

Les avantages des méthodes d'auscultation avancées dans l'analyse des essais de chargements sur pieux par la méthode des vérins embarqués

The benefits of advanced profiling methods in the analysis of bi-directional load testing

Michel MARON ^{1, *}, Paul S. IRELAND ², Jonathan CALOZA ³

1 FUGRO France S.A.S., Nanterre, France

2, 3 FUGRO Loadtest, Wallingford, U.K.

** m.maron@fugro.com*

RESUME : L'auscultation des fondations profondes fournit des informations essentielles sur la géométrie, l'alignement et la verticalité des pieux et barrettes à des fins de contrôle et d'assurance de la qualité. Le SONICaliper[®] fournit une inspection sur la qualité de l'excavation avant l'installation de la cage, tandis que la méthode d'Auscultation Thermique de l'Intégrité (Thermal Integrity Profiling, TIP) utilise la chaleur générée lors de la prise du ciment après coulage pour évaluer la qualité des fondations en béton. Le TIP évalue la qualité du béton sur toute la section transversale, et sur toute la longueur de la fondation, fournissant des informations essentielles tel que le diamètre du pieu et l'interface entre le béton et le sol. Les données enregistrées par le Sonicaliper[®] et le TIP sont utilisées pour générer des modèles efficaces représentant la géométrie réelle de la fondation. La forme et la dimension de la fondation sont des paramètres clés pour comprendre la réaction d'un pieu à un effort de chargement. L'incorporation des données issues du TIP dans l'analyse des essais de chargement par la méthode des vérins embarqués améliore significativement la précision dans l'évaluation du module d'élasticité et de la charge à partir de déformations mesurées par des jauges de contrainte. Les avantages de la combinaison des méthodes d'auscultation avancées et d'essais de chargement seront décrits. Des études de cas provenant des deux méthodes illustreront les avantages en matière d'analyse mais aussi en matière de sécurité et d'optimisation économique.

ABSTRACT: Profiling of deep foundations provides critical insight into geometry, alignment and verticality for quality control and assurance purposes. The SONICaliper[®] provides real time excavation quality inspection prior to installation while the Thermal Integrity Profiling (TIP) method uses heat generated during the curing of cement post pour to assess the quality of cast-in-place concrete foundations. TIP evaluates the concrete quality for the entire cross section and full length of the foundation, providing critical information such as estimated pile diameter and the interface zone between the concrete and soil. SONICaliper[®] and TIP profiling data are used to generate models estimating the geometry of the foundation. Foundation shape and dimension are key parameters governing performance, incorporation of profiling in analysis of pile load testing enhances calculation of elastic modulus and strain distribution. The advantages of combining advanced profiling methods and static load testing will be described. The inclusion of case studies for both SONICaliper[®] and TIP will illustrate the safety, technical and economic benefits when combined with O-Cell[®] bi-directional static load testing.

Mots-clés: Pieu d'essai; Méthode des vérins encastrés; O-Cell[®]; Auscultation Thermique de l'Intégrité; SONICaliper[®]; Jauges de déformations.

INTRODUCTION

Un dimensionnement précis des fondations permet d'optimiser significativement les coûts du projet, le temps de réalisation ainsi que les émissions de CO². Les essais de chargement permettent de vérifier les performances des fondations, augmentent le degré de connaissance de l'interface sol-fondation tel que réalisé, en frottement et en pointe, et ainsi la confiance dans la conception pour permettre l'optimisation.

La mesure du transfert de charge à l'interface sol-fondation grâce à la mesure de déformation permet d'évaluer le transfert des forces appliquées dans la stratigraphie environnante et de confirmer la charge appliquée par l'essai de pieu. Une fonction clé pour convertir les mesures de déformation en forces internes de pieux est la présence des caractéristiques physiques aux points de mesure de la déformation. Des estimations précises de la géométrie des pieux lors de l'évaluation de leur capacité sont essentielles pour

calculer le module élastique et la distribution de la déformation.

La vérification des dimensions des fondations construites peut être réalisée par l'application de diverses méthodes d'auscultation avancées mises en place à différentes étapes du processus de construction. Ces méthodes d'auscultation fournissent non seulement un contrôle qualité mais aussi des mesures précieuses concernant la géométrie de la section transversale permettant d'affiner les résultats des essais de chargement statique :

- Grâce à la technologie sonar, le SONICaliper® fournit des mesures tridimensionnelles avec une précision centimétrique des excavations sur fondations profondes afin de déterminer le diamètre ou la section transversale. La méthode permet également d'évaluer la verticalité et l'azimut avant l'installation de la cage d'armature et le coulage du béton. Les rapports de terrain sont générés immédiatement après l'acquisition des données permettent une gestion proactive de toute anomalie identifiée avant la poursuite de la construction.
- L'Auscultation Thermique de l'Intégrité (Thermal Integrity Profiling, TIP) mesure les pics de température liés au phénomène exothermique d'hydratation du ciment lors de la prise du béton. Grâce à la répartition des capteurs TIP le long de la fondation, il est possible de contrôler l'amplitude de ces pics de température pour s'assurer de l'absence d'anomalies telles que des inclusions ou bulbes de bétonnage. La méthode permet également de déterminer la section réelle de la fondation telle que réalisée en vue de l'analyse des jauges de déformation.

1 PROBLEMATIQUE

L'essai de chargement sur pieu a pour objectif d'analyser la répartition des efforts le long de la fondation. Les jauges de déformations, intégrées dans le pieu d'essai permettent de mesurer des microdéformations sous chargement. La déformation du capteur est, par convention, la même que celle du tronçon de pieu de longueur identique. La mesure des déformations e_n ($\mu\text{m}/\text{m}$) des jauges de déformation permet de calculer la contrainte σ_n (kN) au niveau du capteur grâce à la l'équation (1).

$$\sigma_n = e_n E_n \quad (1)$$

Où E_n (kPa) est le module élastique du tronçon b_n

L'équation (1) révèle qu'une bonne connaissance du module élastique au niveau de l'extensomètre est

nécessaire pour un calcul correct de la contrainte à partir de la déformation mesurée (Komurka 2025).

Le module d'élasticité E_n du tronçon b_n est pris égal au module du béton E_c , mesuré à partir d'essais d'écrasement d'éprouvettes en béton prélevées lors de la réalisation du pieu ou en adoptant un module équivalent E_e calculé selon l'équation (2) ci-dessous dans le cas de fondation composite et lorsque le pourcentage d'acier est supérieur à 0.5%.

$$E_e = (\sum_{i=1}^{i=m} S_i \cdot E_i) / \sum_{i=1}^{i=m} S_i \quad (2)$$

Où E_i et S_i désignent respectivement le module d'Young et l'aire de la section des m matériaux constitutifs du pieu dans la section transversale d'aire A .

La charge Q_n (kN) au niveau de la jauge de déformation n est calculée grâce à l'équation (3) et nécessite une connaissance de la section de pieu A_n (m^2) au niveau de jauges n .

$$Q_n = \sigma_n \cdot A_n \quad (3)$$

La différence de charges entre deux niveaux de jauges n et $n - 1$ correspond à la charge reprise par l'interface sol-pieu. Il convient de diviser cette charge par la surface frottante du tronçon pour obtenir le frottement unitaire du tronçon de pieu.

$$f_{n,n-1} = \frac{Q_{n-1} - Q_n}{\pi \cdot D_n \cdot h} \quad (4)$$

Où $f_{n,n-1}$ (kPa) est le frottement unitaire du tronçon de pieu entre l'extensomètre n et l'extensomètre $n - 1$, D_n (m) est le diamètre et h (m) la hauteur de ce même tronçon.

La section A_n ainsi que la surface frottante doivent donc être évaluées avec précision pour permettre un calcul fiable du frottement lors de l'analyse des essais de chargement.

La pratique actuelle est d'estimer le diamètre de la fondation sur la base des courbes de bétonnage.

Les courbes de bétonnage sont des enregistrements in-situ du volume de béton injecté en fonction de la hauteur de béton mesurée dans le puits de fondation. Elles constituent un outil essentiel mais limité au contrôle de la surconsommation de béton et l'évaluation de la régularité du forage. La figure 1 présente un exemple de courbe de bétonnage. En analysant ces courbes, il est possible d'estimer un diamètre de la fondation réalisée en fonction de la profondeur.

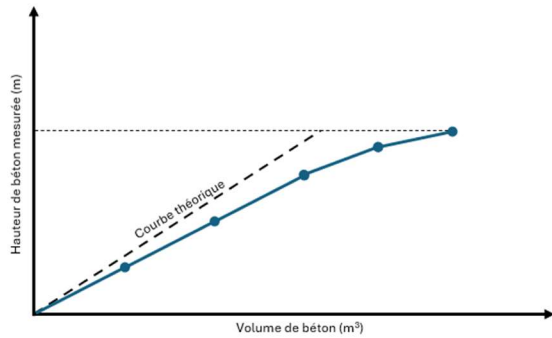


Figure 1. Exemple de courbe de bétonnage

Du fait des contraintes opérationnelles sur site, une seule mesure de hauteur, et donc, une seule évaluation du diamètre, n'est possible par toupie de béton injecté. Ainsi, pour un volume de toupie de 7 m^3 et un diamètre de pieu de 1200 mm , le pas de mesure est de 6.2 m . Il est donc difficile d'évaluer avec précision le diamètre du pieu au niveau de l'extensomètre n et des méthodes d'auscultation complémentaires sont nécessaires.

Les sections 3 et 4 présentent des outils complémentaires permettant une meilleure connaissance du diamètre effectif du pieu en vue de l'analyse des jauges de déformation pour en déduire les frottements réels du pieu testé.

2 AUSCULTATION SONIQUE

En utilisant la technologie sonar, le SONICALIPER[®] fournit des mesures précises à 360° et en trois dimensions des excavations de fondation profondes. La tête omnidirectionnelle se compose d'un unique émetteur-récepteur monté sur une tête rotative. L'appareil est descendu dans le puits à des profondeurs incrémentales et des « anneaux » de données 2D sont acquis. Ces anneaux 2D sont ensuite assemblés dans une représentation numérique 3D de l'excavation telle que construite.

Le système fonctionne indépendamment de la foreuse et des autres équipements de construction, permettant ainsi de poursuivre les activités de construction pendant que les fouilles sont mesurées.



Figure 2. Opérations de mesure SONICALIPER[®] sur le site A

Une auscultation sonique à 360° permet :

- De déterminer la section transversale,
- D'évaluer la verticalité et l'azimut,
- De connaître avec précision le volume de béton requis,
- D'évaluer la densité des particules dans les fluides de forage.

D'un point de vue opérationnel, le système se compose d'une sonde légère qui peut être rapidement installée et déployée dans des excavations remplies de fluide et sans nécessiter de moyens de levage mécaniques.

Comme les propriétés acoustiques des fluides de forage varient considérablement en fonction du type de fluide et de la densité des particules, un étalonnage doit être effectué pour chaque excavation afin de déterminer la vitesse de l'onde dans le fluide. Un anneau d'étalonnage choisi dans une section de diamètre connu est utilisé pour calculer la vitesse d'onde du fluide, qui est supposée constante pour toute la colonne du puits.

Les paramètres de gain et d'absorption définis par l'opérateur sur place garantissent que le système analyse les données enregistrées d'écho de la paroi du puits avec précision. L'analyse des données utilise la technique itérative des moindres carrés pour déterminer le profil de la section transversale afin de calculer la verticalité, la surface transversale et le volume.

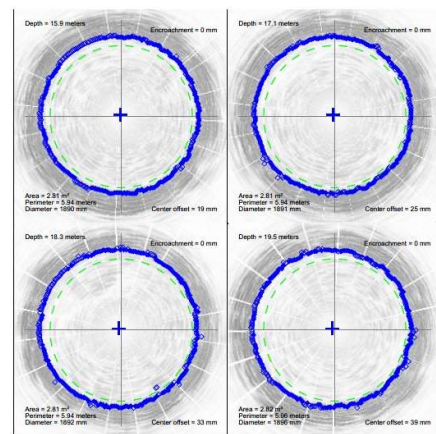


Figure 3. Analyse des données SONICALIPER[®] pour la détermination des sections du puits (Site A)

L'analyse des données se fait sur site directement après la mesure. Cela permet une gestion rapide du problème identifié pour une meilleure mise en place des solutions éventuelles avant la poursuite des travaux.

La prise en compte des données issues des essais SONICALIPER[®] est importante dans l'analyse de la capacité portante d'une fondation profonde. En effet, charger un pieu dépassant l'inclinaison spécifiée peut introduire des moments de flexion et des forces de

cisaillement excessives si le pieux est conçu strictement pour des charges axiales (ASTM D8232). De plus, la présence d'une irrégularité telle qu'une bosse dans un pieu en béton impactera significativement les résultats des essais de chargement (Denton 2007).

3 AUSCULTATION THERMIQUE DE L'INTEGRITE (TIP)

La prise et le durcissement du béton sont le résultat d'un certain nombre de réactions chimiques dont la principale, l'hydratation, s'accompagne d'un fort dégagement de chaleur. L'amplitude de cette réaction exothermique dépend de la composition des bétons (Waller 1993) ainsi que la possibilité de diffusion de chaleur entre la fondation et le matériau environnant (sol, eau, air) définit en partie par la qualité et la forme de la fondation (Belardo, 2021).

L'auscultation thermique d'intégrité (TIP) permet d'évaluer la qualité du béton pour l'ensemble de la section transversale sur toute la longueur de la fondation, d'évaluer l'alignement de la cage de renforcement à l'intérieur du puits et d'estimer la géométrie des pieux.

Les capteurs thermiques TIP fixés à la cage d'armature avant l'insertion enregistrent la température du béton toutes les 15 minutes lors de la prise du béton.



Figure 4. Capteurs d'auscultation thermique de l'intégrité (TIP) installés sur une cage d'armature de pieu O-Cell® sur le site B.

D'un point de vue opérationnel, la légèreté des capteurs thermiques TIP, fixés à la cage d'armature, éliminent les risques liés à la manutention et l'assemblage de tubes soniques habituels (CHSL).

Les résultats du TIP peuvent être évalués dès que le béton a atteint la température maximale. La collecte des données se fait en temps réel grâce aux datalogger connectés et permet de traiter les résultats rapidement

à distance pour fournir les estimations de diamètre à partir des températures mesurées.

Comme pour les mesures SONICALIPER®, un anneau d'étalonnage choisi dans une section de diamètre connu avec une cage d'armature centrée, est utilisé pour mesurer le pic de température référence pour le type de béton utilisé. Les variations mesurées dans la fondation peuvent ainsi être comparées à cette mesure référence et sont associées à des variations de géométrie de la fondation.

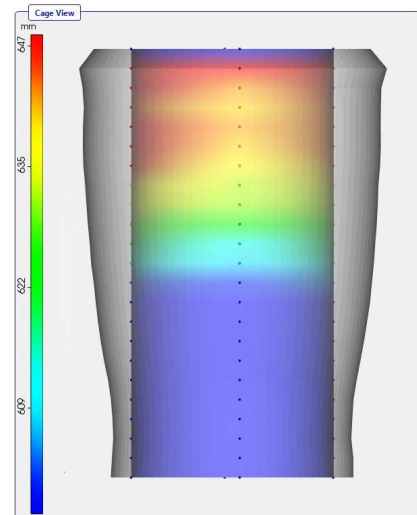


Figure 5. Profil réel d'un pieu de fondation modélisé à l'aide de données TIP (Site B)

L'analyse des données TIP doivent être confrontés aux courbes de bétonnage et aux données SONICALIPER® si disponibles afin d'en fiabiliser l'analyse et d'estimer avec précision le diamètre de la fondation au niveau des jauges de déformation en vue de l'analyse d'essais de chargement.

4 ETUDE DE CAS

Deux études de cas provenant des deux méthodes sont présentées dans cette section et illustrent les avantages de la connaissance du diamètre pour l'analyse des jauges de déformation dans le cadre d'essais de chargement sur pieu. Les deux cas présentés concernent des mesures SONICALIPER® et TIP mises en place sur des pieux d'essai bi-directionnels O-Cell®. Les avantages et conclusions présentés ne sont pas spécifiques à ce type d'essai et peuvent également être appliquées à des essais de chargement en tête.

4.1 Site A : Pieu d'essai O-Cell® avec mesure Sonicaliper® en Allemagne

Un essai de chargement par la méthode des vérins embarqués a été réalisé sur un site appelé « Site A » dans le cadre d'un projet de tour de grande hauteur en Allemagne. Un système de vérins embarqués

bidirectionnel O-Cell[®] a été placé dans l'argile à 5.7 m de la pointe d'un pieu foré simple de longueur 74.55 m et de diamètre théorique 1850 mm. Compte tenu de la présence de remblais, le pieu est équipé d'un tubage temporaire sur ses 8 premiers mètres. La stratigraphie générale est donnée dans le tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1. Site A - Stratigraphie

Elévation de la tête de la couche [m]	Epaisseur [m]	Description
0	8.0	Remblais
-8.0	20.4	Sables
-28.4	34.6	Argile
-63.0	4.1	Sables
-67.1	>1.78	Argile

Six niveaux de jauges de déformation ont été placés le long du pieu. Les niveaux 1, 2 et 3 (SG1, SG2 & SG3) sont situés dans l'argile, le niveau 4 (SG4) est situé à l'interface Argile-Sable, le niveau 5 est situé dans la couche de Sable et le niveau 6 (SG6) est placé à l'interface entre la couche de Sable et les Remblais. Chaque niveau est constitué de quatre jauges de contrainte de type „sister-bars“ réparties tous les 90° sur les filants de la cage d'armature. L'essai de chargement a été réalisé en deux cycles consécutifs de 8 et 14 paliers respectivement. Chaque palier est maintenu entre 30 minutes et 3 heures. Sur la base de la qualité des données à notre disposition, nous proposons d'étudier le dernier palier de chargement du cycle 1. A ce palier, la charge appliquée par les vérins est de 10.09 MN et le frottement limite de l'interface sol-pieu n'a pas encore été atteinte.

Le module du béton a été calculé d'après des essais d'écrasement sur des éprouvettes béton et permet de définir un module $E_c = 23.57 \text{ GPa}$.

Avant l'insertion de la cage d'armature, des mesures SONICALIPER[®] ont été réalisées tous les 1.2 m dans la bentonite, sur toute la longueur du puits. Cette mesure a permis d'évaluer le diamètre réel de l'excavation et de s'assurer de l'absence de zones d'affaissement ou d'obstructions. Les résultats des mesures SONICALIPER[®] révèlent un diamètre réel différent de 2.8% à 10.5 % par rapport au diamètre théorique. La figure 6 ci-dessous présente le diamètre estimé tous les 1.2 m à partir des mesures SONICALIPER[®].

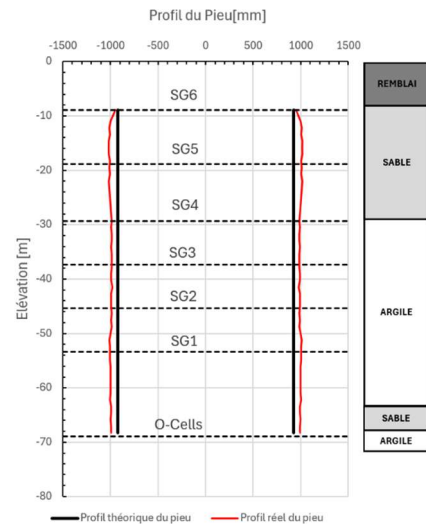


Figure 6. Profil réel et théorique du pieu d'essai (Site A).

Il est proposé d'utiliser les mesures SONICALIPER[®] pour évaluer l'effet des corrections de diamètre sur l'analyse des jauges de déformation.

Le diamètre réel mesuré aux six niveaux de jauges de déformation ainsi que la différence par rapport au diamètre théorique de 1850 mm est présenté dans le tableau 2 ci-dessous.

Tableau 2. Site A – Diamètre au niveau des jauges

Niveau de jauges	Diamètre réel (SONICALIPER [®]) [m]	Différence au théorique [%]
SG1	1.902	+3%
SG2	2.023	+9%
SG3	1.976	+7%
SG4	1.976	+7%
SG5	1.973	+7%
SG6	2.005	+8%

Le module équivalent E_e , tel que défini dans l'équation 2 est recalculé en intégrant le diamètre réel du pieu. Ceci apporte une différence non significative de l'ordre de 0.5% sur le calcul du module équivalent.

La charge est recalculée selon l'équation 3 pour chaque niveau de jauges. La figure 10 ci-dessous présente la comparaison entre les charges maximales calculées sur la base du diamètre théorique (courbe noire) et celles calculées sur la base du diamètre réel évalué par le SONICALIPER[®] (courbe rouge). La correction du diamètre induit une différence sur la charge calculée de 13% à 19% tel qu'indiqué sur la figure 7 ci-dessous.

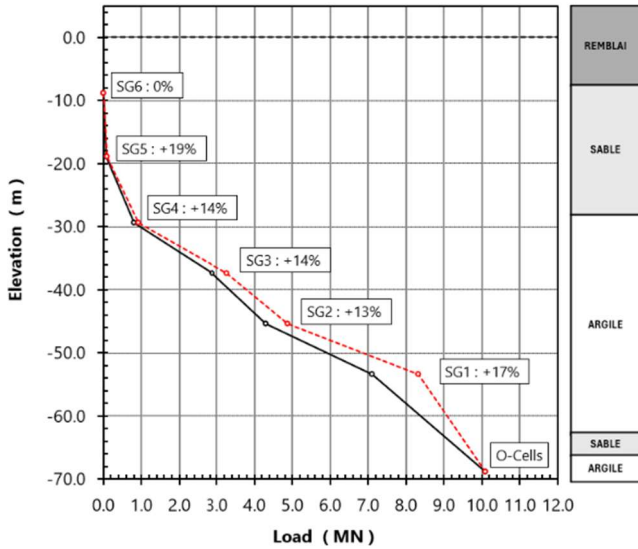


Figure 7. Distribution des charges (site A)

Six tronçons de pieu sont définis à partir de la position des jauges de déformation et du système O-Cell® :

- Le tronçon A, entre le système O-Cell® et le niveau de jauges SG1 comprend 4.1 m de Sable et 11.6 m d'Argile,
- Les tronçons B, C et D, entre les niveaux de jauges SG1 et SG2, SG2 et SG3 et SG3 et SG4, respectivement sont exclusivement dans l'Argile,
- Les tronçons E et F, entre les niveaux de jauges SG4, SG5 et SG5 et SG6 sont exclusivement dans la couche de Sables.

Pour chaque tronçon, les frottements unitaires mobilisés lors de l'essai sont calculés selon l'équation 4. Il convient de ré-évaluer la surface frottante $\pi \cdot D_n \cdot h$ de chaque tronçon sur la base des mesures SONICaliper®. La figure 8 ci-dessous présente les frottements unitaires calculées à partir du diamètre théorique (courbe noire) et estimé (Courbe rouge).

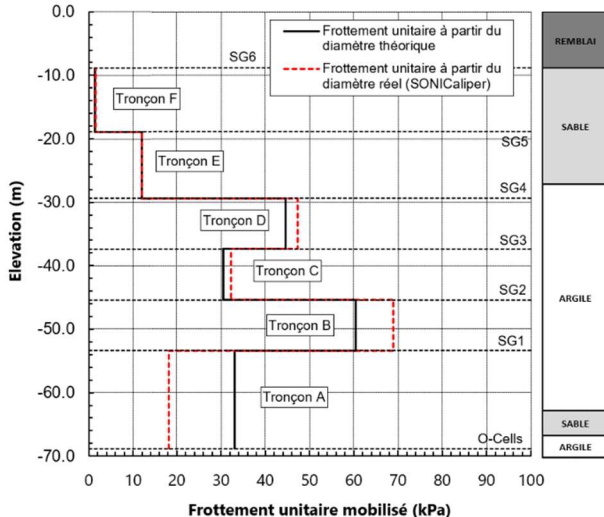


Figure 8. Frottement unitaire (site A)

La réanalyse des frottements unitaires mobilisés révèle une réduction significative (de 33.1 à 18.2 Kpa) du frottement dans le tronçon A. En parallèle, une augmentation du frottement de 5% à 15% est mesurée dans l'Argile (Tronçons B, C et D) et dans la couche de Sable (tronçons F). Le tableau 3 ci-dessous reporte les frottements unitaires maximaux mobilisés lors de l'essai de chargement et suivant les deux méthodes d'analyse.

Tableau 3. Site A – Frottement unitaires mobilisés (Fs)

Tronçon	Fs d'après le diamètre théorique [kPa]	Fs d'après le diamètre mesuré par SONICaliper® [kPa]	Différence [%]
A (Sables + Argile)	33.1	18.2	-45%
B (Argile)	60.4	68.9	+14%
C (Argile)	30.5	32.2	+5%
D (Argile)	44.5	47.3	+6%
E (Sables)	12.0	11.9	-1%
F (Sables)	1.4	1.6	+15%

4.2 Site B : Pieu d'essai O-Cell® équipé de TIP en Angleterre

Un essai de chargement par la méthode des vérins embarqués a été réalisé sur un site appelé « Site B » dans le cadre d'un projet d'infrastructure en Angleterre. Un système de vérins embarqués bidirectionnel O-Cell® a été placé dans le calcaire à 1.1 m de la pointe d'un pieu foré simple. Le pieu à un diamètre théorique de 1180 mm en partie haute après retrait du tubage temporaire et de 1050 mm dans les 1.67 derniers mètres du pieu. La longueur totale du pieu est de 7.14 m. La stratigraphie générale est donnée dans le tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1. Site B - Stratigraphie

Elevation de la tête de la couche [m]	Epaisseur [m]	Description
121.5	2.4	Argile
119.1	0.6	Banc de Grès
118.5	2	Calcaire altéré
116.5	>2.1	Calcaire

Trois niveaux de jauges de déformation ont été placés dans la section de diamètre théorique 1180 mm. Les niveaux 1 et 2 (SG1 & SG2) sont situés dans le Calcaire altéré alors que le niveau 3 (SG3) est situé dans l'Argile. Chaque niveau est constitué de deux jauges de contrainte de type "sister-bars" installées diamétralement opposées sur les filants de la cage

d'armature. L'essai de chargement a été réalisé en 13 paliers réguliers et maintenus entre 30 minutes et 3 heures. La charge maximale appliquée est de 3.6 MN en dessous et au dessus du système O-Cell®.

Le module du béton a été calculé d'après des essais d'écrasement sur des éprouvettes béton et permet de définir un module $E_c = 32.9 \text{ GPa}$.

Avant bétonnage, la cage d'armature du pieu d'essai a été équipée de quatre lignes de capteurs TIP réparties sur le périmètre de la cage d'armature. Les données TIP ont permis d'évaluer le diamètre effectif du pieu tous les 0.3 m et s'assurer de l'absence de défauts de bétonnage. Les résultats des mesures TIP révèlent un diamètre réel moyen différent de -5.6% à +13.9% par rapport au diamètre théorique. La figure 9 ci dessous présente le diamètre estimé tous les 0.3 m à partir des mesures TIP.

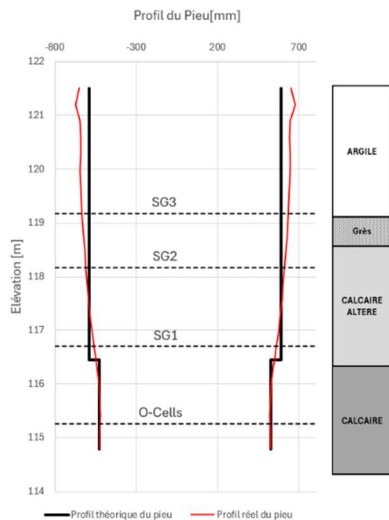


Figure 9. Profil réel et théorique du pieu d'essai (Site B).

De même que nous l'avons fait à partir des données SONICaliper® pour le site A, il est proposé d'utiliser ces mesures TIP pour évaluer l'effet des corrections de diamètre sur l'analyse des jauges de déformation.

Le diamètre réel mesuré aux trois niveaux de jauges est de 1144 mm, 1238 mm et 1278 mm pour les niveaux SG1, SG2 et SG3, respectivement, soit une différence de -3.1%, +4.9% et +8.3% par rapport au diamètre théorique de 1180 mm.

Le module équivalent E_e , tel que défini dans l'équation 2 est recalculé en intégrant le diamètre réel du pieu. Ceci apporte une différence non significative de l'ordre de 1% sur le calcul du module équivalent.

La charge est recalculée selon l'équation 3 pour chaque niveau de jauges. La figure 10 ci-dessous présente la comparaison entre les charges maximales calculées sur la base du diamètre théorique (courbe noire) et celles calculées sur la base du diamètre réel évalué par la méthode TIP (courbe rouge). La correction du diamètre induit une différence sur la

charge calculée de -6%, +9% et +16% pour les niveaux SG1 ; SG2 et SG3, respectivement.

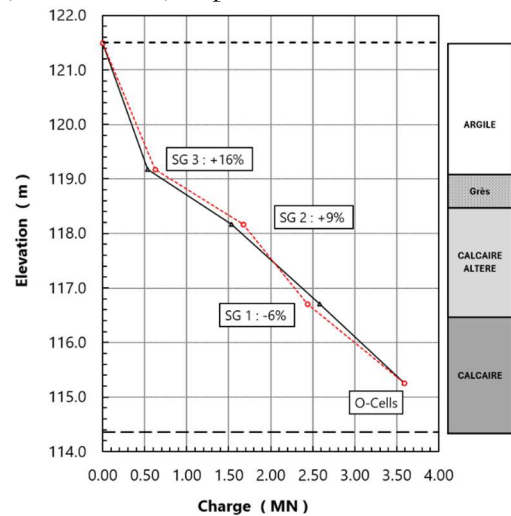


Figure 10. Distribution des charges (site B)

Quatre tronçons de pieu sont définis à partir de la position des jauges de déformation et du système O-Cell® :

- Le tronçon A, entre le système O-Cell® et le niveau de jauges SG1 comprend 1.2 m de Calcaire et 0.2 m de Calcaire altéré,
- Le tronçon B, entre les niveaux de jauges SG1 et SG2 est situé exclusivement dans le Calcaire altéré,
- Le tronçon C, entre les niveaux de jauges SG2 et SG3 comprend 0.3 m dans le Calcaire altéré et 0.6 m d'horizon gréseux,
- Enfin, le tronçon D, entre les niveaux de jauges SG3 et la tête du pieu où la charge est considérée nulle est située exclusivement dans l'Argile.

Pour chaque tronçon, les frottements unitaires mobilisés lors de l'essai sont calculés selon l'équation 4. Il convient de ré-évaluer de la surface frottante $\pi \cdot D_n \cdot h$ de chaque tronçon sur la base des mesures TIP. La figure 11 ci-dessous présente les frottements unitaires calculés à partir du diamètre théorique et recalculés à l'aide des mesures TIP.

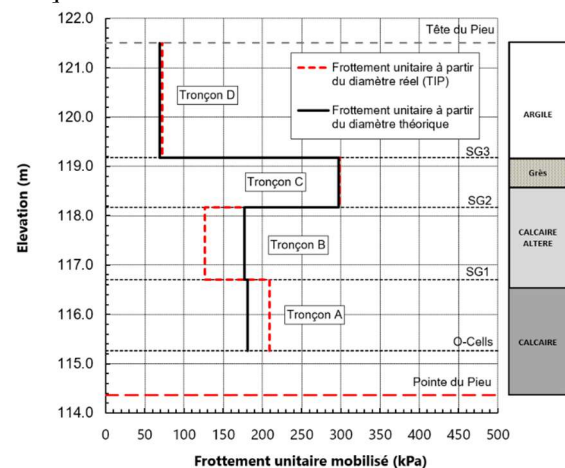


Figure 11. Frottement unitaire (site B)

La réanalyse des frottements unitaires mobilisés révèle une diminution significative (-28%) du frottement unitaire du tronçon B (Calcaire altéré) au profit d'une augmentation (+15%) du frottement unitaire du tronçon A (Calcaire). Les tronçons C et D ne sont pas ou peu affectés. Le tableau ci-dessous reporte les frottements unitaires maximaux mobilisés lors de l'essai de chargement et suivant les deux méthodes d'analyse.

Tableau 2. Site B – Frottement unitaires mobilisés (Fs)

Tronçon	Fs d'après le diamètre théorique [kPa]	Fs d'après le diamètre mesuré par TIP [kPa]	Différence [%]
A (Argile)	180.7	208.6	+15%
B (Grès + Calc. Altéré)	177.0	126.8	-28%
C (Calc. altéré)	296.8	298.2	+0.5%
D (Calcaire)	69.4	72.3	+4%

CONCLUSION

Les méthodes de contrôle qualité SONICaliper® et TIP garantissent la conformité des fondations profondes aux spécifications du projet. Le SONICaliper®, utilisé avant bétonnage, permet d'identifier d'éventuels défauts du puits et d'envisager des corrections en amont. Le TIP, quant à lui, assure un contrôle qualitatif de la fondation après bétonnage.

L'estimation du diamètre fournie par ces deux méthodes améliore l'interprétation des jauges de déformation et, par conséquent, la précision des résultats des essais de chargement statique. Cette information est essentielle pour déterminer le module équivalent du pieu, calculer la charge à chaque niveau instrumenté et évaluer la surface de frottement sol-pieu entre deux niveaux de jauge, donc le frottement unitaire.

Les deux essais de chargement bidirectionnels O-Cell® présentés illustrent l'impact notable de la correction du diamètre sur l'analyse du frottement. Les diamètres corrigés proviennent du SONICaliper® pour le cas A et de la méthode TIP pour le cas B. Les résultats montrent clairement que la prise en compte du diamètre réel modifie significativement l'interprétation du comportement en frottement.

Cette conclusion s'étend également aux barrettes de fondation et aux essais de chargement en tête. L'utilisation conjointe du SONICaliper® et du TIP est donc recommandée, tant pour le contrôle qualité avant

et après le bétonnage, que pour l'estimation précise de la géométrie des fondations profondes, permettant une analyse plus fiable des paramètres du sol lors des essais de chargement.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ASTM D7949-14, "Standard Test Methods for Thermal Integrity Profiling of Concrete Deep Foundations", 2015
- ASTM D8232-18, "Standard Test Procedures for Measuring the Inclination of Deep Foundations", 2020
- Belardo, D., Robertson, S., Coleman, C. (2021). "Interpretation and Evaluation of Thermal Integrity Profiling Measurements", DFI 46th Annual Conference on Deep Foundations: Las Vegas, NV, October 2021.
- Denton, A.K. (2007) Sonar Caliper of Slurry constructed drilled shafts - Providing quality assurance and quality control in deep foundations, 7th FMGM 2007: Field Measurements in Geomechanics
- Komurka, V. Roberson, S. (2025) Calculating internal forces from atypical strain readings, *Proceedings of DFI 50th Annual Conference*, pp. 43-52 DOI
- NF-EN-ISO 22477-1, Geotechnical Investigation and Testing – Testing of geotechnical structures – Part 1: Testing of piles: Static compression load testing O-Cell®, England et al., "Method and Apparatus for Automatic Load testing using Bi-Directional Testing", Patent US7353714 B2, April 2008.
- SONICaliper®, Hayes, "Method and apparatus for investigating a Borehole with a Caliper"; Patent US7495995 B2, February 2009
- Waller, V. (2000) Relations entre composition des bétons, exothermie en cours de prise et résistance en compression, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), ISSN: 1161-028X