

SEMELLES SUR INCLUSIONS RIGIDES : VALIDATION DU NOUVEAU CAHIER DES CHARGES DE MENARD

FOOTINGS OVER RIGID INCLUSIONS : EXPERIMENTAL VALIDATION OF THE MENARD NEW SPECIFICATIONS

Maud BARONI¹, Laurent BRIANÇON², Jérôme RACINAIS³, Fanny MAUCOTEL³ et Hubert SCACHE³

¹ ANTEA GROUP, Olivet, France

² INSA LGCIE, Lyon, France

³ MENARD, Nozay, France

RÉSUMÉ – Dans le cadre de la rédaction d'un nouveau cahier des charges pour le dimensionnement de Colonnes à Module Contrôlé (CMC) sous semelle et sans plateforme de transfert de charge, une expérimentation en vraie grandeur de chargements verticaux et horizontaux a été réalisée. Le comportement de la semelle a été modélisé sous PLAXIS et les résultats numériques ont été confrontés aux mesures expérimentales.

ABSTRACT – Menard has recently submitted a new guideline (specifications) for the design of Controlled Modulus Columns (CMC) under footings without any Load Transfer Platform. A full-scale test consisting in vertical and horizontal loadings has been performed to validate these new specifications. PLAXIS finite element models have been carried out to simulate the footing behavior and the numerical results have been compared to the experimental measurements.

1. Introduction

Les Colonnes à Module Contrôlé (CMC MENARD) sont des inclusions semi-rigides et cimentées dont les modules de déformation sont de 5 à 30 fois plus faibles que ceux du béton. Elles sont mises en œuvre comme procédé de renforcement de sol.

Le procédé CMC Menard est encadré depuis 2002 par un cahier des charges précis intitulé « Cahier des charges CMC 2002 v1.12 ». Ce document permet de garantir la qualité d'exécution et la pérennité dans le temps des ouvrages CMC réalisés par Menard. Il a fait l'objet d'un contrôle et d'une validation de la part du Bureau VERITAS, spécialisé dans l'évaluation de la conformité et la certification.

Le Procédé CMC MENARD est ainsi certifié conforme à l'ensemble des normes régissant la réalisation des travaux de renforcement de sol. Cependant cette certification est limitée dans le temps, et la récente évolution des normes (notamment le passage aux Eurocodes et le projet national ASIRI (2012)), a conduit MENARD à renouveler le cahier des charges en y intégrant ces récents changements.

Dans ce cadre, une expérimentation en vraie grandeur de semelle sur CMC a été mise en œuvre pour valider le nouveau cahier des charges. Deux semelles, dont une posée sur quatre CMC, ont subi différents chargements (verticaux centrés et excentrés, horizontaux) afin d'analyser le comportement du sol de fondation. Les mesures expérimentales ont été confrontées aux résultats de modélisations par éléments finis afin de valider les calculs numériques et confirmer la validité des méthodes développées par MENARD.

2. Expérimentation

2.1. Contexte

La société MENARD a réalisé les plots d'essais ainsi que les différents tests en accord avec son client entre avril et juin 2014 sur le site de « BIOGIS CENTER » situé à Venette (60280). Antea Group a assuré la mise en place et le suivi de l'instrumentation.

2.2. Caractérisation du site expérimental

3.2.1. Le sol de fondation

Des essais in situ (pénétromètre et pressiomètre) couplés à des forages carottés et des essais en laboratoire ont permis de tracer un profil géotechnique du sol de fondation (Figure 1).

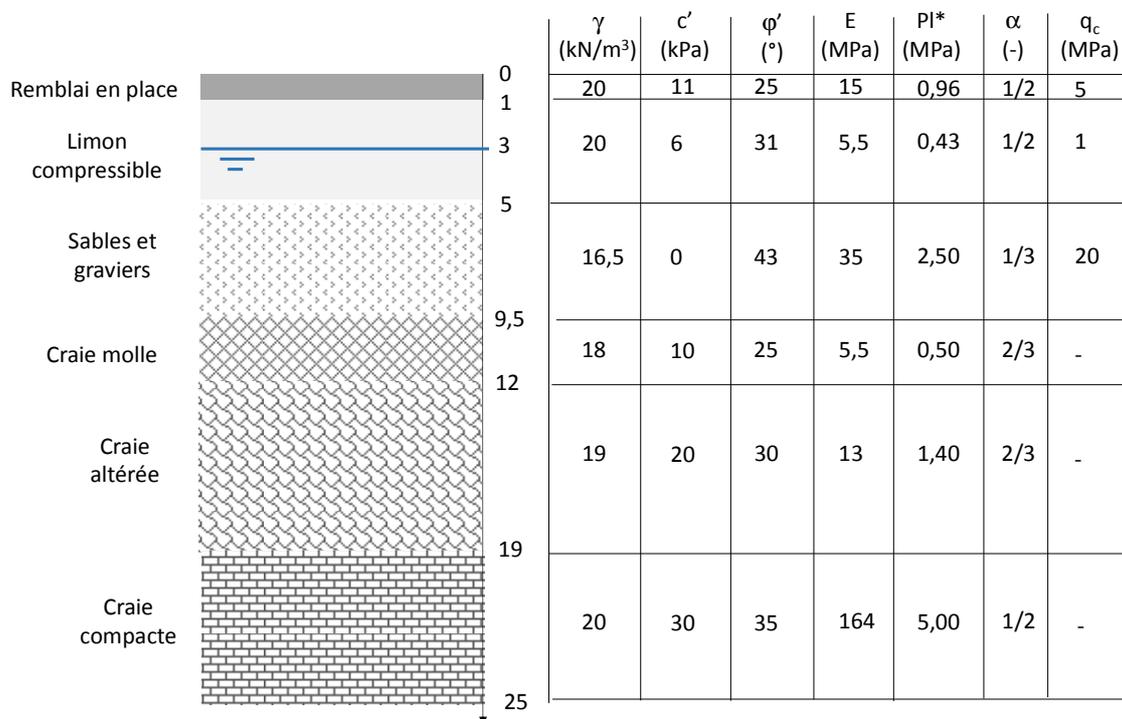


Figure 1. Profil géotechnique

3.2.2. Les CMC

Les CMC sont réalisées par une vis spéciale à refoulement de sol. Un mortier ou coulis est injecté à faible pression par l'extrémité inférieure de la tarière, de façon à constituer une colonne continue lors de la remontée de l'outil. Du fait du refoulement qui évite l'extraction de terre, ce procédé permet d'obtenir un bon frettage latéral du terrain et n'entraîne pas de pollution significative de la plateforme de travail.

Les caractéristiques mécaniques admissibles des CMC réalisées sur le chantier sont les suivantes :

- diamètre $\phi = 320$ mm,
- longueur $L = 5,5$ m avec un ancrage de 0,5 m dans la couche de sables et graviers,
- $E_{y,différé} = 5000$ MPa,
- $f_{ck} = 10$ MPa.

3.3. Principe des essais de chargement

Le plot expérimental consiste à appliquer des chargements sur deux semelles et deux CMC isolées :

- une semelle de 2 m x 2 m de section en béton armé et de 0,5 m d'épaisseur, cette semelle repose directement sur le sol compressible et sert de plot de référence. Deux essais de chargement vertical centré sont réalisés sur cette semelle ;
- une semelle de 2 m x 2 m de section en béton armé et de 0,5 m d'épaisseur reposant sur quatre CMC. Des essais de chargements verticaux centré et excentré ainsi que des essais de chargement horizontal seront appliqués sur cette semelle ;
- deux CMC chargées verticalement pour réaliser des essais de chargement statique classiques.

Afin d'appliquer les différents chargements, des systèmes de réaction ont été spécifiquement créés (Figure 2). Pour appliquer les efforts verticaux, une poutre en acier renforcée a été disposée sur des pieux de réaction permettant de disposer un vérin entre chaque semelle testée et la poutre. Pour les essais de chargement statique sur les deux CMC, la machine de forage a servi d'appui pour le vérin. Pour appliquer les efforts horizontaux sur la semelle reposant sur les quatre CMC, un massif d'appui fondé sur quatre pieux a été construit à proximité de la semelle testée. Le dimensionnement des semelles ainsi que de l'ensemble des dispositifs de réaction a fait l'objet d'une étude détaillée.

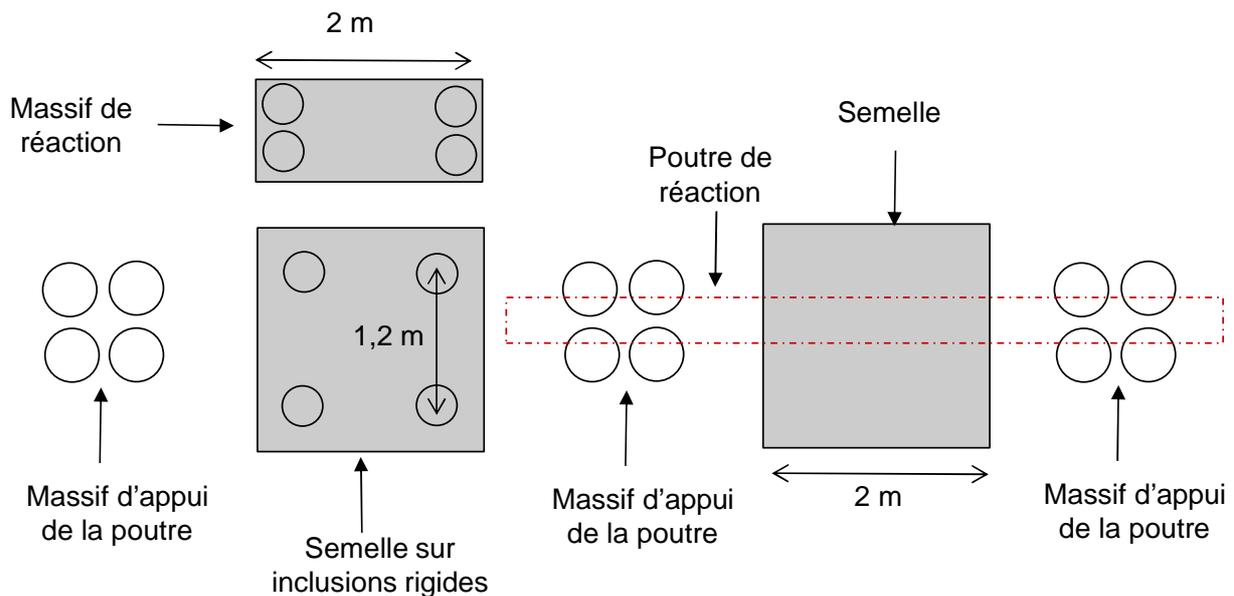


Figure 2. Zone expérimentale

3.4. Instrumentation

Une instrumentation conséquente a été mise en place pour instrumenter la semelle fondée sur les quatre CMC. Elle permet de suivre pour les essais de chargement vertical :

- le déplacement vertical de la semelle,
- la contrainte sur les têtes des CMC,
- la déformation le long d'une CMC,
- la déformation du sol de fondation,
- la déformation de la semelle.

Pour les essais de chargement horizontal, l'instrumentation permet de mesurer :

- le déplacement horizontal de deux CMC,
- le déplacement horizontal de la semelle,
- le déplacement du sol sur un profil vertical entre deux CMC,
- l'inclinaison d'une CMC.

Concernant les essais de chargement sur la semelle directement posée sur le sol compressible, seul le déplacement de la semelle a été suivi.

3.5. Les essais de chargement

3.5.1. Essais de chargement sur semelles

Le tableau 1 présente le programme de chargement vertical appliqué sur les deux semelles.

Tableau 1. Programme de chargement vertical

Plot	Essai	Excentricité	Chargement vertical (kN)
Semelle sur sol	1A	0	0 → 400 → 0
	2A	0	0 → 1800 → 0
Semelle sur CMC	1B	0	0 → 1000 → 0 → 1000 → 0
	2B	30 cm	0 → 690 → 0 → 690 → 0
	3B	45 cm	0 → 600 → 0 → 960 → 0
	4B	0	0 → 1000 → 0
	6B	0	0 → 1000 → 0
	7B	45 cm	0 → 960 → 0
	8B	0	0 → 2200 → 0

3.5.2. Essais de chargement statique sur les CMC isolées

Les deux essais de portance sur CMC isolées ont été effectués pour caler les modèles numériques. Chaque essai comporte deux cycles de chargement/déchargement de 300 kN puis 480 kN. La Figure 3 présente les résultats des mesures du comparateur du système de réaction (poutre de type Benkelman) utilisé pour mobiliser les efforts.

Les essais sur la CMC B montrent une déformation linéaire et élastique pour les deux cycles alors que ceux réalisés sur la CMC A mettent en évidence une déformation élastique jusqu'à 360 kN puis une déformation plastique entre 360 et 480 kN. Le comportement différent des deux CMC peut s'expliquer par une hétérogénéité du sol.

4. Modélisation

Les essais de chargement ont été modélisés sous PLAXIS. Le calage des paramètres a été fait avec PLAXIS 2D à partir des résultats des essais de chargement statique sur les CMC. La modélisation des essais de chargement sur les semelles a été effectuée avec PLAXIS 3D. Les résultats des essais ont aussi été comparés aux résultats obtenus par un logiciel développé par MENARD en interne.

4.1. Calage à partir des essais de chargement statique sur CMC isolée

Le calcul des chargements des colonnes isolées avec les paramètres initiaux (modules et paramètres de cisaillements issus des campagnes de sol) amène à des tassements surestimés et à une rupture sous une charge de 320 kN très inférieure à celle démontrée expérimentalement (Figure 3). Ces paramètres de modélisation ne permettent donc pas de représenter autant que possible les essais de chargement sur site. Il a donc été décidé de caler les paramètres de la modélisation sur les résultats des essais de chargement statique sur les colonnes isolées :

- le comportement en pointe de l'inclusion a été modélisé en calant les caractéristiques de la couche d'ancrage (sables et graviers) pour obtenir la courbe de mobilisation de l'effort de pointe définie par l'approche semi-empirique de Frank & Zhao (1982),
- la mobilisation du frottement le long de l'inclusion a été modélisée en calant les paramètres de cisaillement des couches de sol traversées afin d'être conforme à la courbe semi-empirique de Frank & Zhao (1982).

Le modèle avec les paramètres calés sur la pointe et le frottement converge. Les tassements calculés grâce au logiciel PLAXIS sont plus proches des valeurs mesurées lors des essais sur site mais restent néanmoins légèrement surestimés (Figure 3). Le calcul aux éléments finis est ainsi sécuritaire.

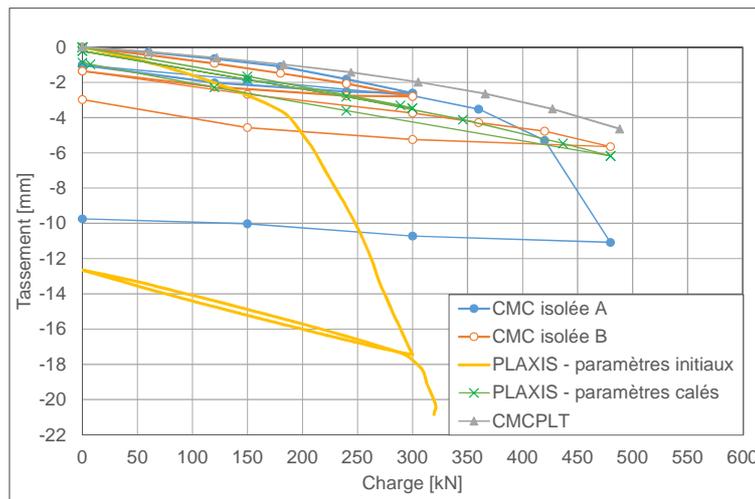


Figure 3. Essais de chargement statique des CMC isolées

La feuille de calculs analytiques « CMCPLT.xls » développée par MENARD en interne implémente les lois de Combarieu (1988) et donne la courbe d'un essai de chargement sur une colonne isolée en tête et les résultats (tassements, efforts dans la colonne et frottement) pour une charge donnée. L'ajustement de Combarieu montre des tassements similaires à ceux des deux CMC lorsque leur déformation reste dans le domaine élastique : jusqu'à 350 kN, la méthode analytique se corrèle très bien avec les mesures effectuées sur les deux CMC et ensuite seulement avec la CMC B entre 350 et 480 kN, la CMC A commençant à fluer dès 350 kN.

4.2. Calage à partir des essais de chargement sur semelles non renforcées par CMC

Les calculs aux éléments finis sont réalisés à l'aide du logiciel PLAXIS 3D. Du fait des conditions de symétrie au bord du modèle, le modèle 3D a été simplifié : seulement un quart de la semelle est représenté.

Le calcul PLAXIS avec les paramètres initiaux (modules et paramètres de cisaillement issus des campagnes de sol) montre des tassements beaucoup plus élevés (Figure 4). Ces paramètres de modélisation ne permettent donc pas de représenter les essais de chargement sur site.

Dans le cas de recours à des méthodes numériques, la norme Fondations superficielles NF P 94-261 (2013) préconise pour le calcul des tassements des fondations superficielles à l'ELS quasi-permanent des valeurs de module de Young E_Y par corrélation avec le module pressiométrique E_M , différent du coefficient rhéologique α . Les modules de Young de chaque couche ainsi ajustés permettent de modéliser correctement l'essai de chargement sur semelle non renforcée par CMC (Figure 4).

Un calcul analytique du tassement par la méthode pressiométrique permet d'estimer à la charge ELS un tassement voisin aux valeurs mesurées lors des essais et comparables aux résultats numériques avec ajustement des modules.

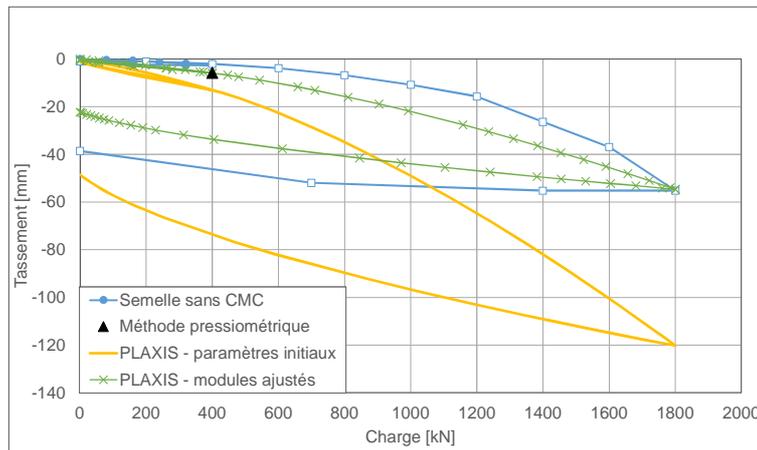


Figure 4. Essais de chargement statique de la semelle non renforcée par CMC

5. Confrontation des résultats expérimentaux et numériques

Dans cet article, seuls les essais de chargements verticaux centré et excentré sont présentés et comparés aux résultats de la modélisation numérique.

5.1. Chargement vertical centré

Les essais 1B, 4B et 6B sont comparés aux résultats de la modélisation numérique (Figure 5). Excepté le premier cycle de chargement de l'essai 1B, les essais de chargement vertical donnent les mêmes résultats en termes de tassement. Il est à noter que tous les capteurs ont mesuré des paramètres plus élevés lors du premier cycle du premier essai de chargement vertical centré. Cette mise en place initiale n'a pas été identifiée avec les différentes modélisations.

Les résultats indiquent que la prise en compte des paramètres calés permet de modéliser correctement la courbe de chargement de la semelle. La feuille de calculs CMCMAT donne des tassements comparables au calcul PLAXIS avec les paramètres calés et aux résultats d'essais.

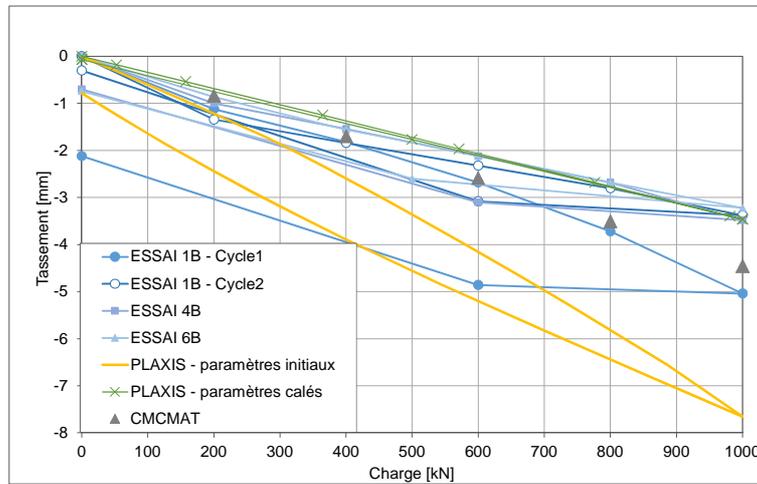


Figure 5. Essais de chargement statique vertical centré de la semelle sur CMC

5.2. Chargement vertical excentré

Les tassements calculés avec PLAXIS sont proches des valeurs mesurées lors des essais sur site mais restent néanmoins légèrement surestimés pour les deux excentrement (Figure 6). Le logiciel CMCMAT utilise la surface de référence, ce qui est défavorable par rapport aux calculs aux éléments finis et aux mesures mais les résultats sont ainsi sécuritaires.

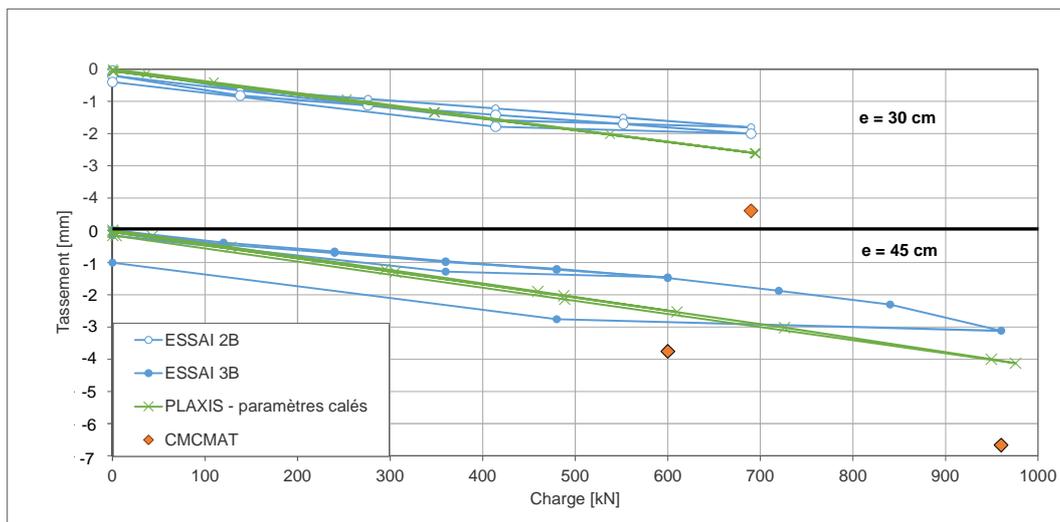


Figure 6. Essais de chargement statique vertical excentré de la semelle sur CMC

Pour vérifier la cohérence des résultats, les contraintes appliquées en tête d'une CMC située du côté de l'excentrement sont comparées pour une charge appliquée de 600 kN. (Tableau 2). On note qu'il existe des différences importantes entre les mesures de la contrainte sur la CMC située du côté de l'excentrement et les résultats de la modélisation. Les mesures de la contrainte peuvent être remises en cause et cette difficulté à mesurer

correctement la charge appliquée peut s'expliquer par une répartition non homogène de la charge sur les quatre CMC. On observe en particulier que les contraintes mesurées pour les charges verticales centrées ne sont pas répétables et très inférieures aux contraintes estimées en supposant qu'un quart de la charge est transférée sur chaque inclusion. La mesure de la contrainte devient plus cohérente dans le cas des chargements excentrés. Par ailleurs la mesure du report de charge sur chaque inclusion est très sensible au diamètre de la CMC, par exemple la modélisation donnerait les mêmes résultats que les mesures enregistrées pour les deux cas de chargement excentrés en considérant des CMC de 0,38 m de diamètre.

Tableau 2. Comparaison entre les mesures et la modélisation pour une charge de 600 kN

Excentricité	Contrainte appliquée sur une CMC	
	Mesures	Modélisation
e = 0	750* kPa 450** kPa	1290 kPa
e = 0,3 cm	1250 kPa	1780 kPa
e = 0,45 cm	1450 kPa	2040 kPa

* : moyenne à partir des deux cycles de l'essai 1B, ** : moyenne des essais 4B et 6B

6. Conclusions

La comparaison entre les mesures des essais de chargement de CMC isolée, de semelle posée sur sol non renforcé et de semelle sur quatre CMC sans plateforme granulaire intercalée avec les résultats de leur modélisation sous PLAXIS a mis en évidence la nécessité d'un calage des paramètres du sol de fondation et d'interaction CMC/sol. La mobilisation des interactions proposée par l'approche de Frank & Zhao (1982) permet d'obtenir une modélisation fidèle aux expérimentations en termes de tassement.

Les incertitudes liées à la mesure de la contrainte verticale en tête d'inclusion ne permettent pas de conclure sur le transfert de charge. Une nouvelle expérimentation avec une instrumentation sur les quatre CMC pourrait permettre de lever les doutes.

Cette étude a cependant permis de valider les outils de dimensionnement utilisés sous réserve d'un bon calage et le bon fonctionnement du renforcement par CMC sous semelle sans plateforme granulaire intercalée.

Il est à noter que les résultats des essais de chargement statique horizontal (H/V = 20%) feront l'objet d'un article ultérieur. Ils montrent en particulier que le déplacement horizontal des têtes d'inclusion est inférieur au déplacement de la semelle elle-même, mettant en évidence un léger glissement de la semelle sur les inclusions. En outre, les comparaisons des mesures expérimentales avec les résultats des modèles analytiques MH1 et MH2 développés dans le guide ASIRI (2012) s'avèrent pertinentes.

7. Références bibliographiques

ASIRI (2012). Recommandations pour la conception, le dimensionnement, l'exécution et le contrôle de l'amélioration des sols de fondation par inclusions rigides, Presses des Ponts.

Frank R., Zhao S.R. (1982). Estimation par les paramètres pressiométriques de l'enfoncement sous charge axiale de pieux forés dans des sols fins. Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées n°119.

Combarieu O. (1988). Calcul d'une fondation mixte semelle pieux sous charge verticale centrée. Note d'information technique LCPC.

NF P94-261 (juin 2013) Justification des ouvrages géotechniques - Normes d'application nationale de l'Eurocode 7 - Fondations superficielles. AFNOR.