

Instrumentation et modélisation numérique d'un essai de chargement statique réalisé sur inclusion rigide

Instrumentation and numerical modelling of a static pile load test performed on rigid inclusion

Adnan SAHYOUNI^{1,2}, Laurent BRIANÇON², Pierre BURTIN¹, Jérôme RACINAIS¹, Benoit QUANDALLE¹, Eric ANTOINET³, Charles PORQUET⁴

¹ Menard, Chaponost, France

² Univ Lyon, INSA-Lyon, GEOMAS, F-69621, Villeurbanne, France

³ Antea Group, Orléans, France

⁴ Nordex, Paris, France

RÉSUMÉ – Dans le cadre de projet FUI25 FEDRE, une éolienne grandeur nature a été instrumentée afin de mieux comprendre son système de fondation. En parallèle deux essais de chargements statiques et cycliques ont été réalisés sur deux inclusions rigides isolées. Les résultats expérimentaux du chargement statique sont comparés aux estimations analytiques et numériques avec calage des paramètres du modèle aux éléments finis MEF.

ABSTRACT – As part of the research project FUI25 FEDRE, a real-scale wind turbine has been instrumented to better understand its foundation system. In parallel, static and cyclic loadings have been conducted on isolated rigid inclusions. The results of a static plate load test conducted until failure are compared to analytical and numerical estimations for which the parameters of the finite element model were calibrated.

1. Introduction

Le projet FUI25 FEDRE (Fondations d'Eoliennes Durables et REpowering) a pour objectif d'améliorer la compétitivité de la filière en optimisant les fondations des éoliennes et d'améliorer l'intégration de l'éolien dans le paysage énergétique français. Plusieurs pistes d'optimisation sont à ce stade envisagées pour les parcs éoliens à rééquiper afin de réutiliser les fondations existantes mais également pour les nouvelles fondations pour lesquelles une conception évolutive doit être envisagée.

Dans le cadre de ce projet, afin de mieux comprendre les mécanismes mis en jeu dans les fondations, l'instrumentation d'une éolienne construite sur sol renforcé par inclusions rigides de type CMC a été installée de septembre à octobre 2019 sur le parc éolien de Ecoust-Saint-Mein dans le Pas de Calais (62). L'instrumentation consiste à mesurer le transfert de charge du mât de l'éolienne jusque dans le sol renforcé. Des capteurs au niveau des inclusions rigides, du sol et de la semelle de l'éolienne ont été utilisés afin de suivre le transfert de charge dans la phase de construction de l'éolienne jusqu'à sa mise en service et pendant un an de service. Dans le but de comprendre le comportement du renforcement de sol par inclusions rigides, deux essais de chargements statiques et cycliques jusqu'à la rupture ont été réalisés sur des inclusions rigides notées IR1 et IR2, sur une plateforme située à proximité de l'éolienne.

L'essai de chargement est un moyen efficace pour dimensionner le renforcement de sol par inclusions rigides. L'intérêt de l'instrumentation est de mettre en évidence l'évolution du frottement en fonction de la profondeur et déduire l'effort de pointe en fonction de la déformation de l'inclusion rigide. L'interprétation des résultats peut aider à justifier les

méthodes de dimensionnement utilisées et proposer un moyen de calcul adapté au problème géotechnique posé. La norme NFP 94 262 (2012) permet d'estimer la capacité portante des colonnes isolées à partir d'essais pressiométriques ou pénétrométriques. Ces calculs ont pu être établis grâce à l'exploitation de nombreux résultats d'essais de chargement en vraie grandeur (Bustamante et Gianceselli, 1981 ; Frank et Zhao, 1982). Les résultats des essais de chargement peuvent aussi permettre de calibrer des modélisations numériques utiles pour la simulation du renforcement de sol de l'ouvrage.

D'après l'expérience de la société Menard, sans calibration sur des paramètres de sol, les résultats des modélisations numériques sous estiment généralement la capacité portante des inclusions rigides (Racinais et al., 2017).

Dans cette communication, les résultats d'un essai de chargement seront comparés aux calculs analytiques basés sur les lois semi-empiriques de Frank et Zhao citées par les recommandations ASIRI (2012) et à des simulations numériques sur PLAXIS.

2. Essai de chargement

2.1 Réalisation des inclusions rigides

Les deux inclusions testées, notées IR1 et IR2, sont des CMC refoulées de Classe 3 catégorie 7 selon l'Annexe A de la norme NFP 94-262 (2012). Ces deux inclusions, de 12,8 m de longueur et 360 mm de diamètre, sont ancrées de 1 m dans un horizon compact. La Figure 1 présente les deux inclusions rigides testées avec la poutre de chargement installée pour tester IR1 puis IR2 le jour suivant. Les massifs d'ancrage sont constitués de 12 colonnes travaillant en traction pour reprendre les efforts verticaux appliqués par le vérin.

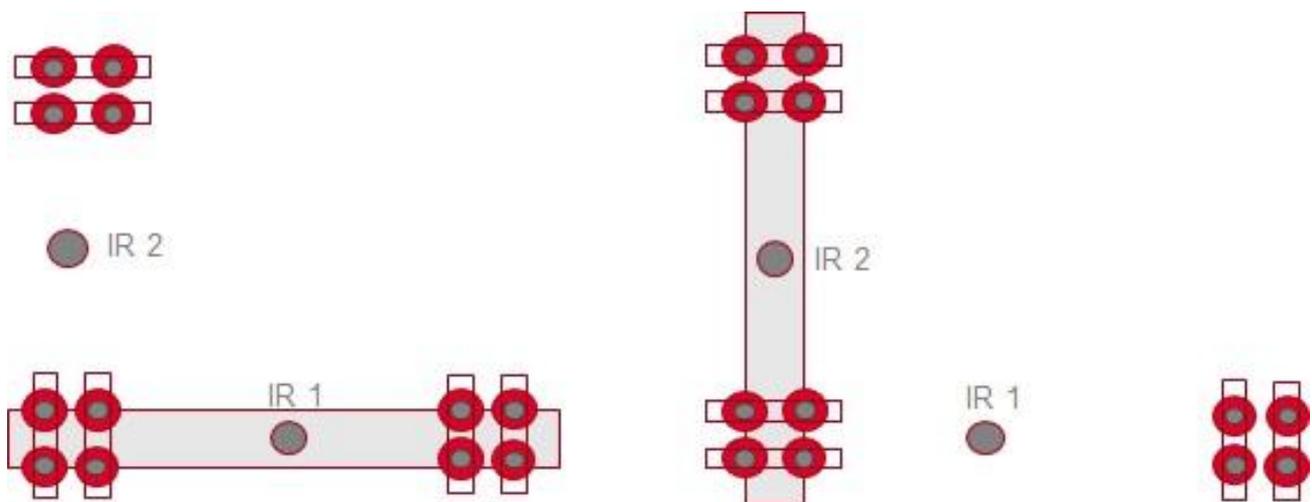


Figure 1. Vues des deux essais de chargement

2.2 Instrumentation

L'instrumentation de la tête des inclusions testée respecte les recommandations de la norme NF P94-150-1 : un capteur de force de 2000 kN a été installé entre le vérin et la poutre pour contrôler la charge appliquée sur chaque inclusion, trois capteurs de déplacement Laser mesurent le tassement de la tête de la colonne (Figure 2).

Une fibre optique de 12 m de long a été rajoutée dans chaque inclusion pour suivre leur déformation. La technologie de rétrodiffusion Rayleigh se basant sur l'OFDR (Optical Frequency Domain Reflectometry) a été choisie pour suivre ces déformations avec une résolution spatiale millimétrique et une fréquence d'acquisition de 250 Hz.

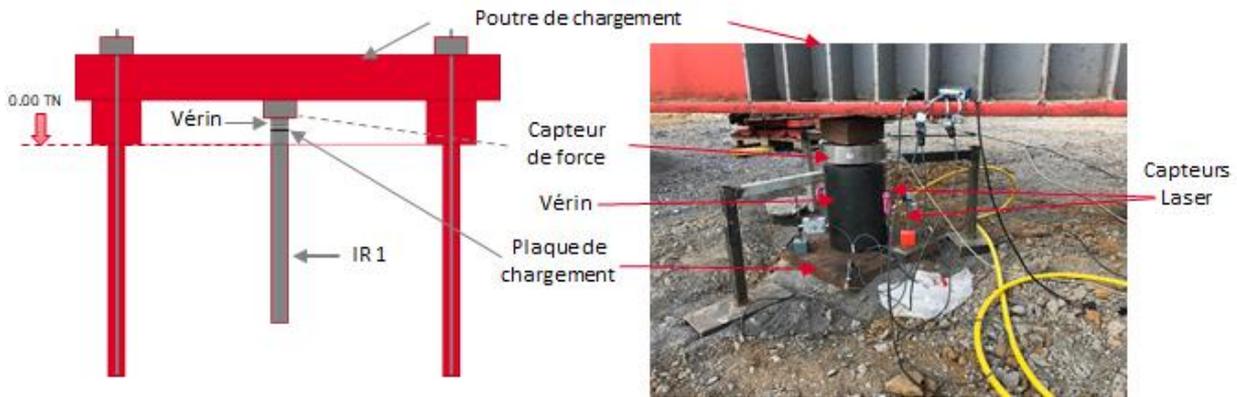


Figure 2. Essai de chargement

On peut regretter que les fibres optiques n'aient pas été assez longues pour instrumenter les CMC sur toute leur longueur.

2.3 Capacité portante calculée

La capacité portante d'une inclusion rigide sous l'essai de chargement est contrôlée par deux paramètres : le frottement latéral unitaire q_s et la résistance limite en pointe q_b . Dans le cas présent, cette capacité portante a été calculée selon le cahier des charges Menard version 3 (2017), à partir des essais pressiométriques et pénétrométriques. Sous la fondation de l'éolienne, il a été réalisé un sondage pressiométrique, 10 sondages pénétrométriques à pointe électrique ainsi qu'un sondage carotté. Sur ce dernier, des essais de laboratoire sont envisagés tels que des identifications du sol, 6 tests triaxiaux et 2 tests œdométriques. Cependant à ce jour ces éléments ne sont pas disponibles. La capacité portante de l'IR1 a été estimée à $F_t = 1246,0 \text{ kN}$ selon la méthode pressiométrique et $F_t = 1132,6 \text{ kN}$ selon la méthode pénétrométrique.

2.4 Protocole expérimental

L'essai consiste à appliquer un effort axial de compression en tête d'une inclusion rigide, et à mesurer le déplacement vertical correspondant en tête de l'inclusion selon un programme défini à partir de la norme NF P94-150-1 (Figure 3).

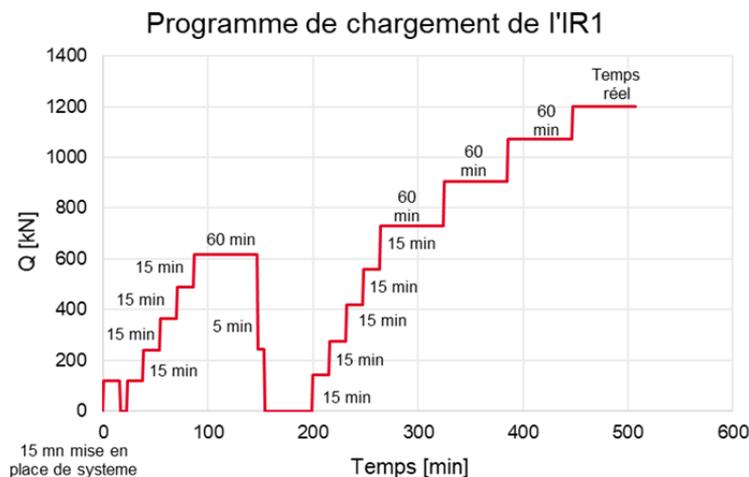


Figure 3. Programme de chargement de l'inclusion IR1

Les paliers lors de la phase de chargement sont maintenus à charge constante pendant une durée de 15 ou 60 minutes. Lors du déchargement, les paliers ont une durée de 5 min. Le premier cycle comprend un chargement jusqu'à 0,5 Qmax suivi d'un déchargement avec un palier à 0,2 Qmax. Le deuxième cycle se fait avec un chargement jusqu'à Qmax ou jusqu'à la rupture du sol. Le chargement a été effectué en respectant les préconisations du projet national ASIRI (2012) précisant que l'on peut passer au palier suivant si le déplacement est inférieur à 0,02 mm en 15 min d'application de la charge.

3. Approche analytique

Afin de caractériser l'interaction sol/structure du sol renforcé par des colonnes isolées, Frank et Zhao ont proposé deux lois : la loi de mobilisation du frottement à l'interface de la colonne et la loi de mobilisation de l'effort à la pointe.

Ce modèle semi-empirique est proposé dans les recommandations ASIRI (2012) qui recommandent par ailleurs de caler les modèles numériques en éléments finis par rapport aux courbes (t-z) de Frank et Zhao en absence de valeurs expérimentales lors du dimensionnement. Le modèle de Frank et Zhao (1982) actualisé selon la norme NF P 94-262. 2012 est fondé sur les données pressiométriques :

- La loi de mobilisation du frottement est définie selon la relation entre la contrainte de cisaillement " τ " et le déplacement relatif entre l'inclusion rigide et le sol tout au long de l'inclusion " S_{s-i} " (Figure 4a). Cette loi dépend directement du frottement latéral unitaire limite q_s qui est corrélée à partir du profil de la pression limite P_1^* .
- La loi de mobilisation de l'effort de pointe est définie selon la relation entre la contrainte en pointe " q " et le déplacement vertical " S_b " à la pointe de l'inclusion dans la couche d'ancrage (Figure 4b). Cette loi dépend directement de la résistance de pointe q_b qui est corrélée à partir du profil de pression limite équivalente de la couche d'ancrage P_{1e}^* .

Les paramètres des pentes k_τ et k_q dépendent du type de sol, du module pressiométrique E_M et du diamètre de l'inclusion B (Tableau 1).

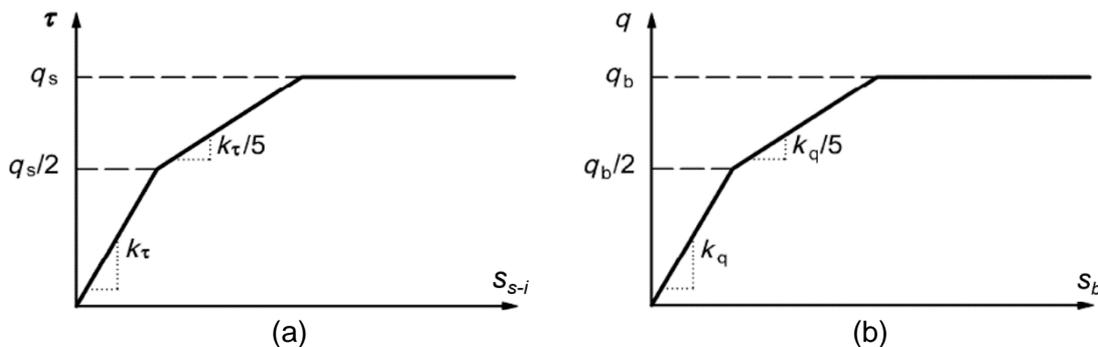


Figure 4. Courbes de Frank et Zhao

Tableau 1. Paramètres des pentes k_τ et k_q de Frank et Zhao en fonction du type de sol

Pente de la courbe	Type de sol	
	Sols fins et roches tendres	Sols granulaires
k_τ	$\frac{2,0E_M}{B}$	$\frac{0,8E_M}{B}$
k_q	$\frac{11,0E_M}{B}$	$\frac{4,8E_M}{B}$

4. Méthodes des éléments finis

L'essai de chargement a été modélisé sur PLAXIS 2D en axisymétrique (Figure 5). Ce choix de symétrie s'applique pour les structures circulaires avec une coupe radiale uniforme et une répartition de chargement autour de l'axe central. Dans ce modèle, on estime que les couches de sol et l'interface obéissent à la loi linéaire élastique parfaitement plastique avec critère de rupture de « Mohr-Coulomb ». Cette loi est généralement utilisée pour représenter le comportement de la couche d'ancrage et l'interface tout au long de l'inclusion rigide (Racinais et al., 2017).

Les paramètres nécessaires à la modélisation sont présentés dans le Tableau 2, ils sont issus des reconnaissances géotechniques mentionnées en section 2.3. A noter que le module de Young a été calculé par la relation $E_Y = k \frac{E_m}{\alpha}$ (Combarieu, 2006) avec $k=1$.

Tableau 2. Paramètres de sol

Couches de sol	E_M (MPa)	P_L (MPa)	α	E_Y (MPa)	γ (kN/m ³)	c (kPa)	φ (°)
Limons Lâches (L.L)	8	0.47	2/3	12	18	5	25
Limons compacts (L.C)	16	0.92	2/3	24	18	10	25
Horizon compact altéré fin (C.A)	22	1.10	2/3	33	18	10	30

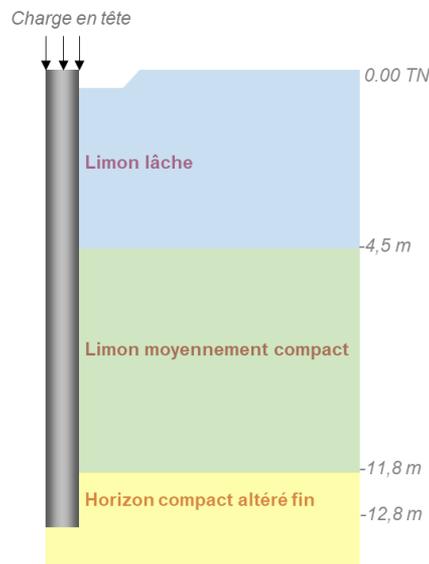


Figure 5. Coupe lithologique de sol

L'interaction entre la CMC et le sol avoisinant est prise en compte par une interface le long de la colonne. Une étude paramétrique par la MEF a été menée afin de définir les paramètres optimaux qui reproduisent le comportement le plus proche aux résultats expérimentaux et analytiques. Les modules et les paramètres de cisaillement ont été recalés aux abords de l'inclusion.

5. Résultats

5.1 Recalage des paramètres de la modélisation

Les paramètres de la loi du Mohr-Coulomb utilisés par la MEF interviennent dans le domaine élastique et dans le domaine plastique. Le modèle a été calibré au niveau de l'interaction CMC / sol en jouant sur le module de Young dans le domaine élastique et sur

les paramètres de cisailment dans le domaine plastique. Le module de Young $E_Y = \frac{E_m}{\alpha}$ a été pondéré de 1/1,5/3/4,5 et 6 sur l'interface et la couche sous la colonne. A l'interaction CMC / sol, la cohésion c a été augmentée tout en utilisant un angle de frottement φ nul. Le recalage des paramètres a permis de simuler les deux domaines et reproduire fidèlement le comportement de l'essai de chargement. La vue du modèle PLAXIS est présentée ci-dessous.

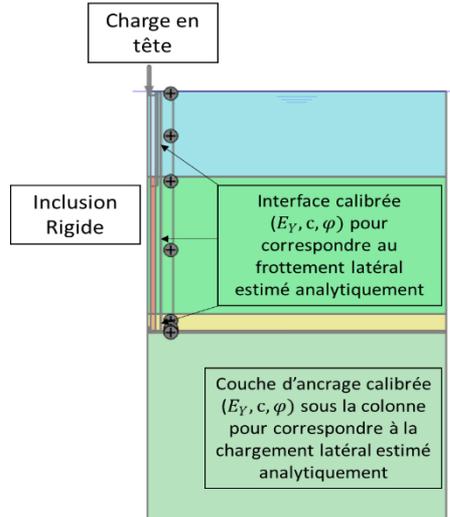


Figure 6. Vue de modèle axisymétrique sur PLAXIS

Pour la pointe, après l'étude paramétrique, $E_Y = \frac{3 \cdot E_m}{\alpha}$ et $c' = q_b/9$ ont été choisis. La pente de la courbe des paramètres recalés est équivalente à celle de la courbe analytique (Figure 7). La différence de la charge maximale entre la méthode analytique et numérique est due à ce que la loi de Frank et Zhao, méthode semi-empirique, estime la charge maximale pour une charge infinie et un déplacement infini. Avec la MEF, la charge a été limitée à 1200 kN en tête de colonne et le déplacement correspondant est calculé.

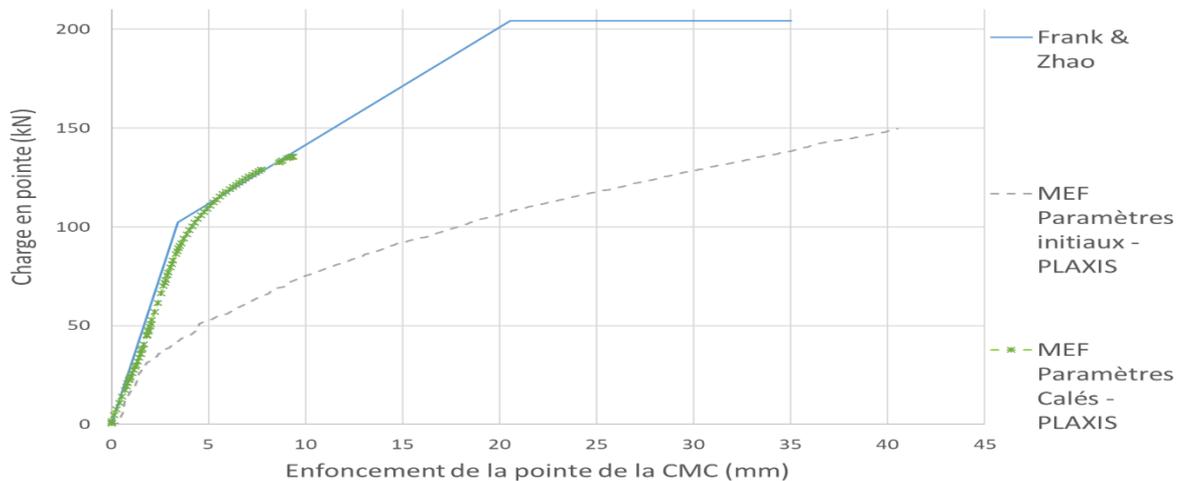


Figure 7. Comparaison des résultats au niveau de la pointe

La mobilisation du frottement a été simulée dans ce modèle par l'intermédiaire de l'équation 1, elle permet de contrôler la plastification du sol sur l'interface

$$\tau_{max} = R_{inter}(c + \sigma' \tan(\varphi)) = qs \quad (1)$$

Pour atteindre un frottement maximal sur l'interface, il faut que $\tau_{max} = qs$ pour chaque couche de sol. Par la suite $R_{inter} = 1$, $c = q_s$ et $\varphi = 0$ seront les nouveaux paramètres de l'interface. Pour simuler le comportement élastique de la colonne, le module Young $E_Y = \frac{E_m}{\alpha}$ a été pondéré de 6 sur l'interface le long de la colonne. On note que, l'introduction de ces paramètres recalés au niveau de l'interface n'est pas suffisante. Le sol à proximité du fut de la colonne plastifie et empêche de mobiliser correctement le frottement. Pour résoudre ce problème, un anneau de sol avec des paramètres recalés a été modélisé sur une épaisseur de 20 cm. Les paramètres optimaux trouvés après cette étude : $E_Y = \frac{6 \cdot E_m}{\alpha}$, $c = q_s$ et $\varphi = 0$ sur l'interface. Avec ces paramètres, le modèle adopté simule correctement la mobilisation du frottement sur toutes les couches considérées (Figure 8).

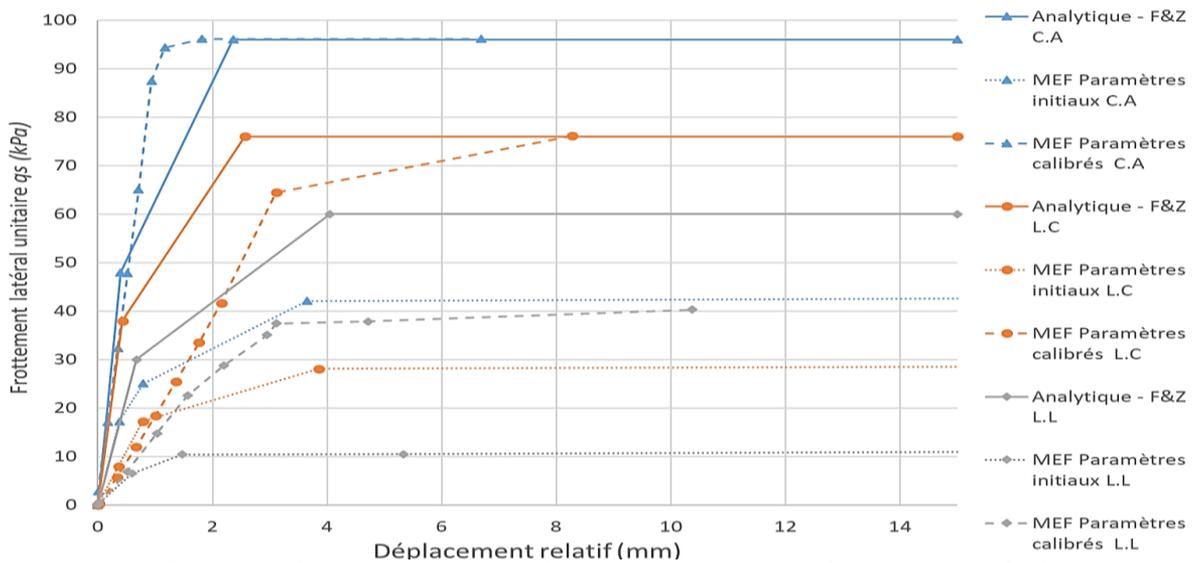


Figure 8. Comparaison des résultats au niveau du frottement latéral

5.2 Courbe de chargement

La Figure 6 présente le tassement en tête en fonction de la charge appliquée mesurée pour l'essai de chargement de l'inclusion rigide IR1, calculée avec la loi de Frank et Zhao et simulée avec Plaxis 2D (paramètres initiaux et recalés).

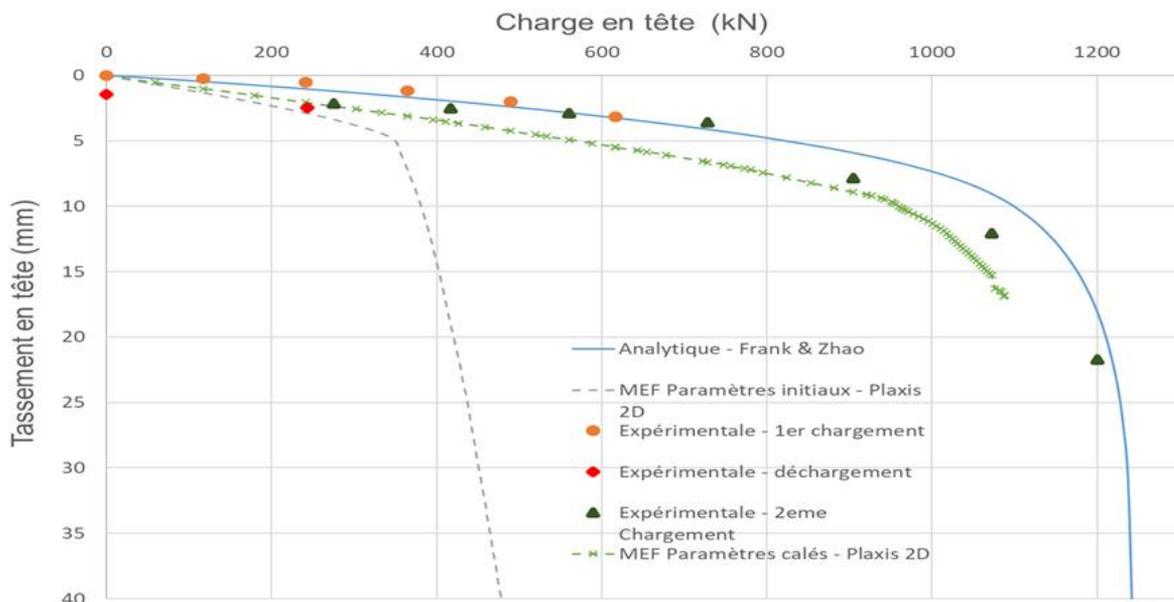


Figure 9. Comparaison des résultats de l'essai de chargement

Il est observé une très bonne corrélation entre les résultats obtenus par la méthode de Frank et Zhao et ceux de l'essai. Par contre, avec les paramètres initiaux, la modélisation ne reproduit pas correctement l'essai de chargement en termes de pente initiale de la courbe et de la rupture simulée à 400 kN ce qui est bien inférieure aux deux autres courbes. En calibrant le module de Young et les paramètres de cisaillement tel que présenté en section 5.1, la simulation s'approche des résultats de l'essai (courbe verte).

6. Conclusions

Cette étude d'un essai de chargement statique d'une inclusion a permis de comparer les résultats expérimentaux avec les calculs analytiques et la simulation numérique.

La courbe (charge / Déplacement vertical) obtenue par les lois semi-empiriques de Frank et Zhao est très proche de la courbe obtenue expérimentalement.

La simulation par MEF, avec les paramètres initiaux, sous-estime significativement la rigidité du sol et la rupture. Le tassement de la colonne est plus grand et la rupture est obtenue pour un effort trois fois plus petit dans ce cas.

Une calibration des paramètres initiaux sur l'interface sol / colonne et la couche d'ancrage permet de reproduire le comportement de la colonne selon les méthodes analytiques et les résultats expérimentaux.

Cette étude met en évidence l'importance de réaliser un essai de chargement statique pour calibrer les modèles numériques pour le renforcement de sol sur inclusions rigides.

7. Références

- Abchir Z. (2016). Contribution à l'étude du comportement des pieux soumis à des sollicitations axiales monotones et cycliques.
- ASIRI Projet National (2012). Recommandations pour la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des ouvrages sur sols améliorés par inclusions rigides verticales.
- Bustamante M. et Gianeselli L. (1981). Prévion de la capacité portante des pieux isolés sous charge verticale – Règles pressiométriques et pénétrométriques. Bull. Lab. Ponts Chaussées, n° 113, pp. 83–108.
- Combarieu O. (2006). L'Utilisation des Modules de Déformation en Géotechnique Revue Française de Géotechnique, vol.114, pp. 3-32
- Frank R. et Zhao S.R. (1982). Estimation par les paramètres pressiométriques de l'enfoncement sous charge axiale de pieux forés dans des sols fins. *Bull. Liaison Lab. Ponts Chaussees*, vol. 119, pp. 17-24.
- NF P 94-262. 2012. Normes d'application nationale de l'Eurocode 7. Fondations profondes
- NF P 94-150-1. Essai statique de pieu isolé sous un effort axial.
- Racinais J., Maucotel F., Varaksin S. and Hamidi, B. (2017). Beneficial Use of Pressuremeter Tests for Accurate Modelling by Finite Elements of a Rigid Inclusion Ground Improvement Solution. ICSMGE 2017 - 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, *South Korea*, pp. 2635-2638.