

ESSAIS DE CHARGEMENT DE SEMELLES SUR INCLUSIONS RIGIDES

STATIC LOAD TESTS ON RAFT ON RIGID INCLUSIONS

Cécilia BOHN¹, Fabien SZYMKIEWICZ², Laurent BRIANÇON³, Serge LAMBERT⁴, Pierre GARNIER⁵, Luis CARPINTEIRO⁶

¹ KELLER Holding, Offenbach am Main, Allemagne

² Université Gustave Eiffel, GERS-SRO

³ GEOMAS, INSA LYON

⁴ KELLER fondations spéciales

⁵ COLAS France, Direction Technique Ouest

⁶ GINGER CEBTP

RÉSUMÉ – Une expérimentation en vraie grandeur de chargement de semelles sur inclusions rigides a été menée dans le cadre du Projet National ASIRI+. Différentes configurations de renforcement de sol par inclusions rigides sous semelle ont été testées par des essais de chargement statique vertical centré, vertical excentré et horizontal. Une instrumentation adaptée a permis de mettre en évidence le comportement du sol sous la semelle.

ABSTRACT – A full-scale experimentation of static loading tests on square footings on rigid inclusions has been performed in the framework of the research project ASIRI+. Many configurations of load transfer platform between the square footing and the rigid inclusions have been tested under various loadings. A specific monitoring was implemented, achieving measurements allowing a better understanding of the behaviour of the reinforced soil under the footings.

1. Introduction

Une expérimentation en vraie grandeur de chargement d'une semelle sur quatre inclusions rigides a été menée dans le cadre du projet national ASIRI+. L'objectif de cette étude était de comparer le comportement de la semelle avec la présence ou non d'une plateforme granulaire de transfert de charge. En effet, le projet national ASIRI (2012) préconisait uniquement une solution avec une plateforme granulaire intercalée entre les inclusions et la semelle et depuis 2012, de nombreuses sociétés disposent d'un cahier des charges spécifique pour réaliser les semelles directement sur inclusions. C'est donc pour harmoniser le cadre réglementaire que le projet ASIRI+ souhaite proposer dans ses recommandations le dimensionnement des semelles sur inclusions rigides.

Des chargements verticaux centrés, verticaux excentrés et horizontaux ont été appliqués sur la semelle avec une instrumentation qui a permis de suivre le report de charge sur les inclusions, le déplacement de la semelle, le tassement du sol et des inclusions. Deux inclusions isolées ont par ailleurs été sollicitées pour déterminer leur comportement sous un chargement statique et cyclique.

Les essais sur les inclusions isolées ont mis en évidence que la portance était reprise majoritairement par frottement et que le chargement cyclique diminuait de 20 % la portance de l'inclusion.

Les essais sur les semelles ont montré que quelque-soit la configuration, la semelle ne repose jamais sur les quatre inclusions. Néanmoins, l'interposition d'une couche de sable de régalaage semble permettre une meilleure répartition sur les inclusions. Lorsque l'excentrement du chargement sort du tiers central, le chargement n'est repris que par deux inclusions. La charge de fluage du renforcement de sol est sensiblement la même quelque-soit la configuration.

2. Présentation des plots

Quatre plots ont été réalisés pour évaluer le comportement d'une semelle sur quatre inclusions rigides soumises à des chargements verticaux centrés, excentrés et horizontaux :

- Plot 0 : deux inclusions isolées.
- Plot 1 : une semelle sur quatre inclusions rigides sans plateforme de transfert de charge.
- Plot 2 : une semelle sur quatre inclusions rigides avec une plateforme de transfert de charge constituée de 30 cm de matériaux granulaires.
- Plot 3 : une semelle sur quatre inclusions rigides avec un lit de sable de 10 cm.

Les inclusions rigides de 270 mm de diamètre ont une longueur de 4,5 m. La même semelle est utilisée pour tester chaque plot. La charge verticale est appliquée par un vérin posé sur la semelle et en appui sur une poutre de réaction (Figure 1). La charge horizontale est appliquée par un vérin connecté entre la semelle est une semelle centrale coulée en place sur quatre pieux.

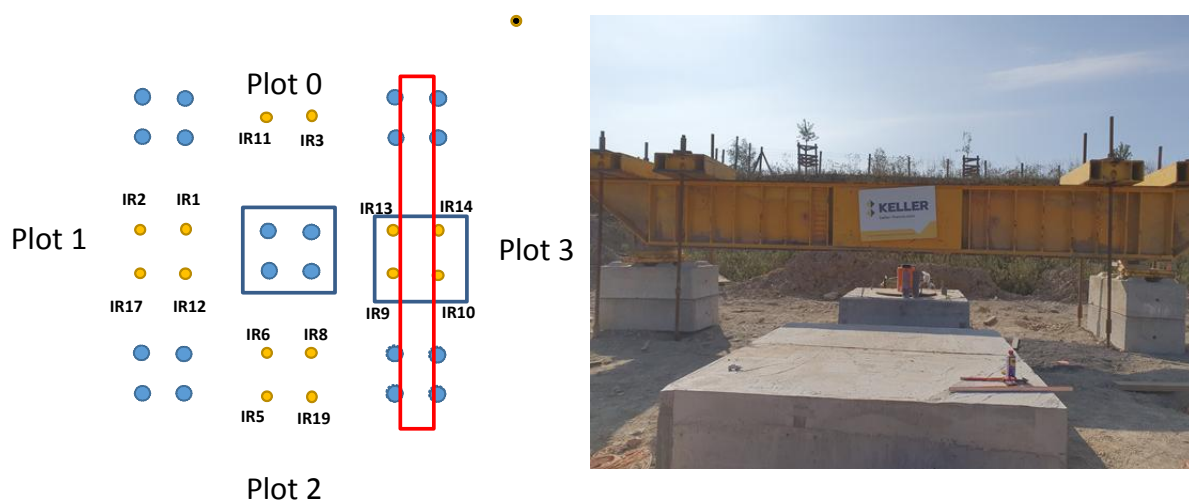


Figure 1. Configuration des plots avec la poutre de chargement installée sur le plot 3

3. Instrumentation

Une instrumentation des plots 1, 2 et 3 a été mise en œuvre (Figure 2). Elle est constituée de :

- Un capteur de pression totale positionné sur chaque inclusion
- Un capteur de pression totale positionné entre les quatre inclusions rigides
- Un capteur de tassement positionné sur chaque inclusion et un dernier positionné entre les quatre inclusions
- Trois extensomètres à cordes vibrantes installés dans chaque inclusion à 0,5m, 2 m et 4 m de la tête,

- Un capteur de déplacement à fil installé aux quatre coins de la semelle mesurant le déplacement vertical de la semelle,
- Un tube inclinométrique,
- Un capteur de déplacement à fil utilisé uniquement pour le chargement horizontal et positionné entre la semelle et la semelle centrale,
- Un extensomètre multipoint en forage installé uniquement dans le plot 2 entre les quatre inclusions.

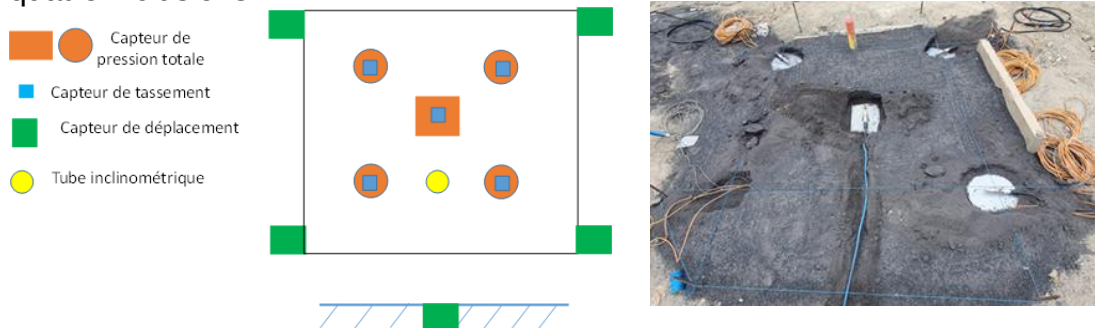


Figure 2. a) Instrumentation des plots 1 à 3, b) Mise en place des capteurs dans le plot 3

4. Essais de chargement sur les inclusions isolées

Deux inclusions rigides ont été sollicitées par un essai de chargement. Dans chacune des deux inclusions chargées verticalement jusqu'à la rupture, trois jauges à corde vibrante ont été installées à 0,5 m, 2 m et 4 m de la tête. Un ensemble centrale hydraulique / vérin de 2500 kN a été utilisé pour exercer la force en tête et la maintenir durant les paliers. Un capteur de force de 2500 kN a permis le contrôle de cette force tout au long des essais. Les deux inclusions rigides IR1 et IR2 étant sensiblement identiques en théorie, la capacité portante attendue était de 260 kN environ. Le programme de chargement présenté dans le Tableau 1 a donc été défini à partir de cette capacité portante théorique.

Tableau 1. Programme de chargement des Inclusions rigides isolées

Palier	IR 1	IR 2
1	37,5	37,5
2	75	75
3	112,5	100 *
4	150	130
5	187,5	160
6	225	190

* Sollicitations cycliques

L'inclusion rigide isolée IR2 a par ailleurs été soumise à dix cycles de déchargement – recharge entre 0 et 100 kN, avec des déchargements et recharges instantanés et des paliers maintenus pendant 2 minutes. La Figure 3 présente les courbes charges-enfoncement obtenues pour les deux inclusions rigides isolées.

On peut estimer la portance de l'IR1 aux alentours de 220 kN, et celle de l'IR2 à 180 kN. Cette différence de 40 kN peut au moins pour partie s'expliquer par la fatigue et l'accumulation de déplacement engendrées par les 10 cycles subis par l'IR2. L'analyse des courbes de fluage, vitesses de fluage et des valeurs du coefficient de fluage α a permis de déterminer une force de fluage de 110 kN pour l'IR1 et 100 kN pour l'IR2. L'analyse des mesures des extensomètres permet de déterminer la répartition des efforts

le long des inclusions : à la rupture, les efforts de frottement représentent respectivement 80% et 65% de la résistance totale pour l'IR1 et l'IR2. Ces deux essais permettent de mettre en évidence l'influence des sollicitations cycliques sur le comportement global d'une inclusion rigide et de caractériser le comportement des inclusions pour les modélisations numériques.

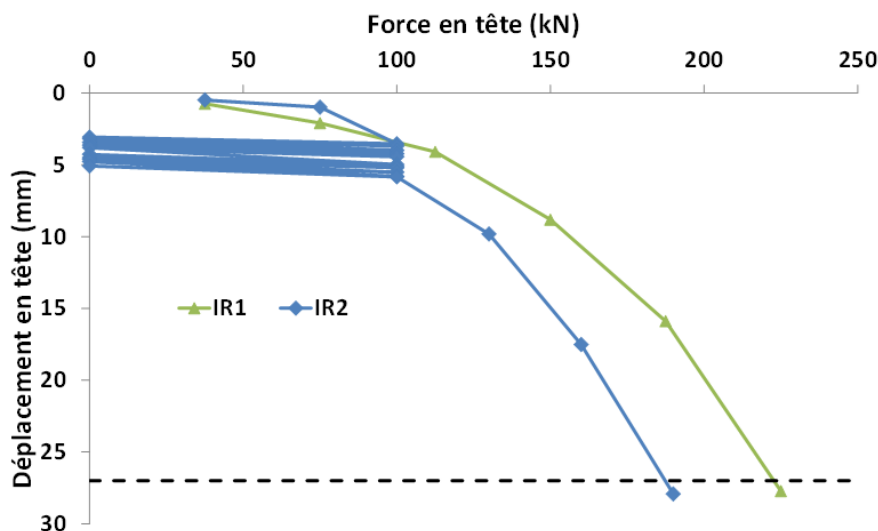


Figure 3. Courbes force – déplacement en tête pour les deux inclusions

5. Essais de chargement sur les semelles

5.1. Programmes de chargement

Une fois posée sur les quatre inclusions, la semelle a été sollicitée verticalement et horizontalement à l'aide de vérins. Pour le chargement vertical, une poutre de réaction a été préalablement installée au droit du plot d'essai et le vérin a été mis en action entre la poutre et la semelle. Pour le chargement horizontal, un second vérin a été installé entre la semelle et le massif central coulé sur quatre pieux. Chaque plot a été soumis au même programme de chargement (Tableau 2).

Tableau 2. Programme de chargement des Inclusions rigides isolées

Essai	Excentricité vérin vertical V	Présence vérin horizontal H	Chargement
1	$e = 0$	Non	V : 0 $\rightarrow$ 650 kN
2	$e = 0,3$ m	Non	V : 0 $\rightarrow$ 650 kN
3	$e = 0,45$ m	Non	V : 0 $\rightarrow$ 450 kN
4	$e = 0$	Non	V : 0 $\rightarrow$ 650 kN
5	$e = 0$	Oui	V = 650 kN, H : 0 $\rightarrow$ 250 kN
6	$e = 0$	Non	V : 0 $\rightarrow$ rupture

De nombreux résultats ont été obtenus et nous limiterons notre communication à la présentation de certains d'entre eux.

5.2. Répartition de la contrainte sur les 4 inclusions

La Figure 4 présente les augmentations de contrainte mesurées sur les inclusions rigides des plots 1, 2 et 3 en fin d'essai pour le chargement vertical centré E1 et E4. On observe que pour tous les plots, la semelle ne repose jamais sur les quatre inclusions. Cette même observation a été faite sur un ouvrage expérimental similaire (Pham et al., 2019). Néanmoins, le plot 3, avec la couche de sable de régalage, semble permettre une

meilleure répartition sur les inclusions. Le plot 2, avec la plateforme granulaire, génère une contrainte plus faible sur les inclusions. On note une différence de répartition de contrainte entre l'essai E1 et E4 qui peut être attribuée à la mise en place du dispositif de renforcement de sol lors du premier chargement. Cet effet du premier chargement est observable par la mesure du déplacement de la semelle enregistrée à la fin des essais E1 et E4 (Figure 5).

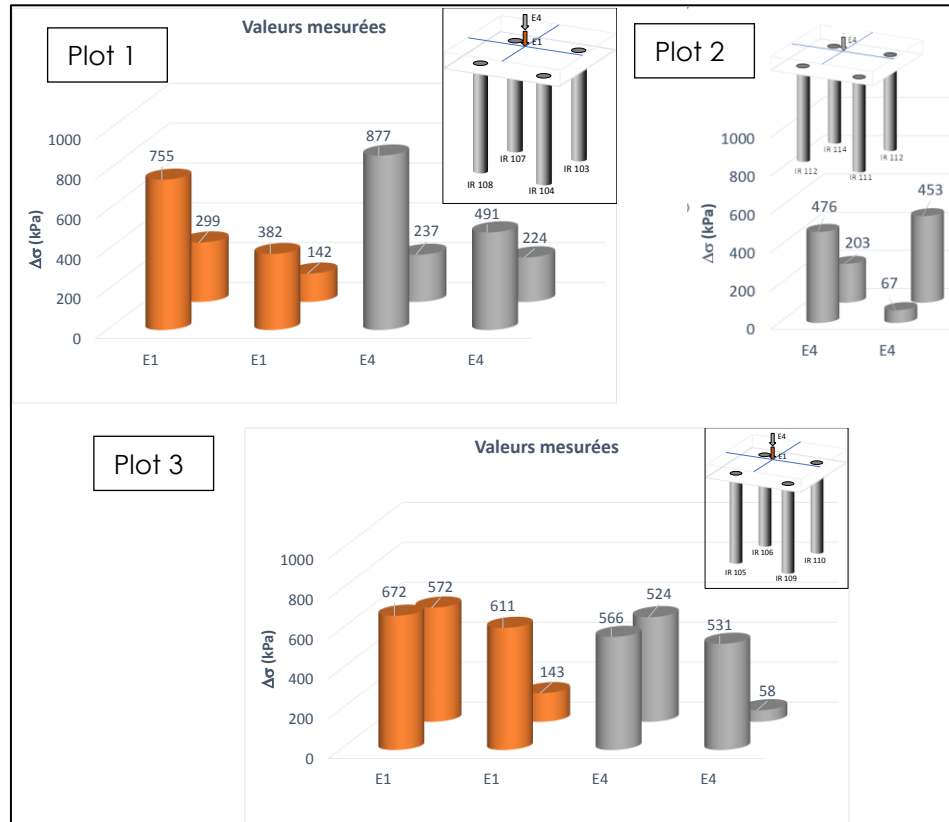


Figure 4. Augmentations de contrainte mesurées sur les inclusions rigides des plots 1, 2 et 3 en fin d'essai pour le chargement vertical centré E1 et E4

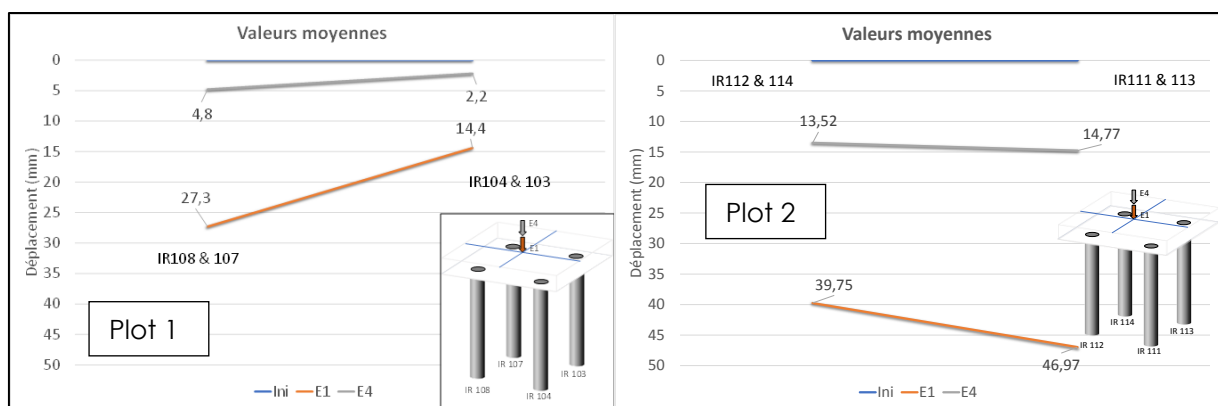


Figure 5. Déplacement de la semelle mesuré pour les plots 1 et 2 en fin d'essai pour le chargement vertical centré E1 et E4

5.3. Chargement vertical centré / excentré

La Figure 6 présente les augmentations de contrainte mesurées sur les inclusions rigides des plots 1 et 3 en fin d'essai pour le chargement vertical centré (E4), vertical excentré à 30 cm (E2) et vertical excentré à 45 cm (E3). Pour éviter les erreurs liées au premier

chargement, l'essai vertical centré E4 a été privilégié au premier essai E1 pour cette comparaison. Par ailleurs pour vérifier l'influence de l'excentrement, des valeurs moyennes sur les deux inclusions perpendiculaires à la direction de l'excentrement ont été choisies.

On observe un déséquilibre (60%-40%) pour l'essai vertical centré même dans le cas où une couche de sable est intercalée entre la semelle et les inclusions. Lors de l'excentrement à 30 cm, on observe un léger basculement vers les deux inclusions situées du côté de l'excentrement. Ce basculement est beaucoup plus prononcé pour un excentrement de 45 cm pour lequel deux inclusions reprennent respectivement 77% et 95% de la charge appliquée pour les plots 1 et 3. Cette différence peut s'expliquer par le fait que dans le cas 1, l'excentrement a été réalisé dans le sens opposé aux deux inclusions les plus chargées initialement alors que pour le plot 3, l'excentrement s'est fait dans le même sens.



Figure 6. Augmentations de contrainte mesurées sur les inclusions rigides des plots 1, et 3 en fin des essais E4, E2 et E3

5.4. Chargement vertical à la rupture

L'essai E6 a mené chaque plot à la rupture. La courbe du déplacement moyen de la semelle mesuré à ses quatre angles en fonction de la charge appliquée permet de déterminer la charge de fluage du renforcement de sol par les quatre inclusions (Figure 7). La charge de fluage est estimée à respectivement 900 kN, 950 kN et 850 kN pour les plots 1, 2 et 3.

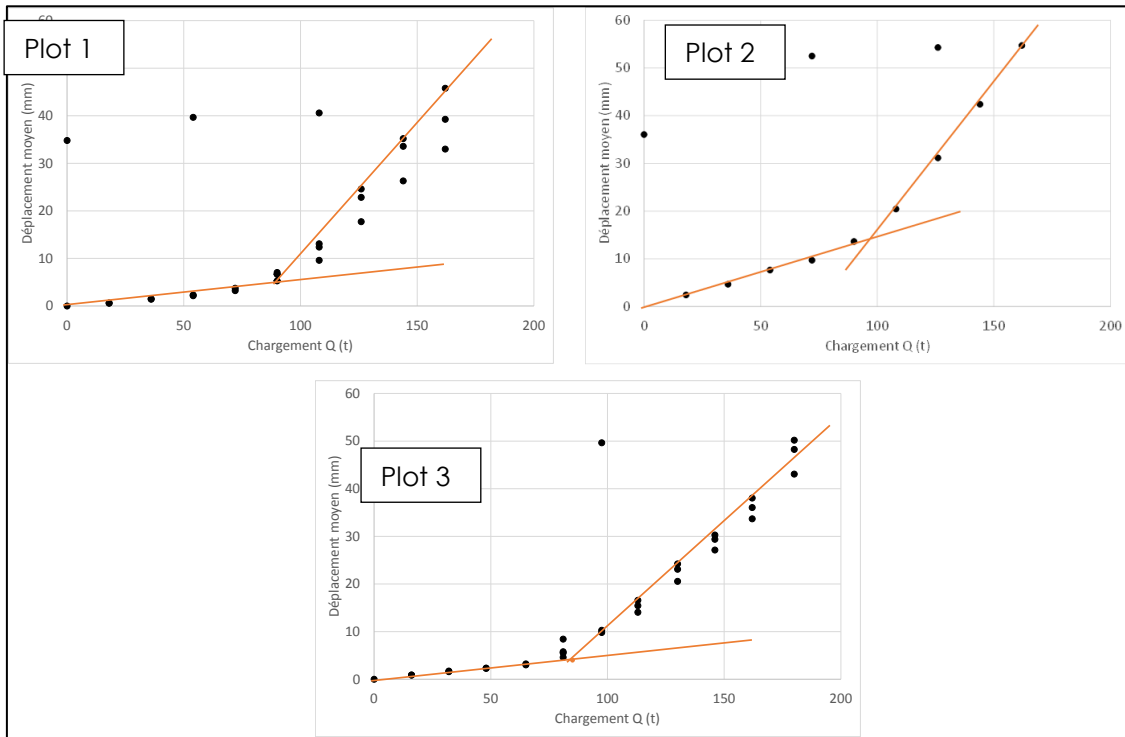


Figure 7. Courbes de chargement des plots 1, 2 et 3 (essais E6)

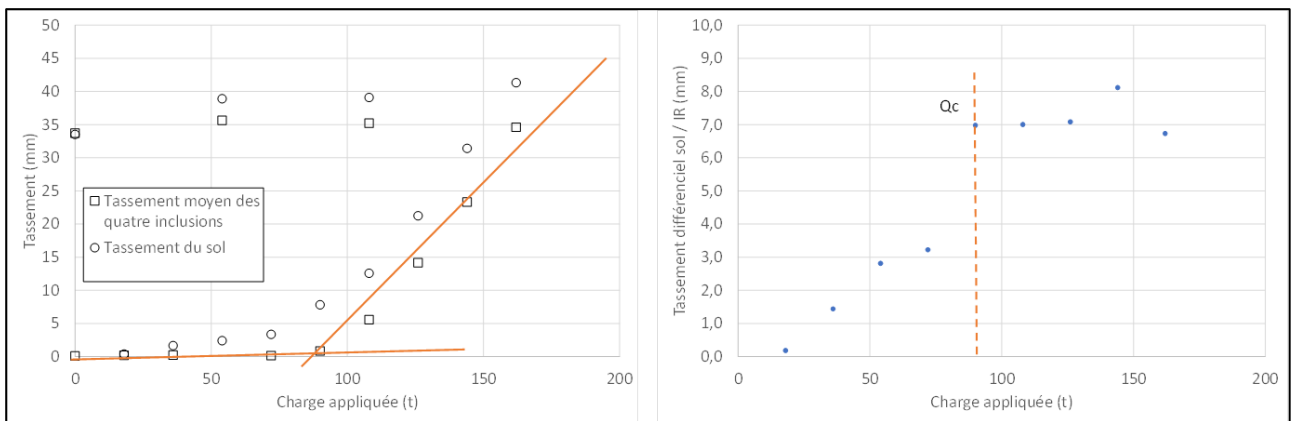


Figure 8. Mise en évidence du comportement du sol renforcé à la rupture pour le plot 1.

Les mesures de tassement sur les quatre inclusions confirment cette charge de fluage (Figures 8a et 9a). On observe aussi sur ces deux figures que le tassement du sol est supérieur à celui des inclusions. En traçant le tassement différentiel sol / inclusion (Figures 8b et 9b), on observe un changement de comportement à partir de la charge de fluage : pour le plot 1, l'ensemble sol-inclusion tasse de façon homogène ; pour le plot 3, ce tassement homogène se produit plus tardivement. A noter que les mesures différentielles enregistrées sont millimétriques et on peut conclure à un tassement homogène du sol renforcé après la charge de fluage pour les deux configurations.

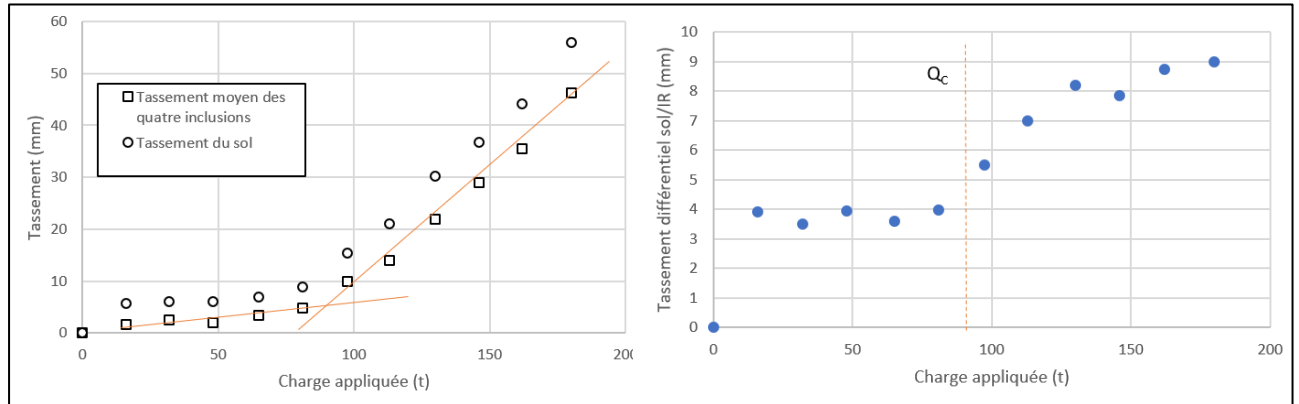


Figure 9. Mise en évidence du comportement du sol renforcé à la rupture pour le plot 3.

6. Conclusions

Cette expérimentation en vraie grandeur de semelle sur inclusions rigides est riche d'enseignement malgré la difficulté de comparer précisément les résultats des trois plots due notamment à des conditions initiales différentes. En effet, pour chaque plot, le premier essai a mis en évidence des conditions de report de charge préférentiel sur deux ou trois inclusions rendant difficile l'exploitation des résultats.

Les essais avec excentrement de la charge verticale ont mis en évidence un fort report de la charge sur deux inclusions. La présence d'une plateforme granulaire permet de diminuer la charge reprise directement sur les têtes d'inclusions (une part devant être transmise par frottement) mais ne modifie pas le comportement global pour un chargement vertical mené jusqu'à la rupture. Les essais à la rupture ont mis en évidence le comportement du sol renforcé après la charge de fluage. Ces essais permettront aux partenaires du projet ASIRI+ de calibrer leurs modèles numériques. Cette étude expérimentale sera complétée par une campagne d'essais à la centrifugeuse pour laquelle les conditions initiales seront mieux maîtrisées et qui permettra une analyse plus aisée du comportement des différentes configurations testées.

7. Remerciements

Les auteurs remercient les 42 partenaires du projet national ASIRI+ pour leur participation à ce projet collaboratif.

8. Références bibliographiques

ASIRi (2012). Recommandations pour la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des ouvrages sur sols améliorés par inclusions rigides verticales (Recommandations Projet National ASIRi), Presse des Ponts - IREX Paris.

Pham V.H., Briançon L., Dias D., Racinais J. (2019). Footings over rigid inclusion-reinforced soft soil. Experimental and numerical approaches. Canadian Geotechnical Journal, 56(12), 1940-1952