



HAL
open science

Effet en 2D d'une charge statique ou roulante sur une plateforme granulaire reposant sur sol renforcé par inclusions rigides

Thierry Dubreucq, Luc Thorel, Alexandre Jagu, Alain Neel, Stéphane Lerat, Patrick Gaudicheau, Philippe Audrain

► To cite this version:

Thierry Dubreucq, Luc Thorel, Alexandre Jagu, Alain Neel, Stéphane Lerat, et al.. Effet en 2D d'une charge statique ou roulante sur une plateforme granulaire reposant sur sol renforcé par inclusions rigides. 11èmes journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon [INSA Lyon], CFMS, CFMR, CFGI, Jun 2022, Lyon, France. hal-03720061

HAL Id: hal-03720061

<https://hal.science/hal-03720061v1>

Submitted on 11 Jul 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

EFFET EN 2D D'UNE CHARGE STATIQUE OU ROULANTE SUR UNE PLATEFORME SUR SOL RENFORCE PAR INCLUSIONS RIGIDES

2D EFFECT OF A STATIC OR ROLLING LOAD ON A PLATFORM REINFORCED BY RIGID INCLUSIONS

Thierry Dubreucq¹, Luc Thorel¹, Alexandre Jagu¹, Stéphane Lerat¹, Alain Neel¹, Patrick Gaudicheau¹, Philippe Audrain¹

¹ Université Gustave Eiffel, Laboratoire Centrifugeuses Géotechniques, Nantes, France

RÉSUMÉ – L'effet des charges statique ou roulante sur une plateforme granulaire de faible épaisseur, fondée sur un sol mou renforcé par inclusions rigides, est étudié à l'aide d'un modèle 2D réduit au 1/10^{ème}. La position de la charge et le renforcement horizontal sont scrutés, notamment via l'analyse d'image.

ABSTRACT – The effect of static or rolling loads on a thin granular platform, based on soft soil reinforced by a mesh of rigid inclusions, is studied using a 2D model reduced to 1/10th. The position of the load and the horizontal reinforcement are scanned, in particular via image analysis.

1. Introduction

L'amélioration des sols meubles avec des inclusions verticales rigides est maintenant une technique répandue (e.g. ASIRI, 2013). Dans le cadre du Programme National de Recherche ASIRI + (Briançon et al., 2020, ASIRI + 2021), lancé en 2019, de nouveaux thèmes de recherche sont investigués, dont le cas de la charge roulante.

Une des approches utilisées est la modélisation en centrifugeuse. Le travail expérimental en macro-gravité concerne ici l'étude 2D du comportement des plateformes de transfert de charge (PTC) minces sur des inclusions rigides (IR) soumises à des charges statique ou roulante sur la plate-forme (figure 1). Le modèle physique se compose d'un sol analogue en polystyrène souple et de plaques métalliques verticales régulièrement espacées au-dessus d'un substratum, et d'une PTC sableuse éventuellement renforcée par une géogrille.

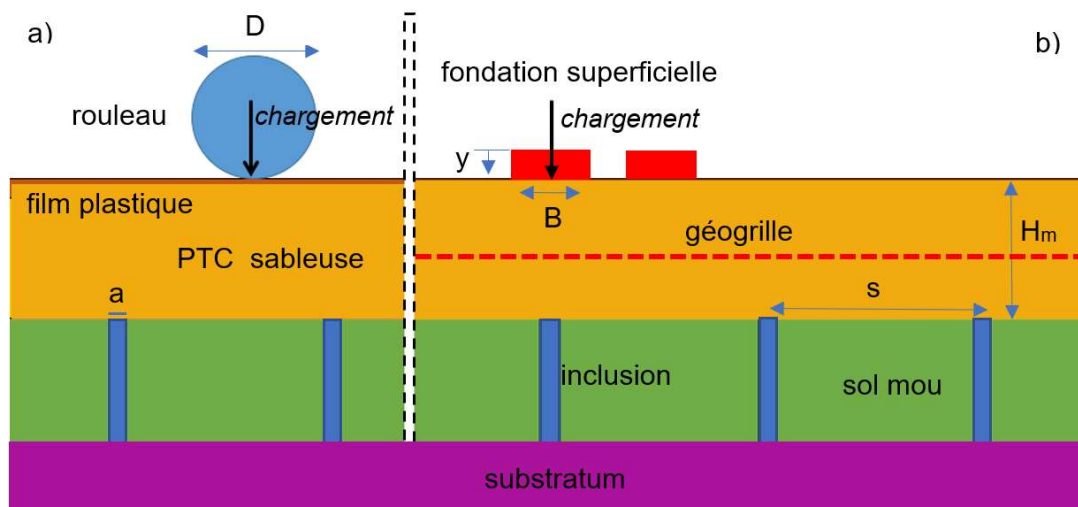



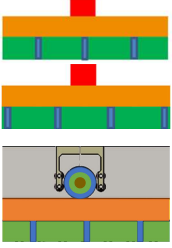
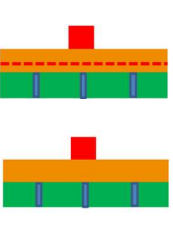
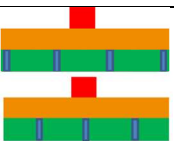


Figure 1: Géométrie 2D du modèle physique –
a) rouleau en translation ; b) chargement (quasi) statique d'une semelle filante, au-dessus d'une IR ou entre deux IR

La géométrie 2D est une première étape (Lukiantchuki et al. 2018) qui, au travers de la face transparente du conteneur, permet de visualiser les mécanismes en jeu et de les analyser via l'utilisation d'une technique de traitement d'image. Dans la suite, on décrira successivement la conception 2D des modèles statiques et roulants, à l'échelle 1/10^{ème}. Les premiers résultats d'essais seront présentés et analysés. Chaque modèle est placé dans un conteneur rigide disposant d'une face transparente latérale. Sous une accélération de 10×g, on peut ainsi visualiser dans la PTC les déformations et les mécanismes de rupture, sous des chargements verticaux, statiques ou dynamiques.

Sur la figure 1 et dans le tableau 1, B désigne la largeur de la semelle filante, H_m la hauteur de la PTC sableuse, et s l'espacement (entre-axes) entre les inclusions. Six combinaisons géométriques (B/H_m × B/s) sont présentées.

Tableau 1. Configurations géométriques des essais de chargement statique et dynamique

| B/s \ B/H _m | 0 | 0,5 | 0,75 | 1 | ∞ |
|------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 0 |  |  | | |  |
| 0,3 | |  |  | | |
| 0,6 | | | |  | |

2. Chargement statique

2.1. Conception du modèle 2D statique

Dans un premier conteneur rigide de 54 cm de long et de 22 cm de large (figure 2), deux semelles en aluminium ont été chargées tour à tour. A l'échelle du prototype (on rappelle que les dimensions du modèle physique doivent être multipliées par 10 ici), la première semelle mesure B = 30 cm de largeur et L = 180 cm de longueur. La deuxième semelle prototype est plus large avec B = 60 cm et de même longueur. La face inférieure des deux semelles a été rendue rugueuse par sablage leur donnant une rugosité normalisée $R_n = R_{max}/d_{50} = 0,46$ qui implique un frottement d'interface proche du frottement interne du sable.

L'accélération centrifuge de 10×g (où g = 9,81 m/s²) est appliquée à la base de la semelle. Le chargement statique est vertical, centré et contrôlé en déplacement à la vitesse de 0,5 mm/min pour tous les essais, au moyen d'un vérin électrique. Il est solidaire d'une poutre de réaction fixée au conteneur. Une rotule assure la liaison entre la semelle et le vérin.

La PTC est un sable de Fontainebleau de type NE 34. Son épaisseur H_m est égale à 40 cm ou 60 cm à l'échelle du prototype, selon les configurations testées. Le sable (d₅₀ = 0,21 mm) est moyennement dense (I_d = 0,73). Il est mis en œuvre par pluviométrie dans le conteneur, avec deux lignes de sable coloré intercalaires, de manière à obtenir une masse volumique de 1648 kg/m³. Son angle de frottement interne est égal à 32 degrés.

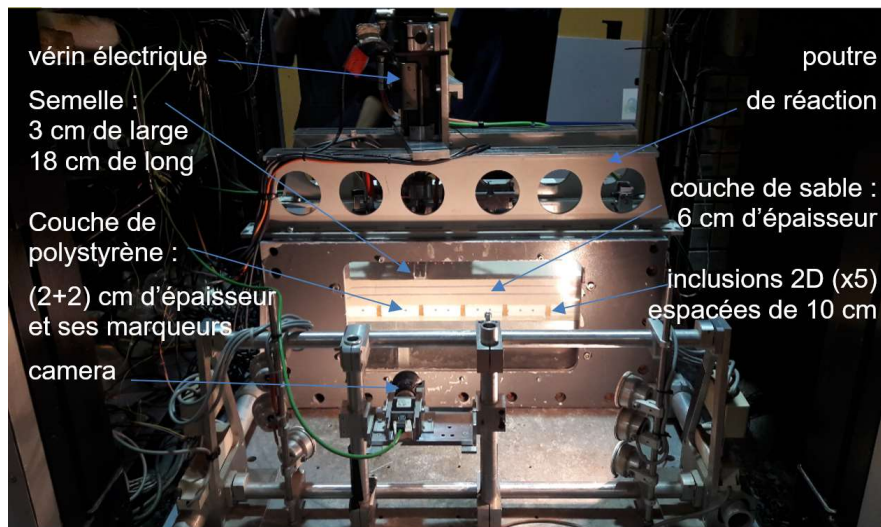


Figure 2 : Le dispositif de chargement de la fondation superficielle filante observé derrière la vitre du conteneur à face transparente, en cours d'installation dans la nacelle de la centrifugeuse

Figure 2, les inclusions 2D disposées tous les $s=10$ cm dans le modèle sont constituées de plaques d'aluminium rigides, posées sur une plaque d'aluminium épaisse pour simuler le substratum. Leur rotation dans le plan de la vitre est bloquée à l'arrière. A l'échelle du prototype, les inclusions font $a=10$ cm d'épaisseur et sont disposées tous les mètres. L'aire de l'inclusion rapportée à l'aire du maillage d'IR est donc de $\alpha=10\%$. La surface des têtes d'IR a également été sablée.

Le sol compressible est simulé avec un polystyrène expansé de masse volumique $15,5 \text{ kg/m}^3$ (Th.38, produit Knauf©). Deux couches superposées de 2 cm d'épaisseur (40 cm à l'échelle du prototype) sont disposées au-dessus du substratum. Avec un coefficient de Poisson quasi nul, le polystyrène ne transmet pratiquement pas de pression horizontale sur les inclusions lorsqu'il est comprimé. Ainsi, il y a très peu de frottement latéral sur les inclusions lors du chargement. Son module a été déterminé après l'analyse du chargement de la semelle filante $B=3$ cm de large sous $10 \times g$ sur un massif en polystyrène de 8 cm d'épaisseur, à l'échelle du modèle. Pour un tassement égal à $10\%B$, une contrainte égale à 70 kPa a été mesurée sous la semelle en centrifugeuse. En appliquant la formule du chargement-tassement d'un milieu élastique, on déduit un module de 1 MPa. Ce module est bien représentatif d'un sol meuble.

La géogrille est une moustiquaire en fibre de verre à maille carrée de $1,6 \times 1,6 \text{ mm}^2$ et de 0,4 mm d'épaisseur (produit Windhager©). Sa résistance à la rupture vaut 10 kN/m (soit 100 kN/m à l'échelle du prototype) pour une déformation très faible de 1 %. Pour simuler le géotextile anticontaminant, un géotextile non tissé de 0,4 mm d'épaisseur aussi a été disposé sur les têtes d'IR et le polystyrène. Sa résistance à la rupture vaut 6 kN/m pour une déformation de 37%. Nous avons considéré par la suite que ce dernier ne participait pas ou très peu au renfort compte de tenu de sa très grande déformabilité.

2.2 Résultats d'essais et analyses

Hors renfort par géogrille, la figure 3 montre l'augmentation de la contrainte sous la semelle filante en fonction de son tassement au centre (y) rapporté à sa largeur (B). La figure 3.a (resp. 3.b) est relative à une largeur modèle de semelle de 3 cm (resp. 6 cm) pour une épaisseur modèle commune $H_m = 6$ cm de la PTC (figure 2).

Dans le cas $B=H_m$ (figure 3.b), la contrainte admissible de la fondation, définie pour $y/B=3\%$, est supérieure à celle obtenue pour $B=0,5H_m$ (figure 3.a) : +66 % quand la semelle est au-dessus d'une inclusion, et +128 % entre deux inclusions. Pour $B=H_m$, la capacité

portante de la fondation, définie pour $y/B=10\%$, augmente de 27 % si la semelle se situe au-dessus de l'inclusion par comparaison à sa position entre deux inclusions.

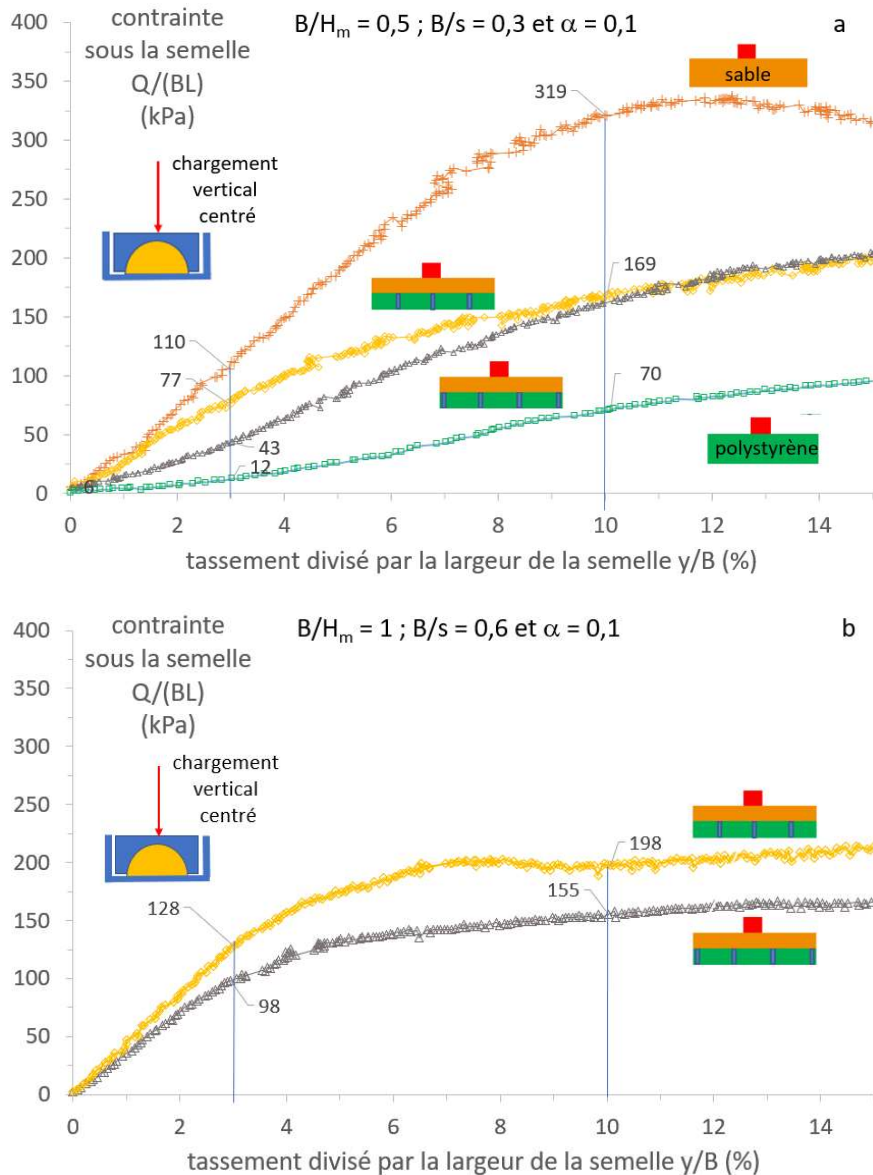


Figure 3 : Contrainte sous la semelle filante $Q/(BL)$ en fonction du tassement relatif y/B de la semelle. cas a) : $B/H_m = 0,5$ et $B/s = 0,3$ et les 2 cas de référence ; cas b) : $B/H_m = 1$ et $B/s = 0,6$

Pour $B=0,5H_m$, la raideur initiale de la fondation augmente de 79% si la semelle est au-dessus de l'inclusion par comparaison à sa position entre deux inclusions. Mais ensuite les capacités portantes sont quasi égales quelle que soit la position de la semelle par rapport aux IR. Elles valent 2,4 fois la capacité portante de la fondation sur polystyrène seul et 0,5 fois celle de la fondation sur le massif sableux seul.

2.3 Mécanismes de rupture

La figure 4, en relation avec la figure 3.b, concerne le chargement statique à la rupture de la semelle filante de 60 cm de large sur une PTC de 60 cm d'épaisseur, à l'échelle du prototype. Les mécanismes de rupture sont associés au tassement relatif de la semelle $y/B=10\%$. Les plans de cisaillement sont identifiés grâce à des lignes horizontales de sable coloré, et à l'analyse d'images avec le logiciel libre GeoPIV-RG (Stanier, 2016).

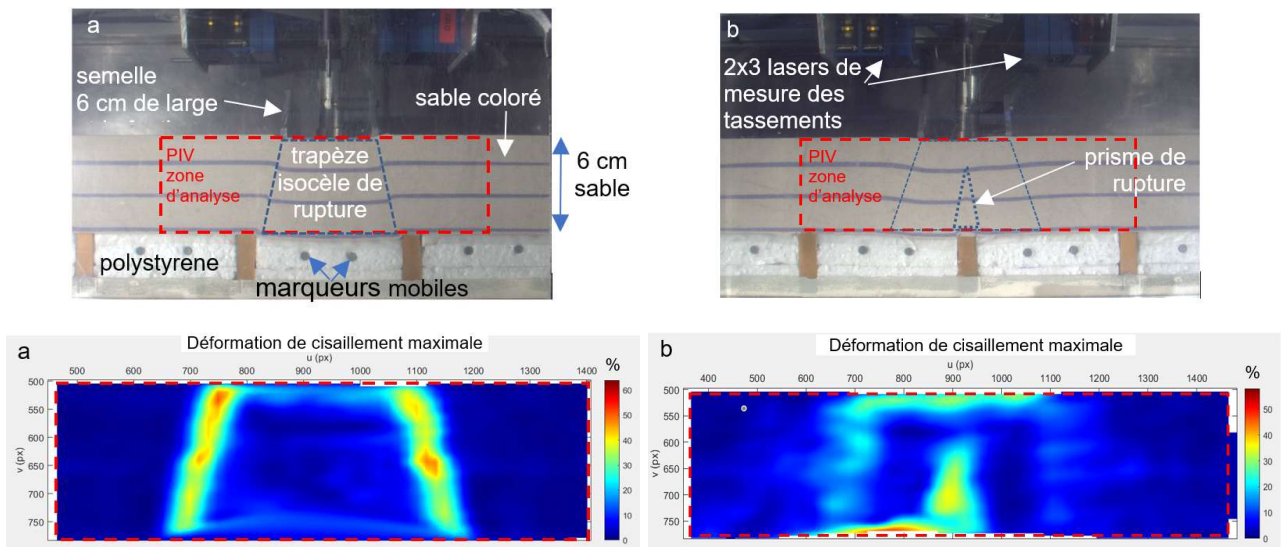


Figure 4 : Localisation de la déformation de cisaillement maximal dans le sable pour le tassement $y/B=0,1$ tel que $B/H_m=1$ et $B/s=0,6$ - cas a) entre deux IR; cas b) au dessus d'une IR .

Le mécanisme représenté sur la figure 4.a est un trapèze isocèle dans le cas où la semelle filante est placée entre deux IR. A la verticale d'une IR sur la figure 4.b, on retrouve le mécanisme précédent, moins accentué, et un prisme de rupture positionné en tête de l'IR qui matérialise une « colonne fictive » de sable remontant à mi-couche (Combarieu, 2008). Le cas b) concentre les plans de cisaillement dans l'axe de la semelle.

A l'échelle du modèle, la figure 5 montre le cas du renforcement additionnel par une géogrille de 21 cm de longueur, disposée à mi-couche dans l'épaisseur de sable ou PTC ($H_m=4$ cm), pour une semelle de largeur $B=3$ cm située au-dessus d'une IR.

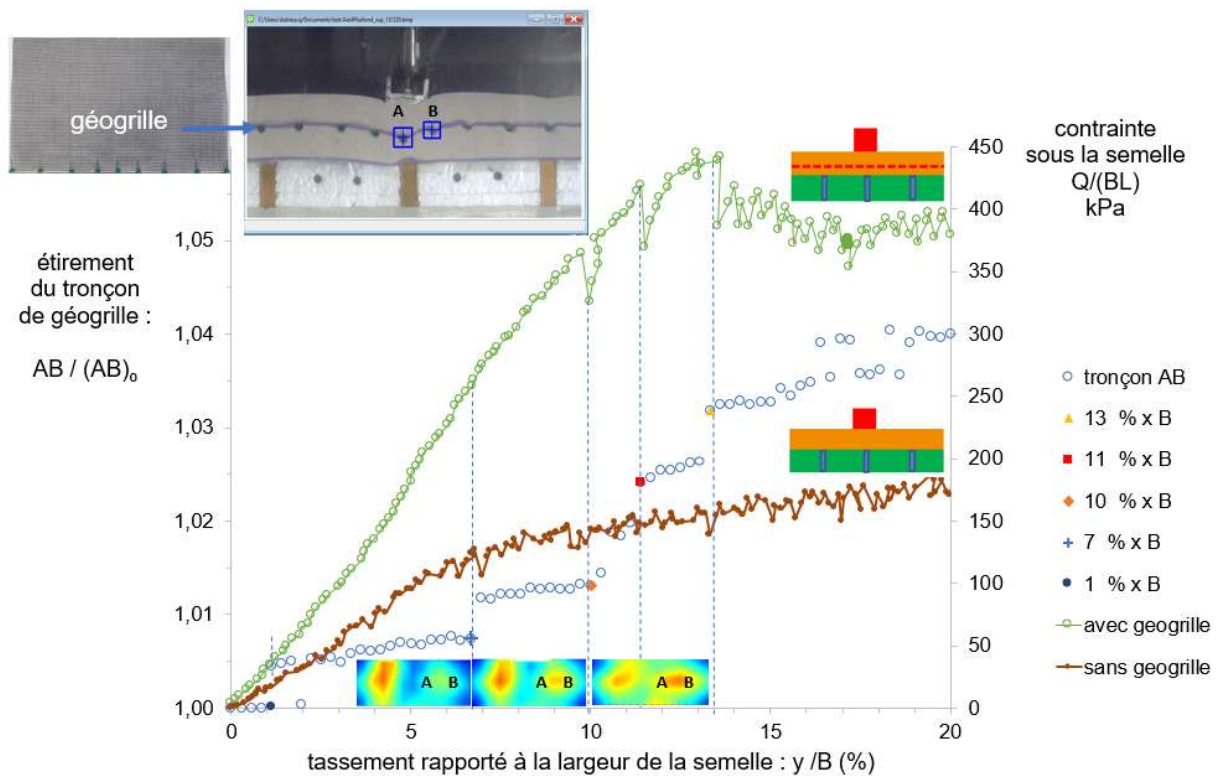


Figure 5 : Etirement d'un tronçon de géogrille sous la semelle située au droit d'une IR, en fonction du tassement réduit y/B – Localisation de la déformation de cisaillement maximal dans le sable – Courbes de chargement-tassement, avec et sans géogrille, pour $B/H_m=0,75$ et $B/s=0,3$.

Neuf pointes à tête plate sont enchâssées sur le bord de la géogrid. Le suivi cinématique montre que l'étirement du tronçon AB de géogrid ($(AB)_0 = 2 \text{ cm}$), situé sous la semelle, commence dès $y/B = 1\%$, avec des mises en tension par paliers à $y/B = 1; 7; 10$ et 13% . Ceci explique le doublement de la raideur mesurée à $y/B=3\%$, comparée à celle sans géogrid. En parallèle, les déformations de cisaillement maximales dans le sable se localisent bien le long de ce tronçon AB. Mais d'autres essais ont montré que cette raideur reste inchangée quand la semelle se situe entre deux IR, avec ou sans géogrid.

3. Chargement roulant

Le dispositif de la charge roulante a aussi été développé dans une géométrie 2D. La charge appliquée à la surface du sol par un rouleau a été évaluée grâce aux essais précédents.

3.1. Conception du modèle 2D roulant

Un conteneur plus grand à face transparente a cette fois-ci été utilisé : 80 cm de long et 25 cm de large (figure 6). L'épaisseur de la PTC est de 4 cm à l'échelle du modèle.

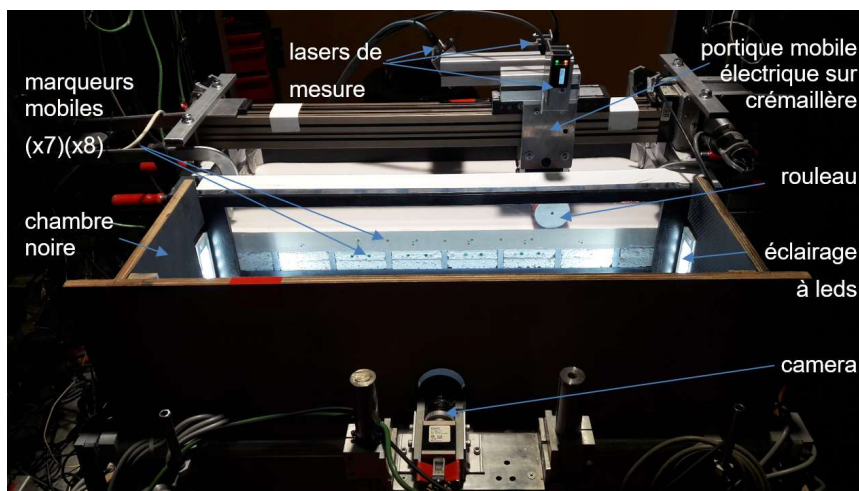


Figure 6 : Le dispositif de roulage du rouleau pour le chargement roulant, observé derrière la vitre du nouveau conteneur à face transparente, lors du montage dans la nacelle de la centrifugeuse.

La charge roulante est constituée d'un tube⁽¹⁾ extérieur en acier de $D^{(1)} = 6 \text{ cm}$ de diamètre à l'échelle du modèle (figure 7.a), à l'intérieur duquel peuvent coulisser deux tubes plus petits: $D^{(2)} = 4 \text{ cm}$ et $D^{(3)} = 2 \text{ cm}$, de masses respectives 2,9 ; 1,8 et 0,6 kg pour simuler des charges variables (tube⁽¹⁾ ou (1+2) ou (1+2+3)). La vitesse de translation du rouleau est de 25 cm/min « en vol » (figure 7.b). Un film plastique PVC de 0,5 mm d'épaisseur tenu à ses extrémités est posé sur la PTC pour éviter l'ensablement du rouleau en translation.

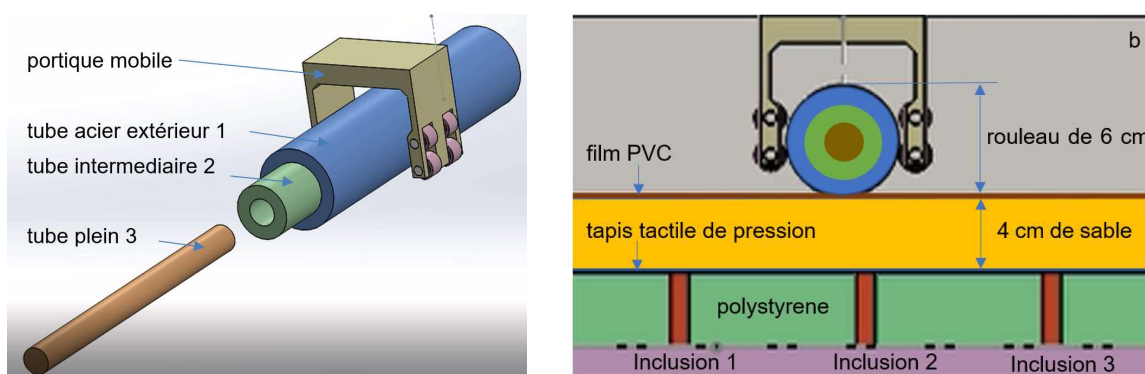


Figure 7 : 3 tubes gigognes forment la charge roulante (a), portique mobile (b)

Un tapis tactile (TactArray, PPS Company©) est placé sur le polystyrène et les 3 têtes d'IR pour mesurer la pression verticale notamment au passage du rouleau-tube. Ce tapis flexible mesure environ 1 mm d'épaisseur. Il est composé de 16×32 cellules de 1 cm².

3.2. Résultats des essais et analyses

On a mesuré par ailleurs la contrainte verticale sous le rouleau-tube⁽¹⁾, immobile, avec le tapis tactile placé d'abord sur la plate forme, à 10×g, entre deux IR : la largeur de l'empreinte du rouleau vaut environ 2 cm à l'échelle du modèle (soit 20 cm à l'échelle du prototype) sous une pression de 57 kPa, soit une valeur proche de la contrainte admissible pour la semelle filante mesurée dans le cas $B/H_m = 0,5$ (voir figure 3.a).

A 10×g, la figure 8 montre l'évolution de la contrainte maximale verticale au fil des allers et retours du rouleau-tube⁽¹⁾ dans la longueur du conteneur, avec le tapis tactile posé sur les IR et le polystyrène. La charge de roulement induit d'importantes variations sur la pression maximale enregistrée, notamment au droit des 3 IR (figure 7.b).

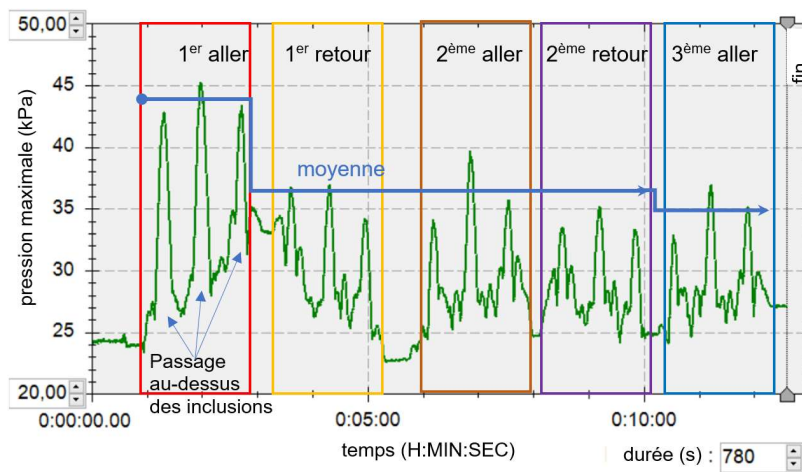


Figure 8 : Evolution de la contrainte verticale maximale mesurée par le tapis tactile sous les passages répétés du rouleau-tube⁽¹⁾.

Lorsque le rouleau-tube⁽¹⁾ passe à la verticale des IR, la contrainte verticale vaut 44 kPa en moyenne au 1^{er} aller, puis 36 kPa au 1^{er} retour, et enfin 35 kPa au 3^{ème} aller.

La figure 9 montre la répartition des contraintes verticales mesurées au-dessus des têtes d'IR et du polystyrène, avant roulage en a), et après 5 va-et-vient du rouleau en b).

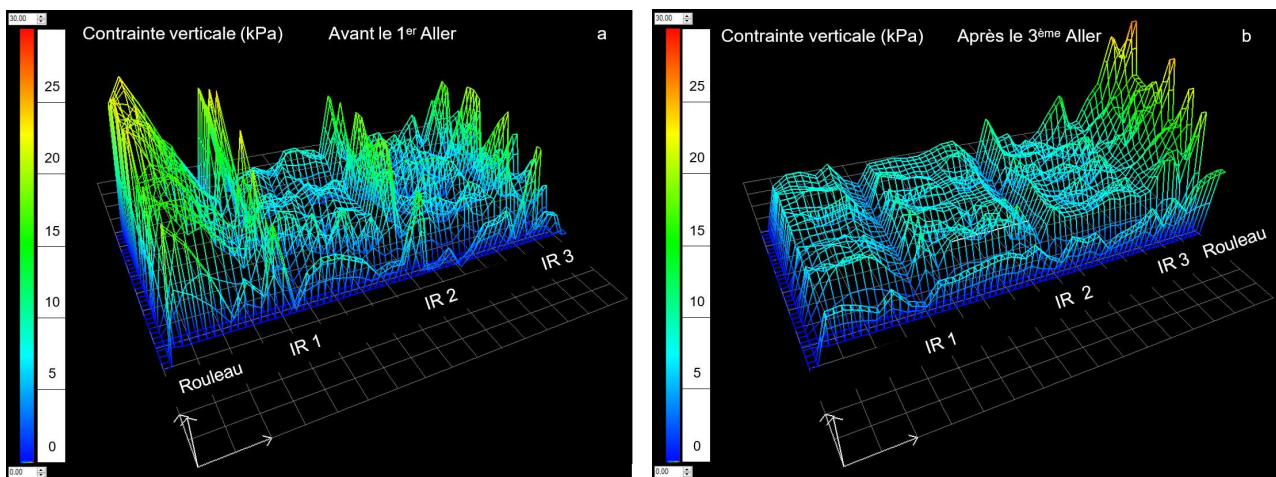


Figure 9 : Répartition des contraintes verticales au-dessus des têtes d'IR et du polystyrène

Avant le roulage, la contrainte verticale exercée par le rouleau-tube⁽¹⁾ sur le polystyrène, après diffusion dans le sable, est proche de celle exercée sur l'IR⁽¹⁾ avec 22 kPa en moyenne. Celles sur l'IR⁽²⁾ et l'IR⁽³⁾ sont plus faibles avec 18 kPa en moyenne. La contrainte moyenne sur le polystyrène est de 7 kPa en accord avec l'épaisseur du sable. La faible contrainte exercée sur le polystyrène qui reste dans son domaine élastique permet de négliger le renfort que pourrait apporter le tapis tactile. Cette répartition périodique des contraintes est due à des effets de voûte dans la PTC sableuse qui se développent entre deux IR adjacentes.

Après 5 passages du rouleau, la répartition des contraintes verticales entre les IR et le polystyrène est inversée. Par ailleurs, on a mesuré un retour élastique des marqueurs fixés au polystyrène. Ainsi, la compression puis la décompression de ce sol meuble analogue au passage du rouleau peuvent créer un effet de voûte inverse au-dessus des IR.

4. Conclusions

Concernant les mécanismes de rupture dans la plate-forme, les essais statiques 2D ont montré l'importance du positionnement de la fondation par rapport aux inclusions, et de sa largeur par rapport à l'épaisseur compressible ou à la distance entre les IR.

Une géogrille de renfort additionnel de forte raideur a permis de doubler la raideur globale de la fondation dans le cas où la semelle est positionnée au-dessus d'une IR.

Enfin, les premières simulations de trafic 2D montrent une inversion des effets de voûte dans la PTC sur la contrainte résiduelle verticale au-dessus des têtes d'IR, du moins pour le modèle étudié. On adjoindra entre autres dans les futurs essais une chaussée modèle.

5. Remerciements

Ce travail est financé par le projet national français ASIRI+ (Amélioration et Renforcement des Sols par Inclusions Rigides), un projet de recherche coopératif géré par l'IREX avec le soutien financier du Ministère de la Transition Ecologique. De plus le matériel est en partie financé par le CPER PRIIC-MER (2014-2020).

6. Références bibliographiques

- ASIRI (French National Research Project on Rigid Inclusions). (2013). Recommendations for the Design, Construction and Control of Rigid Inclusion Ground Improvements, IREX, Presses des Ponts, Paris, France.
- ASIRI+ (Amélioration et Renforcement des Sols par Inclusions Rigides) : <https://asiriplus.fr/> (accessed on 13 dec 2021).
- Briançon L., Thorel L., Simon B. (2020). ASIRI+: French National Research Program on soil Reinforcement with Rigid Inclusions. 4th International Conference on Transportation Geotechnics (ICTG) Chicago, Illinois, USA August 30 - September 2, 2020. Proc. Advances in Transportation Geotechnics IV, Lecture Notes in Civil Engineering 165,. paper 462. 6p. https://doi.org/10.1007/978-3-030-77234-5_54
- Combarieu O. (2008). Remblais sur sol compressible et inclusions rigides. Amélioration de l'approche du dimensionnement. Revue française de géotechnique n° 122, 45-54. <https://doi.org/10.1051/geotech/2008122045>
- Lukiantchuki J.A., Oliveira J.R.M.S., Pessin J., Almeida M.S.S. (2018). Centrifuge modelling of traffic simulation on a construction waste layer. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics 18(6): 290–300, <https://doi.org/10.1680/jphmg.17.00012>
- Stanier S.A., White D.J., Blaber J., Take W.A. (2016). Improved image-based deformation measurement for geotechnical applications, Can. Geotech. J. 53: 727–739, <https://doi.org/10.1139/cgj-2015-0253>