

Etat de l'art : contrôle d'intégrité des fondations forées et parois moulées

State of the art: quality control of drilled foundations and cast-in-place diaphragm walls

Emilio NICOLINI^{1*}, Alexandre CROCHELET¹, Julien HABERT², Mario SAAVEDRA³

1 G-Octopus, Nanterre, France

2 SETEC - Terrasol, Paris, France

3 Pile Dynamic Inc., Cleveland, USA

**nicolini.emilio@gmail.com*

RESUME: Les éléments coulés en place, tels que les pieux forés, les pieux à la tarière creuse (CFA) et les parois moulées, sont largement utilisés comme fondations profondes, avec une tendance vers des dimensions de plus en plus importantes et des charges nettement plus élevées. Ces éléments, souvent réalisés sous boue, présentent des défis d'inspection et de vérification, notamment les pieux CFA, pour lesquels l'ensemble du processus s'effectue sans possibilité d'inspection directe lors de l'installation. Les méthodes classiques d'essais non destructifs (END), comme les essais à faible déformation (par impédance mécanique) et les contrôles par auscultation sonique par transparence, ne sont pas toujours adaptées aux exigences actuelles de contrôle d'intégrité des fondations forées complexes et des systèmes de parois moulées.

Pour satisfaire les objectifs de dimensionnement, il est essentiel d'évaluer des paramètres tels que la forme du fût, l'alignement vertical, la propreté de la base, l'alignement de la cage ainsi que son enrobage de béton, et l'intégrité des matériaux. Les parois moulées ajoutent une complexité supplémentaire, en ce qui concerne l'étanchéité et le phasage de construction, qui influencent fortement la performance à long terme. Le contrôle d'intégrité des fondations par la méthode thermique (Thermal Integrity Profiling, TIP) constitue une avancée en matière d'instrumentation et de contrôle d'intégrité. Il améliore la fiabilité des contrôles d'exécution, permettant une analyse rapide et fiable, un accès aux données en temps réel, la réduction des faux positifs et la possibilité d'opérer à distance, contribuant à la réduction de l'impact carbone. Le TIP facilite les pratiques durables, accélère les chantiers et réduit les risques liés à la construction. Cet article présente les bénéfices du TIP pour les pieux forés et les parois moulées, illustrés par des résultats obtenus sur des projets réels, démontrant son efficacité dans le contexte des infrastructures modernes.

ABSTRACT: Cast-in-place elements, such as bored piles, continuous flight auger (CFA) piles, and diaphragm walls, are widely used for deep foundation support, with a trend toward larger dimensions and significantly higher loads. These elements, often built under mud, present inspection and verification challenges, particularly CFA piles, for which the entire process is carried out without the possibility of direct inspection during installation. Conventional non-destructive testing (NDT) methods, such as low-strain integrity testing (using mechanical impedance) and sonic transparency testing, are not always suitable for the current quality control requirements of complex bored foundations and diaphragm wall systems.

To meet design objectives, it is essential to evaluate parameters such as the shape of the shaft, vertical alignment, cleanliness of the base, alignment of the cage and its concrete cover, and material integrity. Cast-in-place walls add complexity, particularly regarding waterproofing, and construction phasing, which strongly influence long-term performance. Thermal Integrity Profiling (TIP) for foundation integrity testing is an advance in instrumentation and quality control. It improves the reliability of performance checks, enables fast and reliable analysis, provides access to near-real-time data, reduces false positives, and allows for remote testing, helping to reduce carbon impact. TIP eases sustainable practices, speeds up construction sites, and reduces construction-related risks. This article presents the benefits of TIP for bored piles and diaphragm walls, illustrated by results obtained on real projects, demonstrating its effectiveness in the context of modern infrastructure.

Mots-clés: pieux; paroi-moulé; béton; thermique; qualité, intégrité.

1 INTRODUCTION

Cet article présente une synthèse des pratiques actuelles de contrôle de l'intégrité des pieux forés en béton, basées sur la méthode dite thermique.

Le contrôle de l'intégrité des pieux est exigé par la plupart des normes et référentiels de conception afin de démontrer que les caractéristiques de conception du pieu – telles que définies par le concepteur – sont ef-

fectivement respectées lors de l'exécution, dans les tolérances admissibles. Ces contrôles doivent être effectués en parallèle aux essais de chargement de pieux, avec des objectifs différents. Alors que ces derniers visent à démontrer la capacité axiale ou la réponse aux charges latérales, les contrôles d'intégrité ont pour but de vérifier les propriétés du pieu telles que la géométrie et la qualité du béton. Les deux types d'essais sont donc complémentaires et contribuent à réduire la probabilité d'élément de fondation ne répondant pas aux exigences du projet.

Les contrôles d'intégrité sont réalisés au moyen d'essais non destructifs (END), qui permettent de détecter des singularités sans atteinte à la fondation. Pour les fondations profondes comme les pieux ou les parois moulées, ils nécessitent dans certains cas l'installation préalable de capteurs ou de tubes de réservation afin de permettre l'insertion d'instruments pour effectuer les mesures.

L'intérêt d'une méthode de contrôle d'intégrité est idéalement de fournir des données le plus tôt possible afin de corriger et éliminer l'origine des défauts identifiés, et d'être aussi précise que possible pour éviter les fausses détections. La méthode thermique présentée ici permet d'atteindre ces deux objectifs, en bénéficiant du processus de prise du béton et de la chaleur produite. L'interprétation de l'évolution de la température dans la fondation, à l'aide de modèles analytiques ou numériques de référence, permet de détecter rapidement et de manière fiable les problèmes potentiels. La combinaison des données thermiques avec les mesures du volume de béton coulé dans le pieu permettent d'optimiser l'exploitation des enregistrements et d'obtenir des estimations fiables de la géométrie du pieu sur toute sa longueur.

2 LA METHODE THERMIQUE

2.1 La source de chaleur

Le béton est constitué d'un mélange de granulats, grossiers et fins, qui représentent la partie inerte, liés avec du ciment et de l'eau, ces derniers sont les agents chimiquement actifs. Les proportions de ces trois composants sont définies par le concepteur et le fabricant afin de garantir les propriétés requises : résistance, raideur et durabilité. Le ciment et l'eau, une fois en contact, forment un fluide qui se mélange aux granulats et déclenche une réaction chimique créant des liaisons permanentes, ce qui confère la résistance globale du mélange solidifié. La réaction chimique entre le ciment et l'eau est exothermique et produit une énergie thermique comprise entre 250 et 460 kJ/kg de ciment

(PCA, 2016), ce qui peut être comparé à la chaleur spécifique de l'eau, 4.186 kJ/kg/K. Une fois le processus lancé, la température du béton augmente, la température maximale atteinte dépend alors de plusieurs facteurs. Durant le processus d'hydratation du ciment, le taux de génération de chaleur par le ciment dans le béton est bien supérieur à la capacité du fût à dissiper cette chaleur vers le sol environnant. Cela entraîne une augmentation systématique et bien observée de la température du béton dans les pieux. Le type de ciment et sa concentration sont des facteurs qui peuvent modifier globalement cet échange thermique transitoire, mais pour un béton standard, le volume et la dimension de la fondation sont également des éléments importants.

Le pic de température atteint dépend de l'équilibre énergétique entre la chaleur générée dans le volume du pieu et celle dissipée dans le sol par la surface de contact le long du fût du pieu. La génération de chaleur dépend du volume ($\propto L^3$), tandis que la dissipation dépend de la surface du fût ($\propto L^2$), il apparaît donc qu'à mesure que la taille du pieu augmente, la génération de chaleur prédomine largement. Un pieu de 3 m de diamètre présente un rapport volume/surface 3 fois supérieur à celui d'un pieu de 1 m de diamètre. L'élévation de température du pieu peut atteindre 50 °C ou plus au moment du pic, ce dernier est atteint en moyenne entre 24 et 80 h après la mise en place du béton.

2.2 Mesure de la température

La méthode thermique tire avantage, d'une part de l'augmentation de température lors de l'hydratation du béton, d'autre part de la dissipation de chaleur dans le sol, afin d'évaluer l'intégrité des pieux. Des chaînes sont placées le long de barres d'armature sélectionnées, avec des capteurs de température distribués tous les 30 ou 50 cm, sur toute la longueur. En règle générale, il est recommandé d'utiliser environ 1 fil tous les 25 à 30 cm du diamètre du pieu. Pour un pieu de 1 m de diamètre, 4 fils seront installés, tandis que pour un pieu de 3 m, 10 fils seront nécessaires. Un nombre pair de fils est adopté, le positionnement de paires diamétralement opposées permettant de détecter le déplacement latéral de la cage d'armature. Les pieux CFA, qui ont généralement un diamètre d'environ 30 à 60 cm, constituent un cas particulier, où un seul fil est utilisé dans l'axe central; dans ce cas, la méthode thermique offre un avantage net par rapport à d'autres méthodes non destructives, comme le contrôle par transparence sonore (CSL), où, en raison de contraintes d'espace ou de l'absence de cage d'armature toute hauteur, il n'est pas possible de placer les tubes de réservations. La Figure 1 illustre les configurations type pour trois tailles différentes de pieux équipés de 1, 4 et 8 fils ther-

miques. Cette distribution correspond à la capacité observée d'un capteur à mesurer l'évolution de la température dans le béton environnant et à détecter les défauts typiques dans le pieu. Chaque capteur de température (TS) monté sur un fil thermique (TW) est encodé électroniquement permettant ainsi un assemblage sans limite pratique du nombre de capteur sur un seul fil (500). Un boîtier d'enregistrement, est connecté en tête de chaque fil pour collecter les températures à intervalles d'environ 15 minutes. Chaque capteur étant codé, l'outil d'enregistrement peut dissocier les mesures individuelles de chaque capteur et ainsi connaître précisément la température au niveau de chaque capteur. Il en résulte un profil complet de la distribution et de l'évolution de la température du pieu dans le temps (Figure 2).

Les fils sont placés dans le pieu sur la cage d'armature; les boîtiers d'enregistrement peuvent être connectés et activés avant ou après le coulage du béton dans le forage, ce qui permet dans le premier cas de suivre la montée du béton dans la fondation pendant cette phase. L'enregistrement des données reste activé pendant les 24 à 72 h (ou plus) qui suivent le bétonnage, en fonction du diamètre du pieu et du pic de température observé dans le pieu au fil du temps. Grâce à la connectivité sans fil et à la visualisation des données

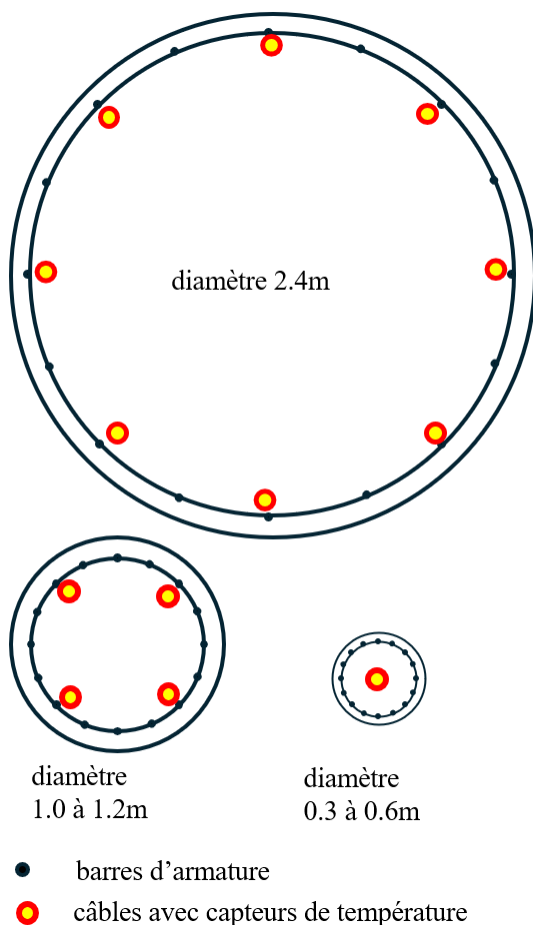


Figure 1. Vue en plan des fils thermiques dans les pieux

en ligne, l'enregistrement des données est suivi en temps presque réel et à distance pendant l'hydratation. Certains défauts initiaux peuvent alors, dans la plupart des cas, être identifiés bien avant le délai standard pour l'interprétation finale. Ce dernier est généralement considéré comme le temps moyen entre la fin de la mise en place du béton et le moment où le pic de température est atteint, permettant d'assurer que le processus d'hydratation est actif et développé dans la même proportion sur toute la longueur du pieu. Enfin, le système d'enregistrement est déconnecté et peut être utilisé sur d'autres pieux; les fils thermiques sont eux sacrificiels.

2.3 Principes fondamentaux d'interprétation

L'interprétation des résultats du test commence de manière qualitative afin d'identifier le type de défauts potentiellement présents dans la fondation (pieux ou paroi moulée), puis approfondie à l'aide de modèles analytiques interprétatifs. Lors de l'hydratation, la chaleur se dissipe par la surface externe du pieu. Plus un capteur est proche de la surface du pieu, voir à l'extrême, en contact avec le sol environnant en raison d'une intrusion de sol, plus la température sera basse. Il en va de même si la teneur en ciment est moindre localement, car la production de chaleur y sera plus faible. Ce principe est illustré à la Figure 3, où le pieu

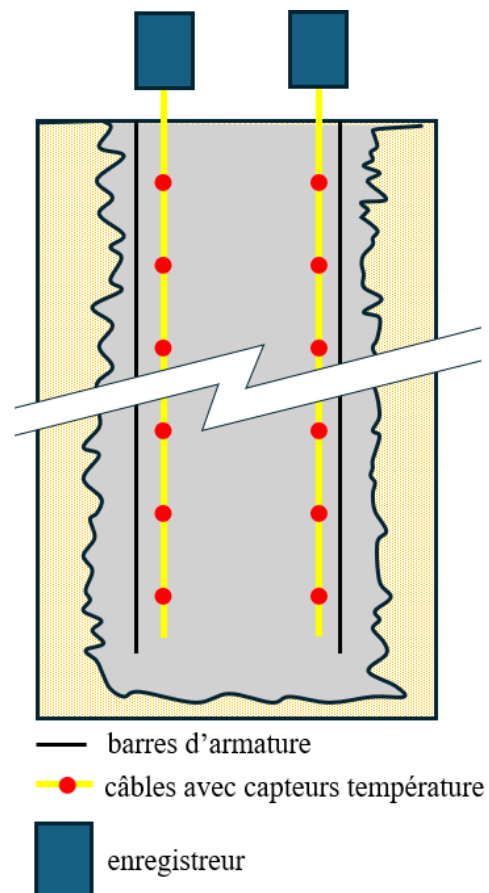


Figure 2. Fils thermiques le long du pieu

équipé de capteurs est représenté avec deux cas possibles des défauts, accompagnés des mesures de température correspondants.

Dans le premier cas (partie supérieure de la figure citée), un côté du pieu présente une intrusion de sol ou une zone où la qualité du béton est inférieure; le capteur situé à cet endroit mesurera une température proche de celle du sol ou réduite, la quantité moindre de ciment générant moins de chaleur. Dans les deux cas, la température locale sera plus basse, comme illustré dans la figure. Plus la baisse de température est importante, plus le défaut est important.

Si le recouvrement de la cage d'armature présente une épaisseur réduite localement, la température mesurée par les capteurs environnants sera par conséquent plus basse que dans les zones où l'épaisseur est plus importante, et inversement. Cela permet de détecter un défaut d'alignement de la cage dans le pieu (voir partie centrale de la figure 3), où les côtés opposés de la cage d'armature présenteront une couverture différente. Les fils diamétralement opposés mesurant l'un une augmentation et l'autre une diminution équivalente permettent de repérer très clairement ce type de problème.

Si les mesures de volumes de béton pompé sont disponibles, les températures sont corrélées au rayon moyen du pieu. L'hypothèse est faite que le pieu est cylindrique, le rayon moyen est déterminé sur la base du volume du béton pompé. La température moyenne est ensuite ajustée au rayon moyen, puis, les mesures de températures locales sont utilisées afin d'obtenir un

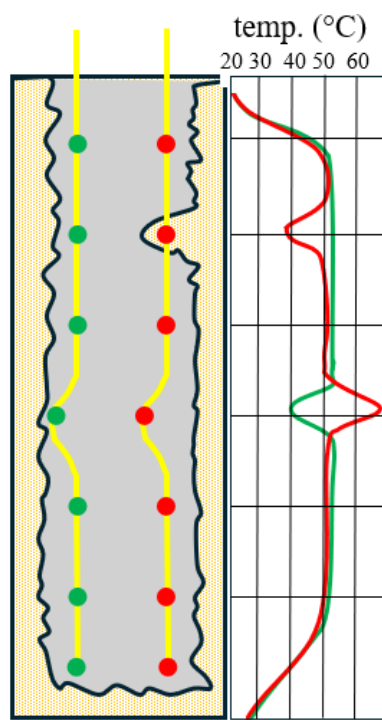


Figure 3. Exemples de défauts et courbes de températures associées

rayon calculé au droit de chacun des capteurs de température. En comparant les résultats à la forme théorique de la cage, l'épaisseur de l'enrobage en béton peut être évaluée, et les zones où l'armature est exposée au sol peuvent être détectées. La capacité de détecter les défauts et la perte de béton également sur la partie externe à la cage d'armature est un atout majeur de la méthode. A titre de comparaison les méthodes de contrôle d'intégrité sonique (CSL) permettent de détecter uniquement les défauts présents à l'intérieur de la cage, le long du trajet des ondes sonores.

Les données acquises par la méthode thermique permettent de détecter non seulement la réduction du béton susceptible d'affecter la capacité axiale du pieu, mais également les défauts d'enrobage de la cage pouvant affecter la durabilité et la résistance à la flexion de la fondation.

2.4 Chute de température à la base du pieu

Comme le montre schématiquement la Figure 3, les capteurs sont également installés à proximité de la pointe des pieux, le dernier capteur étant placé à la base de la cage. L'échange thermique entre le béton et le sol est plus important dans cette zone où la surface de contact est accrue. De ce fait l'interprétation de la température ne peut pas être effectuée comme le long du fût du pieu où la dissipation thermique est radiale. Cependant, cela peut être corrigé empiriquement.

La figure illustre de manière qualitative comment, pour un pieu cylindrique, en l'absence de tout défaut déjà évoqué au niveau du fût, la température diminue vers la pointe du pieu. La distribution de la température sur les derniers capteurs suit une fonction tangente hyperbolique (\tanh) par rapport à la distance de la base théorique du pieu.

La diminution de la température de l'intérieur du pieu vers le sol peut être représentée (Coleman, 2023) par une fonction, comme illustré à la figure 4, où la pente de la baisse de température à la base est estimée à l'aide de l'équation (1) suivante:

$$a = c\sqrt{t} \quad (1)$$

où c varie généralement entre 0.3 et 0.5 et t est le temps écoulé en heures depuis le coulage du béton; la figure indique la forme pour différentes valeurs de α .

La présence de débris ou de béton de mauvaise qualité à la base peut être justifié par une courbe de température mesurée par les capteurs à proximité de la base du pieu qui ne correspond pas à la forme attendue. Cet élément réinterprété, bien que moins précis pour l'instant que l'interprétation le long du fût du pieu, constitue en effet un autre avantage de la méthode thermique pour le contrôle d'intégrité des fondations.

3 EXEMPLES

Le contrôle d'intégrité à l'aide de la méthode thermique peut être appliquée à plusieurs types de fondations. Ces dernières années, elle a principalement été utilisée sur des pieux cylindriques, dont la configuration radiale permet de comparer relativement facilement la température mesurée avec les températures attendues. Cette méthode peut également être utilisée pour contrôler la mise en œuvre des clous de sol, comme le détail l'article de Piscsalko (Piscsalko et al., 2014). L'article décrit comment des défauts placés artificiellement dans un clou ont été détectés avec succès grâce à cette méthode.

Plus récemment, cette méthode a également été appliquée aux parois moulées, même si la méthode est encore en cours de développement pour les estimations quantitatives, vue la complexité à corrélérer les flux thermiques dans la section de la paroi. Cependant, la capacité à détecter des défauts d'enrobage de la cage d'armature a démontré tout l'intérêt de cette méthode sur ce type d'application, ces défauts pouvant avoir des conséquences néfastes sur la résistance à la flexion.

3.1 Pieux en béton armé

Les principes généraux de la méthode ont été exposés dans les sections précédentes, deux exemples sont maintenant présentés ci-après, l'un basé sur une analyse numérique, l'autre basé sur un cas concret.

Baudo (Baudo et al., 2024) rapporte les résultats d'une analyse numérique dans laquelle une inclusion de sable a été modélisée dans un pieu en béton et une analyse thermique a été effectuée comprenant des analyses de sensibilité sur la taille de l'inclusion (Figure 5). Le diamètre du pieu était de 1.5m, il a été équipé de 5 fils, espacés d'environ 0.95m le long de la circonférence. L'inclusion était positionnée entre deux

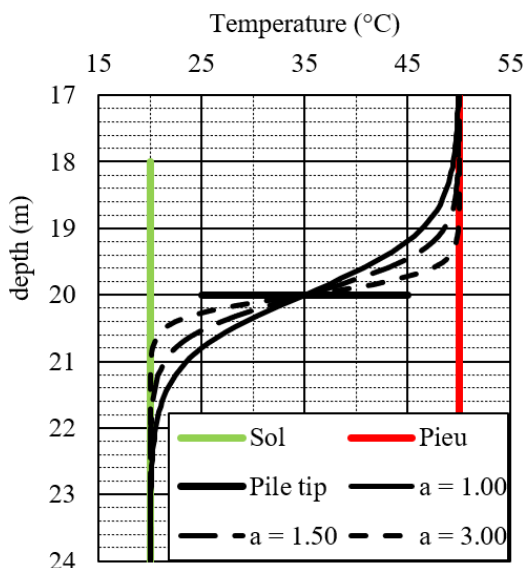


Figure 4. Exemples d'interpolation de température à la base

fils; le rayon R du défaut était de 0.2, 0.25 et 0.5 m. Les résultats sont présentés dans la même figure pour 12h et 24h après le bétonnage et indiquent que même l'inclusion de 0.2 m est très bien détectée par la baisse de température. Un tel défaut ne serait pas détectable avec d'autres méthodes non destructives. L'article décrit d'autres modèles numériques dans lesquels différentes géométries de défauts sont modélisées, comme un manque local de couverture, où là encore, la mesure thermique permet une détection très claire.

Le second exemple présente cette fois le traitement de mesures réelles de température réalisées à la base d'un pieu de 8.4m de long équipé de 8 fils (diamètre: pieu 2.6m, cage d'armature 2.3m, soit 15cm de couverture). Cet exemple est illustré par la Figure 6. La correction permettant de corriger l'effet de la chute de température à la base a été ajustée à la température moyenne sur la partie concernée des données. L'ajustement a été effectué en saisissant la

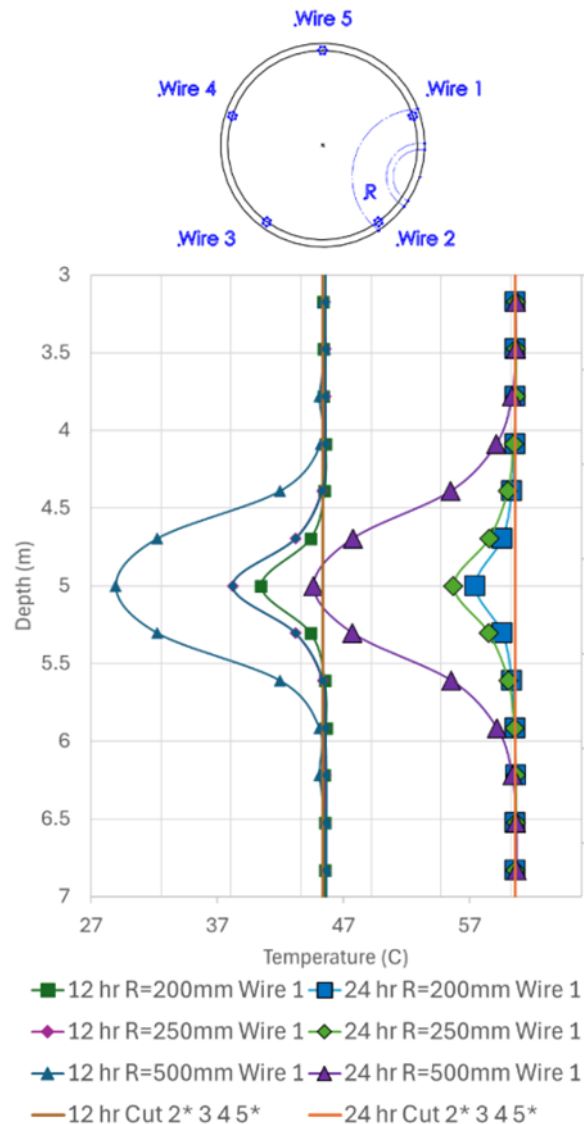


Figure 5. Températures obtenues du model numérique avec inclusion sphérique sableuse au milieu de 2 chaines thermiques (adapté de Baudo,2024)

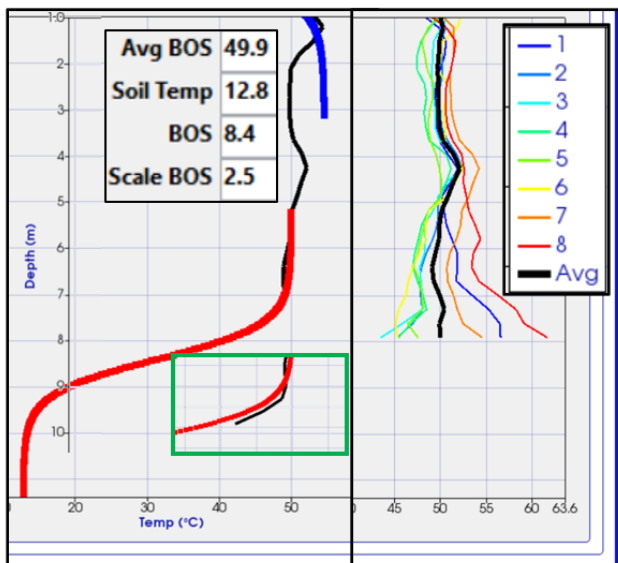


Figure 6. Températures à la base d'un pieu corrigées avec fonction tanh; à gauche la température moyenne mesurée, à droite la température corrigée (PDI, communication personnelle). Le cadre en vert montre l'interpolation tanh légèrement décalé vers le haut pour montrer les données interpolées.

température du béton et du sol et en estimant α par l'équation (1), puis en l'ajustant.

Le résultat est présenté dans la partie droite de la figure, où la température moyenne est désormais corrigée et ne met en évidence aucun débris à la base. Les températures des fils de capteurs individuels corrigés, non alignées avec la moyenne, pourraient indiquer un déplacement de la cage avec une augmentation du recouvrement au niveau des capteurs des fils n° 7, 8 et 1, qui sont adjacents, et une diminution correspondante au niveau des autres fils.

3.2 Parois moulées

Des concepts similaires à ceux adoptés pour les pieux sont appliqués aux panneaux avec une certaine prudence, car le flux thermique vers le sol environnant n'est plus radial comme c'était le cas pour les pieux. Des caractéristiques très intéressantes peuvent être anticipées, qui seront décrites dans cet article sur la base d'une publication précédente de Piscsalko, 2022, et d'un nouveau cas récemment mené au Paraguay.

Les parois moulées en béton peuvent être équipées de fils thermiques comme les pieux, espacés de manière régulière dans le plan et par paire en face-à-face comme illustré en Figure 8. De cette manière, les mêmes concepts utilisés pour interpréter les températures dans les pieux peuvent être adoptés pour les défauts et le déplacement latéral de la cage dans les panneaux. Certaines différences sont à prévoir et nécessitent une attention particulière.

Piscsalko (2022) rapporte un cas réel observé sur le

terrain. Les panneaux de 6.7x1.0 m de section et 20.7m de profondeur formant une paroi de 67m de long ont été équipés chacun de 14 fils. Les fils sont identifiés de 1 à 14 dans le sens des aiguilles d'une montre, les fils n° 1 et 8 se trouvant aux deux extrémités. Les fils situés aux deux extrémités d'un même panneau devraient enregistrer en principe une température plus basse, le béton y présentant une plus grande surface de contact avec le sol (voir par exemple le fil n° 8 de la Figure 9 – cette figure ne présente que l'extrémité droite du panneau). Les capteurs installés à proximité des extrémités (n° 7 et 9) seront également affectés par cette dissipation non uniforme, mais dans une moindre mesure; enfin, les capteurs n° 6 et 10 et les autres situés au centre seront indépendants des effets secondaires et la méthode habituelle pourra leur être appliquée.

L'exemple rapporté est intéressant, car, à des fins de construction, le panneau était équipé de feuilles de mousse de polystyrène, comme le montre la photo de la Figure 7, à une profondeur d'environ 13-14 m. Ces éléments ont fourni une isolation sur ce côté du panneau, ce qui doit être anticipé et observé dans les relevés de température.

La température maximale a été enregistrée environ 82 heures après le bétonnage. Un exemple d'enregistrement est présenté en Figure 9, où on peut observer:

- le fil n° 8 (en vert foncé) est entièrement exposé au sol et est plus froid que les autres sur toute la profondeur, ce qui confirme les effets de bord;
- les fils n° 7 et 9 ont le même effet de bord, mais moins prononcé, le n° 7 étant également influencé par l'isolation fournie par la feuille de polystyrène;
- les fils n° 10 à 14 ont une température presque constante et ne mettent pas en évidence de défauts;
- les fils n° 3 à 6 ont une température supérieure qui détecte bien la présence du polystyrène;
- le fil n° 1 (couleur bleu foncé), opposé au n° 8 à l'autre extrémité du panneau, à une température plus élevée que le n° 8 et presque constante avec la profondeur. Ceci s'explique par la présence du panneau précédent adjacent, ce dernier réduisant la dissipation de la chaleur.



Figure 7. Panneau en polystyrène fixé à la cage d'armature (Piscsalko, 2022)

3.3 Barrettes au Paraguay

Un cas récent de barrettes équipées de fils thermiques est rapporté grâce aux données fournies par Pile Dynamics Inc. (PDI). Les barrettes ont été utilisées comme pieux de fondation pour la construction d'un immeuble de grande hauteur à Asunción, au Paraguay, et ont atteint des profondeurs de 36 à 40 mètres. La Figure 8 présente un schéma en plan de l'emplacement des capteurs; huit fils ont été utilisés pour contrôler la distribution de température dans la fondation. Les barrettes mesuraient 2.70m par 1.00m de section avec un enrobage de béton de 75 mm sur le côté long et de 200 mm sur le côté court. La Figure 10 montre un exemple de

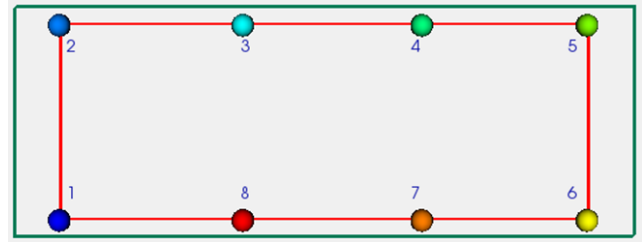


Figure 8. Position des fils des barrettes en Paraguay (grâce à PDI, 2025)

lecture des capteurs, indiquant une température essentiellement constante avec la profondeur.

Bien que les analyses quantitatives sur l'enrobage de béton n'aient pu être réalisées (les modèles n'étant pas encore développés), les températures n'ont indiqué aucune anomalie et les barrettes ont été acceptées.

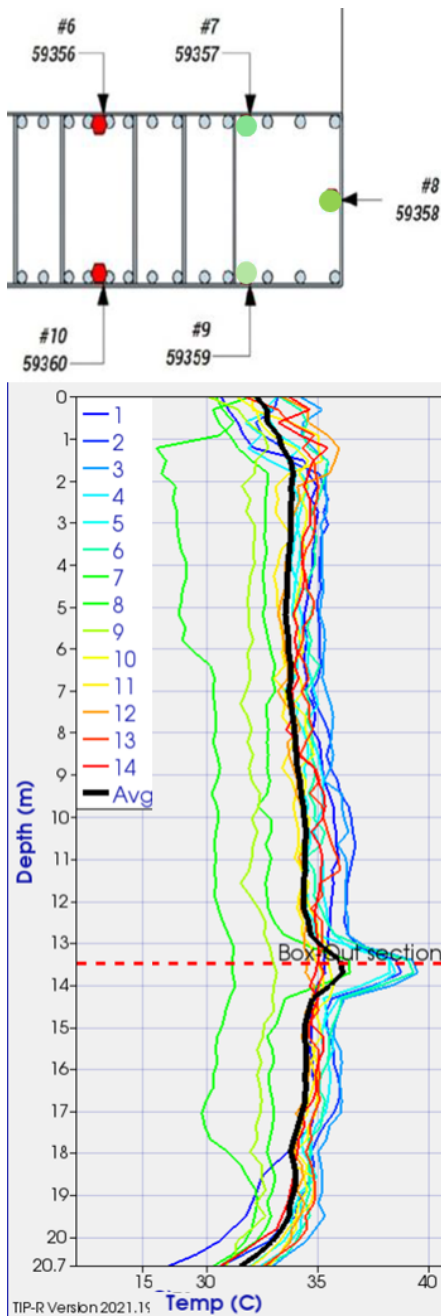


Figure 9. Température dans une paroi moulée (modifié de Piscsalko, 2022)

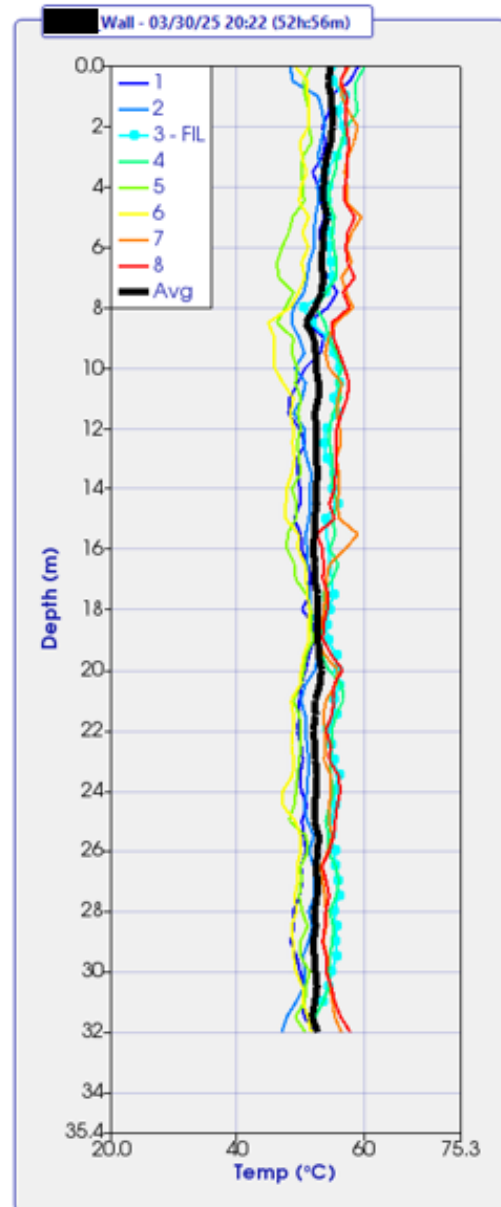


Figure 10. Températures mesurées dans une barrette - Paraguay (PDI, 2025)

4 LA METHODE DANS LE CONTEXTE NORMATIF

Au niveau français, les méthodes normalisées d'essai d'intégrité sont actuellement normalisées sont les suivantes, rattachés aux normes de reconnaissance et essais et la sous-famille « Auscultation d'un élément de fondation » :

- NF P94-160-1:2000 (édition 2) pour l'auscultation sonique par transparence,
- NF P94-160-2:1993 et 4 :1994 respectivement pour les méthodes d'essais par réflexion et impédance
- NF P94-160-3:1993 : méthode sismique parallèle
- XP P94-160-5:1999 : méthodes par diffusion nucléaire à rayon gamma.

On peut ainsi noter que la méthode thermique n'est pas actuellement normalisée. De la même façon, il n'existe pas de norme au niveau européen ou ISO. En revanche :

- celle-ci est couverte depuis 2014 par la norme ASTM D-7949, dont la dernière édition date de 2025 ;
- elle est déjà citée par les spécifications pour les projets de fondation profondes en Grande-Bretagne (SPERW2017) ;
- elle sera bientôt citée dans l'Eurocode 7-3, qui sera publié et applicable en septembre 2027 ;
- elle fait partie des normes d'essais d'auscultation des fondations profondes identifiées comme pertinentes par le comité technique (TC) 182 de l'ISO, qui vont rentrer dans leur phase de développement en 2026.

5 CONCLUSIONS

Les principales caractéristiques et applications de la méthode thermique comme méthode de contrôle de l'intégrité d'un élément de fondation profondes ont été présentées dans cet article conformément aux pratiques courantes les plus récentes. Il a été démontré comment cette méthode permet d'identifier la plupart des défauts pouvant être rencontrés dans un pieu en béton coulé en place, rivalisant avec voire dans certains cas permettant de dépasser d'autres méthodes plus traditionnelles en termes d'efficacité, en n'étant notamment pas limitée au béton à l'intérieur de la cage d'armatures, ne nécessitant pas la mise en place de tubes de réservation mais permettant une caractérisation répartie sur la longueur de l'élément ausculté . Des applications récentes à des parois moulées en béton ont également été présentées dans cet article. Malgré son efficacité prouvée, cette méthode n'est pas encore incluse dans le contexte normatif français (et de même

européen et ISO), ce qui est considéré comme une limitation pour l'application de méthodes visant à améliorer les contrôles d'intégrité des pieux et des fondations en France.

REMERCIEMENTS

Les Auteurs remercient PDI pour le support dans l'écriture et Blue Tower Ventures Paraguay SA pour les données du projet Paseo 55 qui sont ici partagées.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- CEN, prEN 1997-3_Ed2. Eurocode 7 - Geotechnical design - Part 3: Geotechnical structures, 2027
- AFNOR, NF P94-160 - Sols : reconnaissances et essais. Auscultation d'un élément de fondation :
-NF P94-160-1 Partie 1 : Auscultation sonique par transparence, 2000
-NF P94-160-2 Partie 2: Réflexion, 1993
-NF P94-160-3 Partie 3: Sismique parallèle, 1993
-NF P94-160-4 Partie 4: Impédance, 1994
-XP P94-160-5 Partie 5: Méthodes par diffusion nucléaire à rayonnement gamma, 1999
- ASTM D7949-25 (2025). Standard Test Methods for Integrity Testing of Concrete Deep Foundations by Thermal Methods. ASTM
- PCA (Portland Cement Association) (2016). Design and Control of Concrete Mixtures, 16th Edition, Skokie, Illinois, USA, 2016. ISBN: 978-0893122722
- Baudo, M. and Robinson, B. (2024). Modeling inclusions in deep foundations integrity tested by thermal methods. *49th Annual Conf. on Deep Foundations, 2024*.
- Belardo, D., Robertson, S. and Coleman, T. (2021). Interpretation and Evaluation of thermal integrity profiling measurements. *46th Annual Conf. on Deep Foundations, 2021*.
- Coleman, t. and Belardo, D. (2023). Drilled shaft base quality reductions identified with thermal integrity profiling. *Presented at 48th Annual Conf. on Deep Foundations, 2023*.
- ICE (2017). Specification for Piling and Embedded Retaining Walls, 3rd edition, 2017.
- Piscsalko, G., Alvarez, C., Belardo, D.S. and Galvan, M. (2011). Using thermal integrity profiling to evaluate the structural integrity of soil nail. *39th Annual Conf. on Deep Foundations, Atlanta; 2011*, pp.195-202.
- Piscsalko, G. and Ellis, M. (2022). Advantages in using Thermal Integrity Profiling. Proceedings of the 11th Int. Stress Wave Conf., Rotterdam.