

EXPERIMENTATIONS EN CENTRIFUGEUSE DE SEMELLES CARREES SUR INCLUSIONS RIGIDES SOUS CHARGEMENT VERTICAL EXCENTRE

CENTRIFUGE EXPERIMENTS OF SQUARE FOOTINGS RESTING ON RIGID INCLUSIONS SUBJECTED TO UNCENTERED LOAD

Luc THOREL¹, Matthieu BLANC¹, Alain NEEL¹, Alexandre JAGU¹, Philippe AUDRAIN¹, Patrick GAUDICHEAU¹, Stéphane LERAT¹

¹ Université Gustave Eiffel, GERS-CG - Laboratoire Centrifugeuses Géotechniques, Nantes, France

RÉSUMÉ – L'effet de l'excentricité de la charge d'une fondation carrée reposant sur 4 inclusions rigides est étudié à l'aide de modèles centrifugés à échelle réduite. 3 essais ont été réalisés sur des modèles instrumentés avec le robot embarqué dans la centrifugeuse de l'Université Gustave Eiffel. La cinématique de la fondation et le transfert de charge vers les inclusions rigides sont présentés.

ABSTRACT – The load eccentricity effect of a square foundation resting on 4 Rigid Inclusions is investigated with small scale centrifuged models. 3 tests have been performed on instrumented models with the robot of Uni Eiffel Centrifuge laboratory. The kinematics of the foundation and the load transfer towards the Rigid Inclusions are presented.

1. Introduction

Dans le cadre du projet national ASIRI+ (<https://asiriplus.fr>), le comportement d'une fondation carrée sur 4 inclusions rigides (IR) est étudié à l'aide de modèles centrifugés. Cette "fondation composite" comprend, de haut en bas en Figure 1: 1) une fondation superficielle ; 2) une plate-forme de transfert de charge granulaire (PTC) ; 3) des IR installées dans une argile molle ; 4) une couche de sable où pénètrent les pointes des IR. Les forces transmises aux IR ainsi que la cinématique de la fondation superficielle sont présentées pour trois excentricités différentes.

2. Dispositif expérimental

L'ensemble des expériences s'inspire de la géométrie des essais *in situ* (Briançon *et al.*, 2000). Les lois d'échelle (e.g. Garnier *et al.*, 2007) appliquées pour la conception des essais en centrifugeuse ont conduit à une échelle réduite de 1/16,9, correspondant à un niveau d'accélération centrifuge de N=16,9. Les résultats sont présentés à l'échelle du modèle.

Le massif de sol reconstitué comprend, de bas en haut : 1) un géotextile de filtration pour éviter que les particules sableuses ne se déplacent vers le circuit de drainage ; 2) un sable d'Hostun HN31 dense et saturé ; 3) le sol meuble, préparé en 3 couches avec un programme de chargement adapté à une argile légèrement surconsolidée, est constitué d'un mélange de kaolin Speswhite et de sable de Fontainebleau NE34 (Baudouin, 2010) ; 4) la PTC, constituée de sable d'Hostun dense et bien calibré (Baudouin *et al.*, 2008). Les IR sont installées au laboratoire, guidées avec précision 4 par 4.

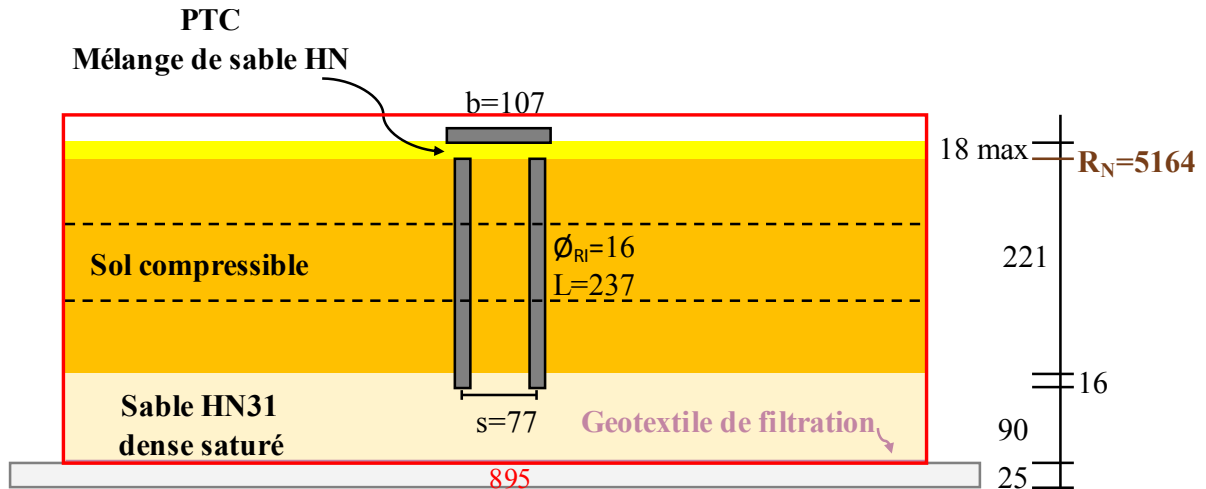


Figure 1. Schéma en élévation de la fondation composite dans le conteneur circulaire testé dans la centrifugeuse (en mm).

La fondation du modèle est en aluminium (figure 2), de même que les IR instrumentées (Figure 3). La fondation comprend une partie supérieure, en forme de T, utilisée pour être suspendue et chargée vers le bas, n'induisant qu'une rotation principale autour de l'axe x.

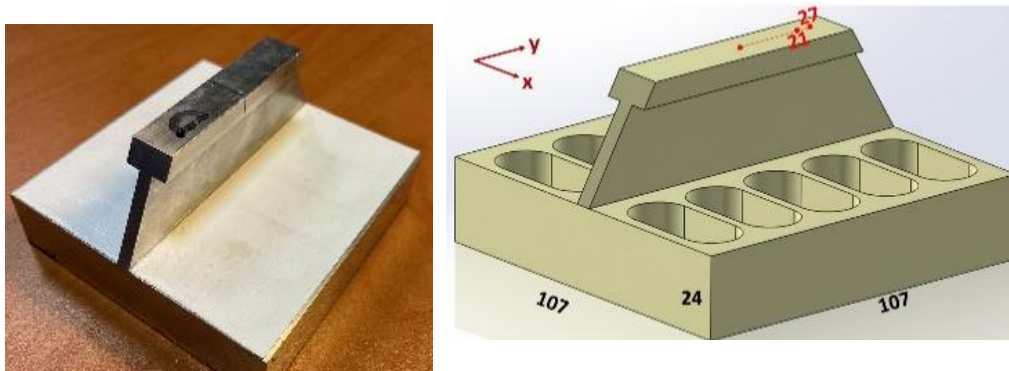


Figure 2. Modèle réduit de fondation carrée

Un scotch (blanc) est collé sur la surface supérieure.

Les IR sont équipées d'un capteur de force intimement lié à leur surface supérieure (Figure 3).

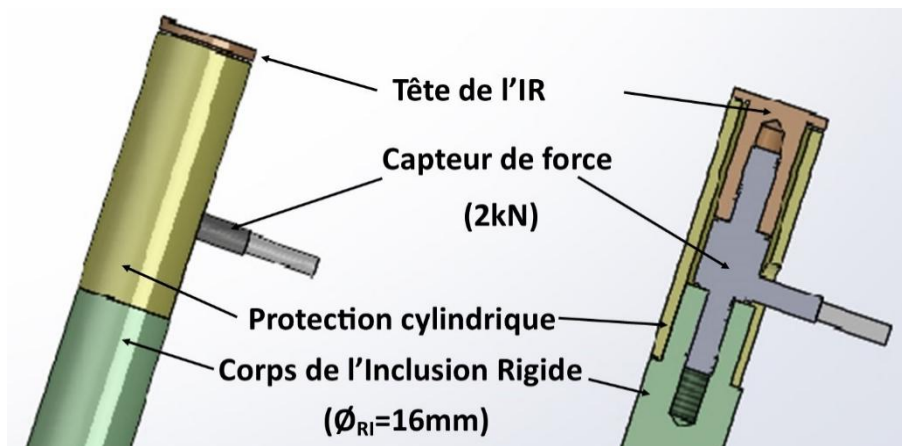


Figure 3. Dessins de l'inclusion rigide instrumentée

Afin d'optimiser le temps de consolidation de l'argile en centrifugeuse, 4 essais sont réalisés au cours d'un même « vol », grâce au robot embarqué de l'Université Gustave Eiffel (Gaudicheau *et al.*, 2014). Un outil spécifique a été développé pour déplacer et charger les fondations (Figure 4). Son interface, identique pour tous les outils du robot, assure la liaison mécanique et électrique (transmission des mesures). Les 4 fondations sont stockées sur une planche fixée sur le conteneur, et sont installées à l'emplacement prévu (où les IR ont été pré-installées) avant d'être chargées (Figure 5).

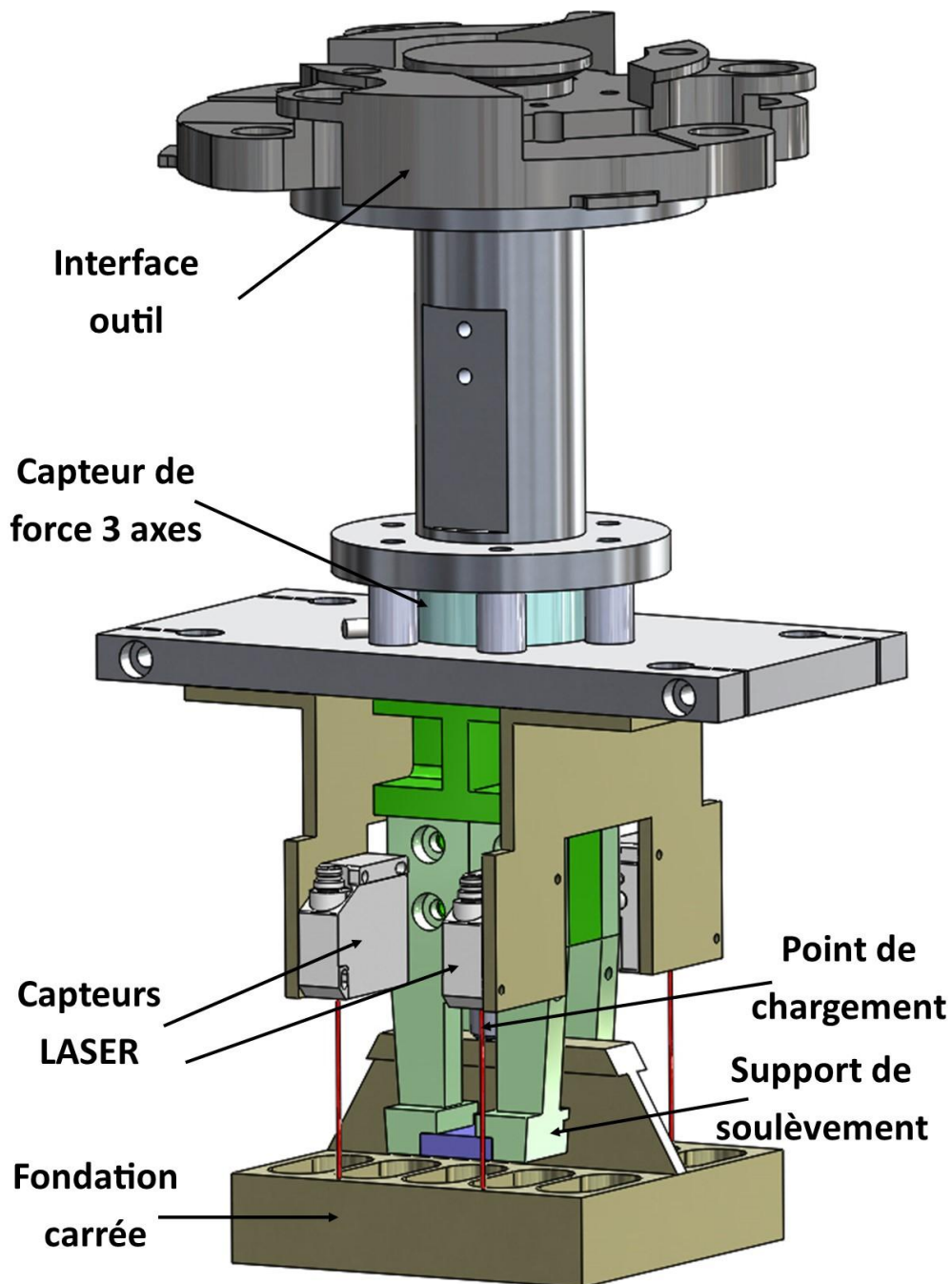


Figure 4. Outil polyvalent pour le robot téléopérateur

3. Programme expérimental

Les essais en centrifugeuse sont effectués dans le même conteneur circulaire, avec une hauteur de PTC de 18 mm (0,3 m à l'échelle du prototype), et avec 3 excentricités e rapportées à l'espacement s $e/s = 0, 0,27$ et $0,35$ (ou à la largeur de la fondation b : $e/b = 0, 0,19$ et $0,25$).

Après une phase de consolidation d'environ 2 heures en vol, les séries de chargement des fondations commencent. Le chargement vertical des fondations est effectué dans des conditions de contrôle en déplacement à une vitesse de 1 mm/min. Si l'excentricité est positive, le chargement vertical génère une rotation négative autour de l'axe x (θ_x). L'acquisition des données est effectuée à une fréquence de 10Hz, grâce au convertisseur analogique-digital Quantum de HBK.

Les capteurs laser installés sur l'outil multi-usages sont dirigés vers la fondation pour accéder à son mouvement de rotation de corps rigide. La distance entre les rayons laser est de 100 mm dans la direction x et 40mm dans la direction y direction. Cela induit une meilleure précision de la rotation autour de l'axe y (θ_y) que sur l'axe x (θ_x).

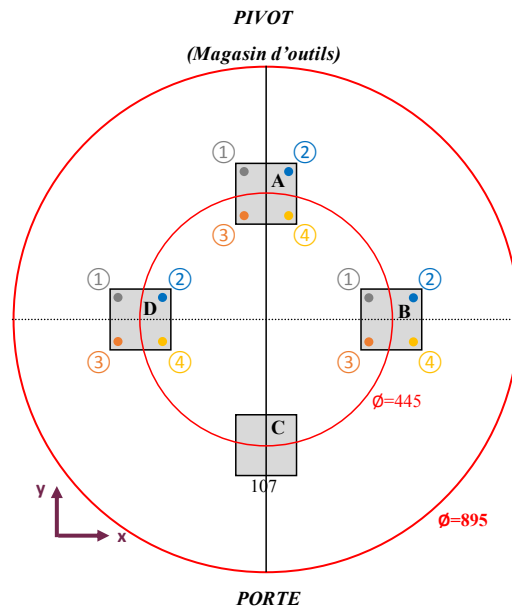


Figure 5. Vue de dessus de la mise en œuvre dans le conteneur (cotes en mm)

Les essais de chargement (Tableau 1) sont consacrés à la charge excentrique, pour étudier la répartition de la charge et la cinématique de la fondation carrée.

Tableau 1. Configuration de l'essai de charge.

Test	e/s	Commentaire
A	0.35	
B	0.27	
C	NA	Chargement H, non présenté
D	0	

4. Discussion

Les résultats du chargement (Figure 6) montrent le comportement jusqu'à un tassement de $1/10^{\text{ème}}$ de la largeur de la fondation (107 mm), à l'échelle du modèle.

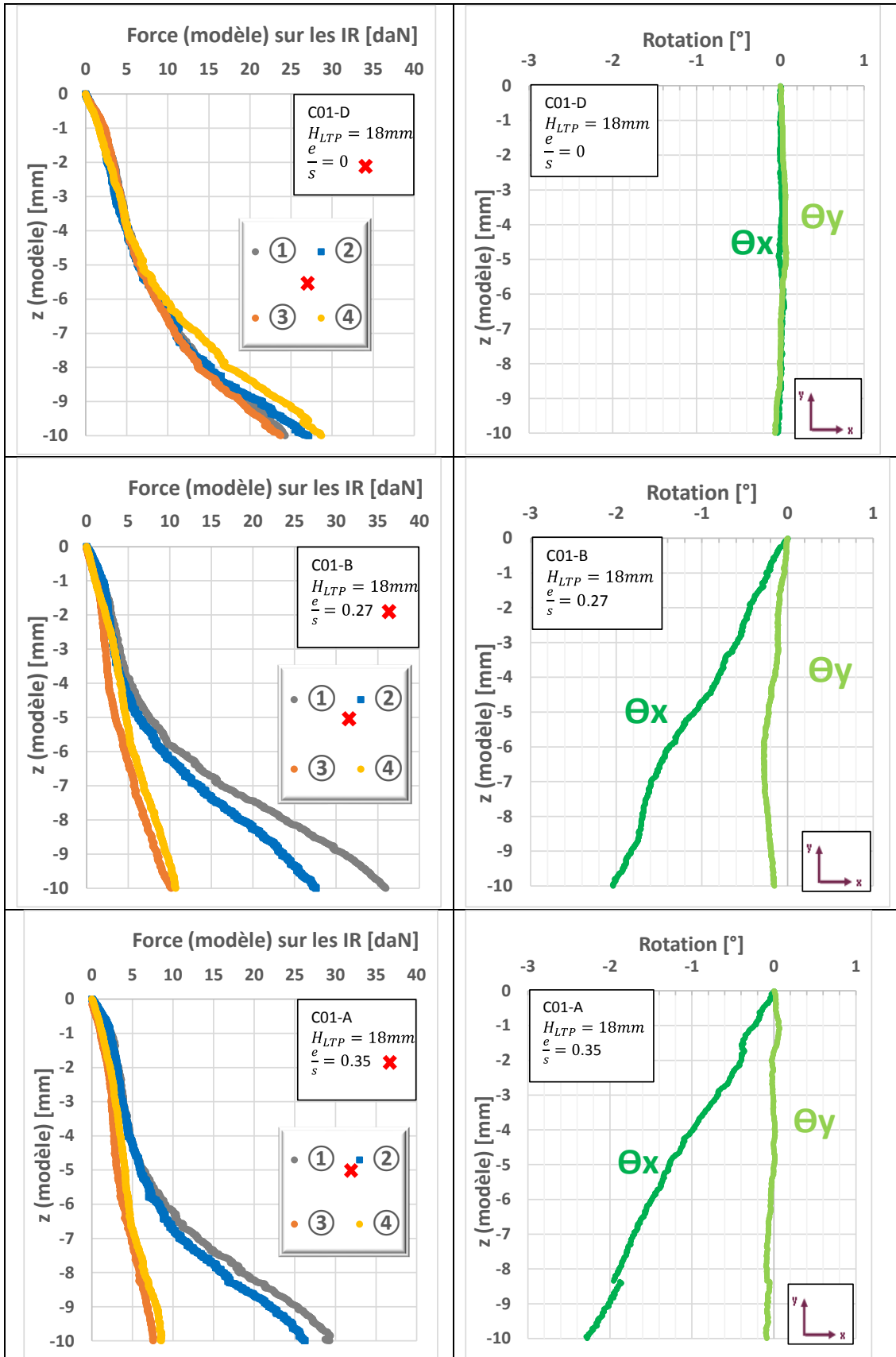


Figure 6. Forces transmises aux inclusions rigides (à gauche) et rotations (à droite) en fonction du tassement pour 3 excentricités: 0 (haut), 0,27 (milieu), 0,35 (bas).

Pour la charge verticale centrée, on constate que les efforts sont presque identiques sur les IR jusqu'à ce que la symétrie soit perdue, générant une légère rotation vers les IR 2 et 4.

Lorsqu'une charge excentrique est appliquée, la rotation de la fondation est immédiatement visible. Le transfert de charge vers les IR 1 et 2 est accentué après un tassement de quelques millimètres, montrant un comportement complexe qui inclut d'abord un mécanisme à l'intérieur de la PTC et ensuite la mobilisation des IR de manière asymétrique.

On peut observer que, même si un processus minutieux a été suivi dans la préparation du modèle de sol, l'installation des IR et l'emplacement des points de chargement, de très petites rotations sont observées sur l'axe y . Cela montre qu'il existe de faibles incertitudes relatives à la perte de symétrie.

Lorsque la variation totale de la charge appliquée sur la fondation est comparée à la somme des variations de charge sur les IR (Figure 7), deux mécanismes distincts de transfert de charge peuvent être identifiés, quelle que soit l'excentricité. La pente initiale pour les petits tassements (et efforts) est d'environ 0,38, alors que la pente finale est proche de 0,74, ce qui montre une mobilisation progressive des IR. Pour un tassement similaire du centre de la fondation (e.g., l'extrémité des courbes correspond à l'état limite de service, 10% de la largeur de la fondation), les charges diminuent avec l'augmentation de l'excentricité.

On peut dire que pour atteindre le même déplacement vertical appliqué au point de chargement : 1) une force plus importante est nécessaire pour une charge centrée que pour une charge excentrée ; 2) une charge plus importante est transférée au sol meuble pour une excentricité plus élevée. Dans tous les cas, la charge transmise aux IR est inférieure à la charge appliquée à la fondation, mais le rapport ne semble pas être affecté par l'excentricité.

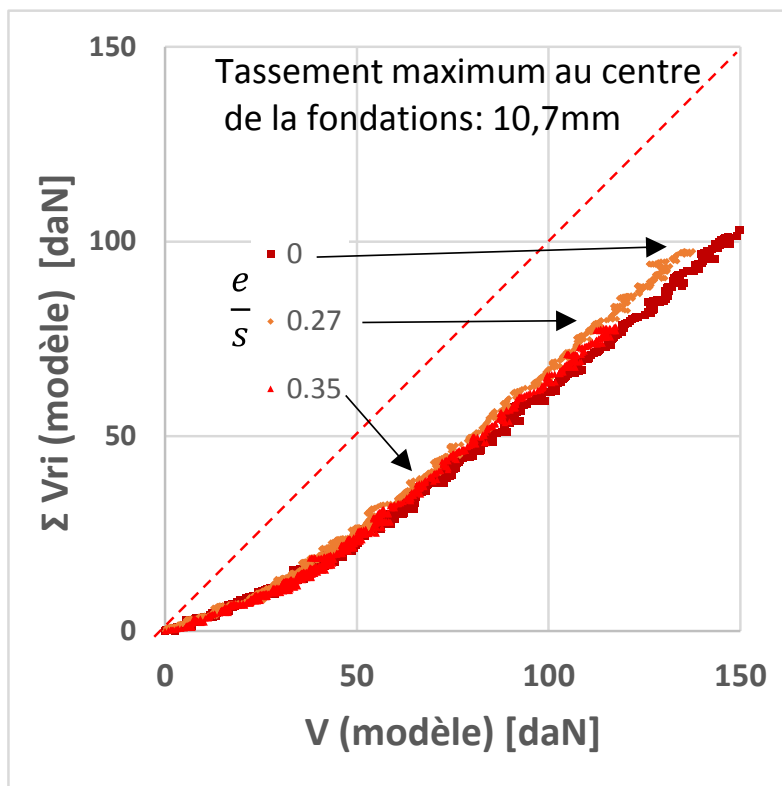


Figure 7. Variation de la force totale appliquée sur les IR par rapport à la variation de la force totale appliquée sur la fondation.

5. Conclusions

Une série d'essais en centrifugeuse a été mise en oeuvre pour étudier l'effet de l'excentricité sur un système de fondation complexe composé d'une fondation carrée peu profonde reposant sur quatre inclusions rigides.

Les premiers résultats montrent que pour un tassement de 10% de la largeur de la fondation, la rotation atteint une valeur d'environ 2 degrés, et que les IR en aval sont surchargées jusqu'à 3 fois les IR en amont.

Lors de la mise en charge de chaque fondation, deux mécanismes semblent apparaître : 1) un transfert de charge principalement dans la PTC ; 2) un transfert de charge plus actif vers les IR.

D'autres études sont en cours pour d'autres configurations d'essai telles que la hauteur PTC.

Remerciements

Les auteurs remercient le projet national ASIRI+ pour son soutien financier.

Références

- Briançon L., Bohn C., Szymkiewicz F. (2020). Semelles sur inclusions rigides - Plan d'auscultation. Rapport PN ASIRI+, tâche 4, T4-04, ASI+/R/001, 15p.
- Baudouin G., 2010. Modélisation Physique en centrifugeuse des sols renforcés par Inclusions rigides, Ph.D. Univ. Nantes. <https://www.theses.fr/2010NANT2046>
- Baudouin G., Rosquoët F., Canou J., Dupla J.C., Thorel L., Rault G., Andria-Ntoanina I. (2008). **Caractérisation mécanique d'un mélange de sables d'Hostun**. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, Nantes 18-19 juin JNGG08. ISBN 9782720825204. pp 491-498. <https://www.geotech-fr.org/download.php?type=pdf&doc=jngg-2008>
- Garnier J., Gaudin C., Springman S.M., Culligan P.J., Goodings D., König D., Kutter B., Phillips R., Randolph M.F., Thorel L. (2007). Catalogue of scaling laws and similitude questions in geotechnical centrifuge modelling. *Int. J. Phys. Mod. Geotechnics* 7(3), 1-24. doi.org/10.1680/ijpmg.2007.070301
- Gaudicheau P., Thorel L., Néel A., Audrain Ph., Lozada C., Monroy J. (2014). Improvement of the IFSTTAR robot control system, 8th ICPMG Int. Conf. Phys. Mod. Geotech, Perth 14-17 janvier, pp.221-226.