METHODOLOGIE DE CONTROLE EN PLACE DE LA CAPACITE PORTANTE DES MICROPIEUX A PARTIR D'ESSAIS DYNAMIQUES

METHODOLOGY FOR ASSESSING THE IN SITU BEARING CAPACITY OF MICROPILES BASED ON DYNAMIC LOAD TESTING

R. Matias CALVENTE[1], Pierre BREUL[2], Miguel Angel BENZ[1], Roland GOURVES[1], Younes HADDANI[1], Claude BACCONNET[2] et Philippe GOTTELAND[3]

1 Sol Solution Géotechnique Réseaux, 63204 Riom Cedex, France
2 Institut Pascal, 63170 Aubière Cedex, France
3 Fédération Nationale des Travaux Publics, 75008 Paris, France

RÉSUMÉ — L'utilisation des micropieux a augmenté considérablement depuis leur création. Toutefois, ce développement n'a pas été accompagné par la mise en place d'essais de contrôle systématiques et satisfaisants. En effet, la méthode la plus utilisée pour contrôler la portance d'un micropieu est l'essai de chargement statique en traction. Cet essai a cependant quelques problèmes, à savoir l'encombrement, le temps de mise en œuvre, la durée de l'essai, le coût... Il apparaît donc nécessaire de développer une nouvelle méthodologie de contrôle des micropieux adaptée aux conditions de chantier. Dans cet article, une nouvelle méthodologie basée sur des essais de chargement dynamique à faible contrainte est proposée. La validation et la faisabilité de la méthode et du protocole d'essai ont été effectués à partir d'une étude expérimentale menée sur 18 micropieux à échelle réelle. Sur chaque micropieu des essais de chargement statique en traction et dynamiques ont été réalisés. Les résultats sont très encourageantes et montrent qu'il est possible au moyen de la méthode proposée, de déterminer, et de contrôler, la capacité portante des micropieux auscultés de manière systématique, simple, rapide, à faible coût et en préservant leur intégrité.

ABSTRACT — Micropiles technology increased significantly since their inception however this expansion has not been accompanied by the development of an appropriate execution control. Indeed, the static load test is traditionally performed to verify the bearing capacity of micropiles. Unfortunately, this type of testing is expensive and time consuming. It is necessary, therefore, to develop a new control methodology adapted to site conditions. This paper present a new methodology based on low-strain dynamic testing that requires much less important impact energy. The validation and feasibility of the methodology and its protocol has been carried out using an experimental study of 18 full-scale micropiles on which static and dynamic loading were performed. The results showed that it is possible to control the bearing capacity of micropiles using this method in a simple, rapid, low cost way and preserving their integrity.

1. Introduction

La technique des micropieux est utilisée depuis plus de 60 ans comme système de fondation. Aujourd'hui, son utilisation s'est développée considérablement mais ce développement n'a pas été accompagné par la mise en place d'essais de contrôle, d'intégrité et de portance, systématiques et satisfaisants. En effet, la méthode la plus utilisée en France et à l'étranger pour contrôler la portance d'un micropieu est l'essai de chargement statique en traction (AFNOR, 1999). Néanmoins, celle-ci présente quelques inconvénients : l'encombrement, le temps de mise en œuvre, la durée de l'essai, le coût…. En conséquence, cet essai ne peut pas être systématisé et ne peut être utilisé que pour des chantiers de grande taille et dont le budget le permet.
Il apparaît ainsi nécessaire de développer une méthodologie de contrôle des micropieux adaptée aux conditions de chantier, qui soit rapide, fiable, à faible coût et permettant une interprétation en temps réel. Pour ce faire et parmi les techniques développées ces dernières années dans le domaine des pieux, l'essai de chargement dynamique semble le mieux adapté pour répondre à ces besoins.
L'essai de chargement dynamique est un essai très rapide par rapport à un essai de chargement statique. Par contre, l'énergie de battage nécessaire est considérable et l'interprétation des phénomènes engendrés pendant le battage est très complexe. Ces inconvénients nous ont motivé à étudier et à développer une nouvelle méthodologie basée sur les essais dynamiques. Elle se caractérise d'une part par l'utilisation d'une énergie de battage beaucoup plus petite et d'autre part par l'analyse et l'interprétation réalisés sur les signaux mesurés lors du battage.

2. Comportement d'un micropieu sous chargement dynamique

L'essai de chargement dynamique consiste à faire tomber une masse sur la tête du pieu et à enregistrer la force et l'accélération entrainées par le passage de l'onde de choc créées par l'impact. En effet, lorsqu'un impact est appliqué sur la tête d'un pieu de section At et de module d'élasticité Et, une onde de compression u(x,t) est introduite dans le pieu en se déplaçant vers la pointe à vitesse ct (vitesse de propagation de l'onde). Quand l'onde u(x,t) arrive à l'extrémité du pieu, son amplitude est réduite du fait de la résistance du sol le long fût (Ramshaw et al., 1998) et une partie est utilisée pour déformer le sol tandis que l'autre partie est réfléchie vers le haut. Le pieu s'enfonce dans le sol et on obtient un enfoncement permanent quand le pic de l'onde surmonte la résistante du sol. Après un cycle aller-retour t2 = t1+2Lt/ct (avec Lt la longueur du pieu), la partie de l'onde réfléchie depuis la pointe revient au point de mesure en apportant une force remontante F(t2). Ainsi, la modification de la force de l'onde pendant cette période de mesure est interprétée comme la résistance totale RT opposée par le sol (Rausche et al., 1985). Le phénomène dynamique décrivant la propagation de cette onde est expliqué par l'équation d'onde (équation 1) proposée par Barré de Saint-Venant, (1967).

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - c_t^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{R(x,t)}{E_t . A_t} \qquad (1)$$

Où R(x,t) représente la résistance opposée par le sol le long du fût et dans la pointe. Différentes solutions permettent de donner une solution à cette expression ; toutefois, la plus répandue est celle dite des caractéristiques. Rausche et al. (1985) présentent une solution complète de l'équation de l'onde appliquée au cas de battage d'un pieu.

Par ailleurs, quelques études expérimentales ont été réalisées afin d'évaluer la faisabilité des essais de chargement dynamique sur micropieux (Gomez et al., 2004 ; Oteo et al., 2008). Ces essais ont mis en évidence la faisabilité d'un tel essai et les résultats obtenus satisfaisants vis-à-vis des résultats obtenus avec les essais de chargement statique. Cela a été vérifié par des études expérimentales à échelle réduite et des études numériques réalisées au préalable (Breul et Calvente, 2010).

Néanmoins, toutes les études réalisées ont montré qu'il est nécessaire d'appliquer de grandes énergies de battage pour mobiliser toute la résistance le long du fût, mettant ainsi en risque l'intégrité du micropieu. En effet, l'élancement des micropieux et les grands pics de traction engendrés le long du fût par l'impact du marteau peuvent entraîner la rupture de l'élément. De même, tous les auteurs concordent sur le fait que l'interprétation théorique de l'essai n'a pas une solution unique, qu'elle est très délicate et qu'elle nécessite des hypothèses assez lourdes sur le comportement à l'interface sol/pieu, difficiles à vérifier sans la réalisation d'un essai de chargement statique de référence.

3. Essai de chargement dynamique à faible contrainte

L'essai consiste à mesurer à l'aide des capteurs installés au voisinage de la tête du micropieu, les impacts graduels fournis à l'aide d'un marteau de 5 kg et d'une masse de quelques dizaines de kilogrammes. Une chaîne d'acquisition et de traitement des signaux permet de calculer, pour chaque coup, la force statique Fstat et le déplacement élastique Delast du micropieu. Ces valeurs sont traitées en temps réel et permettent de tracer la courbe charge enfoncement du micropieu testé.

3.1. Hypothèses de base

La méthode proposée repose sur l'analyse de la propagation d'une onde mécanique dans un milieu élastique élancé. Les hypothèses prises en compte sont :

-→ comportement visco-élasto-plastique du sol,
-→ micropieu infiniment rigide par rapport au sol environnant,
-→ contrainte répartie uniformément sur la section du micropieu,
-→ grande longueur d'onde devant les dimensions transversales du micropieu,
-→ sol bien couplé au béton à l'interface sol/fût - égalité des déplacements,
-→ l'impact à faible contrainte (énergie de battage faible) n'active pas la composante visqueuse à l'interaction sol/fût,
-→ le comportement sous chargement pseudo-statique du micropieu dans le domaine élastique est gouverné par la raideur à l'interface sol/fût,
-→ le comportement à la rupture sous chargement est gouverné par les caractéristiques plastiques (cisaillement) du sol.

En résumé, si les contraintes engendrées dans le micropieu ne sont pas suffisamment importantes pour mobiliser plastiquement le micropieu, on peut dire que le phénomène est purement élastique. Le système micropieu-sol peut être ainsi modélisé comme un système masse-ressort simple (figure 1).

3.2. Calcul de la force statique équivalente

Si l'on considère le système sol/micropieu comme un ressort soumis à de faibles contraintes et si l'on connaît sa raideur Ks, il est alors possible de calculer une « force statique équivalente » à chaque coup de marteau. Cette force, provoque dans le système un déplacement égal à celui mesuré dans la tête du micropieu. En connaissant le déplacement maximal (D) entrainé par l'impact du marteau dans la tête du micropieu et la raideur du système (Ks), il est possible de calculer la force statique (F) qui produit ce déplacement maximal à partir de la relation suivante :

$$F_{stat} = K.D_{elast} \quad (2)$$

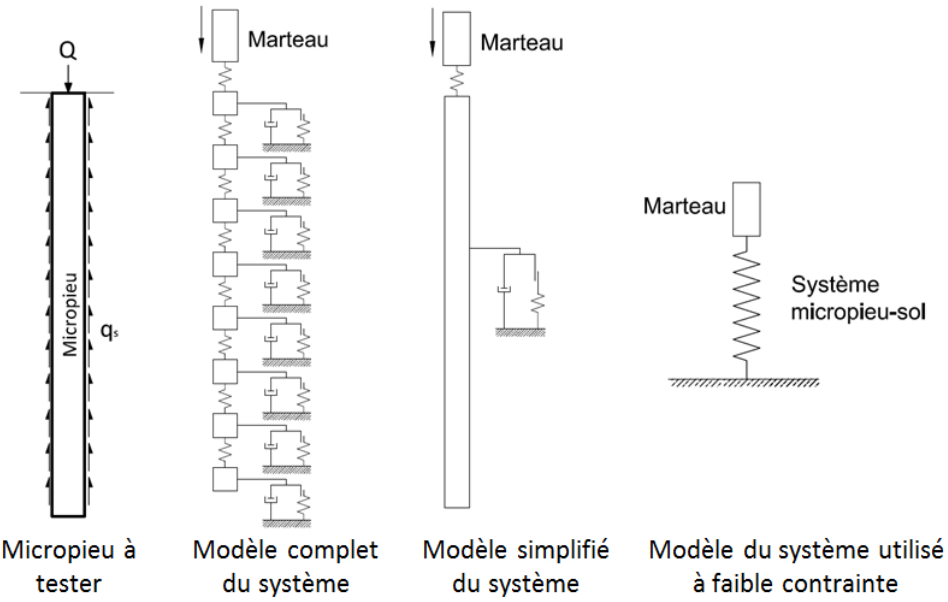

Figure 1. Modèle du système micropieu-sol.

Pour le calcul de la raideur statique Ks on se sert de la courbe d'accélérance (fonction de transfert dans le domaine fréquentiel) proposée par Héritier et Paquet (1986). En effet, aux basses fréquences, le système pieu/sol a un comportement de type ressort. Au-delà, l'accélérance augmente avec la fréquence jusqu'au départ de la résonance. La raideur Ks calculée par cette approche distingue la partie réelle qui représente la raideur statique (indépendante de la fréquence) et la partie 'imaginaire qui représente la diffusion de l'énergie à travers le sol (Caballero, 2007). Ainsi, à basses fréquences, la raideur dynamique (Kd) tend vers la raideur statique (Ks) du système. En modifiant ainsi la masse, la géométrie et l'énergie d'impact du marteau

on cherchera à stimuler les basses fréquences afin d'ajuster le calcul de la raideur Ks.

3.3. Protocole d'essai

Le protocole de l'essai (figure 2) consiste à réaliser des impacts en augmentant l'énergie de battage de façon à mobiliser à chaque nouvel impact une partie plus profonde du micropieu. De cette manière, il est possible d'obtenir la charge que le micropieu est capable de reprendre en service. Il est ainsi possible de vérifier pour une charge donnée s'il y a ou non présence de fluage. Il s'agit donc d'un essai de contrôle de la capacité portante en service. Dans la pratique, la charge sera augmentée jusqu'à l'atteinte d'une force statique équivalente comprise entre RELS et 1,3 RELS. Par ailleurs, pour vérifier l'hypothèse d'un comportement élastique, à chaque impact, l'enfoncement final mesuré ne doit pas dépasser 1 mm ; dans le cas contraire, l'essai est arrêté pour ne pas endommager le micropieu.

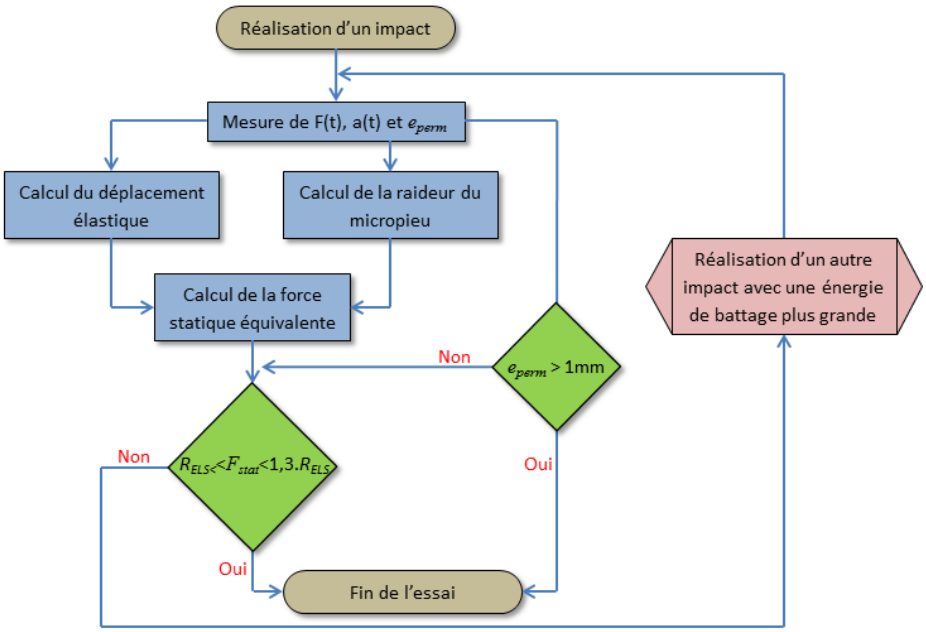

Figure 2. Principe de la méthode proposée.

4. Validation expérimentale : le site, les micropieux, l'appareil et les résultats

4.1. Site d'étude et réalisation des micropieux

Le site expérimental se situe dans la commune de Gerzat, au nord de Clermont-Ferrand. Ce site a été alloué à Sol-Solution par la mairie de la commune spécialement pour la réalisation de ce projet. La caractérisation géotechnique du terrain (tableau 1) a comporté la réalisation d'une trentaine d'essais pénétrométriques Panda couplés à des essais pressiométriques, CPT et géophysiques (électrique, MASW,…). Deux sondages carottés ont été aussi réalisés afin d'effectuer des essais au laboratoire.

Sur le site (figure 3), 18 micropieux « type II » de différentes longueurs, d'un diamètre de 150 mm et de différents rapports C/E ont été réalisés par SOTRAISOL Fondations. Différentes techniques de mise en œuvre (gravitaire avec compensation d'essorage (G.+C.e.) et sans compensation d'essorage (G.)) ont également été testées (tableau 2).

Tableau 1. Horizon géotechnique du site expérimental

Cote (m)	Nature	VBS	Classe GTR	Pl*(MPa)	qc (MPa)	qd (MPa)
0 à 6	Argile sablo-limoneuse	5	A2	0,65	1,9	2,4
6 à 8	Argile à passages à sables grossières	0,6	B4	0,95	21,4	18,2
8 à 12	Argile marneuse	1,4	A1	2,60	5,6	10,2
> 12	Marne	-	-	5,00	16, 6	-



Figure 3. Plan d'implantation des micropieux (Source : Google Earth).

Tableau 2. Caractéristiques des micropieux

L (m)	Quantité		Mise en œuvre	Type	Pressiomètre	Pénétromètre	
						CPT	Panda
9 m	4 (C/E:2)		G.+C.e.	A	331 kN	328 kN	316 kN
6 m	11	5 (C/E:2)	G.+C.e.	B	154 kN	150 kN	153 kN
		3 (C/E:2,4)	G.+C.e.	C			
		3 (C/E:2)	G.	D			
3 m	3 (C/E:2)		G.+C.e.	E	68 kN	44 kN	71 kN

4.2. Matériel utilisé

Le système de battage est composé de plusieurs masses modulables de 20 kg chacune (figure 4). La masse totale du marteau peut varier entre 20 et 300 kg. La levée et la chute du marteau est guidée par une barre vissée à la tête de battage et permettant d'entraîner un impact uniforme en réduisant les risques d'endommagement par flambement (figure 4). Pour réduire les pics de contrainte dus aux chocs et pour augmenter la durée du choc afin d'exciter les basses fréquences, nous avons conçu un système d'amortissement d'épaisseur variable (10-250mm).

Celui-ci est placé entre la masse et la tête de battage permettant donc d'augmenter la qualité des mesures et de réduire les effets dynamiques du choc.
En ce qui concerne l'instrumentation, nous avons utilisé deux capteurs d'accélération et 4 jauges de déformation (figure 4). La fréquence d'échantillonnage est variable (1kHz – 50kHz). Le système d'acquisition est relié vers un PC compatible. Dans ce qui suit, nous présentons les résultats des essais réalisés sur les micropieux type A (L : 9m), car ceux-ci sont les plus proches de ceux utilisés dans la réalité.

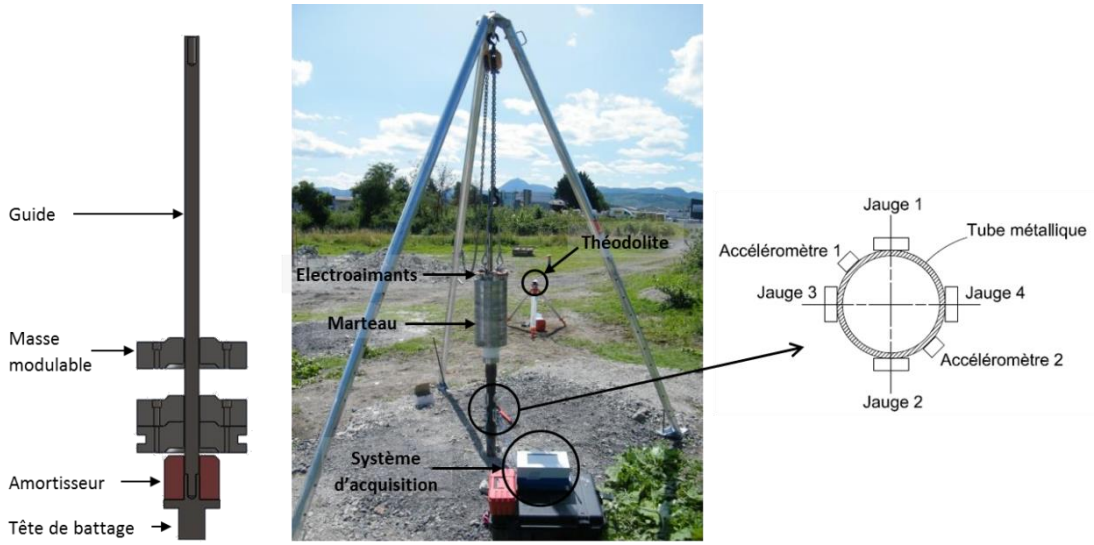

Figure 4. Masses, système de battage et section transversale de la tête de mesure.

4.3. Résultats obtenus

Sur l'ensemble des micropieux les essais ont été réalisés en utilisant d'abord un marteau de 5kg et ensuite une masse de 195kg. Pour cette dernière, les hauteurs de chute ont varié entre 0,1 et 1,6 m. Sur ces mêmes micropieux, des essais de chargement statique en traction (AFNOR, 1999) ont été réalisés juste après (sauf dans le cas du micropieu A1). Les résultats obtenus et les comparatifs sont présentés dans les figures 5 et 6.
En ce qui concerne le micropieu A1, on peut constater qu'il n'y a pas eu de mesures dynamiques avec la masse (> 100Kg). En effet, dans ce cas nous avons réalisé l'essai de chargement statique juste après avoir réalisé les mesures dynamiques avec le marteau de 5kg. Juste avant la fin de l'essai, la barre Dywidag est arrivée à la rupture, nous empêchant par la suite, d'y installer notre système de mesure. Toutefois, nous avons quand même exploité les mesures réalisées, lesquelles ont été complétées par l'information du terrain (résistance ultime théorique) afin d'ajuster la régression. Les résultats obtenus sont très encourageants (figure 5).
Dans le cas du micropieu A2, deux protocoles d'essai ont été réalisés afin d'étudier l'influence de l'énergie d'impact. Juste après avoir réalisé les mesures avec le marteau de 5kg, nous avons continué les essais en utilisant deux masses différentes (184 kg et 290 kg).

Les résultats montrent qu'il existe une très bonne corrélation entre les résultats obtenus (figure 5) et qu'a priori, l'utilisation des masses plus lourdes n'est pas nécessaire. Au contraire, l'utilisation des masses plus lourdes, comme dans les essais dynamiques classiques type PDA, SIMBAT…, peut endommager le contact sol/fût en réduisant la rigidité du système, tel qu'on peut le constater dans la figure 5, mais aussi activer la partie visqueuse au contact. Par ailleurs, dans le cas du micropieu A4 nous avons réalisé l'essai de chargement statique tout en incluant un palier de déchargement-rechargement afin de vérifier la rigidité du contact sol/fût (figure 6). On peut constater que la pente de la courbe (raideur statique) au déchargement est sensiblement identique à celle déterminée par les essais dynamiques à faible contrainte (Ks).

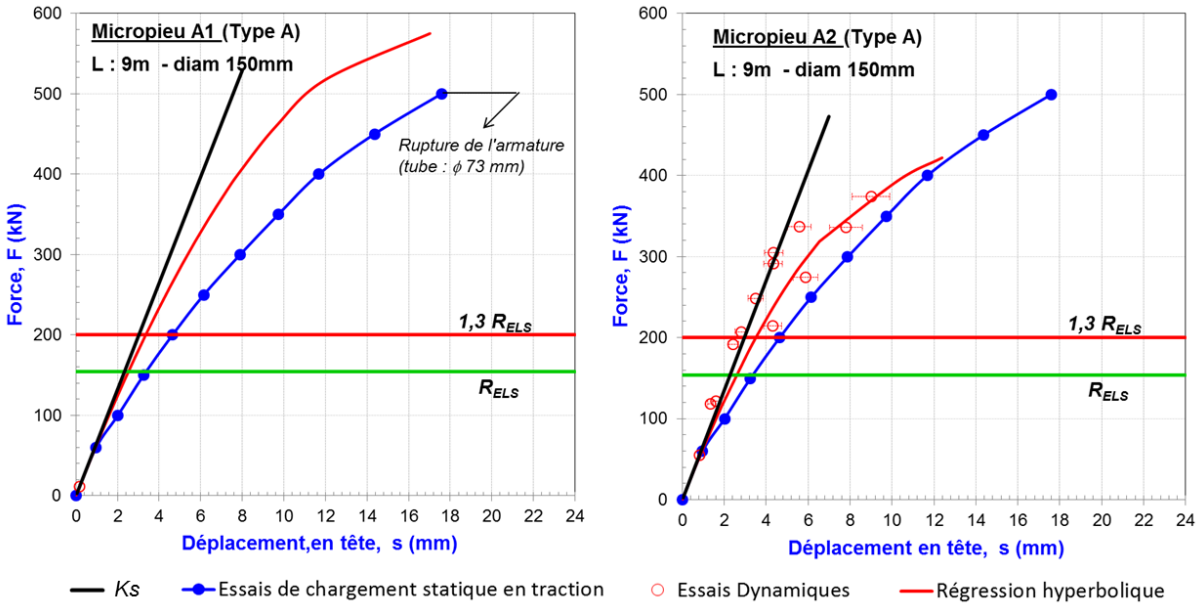

Figure 5. Résultats des essais de chargement sur le micropieu A1 et A2.

De manière générale on peut constater que :

⇢ Il existe une très bonne corrélation entre les résultats obtenus avec les essais dynamiques (régression hyperbolique) et les essais de chargement dynamique. Le protocole d'essai, ainsi que la procédure de traitement et d'exploitation des signaux montrent que la méthode proposée peut fournir la même qualité de résultat par rapport à ceux obtenus avec un essai de chargement statique classique. L'avantage principal est le temps de réalisation (2h pour l'essai dynamique, contre 8h lors d'un essai statique en traction à l'ELS).

⇢ Pour l'ensemble des micropieux auscultés, la capacité portante RELS est très supérieure à la valeur théorique ou nominale.

⇢ Pour tous les micropieux testés, la force statique équivalente obtenue avec une énergie d'impact de 420J (masse de 195kg et hauteur de chute 300mm) est supérieure à la résistance ELS (RELS) et à la charge de fluage (1,3*RELS). Cela permet de vérifier la portance de conception des micropieux testés.

→ L'enfoncement résiduel à la fin de chaque essai dynamique a été inférieur à 0,5mm. Nous avons ainsi sollicité les micropieux dans leur domaine élastique.
Dans le tableau 3 on présente un comparatif entre les résistances de calcul aux ELS (RELS), les résistances de fluage mesurées lors des essais de chargement statique (Rt,cr,mesurée) et celles déterminées à partir de la méthode proposée (R,cr,estimée). La dernière colonne du tableau 3 représente l'erreur dans l'estimation par rapport à Rt,cr,mesurée, laquelle n'a pas été calculée pour le micropieu A3 car la courbe de fluage n'a pas montré d'amorce de fluage. De même, les résultats obtenus pour le micropieu A1 ne sont pas présentés ici. Les résultats obtenus et représentés dans le tableau ci-dessous sont très encourageants et montrent que la méthode proposée est tout à fait applicable au cas du contrôle de la capacité portante au service. La rapidité et la fiabilité des résultats obtenus avec cette méthode, nous permettent d'envisager la systématisation d'un tel contrôle.

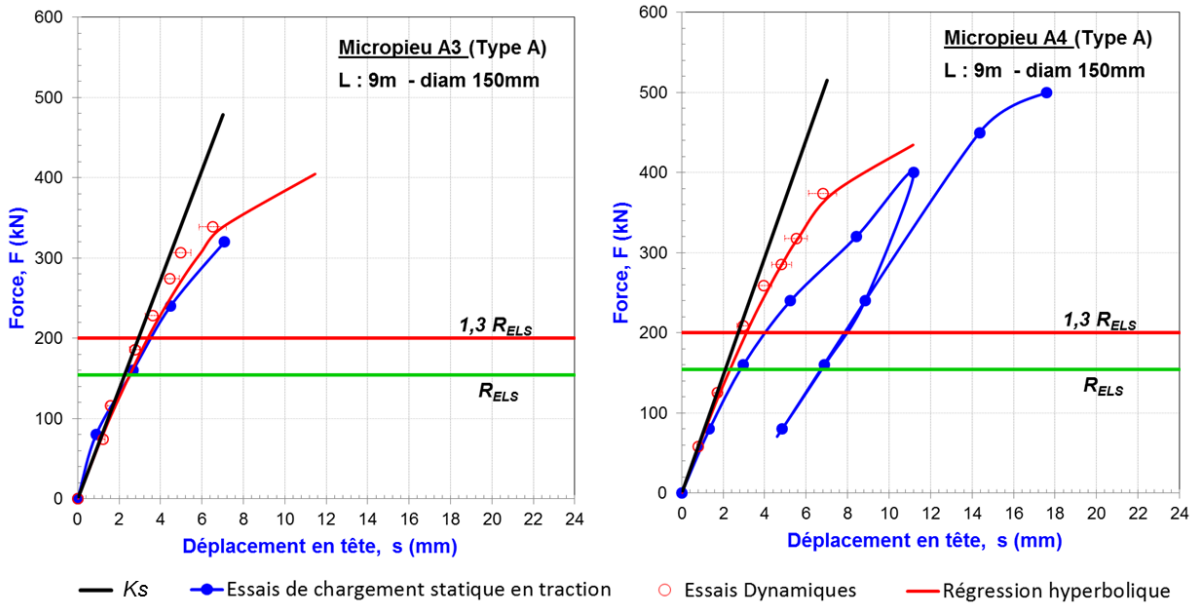

Figure 6. Résultats des essais de chargement sur les micropieux A3 et A4.

Tableau 3. Tableau récapitulatif.

Micropieu	Longueur	RELS	Rt,cr,mesurée	R,cr,estimée	Erreur
A2	9 m	154 kN	350 kN	348 kN	- 0,6 %
A3	9 m	154 kN	>320 kN	400 kN	-
A4	9 m	154 kN	400 kN	419 kN	4,5 %

5. Conclusions

Dans le but de permettre un contrôle systématique de la capacité portante des micropieux, une méthodologie basée sur l'utilisation d'essais dynamiques à faible contrainte a été développée. Cette méthodologie est adaptée aux contraintes industrielles (rapidité de mise en œuvre et de réalisation, faible encombrement) et économiquement réaliste. La comparaison des essais de chargement dynamique à

faible contrainte avec des essais statiques en traction donne des résultats relativement proches en termes de capacité portante en service (charge de fluage) pour des essais réalisés sur des micropieux de 9m de longueur, de 150 mm de diamètre et de résistance nominale aux ELS de 154kN. La méthodologie développée fournit une estimation de la charge de fluage en temps réel et les résultats obtenus montrent que l'essai de chargement dynamique permet de vérifier la résistance calculée par des méthodes de calcul classiques même avec des énergies assez faibles (dans notre cas une énergie de 570 J alors que l'énergie préconisée pour réaliser un essai dynamique classique (Hussein et al., 1996) est de 2,5kJ).

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier la Fédération National des Travaux Publics (FNTP) pour le soutien au projet et aux membres du comité de pilotage, spécialement à Mrs : J.P. Volcke (Franki Fondation), P. Lebouc (Sotraisol Fondations) et P. Vezole. Les auteurs tiennent à remercier également la mairie de Gerzat pour la mise à disposition du site d'essai et l'entreprise SOTRAISOL pour la réalisation des micropieux. Le présent travail a fait l'objet du dépôt de brevet BFF 13L0853 du 31 Janvier 2014.

Références bibliographiques

Breul P., Calvente R.M. (2010). Mise au point d'une méthodologie de contrôle des micropieux, Rapport d'étude N°2009-Ms-PB4. Polytech'Clermont-Ferrand, Université Blaise Pascal.

Caballero C. (2007). Evaluación Numérico Experimental del comportamiento bajo carga axial de Pilotes. Tesis Doctoral. Córdoba, Argentina: Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba.

Gomez J., Cadden A., Webster C. (2004). Micropiles foundations in karst: Static and dynamic testing variability, Fifth international conference on case histories in geotechnical engineering.

Héritier B., Paquet J. (1986). Battage d'un pieu en milieu pulvérulent - acquisition des données et simulation, Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, N°450.

Hussein M., Likins G., Rausche F. (1996). Selection of a hammer for High-Strain Dynamic Testing of Cast-in-place Shafts, Proceedings of the Fifth International Conference on the Application of Stress-wave Theory to piles, EEUU.

AFNOR (1999). NF P94-150-2, Essai statique de pieu isolé sous un effort axiale – Partie 2 : En traction, AFNOR.

AFNOR (2012). NF P94-262, Justification des ouvrages géotechniques - Normes d'application nationale de l'Eurocode 7 - Fondations profondes, AFNOR.

Oteo C., Arcos J., Gil R., Fernández Tadeo, C. (2008). High strain dynamic testing in micropiles, Comparison of static and dynamic test results, IOS Press.

Ramshaw C., Selby A., Bettess P. (1998). Computed ground waves due to piling, Proc. of the Conference on Geotechnical Earthquake Enginnering and Soil Dynamic Ground Dynamics III, Washington.

Rausche F., Goble G., Likins G. (1985). Dynamic Determination of Pile Capacity, ASCE Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 111, No. 3: Reston, VA; 367-383.

Saint-Venant (1967). Mémoire sur le choc longitudinal des barres élastiques et sur la proportion de leur force vive qui est perdue pour la translation ultérieure, Journal de mathématiques pures et appliquées 2e série, Tome 12, pp.237-376.