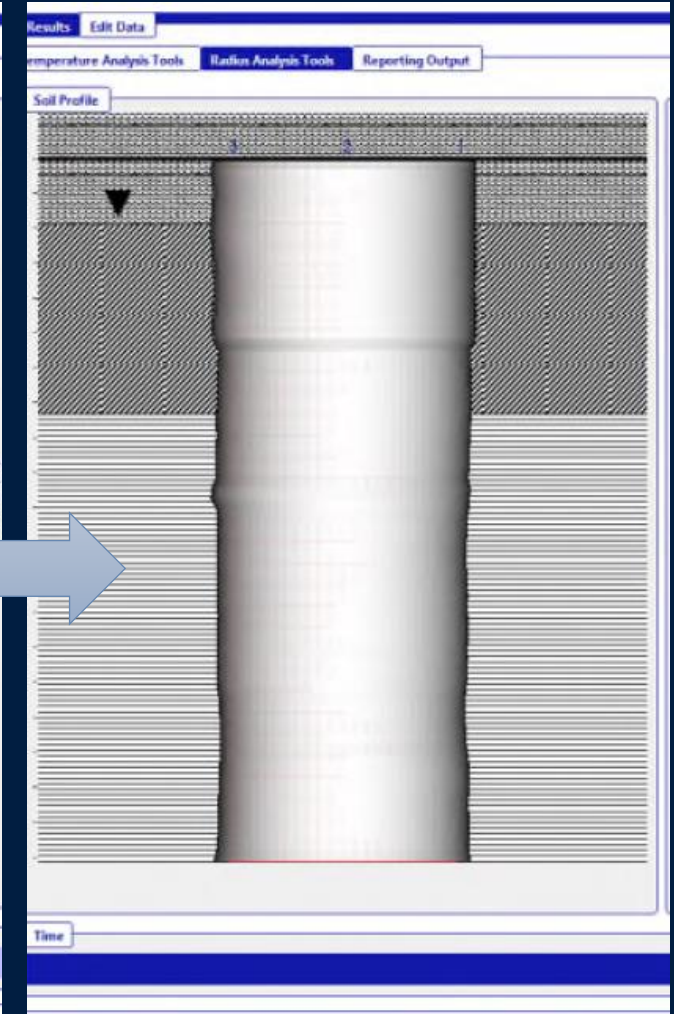
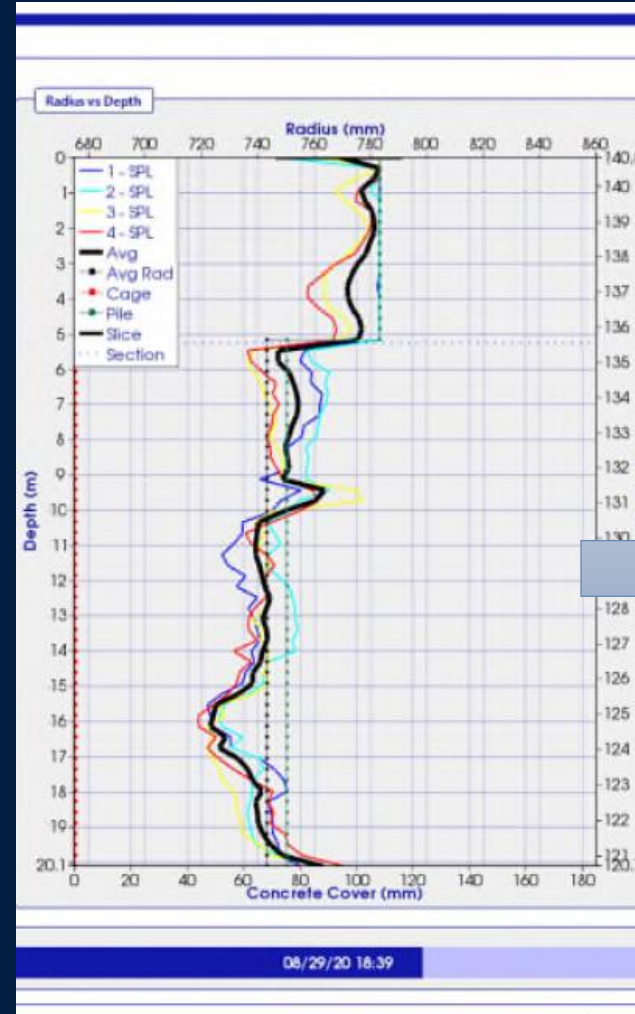
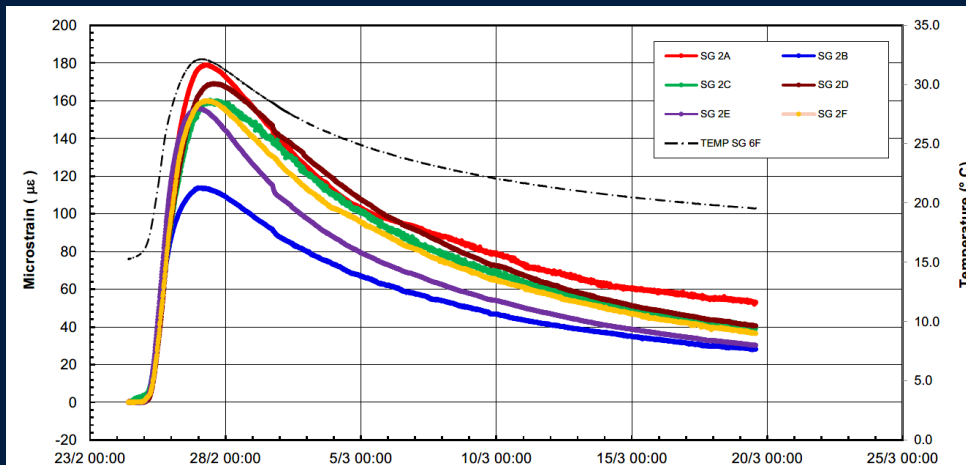
- Jauge sacrificielle
- Nécessité d'estimer la raideur du pieu

$$Q \text{ [MN]} = \varepsilon \cdot E \cdot A$$



Mesurer les charges dans le pieu

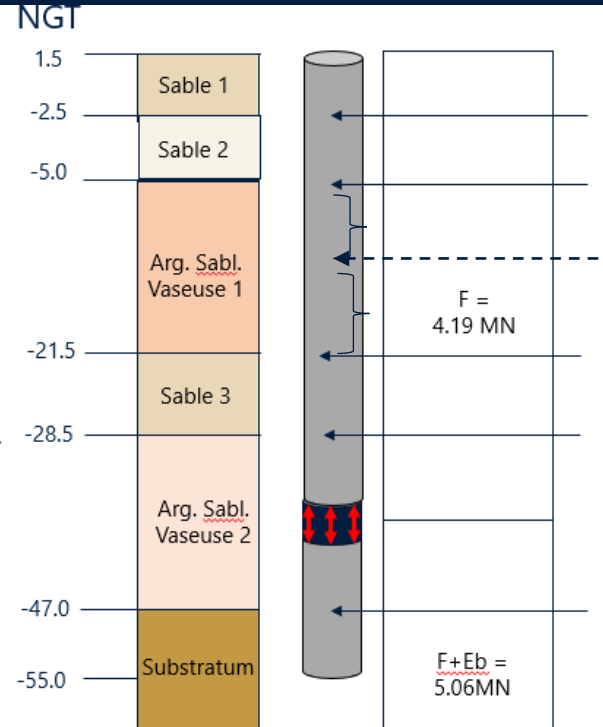
Profil thermique d'intégrité



Mesurer les charges

Positionner les jauges

Sol	Elévation		Épaisseur [m]	Pressio PI* [Mpa]	Qs [kPa]	Section frottante [m²]	Frottement total [MN]	Rb unitaire	Rb total
	de	A						[Mpa]	[MN]
Sable 1	1.5	-2.5	4	1	34.2	12.57	0.43		
Sable 2	-2.5	-5	2.5	0.6	23.7	7.85	0.19		
Argile sableuse Vaseuse 1	-5	-21.5	16.5	0.3	16.6	51.84	0.86		
Sable 3	-21.5	-23.5	2	1.7	45	6.28	0.28		
Sable 3 (>25m)	-23.5	-28.5	5	1.7	90	15.71	1.41		
Argile sableuse Vaseuse 2	-28.5	-37.5	9	0.6	36	28.27	1.02		
Argile sableuse Vaseuse 2	-37.5	-47	9.5	0.6	36	29.85	1.07		
substratum	-47	-55	8	2	90	25.13	2.2	1.73	



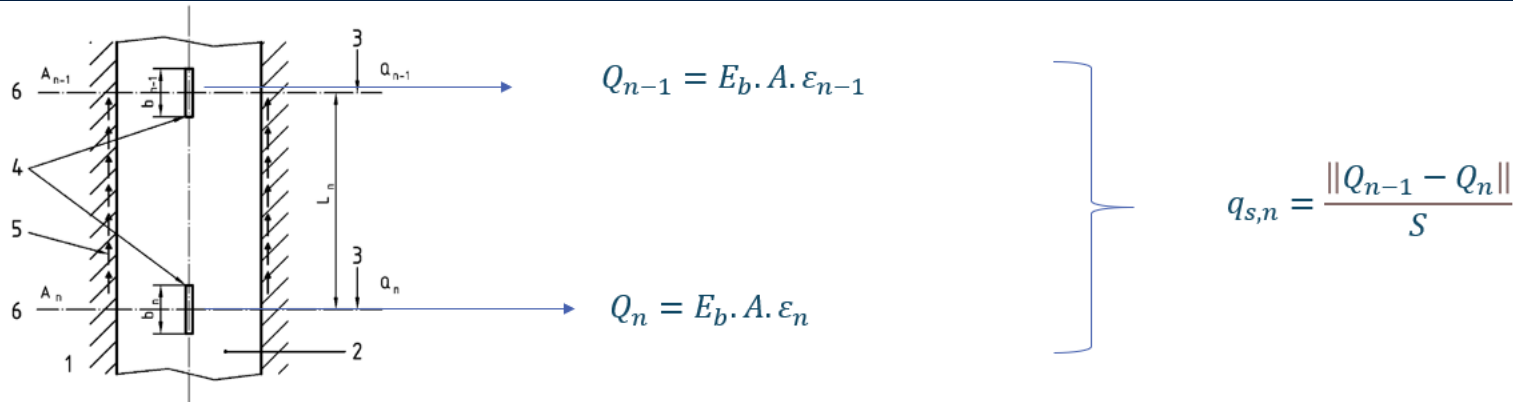
Position à la limite de chaque horizon géologique

Pour juger au sein d'un horizon de l'homogénéité du frottement latéral : on peut ajouter d'autres niveaux supplémentaires

Mesurer les charges

Détermination du frottement latéral mobilisé pour chaque palier de charge dans chaque horizon

Entre 2 niveaux de Jauge



- ε_n : déformation mesurée au droit de la jauge de contrainte n , de longueur b_n
- E_b : Module du béton
- A : Section frottante de l'inclusion.
- S : surface latérale = $2 \cdot (l_{inc} + L_{inc}) \cdot L_n$
- l_{inc} = largeur de l'inclusion
- L_{inc} = longueur de l'inclusion
- L_n : longueur du tronçon

Mesurer les charges

Détermination du frottement latéral mobilisé pour chaque palier de charge dans chaque horizon

Entre le vérin et le niveau de jauge

$Q_{n-1} = E_b \cdot A \cdot \varepsilon_{n-1}$

Q_n appliquée par le vérin

$q_{s,n} = \frac{\|Q_{n-1} - Q_n\|}{S}$

- ε_n : déformation mesurée au droit de la jauge de contrainte n , de longueur b_n
- E_b : Module du béton
- A : Section frottante de l'inclusion.
- S : surface latérale = $2 \cdot (l_{inc} + L_{inc}) \cdot L_n$
- l_{inc} = largeur de l'inclusion
- L_{inc} = longueur de l'inclusion
- L_n : longueur du tronçon

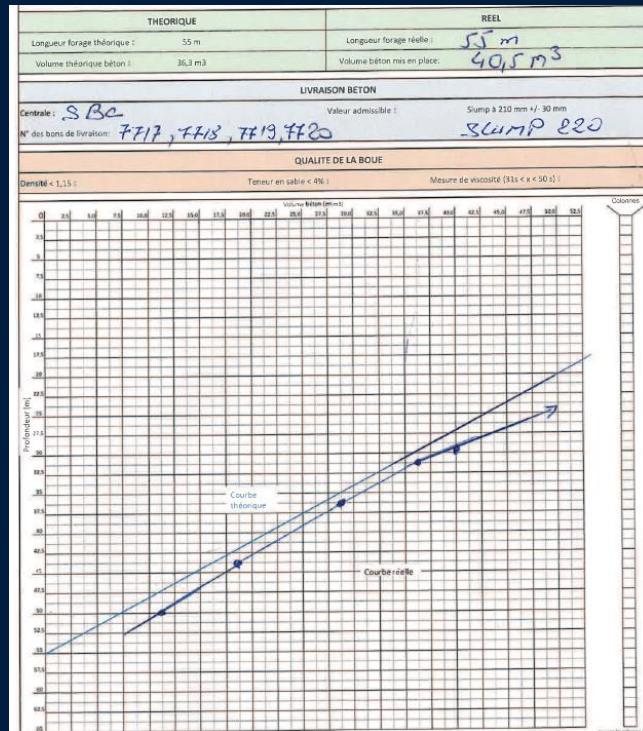
Mesurer les charges

Importance du module du béton:

- série de Rc avec mesure de module à prévoir à différentes profondeurs du pieu ou de la barrette

Pour la section frottante de l'inclusion :

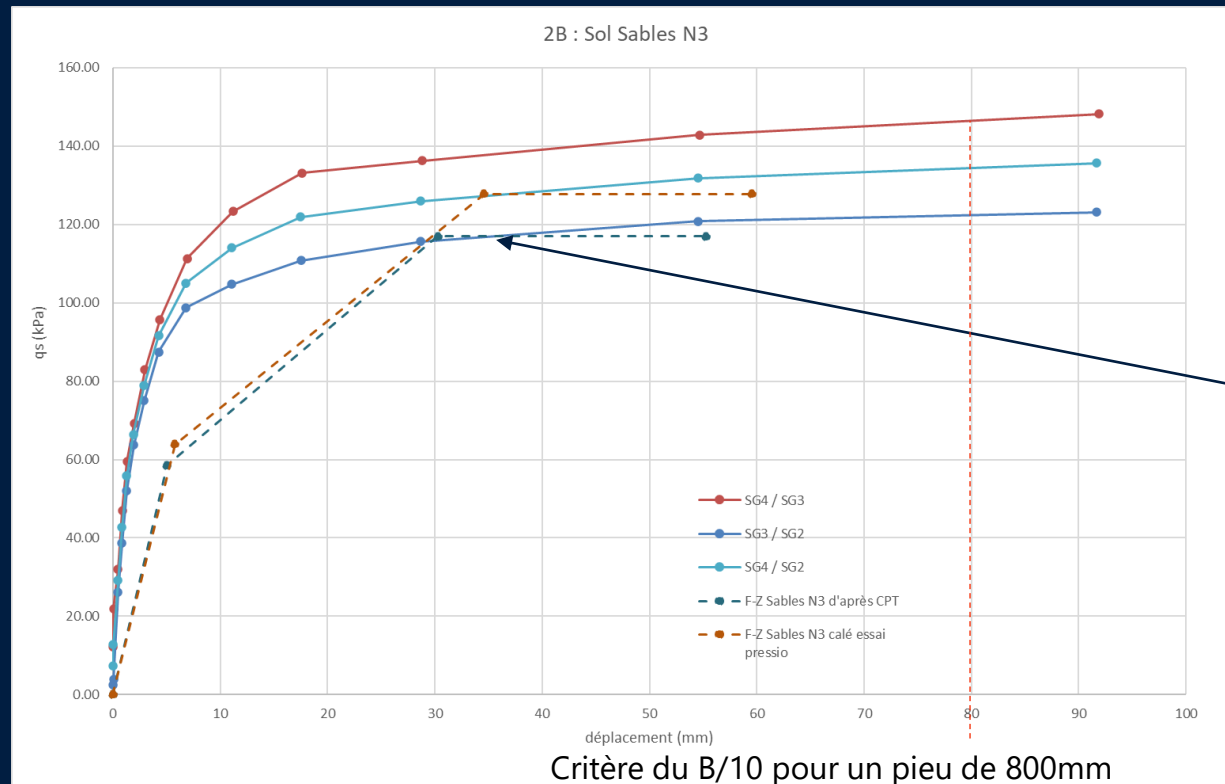
- courbe de bétonnage – correction de la section théorique



	Pfdr (m)	Htr béton / fond	V béton théo	V béton réel unitaire	V béton réel cumulé	Différence (m³)	H tronçon	Vth tronçon	V b réel	diff (m3)	Largeur équivalente (m)
En-dessous du O-cell	55.5	2.32	5.20	7.5	7.5	2.30	2.32	5.1968	7.5	2.303	1.154557
	52	5.82	13.04	7.5	15	1.96	3.5	7.84	7.5	-0.34	0.765306
	49	8.82	19.76	7.5	22.5	2.74	3	6.72	7.5	0.78	0.892857
	45.5	12.32	27.60	7.5	30	2.40	3.5	7.84	7.5	-0.34	0.765306
	42.5	15.32	34.32	7.5	37.5	3.18	3	6.72	7.5	0.78	0.892857
	40.3	17.52	39.24	6.5	44	4.76	2.2	4.928	6.5	1.572	1.055195
	37.2	20.62	46.19	7.5	51.5	5.31	3.1	6.944	7.5	0.556	0.864055
	34	23.82	53.36	7.5	59	5.64	3.2	7.168	7.5	0.332	0.837054
	31.5	26.32	58.96	7.5	66.5	7.54	2.5	5.6	7.5	1.9	1.071429
	28.6	29.22	65.45	7.5	74	8.55	2.9	6.496	7.5	1.004	0.923645
	25.5	32.32	72.40	7.5	81.5	9.10	3.1	6.944	7.5	0.556	0.864055
	22.6	35.22	78.89	7.5	89	10.11	2.9	6.496	7.5	1.004	0.923645
Au-dessus du O-cell	19.2	38.62	86.509	7.5	96.5	9.99	3.4	7.616	7.5	-0.12	0.787815
	16.7	41.12	92.109	7.5	104	11.89	2.5	5.6	7.5	1.9	1.071429
	12.5	45.32	101.52	11	115	13.48	4.2	9.408	11	1.592	0.935374
	9.5	48.32	108.24	7.5	122.5	14.26	3	6.72	7.5	0.78	0.892857
	7	50.82	113.84	7.5	130	16.16	2.5	5.6	7.5	1.9	1.071429
	4.5	53.32	119.44	6.5	136.5	17.06	2.5	5.6	6.5	0.9	0.928571
	2.1	55.72	124.81	7.5	144	19.19	2.4	5.376	7.5	2.124	1.116071
	1.8	56.02	125.48	4	148	22.52	0.3	0.672	4	3.328	

Mesurer les charges

Exemple de sorties : détermination du frottement latéral mobilisé par horizon avec plusieurs niveaux de jauges



- **F&Z Sables N3 d'après CPT** : courbe théorique type Frank et Zhao avec $E_M = 34.5$ MPa et $q_s = 117$ kPa pour un sol frottant [N4]
- **F&Z Sables N3 d'après essai pressio** : courbe théorique type Frank et Zhao avec $E_M = 33$ MPa et $q_s = 127$ kPa pour un sol frottant [N4]

Les frottements sur cet horizon sont compris entre 120 et 140 kPa.

Instrumentation des essais de chargement sur pieux

1. Les différents systèmes de réaction
2. Mesurer les charges
3. Mesurer les déplacements
4. Cas des essais horizontaux

Mesurer les Déplacements

Déplacements en tête

Avantages :

- Charge vs déplacement mesuré en tête
- Capteurs horizontaux pour le suivi de la verticalité
- Suivi optique des mouvements de poutre de référence

Désavantages :

- Mesure en tête uniquement



Mesurer les Déplacements

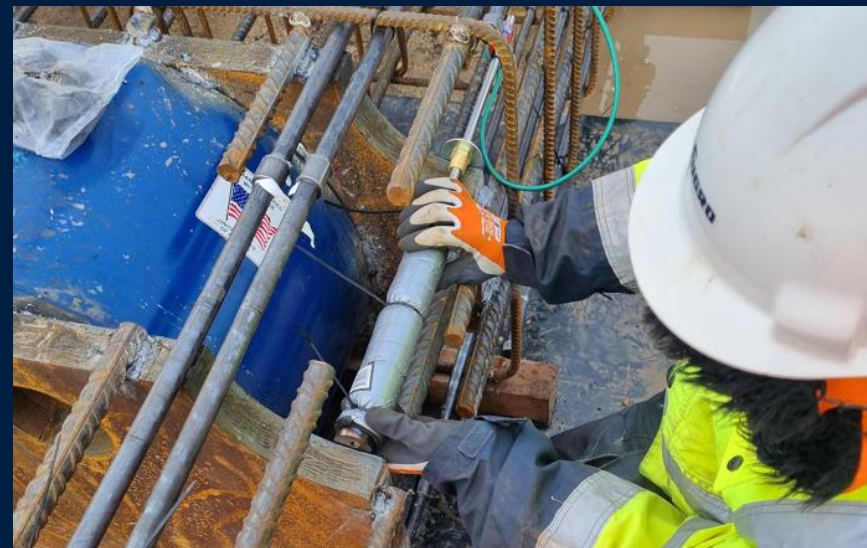
Piges de déplacement

Avantages :

- Permet la mesure directe du déplacement à l'endroit voulu
- Mesure directe de la courbe charge-Déplacement si couplée à une jauge de contrainte

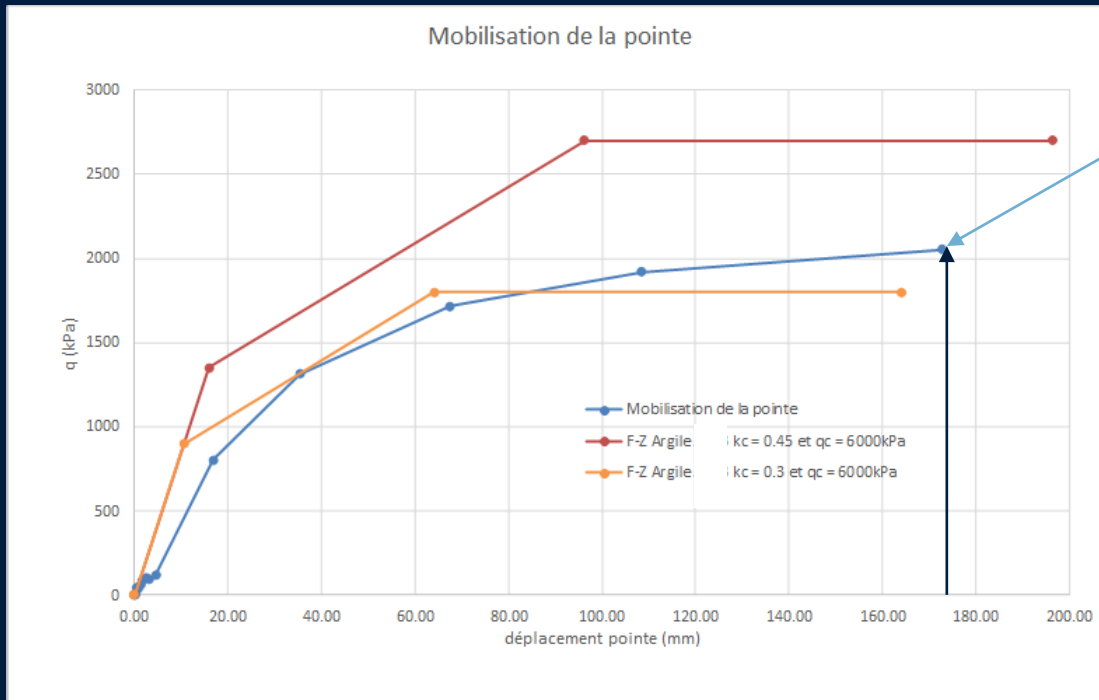
Désavantages :

- Nécessite l'installation de tubes de pige dans la cage d'armature



Mesurer les Déplacements

Utilisation des piges de pointe



Mesure du tassement de la pointe pour chaque palier de charge

Déduction de la charge en pointe :
Charge en pointe à chaque palier de charge =
Charge jauge la plus proche de la pointe
– q_s dans l'horizon d'ancrage * Surface frottante (jauge-> pointe)

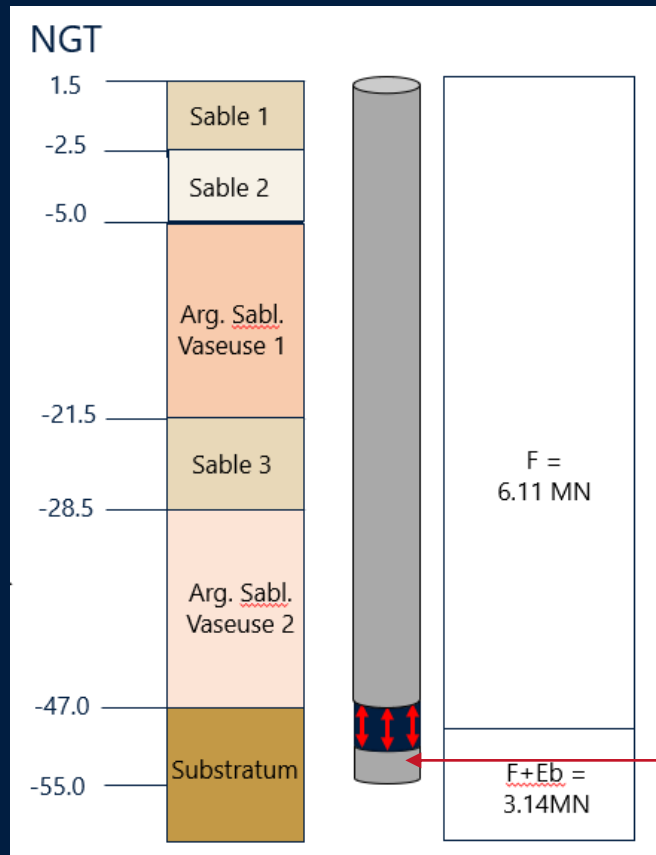
Au critère B/10 (selon la norme NF P94-150-1 paragraphe 7.1.3) : la contrainte en pointe est de 2000 kPa

Cela donne un couple $k_c * q_{ce} = 2000$ kPa

En prenant le $q_{ce} = 6$ MPa dans l'argile => $k_c = 0.33$ au lieu de 0.45 de la norme NFP94-262 pieu foré boue méthode CPT.

Mesurer les charges

Appréhender la charge en pointe



Mise en place d'un niveau de jauge a minima entre les vérins et la pointe pour déterminer le frottement dans l'horizon substratum et permettre de bien appréhender la charge en pointe

Instrumentation des essais de chargement sur pieux

1. Les différents systèmes de réaction
2. Mesurer les charges
3. Mesurer les déplacements
4. Cas des essais horizontaux

Cas des essais horizontaux

Appliquer les charges

- Essais deux par deux
- En poussée ou en traction
- En statique ou en cyclique



Cas des essais horizontaux

Instrumentation

Mesures en tête :

- Effort
- Déplacement relatif (ouverture du vérin)
- Déplacements absolu (par rapport à un référence)

Mesures dans la fondation :

- Charges dans le pieu
- Profil inclinométrique



Cas des essais horizontaux

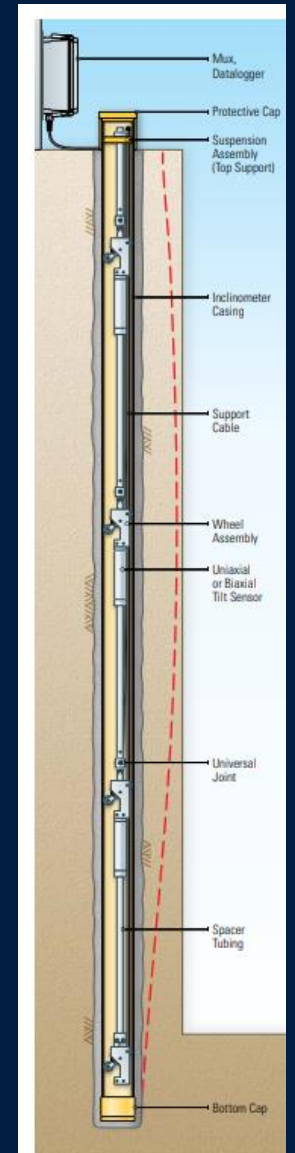
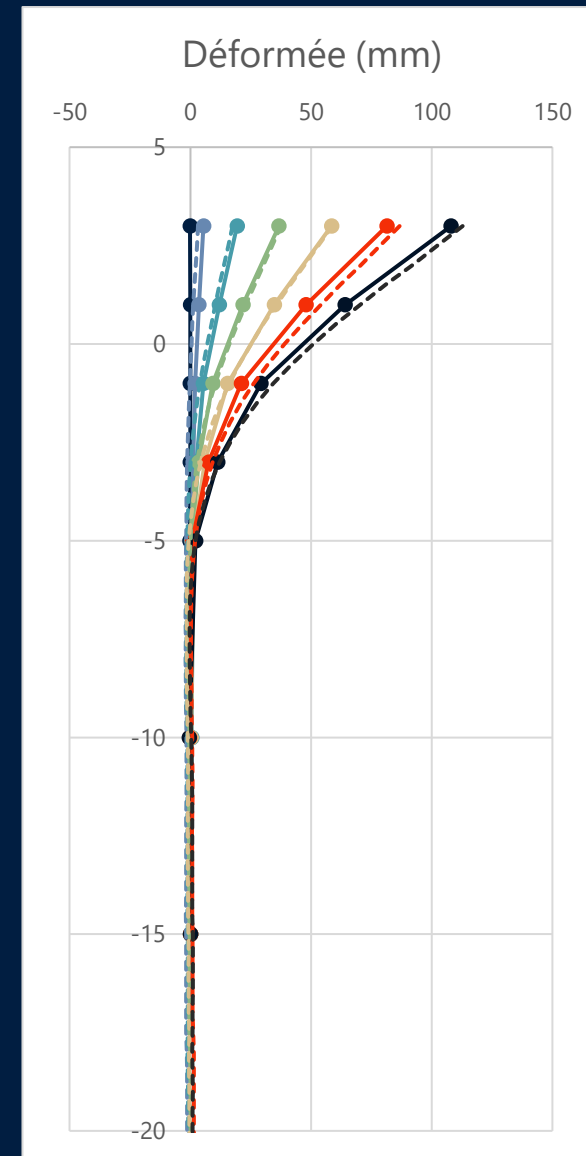
Instrumentation

Mesures en tête :

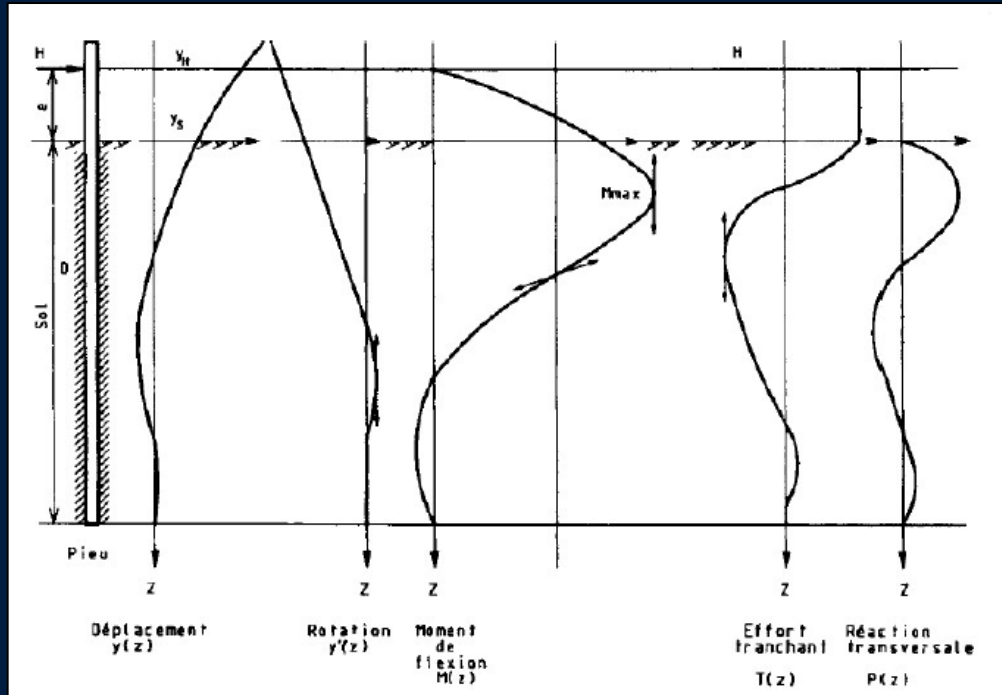
- Effort
- Déplacement relatif (ouverture du vérin)
- Déplacements absolu (par rapport à un référence)

Mesures dans la fondation :

- Charges dans le pieu
- Profil inclinométrique



Cas des essais horizontaux



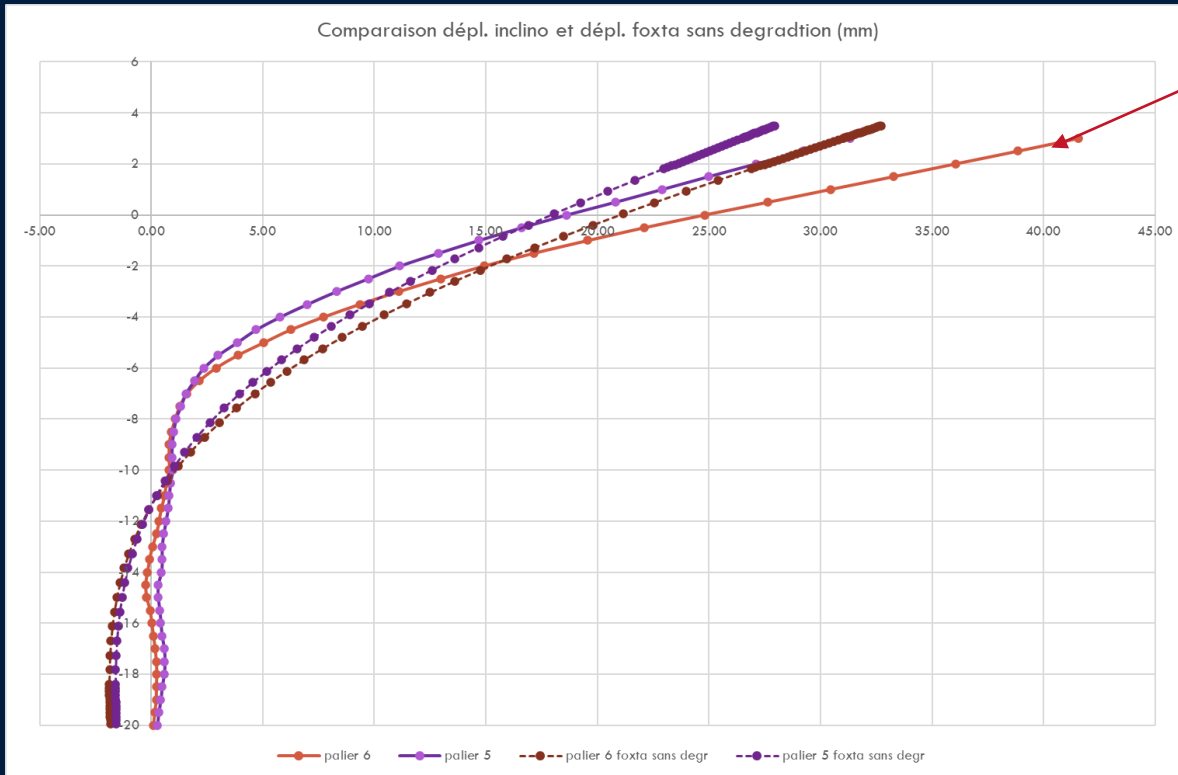
$$Y'(z) = dy/dz$$

$$M(z) = E_p I_p \cdot (d^2 y / dz^2)$$

$$T(z) = dM/dz$$

$$P(z) = -dT/dz = -E_p I_p \cdot (d^4 y / dz^4)$$

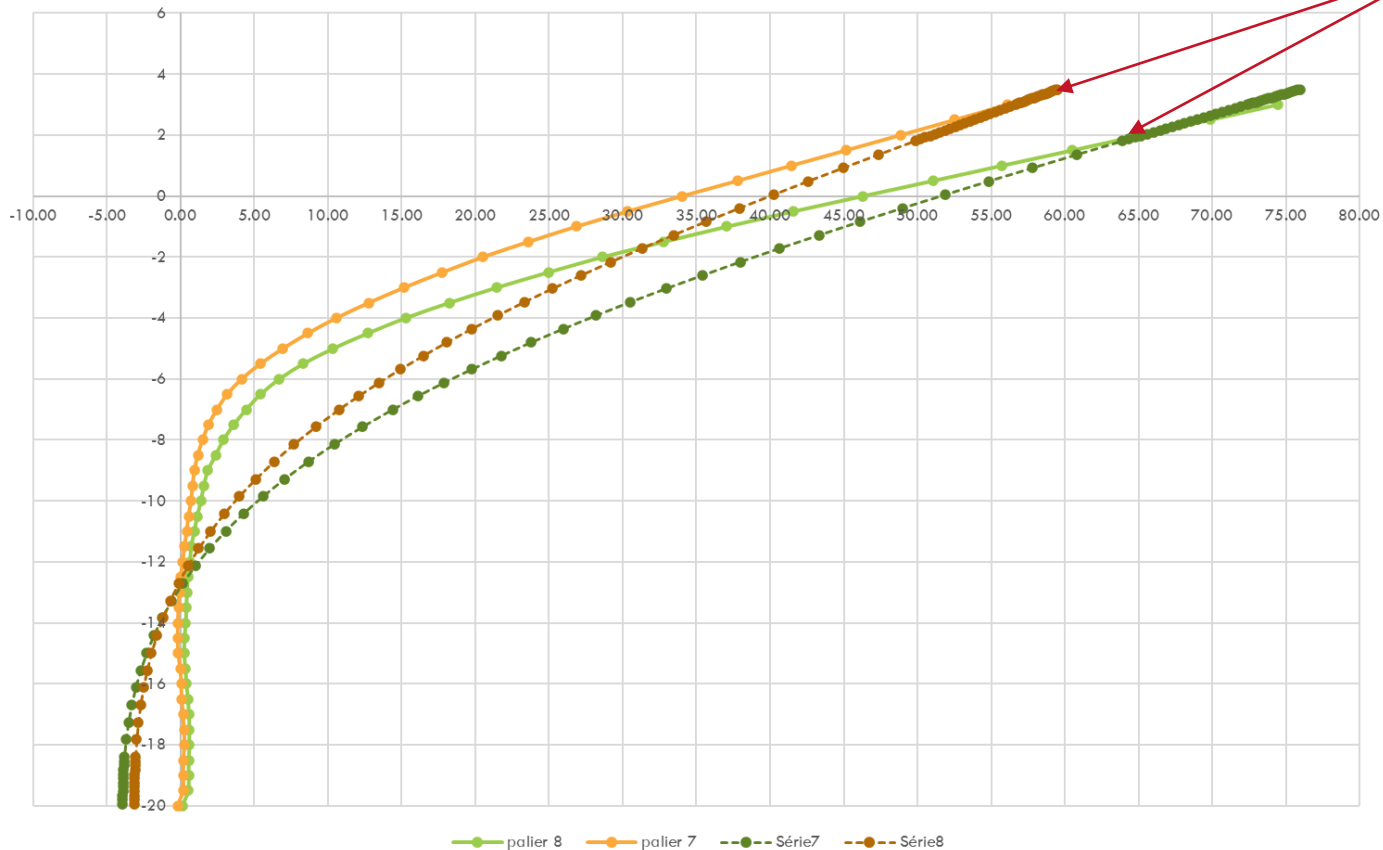
Sur un chantier : comparaison des déformées théoriques sous FOXTA et de la mesure inclinométrique



A partir du palier de charge 6 : la déformée inclinométrique dépasse la déformée théorique calculée avec FOXTA

Sur un chantier : comparaison des déformées théoriques sous FOXTA et de la mesure inclinométrique

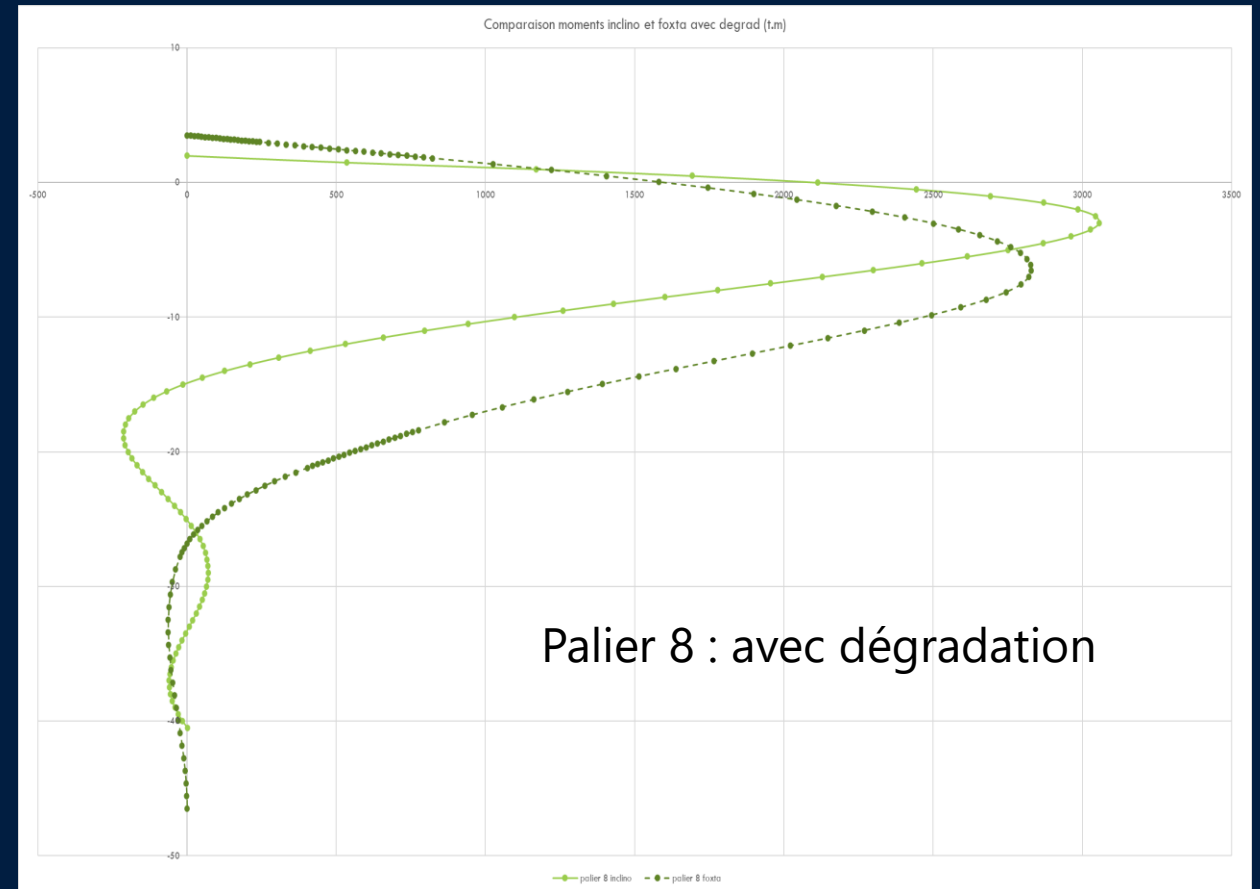
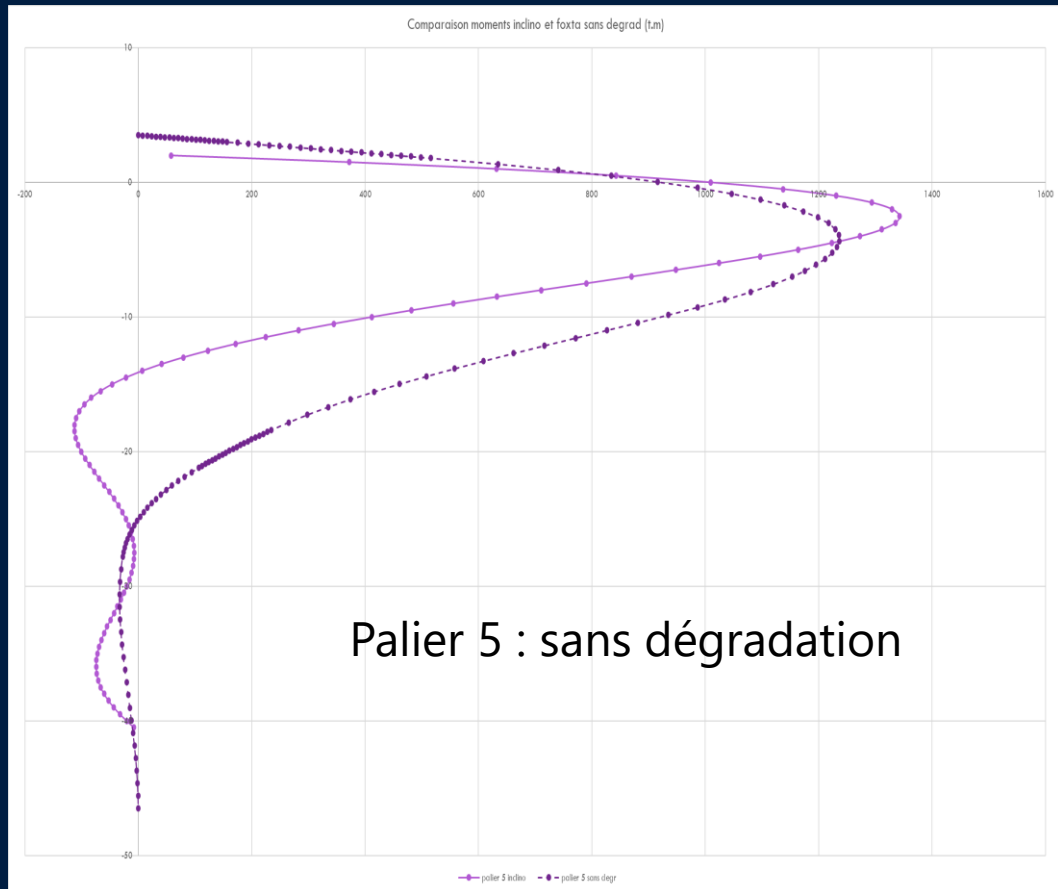
Comparaison dépl. inclino et dépl. foxta avec degradation (mm)



Barrette non encastrée en tête

Paliers de charge 7 et 8 : déformée inclinométrique est calée sur le modèle théorique avec prise en compte de la dégradation de K_f sur $2*B$ ou $4B$ suivant le type de sol (cohérent ou pulvérulent)

Sur un chantier : comparaison de moments entre FOXTA et le moment déduit de la déformée inclinométrique



Conclusions

Un essai de chargement et son instrumentation se conçoit par rapport aux objectifs fixés.

***L'instrumentation vise à mesurer plutôt que d'interpréter..
La mesure permet de limiter les hypothèses pour une
meilleure conception !***



Merci de votre attention

 +33.6.07.02.19.41

 m.maron@fugro.com

 www.fugro.com

+33.6.23.14.77.20

a.reynaud@groupeginger.com

www.ginger.com