

REMBLAIS DE FAIBLE ÉPAISSEUR SUR SOL MOU RENFORCÉ PAR INCLUSIONS RIGIDES: ESSAIS DE CHARGE ROULANTE 2D

LOW THICKNESS EMBANKMENTS ON SOFT SOIL REINFORCED WITH RIGID INCLUSIONS: 2D ROLLING LOAD TESTS

Thierry Dubreucq¹, Luc Thorel¹, Fatima Osman², Alexandre Jagu¹, Stéphane Lerat¹, Alain Neel¹, Patrick Gaudicheau¹, Philippe Audrain¹

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

² Université Grenoble Alpes, Master en Génie Civil

RÉSUMÉ – L'effet des charges roulantes sur une plateforme granulaire de faible épaisseur, fondée sur un sol mou renforcé par inclusions rigides et une géogridde éventuelle, est étudié en centrifugeuse avec un modèle 2D réduit au 1/10^{ème}. Les modélisations du trafic à l'aide d'un rouleau pesant ont montré une évolution du transfert de charge au fil des passages.

ABSTRACT – The effect of rolling loads on a thin granular subgrade, based on a soft soil reinforced with rigid inclusions and possibly with a geogrid, is studied using a 2D model reduced to 1/10th in a centrifuge. Physical modelling of the traffic using a weighted roller showed an evolution in load transfer over time.

1. Introduction

Dans le cadre du PN ASIRI+ (2021-2024) portant sur l'amélioration et le renforcement des sols par inclusions rigides, le laboratoire « Centrifugeuses Géotechniques » de l'Université Gustave Eiffel a étudié l'effet d'une charge roulante sur une plateforme granulaire de faible épaisseur fondée sur un sol mou analogique renforcé par des inclusions rigides (IR).

Sur la figure 1, le modèle réduit à l'échelle 1/10^{ème} réalisé en géométrie 2D est constitué d'une plateforme sableuse de transfert de charge (PTC) d'épaisseur $H_m = 4/40$ cm (grandeur modèle/grandeur prototype), renforcée ou non par une géogridde.

Des plaques verticales métalliques d'épaisseur $a = 1/10$ cm sont espacées d'un entre-axe $s = 0,1/1$ m. Le rouleau disposé sur la PTC a un diamètre $D = 6/60$ cm pour simuler un trafic linéaire. La PTC est surmontée d'une couche de roulement, soit en PVC, soit en caoutchouc épais.

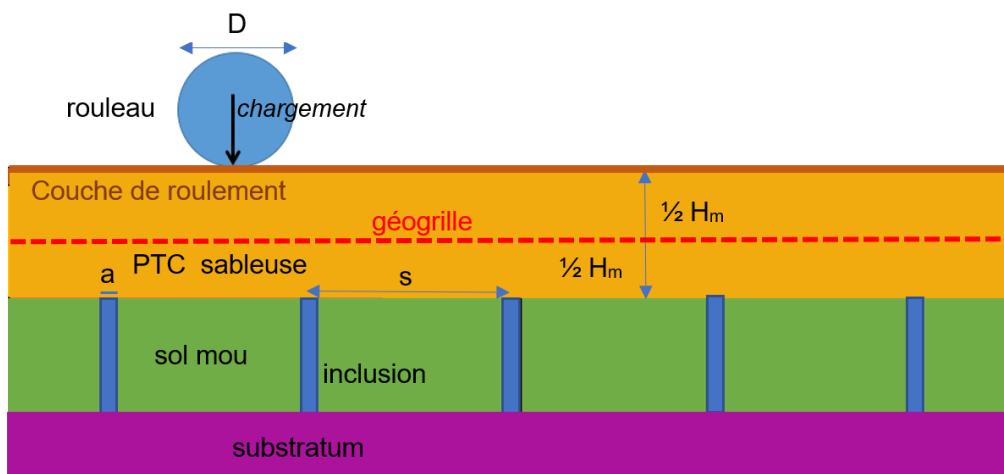


FIGURE 1 : Schéma du modèle physique 2D – rouleau pesant en translation

2. Conception du chargement roulant

Le dispositif de la charge roulante a été développé dans une géométrie 2D. La charge roulante a été évaluée grâce aux essais de chargement statiques réalisés antérieurement sur une fondation superficielle filante (Dubreucq et al., 2022).

Sur la figure 2, le modèle est placé dans un conteneur à face transparente pour permettre l'analyse des images du chargement roulant grâce à une caméra embarquée, l'ensemble étant soumis à une accélération centrifuge de $N \times g = 10 \times g$ appliquée à la base du rouleau. Le conteneur mesure 80/800 cm de long et $l = 25/250$ cm de large.

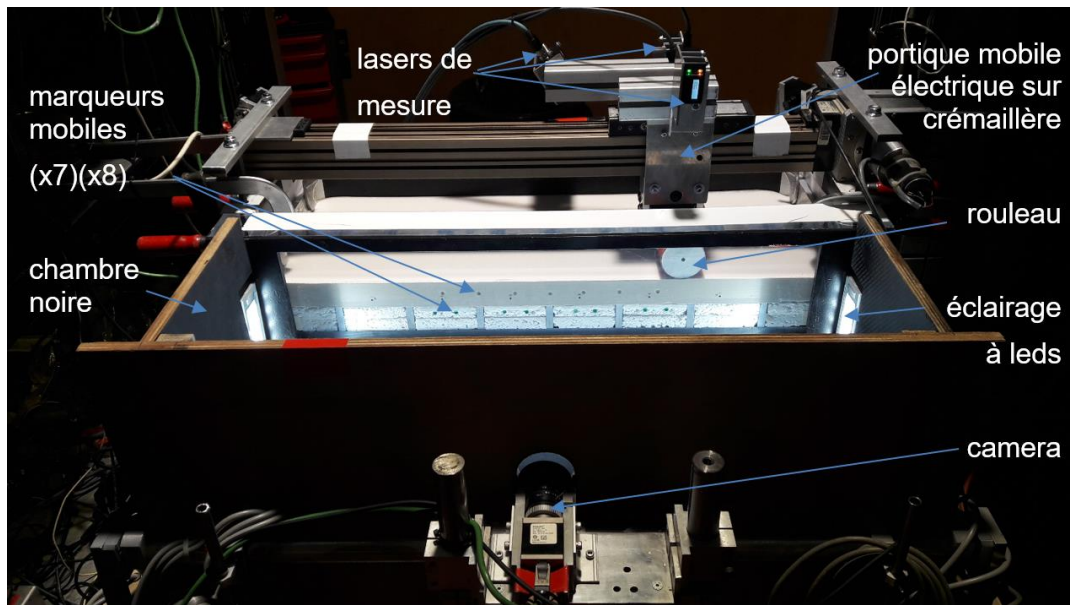


Figure 2 : Dispositif de chargement roulant dans le conteneur à face transparente installé dans la nacelle de la nacelle de la centrifugeuse.

La PTC est constituée d'un sable de Fontainebleau NE 34 ($d_{50} = 0,21$ mm) moyennement dense d'indice de densité $I_d = 0,73$, mis en œuvre par pluviation dans le conteneur. Sa masse volumique est de $\rho = 1648$ kg/m³. Son angle de frottement interne est égal à 39 degrés.

Le sol compressible est simulé avec un polystyrène expansé de masse volumique 15,5 kg/m³ (Th.38, produit Knauф©) pour reproduire un sol mou associé à une résistance au cisaillement non drainée de 15/15 kPa environ et un module de 1/1 MPa. Deux couches superposées de 2/20 cm d'épaisseur sont disposées au-dessus du substratum.

Avec un coefficient de Poisson quasi nul, le polystyrène ne transmet pratiquement pas de pression horizontale sur les IR lorsqu'il est comprimé. Ainsi, on minimise le frottement latéral négatif sur les IR consécutivement au chargement roulant et la flexion des IR.

La charge roulante est constituée d'un tube⁽¹⁾ extérieur en acier de diamètre $D^{(1)} = 6/60$ cm à l'échelle du modèle (figure 3), à l'intérieur duquel peuvent coulisser deux tubes plus petits: $D^{(2)} = 4/40$ cm et $D^{(3)} = 2/20$ cm, de masses respectives 2,9 ; 1,8 et 0,6 kg pour simuler des charges variables (tubes⁽¹⁾ ou (1+2) ou (1+2+3)). La vitesse de translation du rouleau est de 25/25 cm/min.

On ne présentera que les résultats pour la charge roulante à l'Etat Limite de Service (ELS) de 2,9 kg (soit le tube extérieur seul) qui ne poinçonne pas le sol mou de fondation (on ne dépasse pas 0,4 fois la contrainte de plasticité du polystyrène qui vaut 80/80 kPa).

Sur la figure 3.b, un film plastique PVC de 0,5/5 mm d'épaisseur tenu à ses extrémités est posé sur la PTC pour éviter l'ensablement du rouleau en translation.

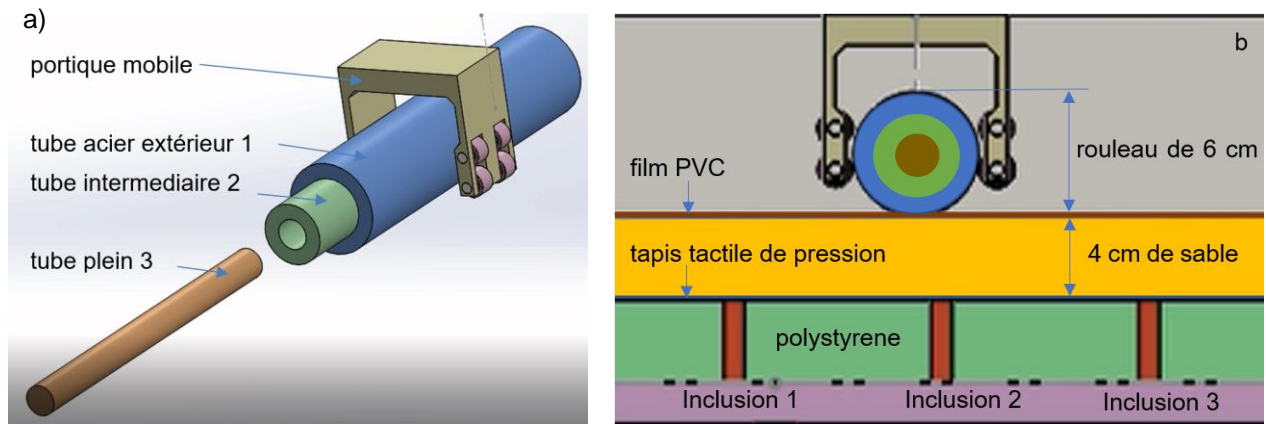


Figure 3 : a) 3 tubes gigognes forment la charge roulante ; b) portique mobile

La pression sur le sol mou est mesurée avec un tapis tactile posé sur les IR et le sol mou. Ce tapis (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, sans que celle-ci ne dépasse 70/70 kPa de pression limite.

Ce tapis flexible mesure environ 1/10 mm d'épaisseur. Il est composé de 16x32 cellules de 1/100 cm². Des essais sans tapis et avec tapis (non rapportés ici) ont montré que celui-ci ne modifiait pas le transfert de charge sur les IR, sous la charge roulante de service.

Sur la figure 4.a, les IR (2D dans le modèle) sont constituées de plaques d'aluminium rigides fixées sur une plaque d'aluminium épaisse qui simule le substratum. Ces IR mesurent a= 1/10 cm d'épaisseur et 25/250 cm de longueur. Elles sont disposées tous les s= 10/100 cm. Le taux de couverture des IR vaut donc $\alpha= 10\%$.

Deux capteurs d'effort vertical sont fixés entre la base de l'IR² central et la plaque substratum. Les IR sont toutes encastrées en pied.



Figure 4 : a) IRs aluminium encastrées dans une plaque aluminium rigide de fond ; implantation des capteurs de force dans l'IR² centrale – Force Q_p en tête ; b) électro-aimant sous le portique.

Dans le but de modéliser un trafic en aller simple (figure 4.b), on a fixé un électro-aimant de 180 daN de capacité sous le portique, pour suspendre magnétiquement et ramener le rouleau à son point de départ après chaque aller.

Sur la figure 5, la géogrille est en fibre de verre à maille carrée de 1,6/160 x 1,6/160 mm² et de 0,4/4 mm d'épaisseur (Windhager©). Sa raideur J est forte et vaut 1/10 MN/ml.

Pour simuler un géotextile anticontaminant, un géotextile non tissé de 0,4/4 mm d'épaisseur a été disposé sur les têtes d'IR et le polystyrène. Sa raideur J est faible et vaut 16/160 kN/ml. Ce non tissé participe donc très peu au renfort vu sa très grande déformabilité.

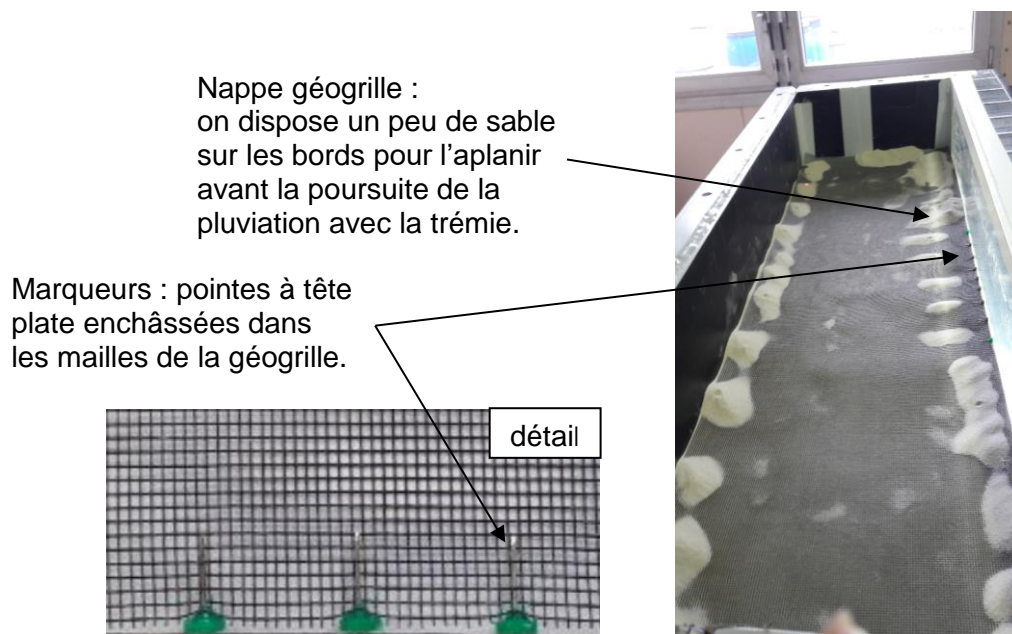


Figure 5 : Pose de la géogrille à mi-couche de la PTC au cours de la pluviométrie.

3. Résultats d'essais et analyse

La figure 6 (resp. 7) montre les positions amont et aval du rouleau au cours des 5 translations, ainsi que les trajectoires du marqueur central au-dessus de l'IR² et du marqueur entre IR¹ et IR² : a) en aller-retour, ou b) en aller simple, sans (resp. avec) géogrille. Celles-ci sont calculées par analyse d'images à l'aide du logiciel Picture (UGE).

Sans géogrille, après une translation de 0,4/4 mm qui accompagne le 1^{er} passage du rouleau de gauche à droite, le déplacement horizontal des grains devient alternatif en aller-retour, tandis que la translation se poursuit en aller simple, en s'atténuant. Avec géogrille, les déplacements des grains sont limités en aller-retour. Les allers simples renforcent l'effet de confinement apporté par la géogrille. Une analyse d'images (non rapportée) a montré le retour élastique des marqueurs solidaires du sol mou, après chaque passage de la charge.

En aller-retour, la figure 8 montre l'évolution de la charge verticale Q_p en tête de l'IR², avec ou sans géogrille, sous la charge roulante ELS. Une fois l'accélération centrifuge requise atteinte ($10 \times g$), un effet de voûte initial ($t=0s$) est décelable avec une charge de l'ordre de 4/400 et 6/600 daN, sans et avec géotextile respectivement. Celles-ci sont supérieures à la charge calculée sans effet de voûte, à partir du poids unitaire et de l'épaisseur de la PTC : $\rho \cdot N \cdot g \cdot H_m \cdot l \cdot a = 1648 \times 10 \times 9,81 \times 0,04 \times 0,25 \times 0,01 = 1,6/160$ daN.

Après le 1^{er} aller, le roulement modifie les chaînes de force entre les grains de sable, annihilant cet effet de voûte au vu des déformations de cisaillement avec l'analyse d'images (non rapportée). Sans la géogrille, la charge roulante modifie à la baisse le transfert de charge avec les passages. Le pic de charge Q_p diminue ainsi après le 1^{er} passage, passant de 12/1200 à 11/1100 daN.

Entre un aller et un retour, Q_p approche par valeur inférieure la charge calculée sans effet de voûte. En effet, la compression puis la décompression élastique du sol mou au passage du rouleau créent un effet de voûte inverse au-dessus des IR, en accord avec la baisse de pression verticale enregistrée par le tapis tactile au-dessus des IR et leur encastrement en pied (Dubreucq et al., 2022).

Avec la géogrille, le pic de charge Q_p diminue après le 1^{er} passage, passant de 19/1900 à 17/1700 daN. La charge Q_p en tête de l'IR² est toujours plus élevée que celle sans géogrille (+54%) en moyenne aux pics. Enfin les charges minimales avec géogrille sont cette fois-ci supérieures au poids du sable au-dessus de l'IR² centrale.

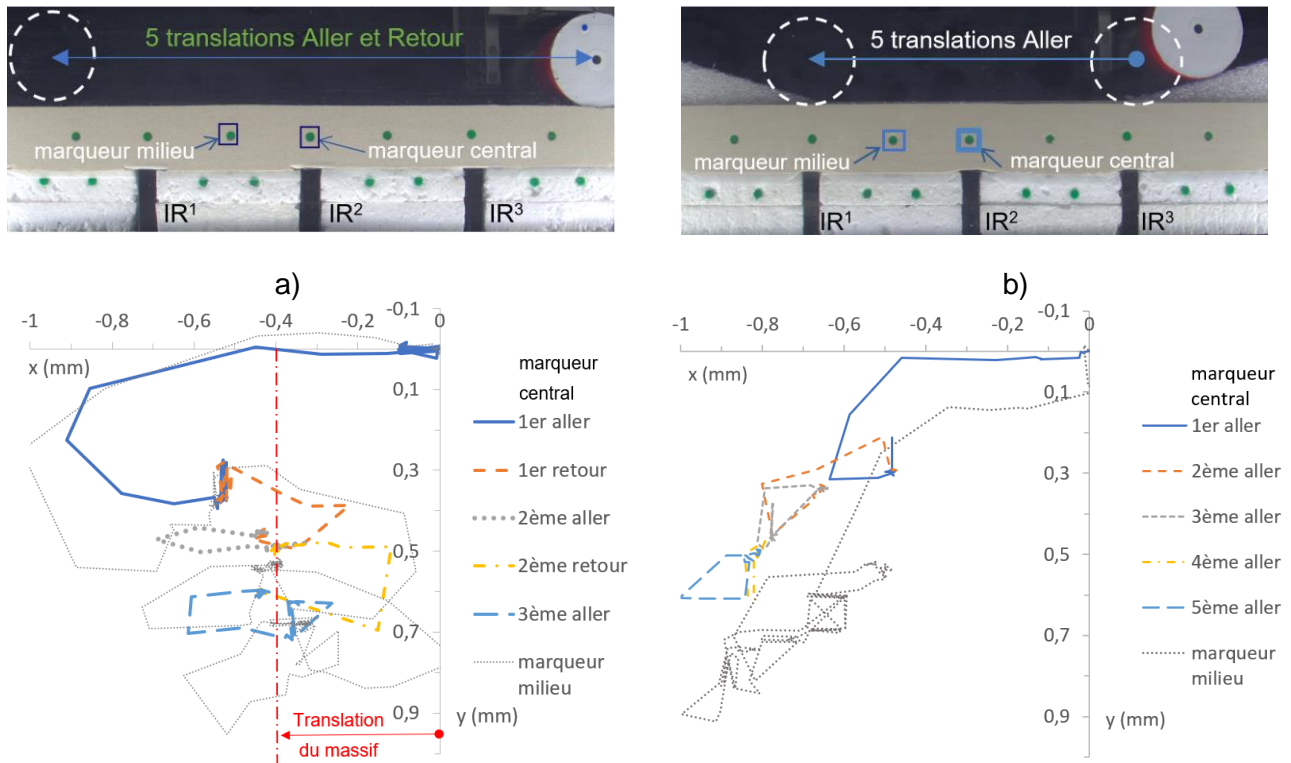


Figure 6 : trajectoires de 2 marqueurs, au-dessus de l'IR², et entre l'IR² et l'IR³, sans géogrille : a) en Aller-Retour ; b) en Aller simple - charge roulante ELS de 2,9 kg

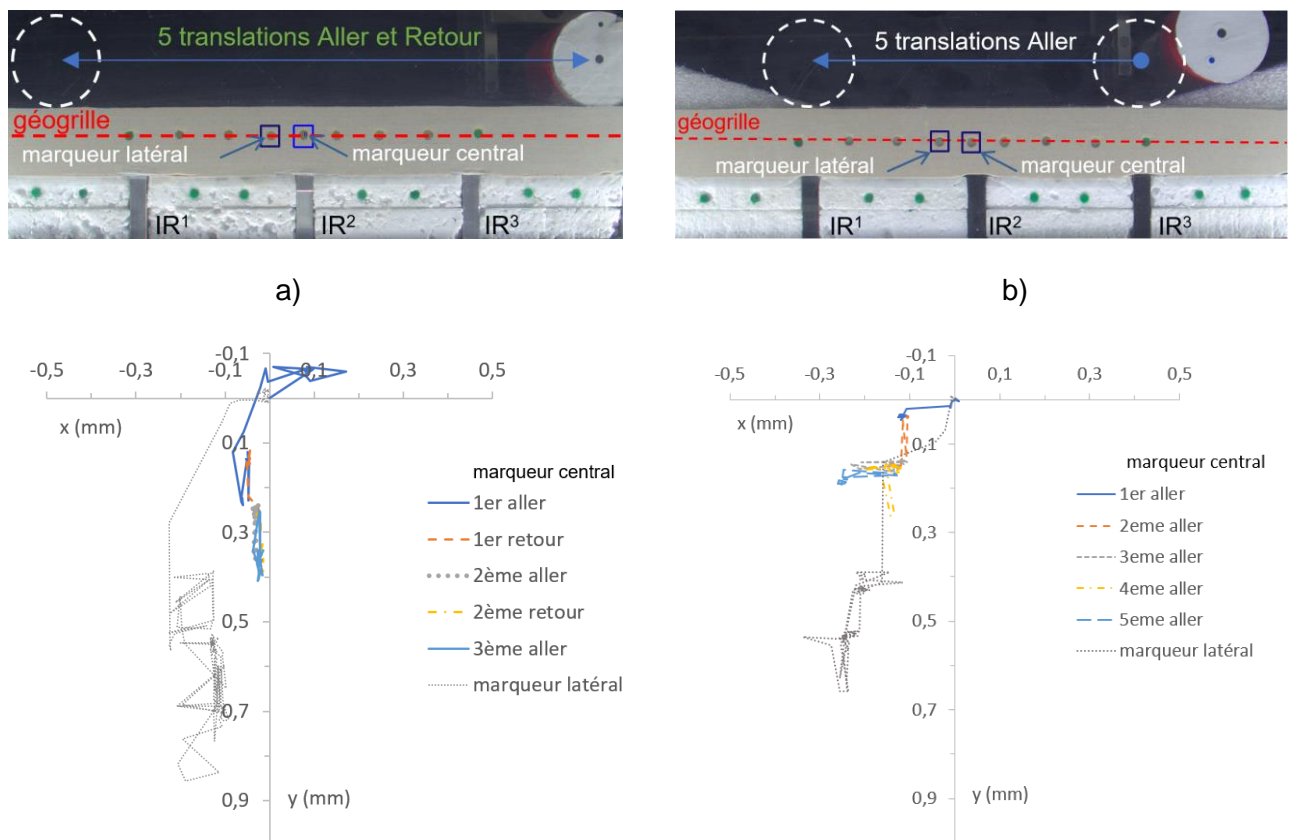


Figure 7 : trajectoires de 2 marqueurs (au-dessus et latéral à l'IR²), avec géogrille ; a) en Aller-Retour ; b) en Aller simple - charge roulante ELS de 2,9 kg.

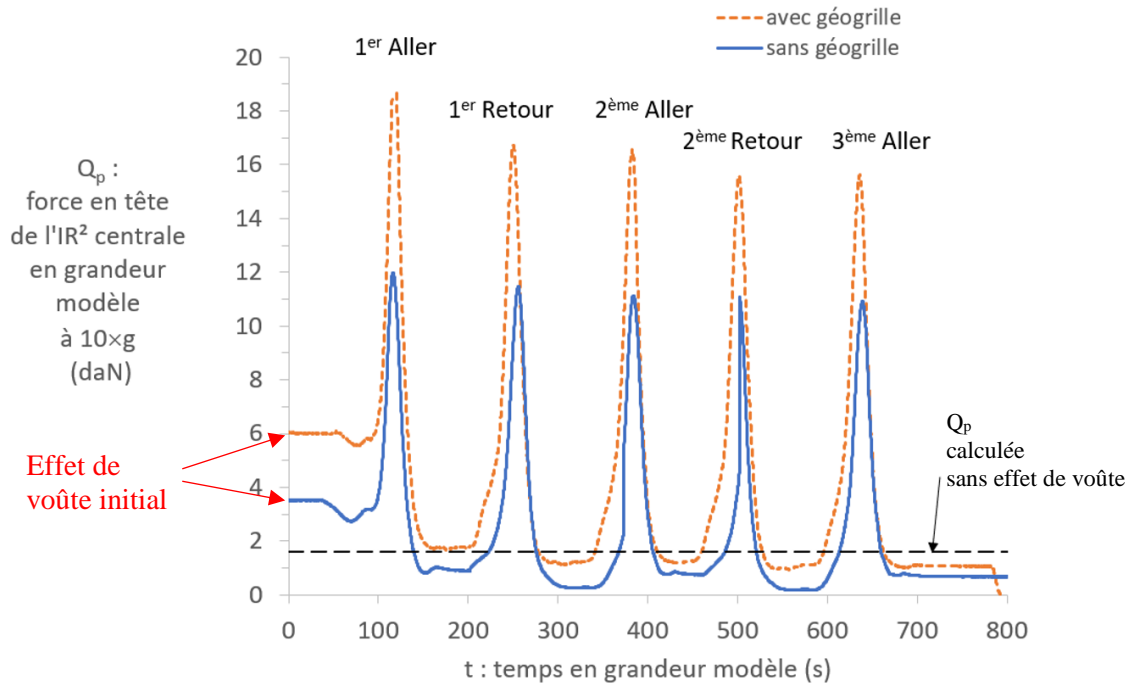


Figure 8 : Charge verticale en tête de l'IR² centrale en allers-retours, avec ou sans geogridde.

En aller-simple, en lien avec le mouvement des grains dans la PTC (figures 6 et 7), la figure 9 montre les transferts de charge sur l'IR² centrale avec une charge roulante ELS, sans et avec géogridde à mi-PTC.

L'écart relatif aux pics entre ces 2 transferts semble tendre vers zéro au fil des passages : +21% pour la géogridde au 1^{er} aller, et +7% au 5^{ème}. On note que l'état initial et l'état au 1^{er} pic notamment différent un peu entre les figures 8 et 9 malgré le soin apporté à la confection des modèles physiques.

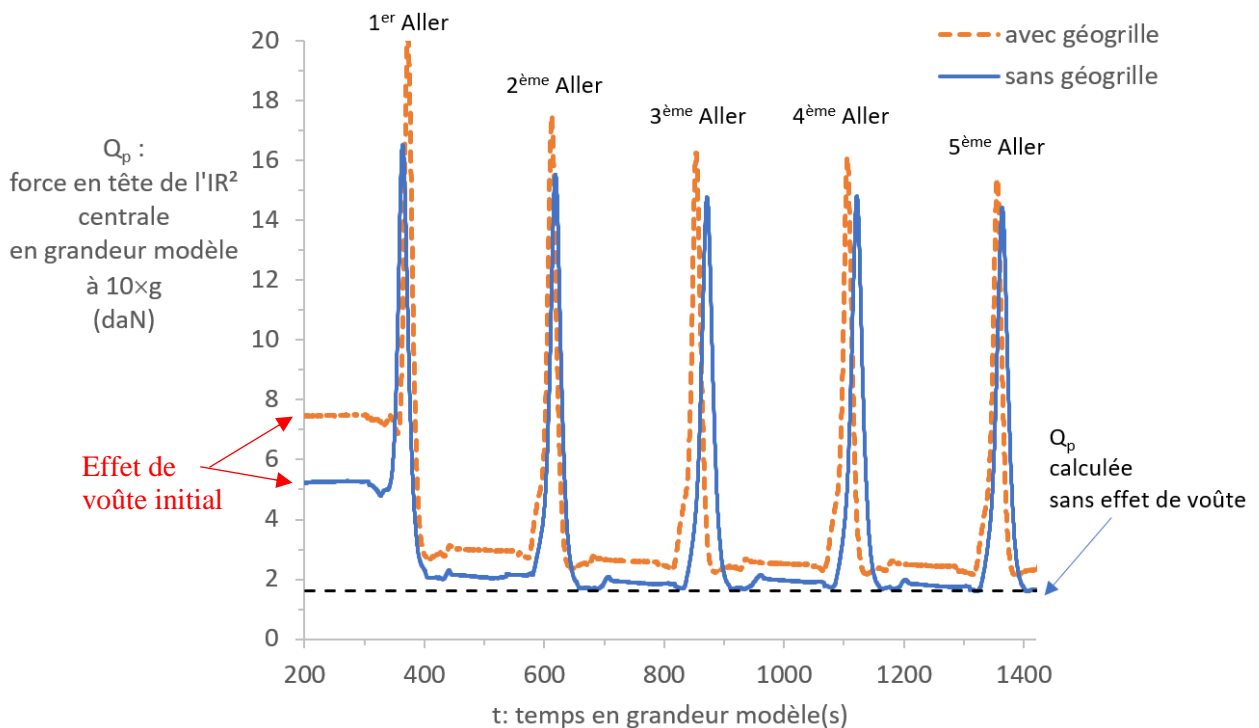


Figure 9 : Charge verticale en tête de l'IR² centrale en allers simples, avec ou sans géogridde.

Osman (2023) a comparé un modèle avec la géogridde disposée directement sur les IR (figure 10.a) et un modèle avec la géogridde disposée au milieu de la PTC (figure 10.b).

La géogridde à la base de la PTC est *recouverte du géotextile non tissé* ce qui empêche les grains de sable de pénétrer dans les mailles (figure 5). Le trafic est en aller-retour.

Une couche de roulement de 5/50 mm en caoutchouc (module de 10/10 MPa) est cette fois-ci placée sur la PTC. Le rouleau-tube de 2,9 kg simule toujours la charge roulante ELS.

Sur la figure 10.c, la charge verticale en tête de l'IR² centrale est de l'ordre de 15/1500 daN avec la géogridde à mi-PTC contre 11/1100 daN avec la géogridde à la base de la PTC (+36%).

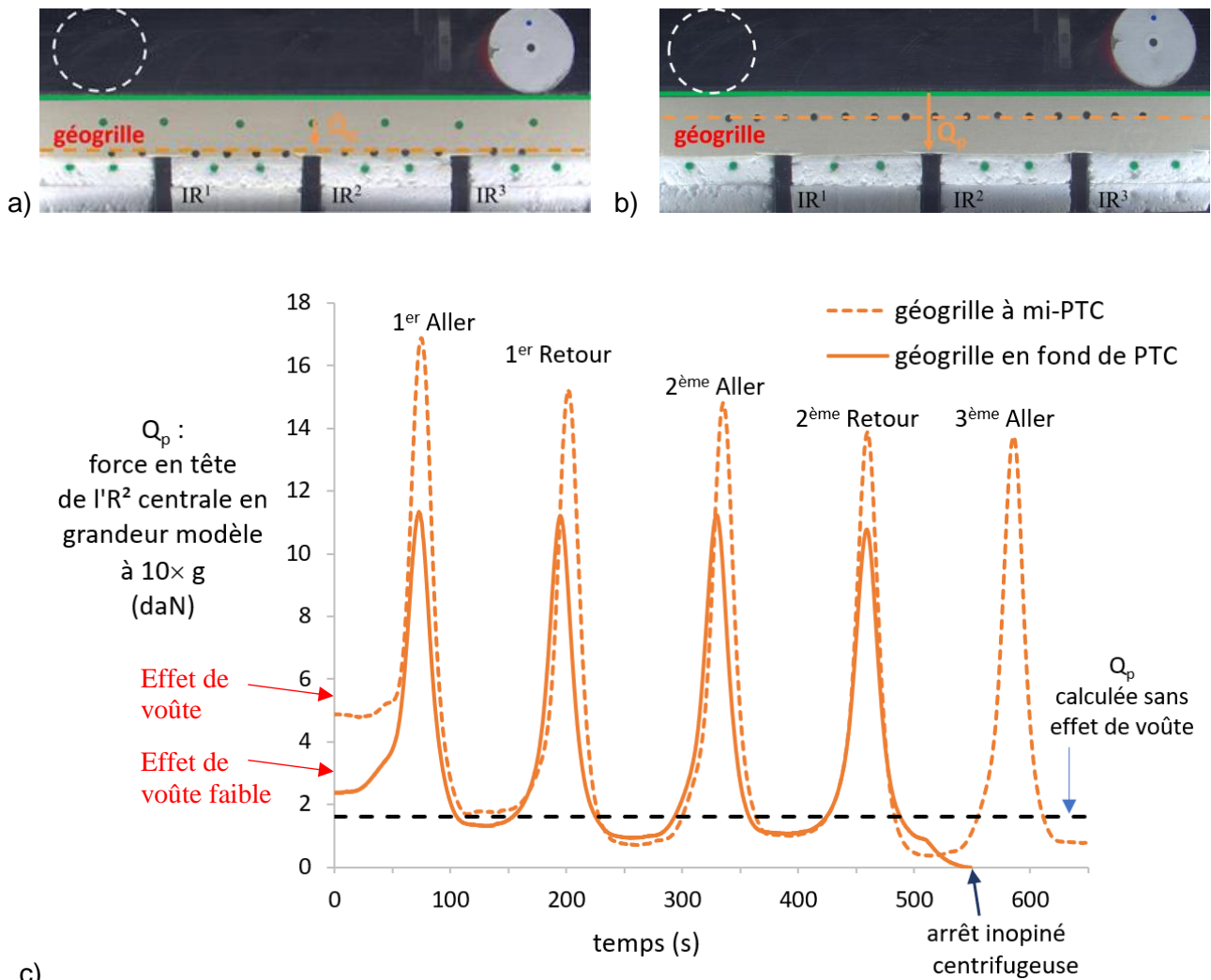


Figure 10 : a) Géogridde au-dessus des IR + couche de roulement; b) géogridde à mi-PTC+ couche de roulement ; c) Charge verticale en tête de l'IR² centrale au cours des allers-retours.

L'effet de voûte initial est environ deux fois plus faible avec le renforcement par géogridde posée directement sur les IR.

Avec la charge roulante ELS, le fonctionnement en « membrane » de ce renforcement s'avère moins efficace que le fonctionnement en « confinement » des grains apporté par la géogridde disposée à mi-PTC. Un tel renforcement posé sur les IR ne semble même pas plus efficace que le modèle sans géogridde (figure 8). Avec le renforcement par géogridde à mi-PTC, l'écart entre les pics se réduit aussi au fil des passages.

Enfin, la présence de la couche de roulement ne semble pas impacter significativement le transfert de charge vers les IR.

4. Conclusions

Pour simuler un trafic linéaire sur une PTC sableuse surmontant un sol mou renforcé par des IR, on a fait circuler un rouleau dont le poids correspond à un chargement de type ELS.

Les modélisations physiques du trafic en 2D en centrifugeuse montrent une évolution du transfert de charge avec les roulages successifs. Le premier passage du rouleau annihile ainsi l'effet de voûte initialement présent entre les IR consécutif à la montée en g.

L'analyse d'images montre que tout le massif sableux se déplace latéralement lors du premier passage, et dans une moindre mesure en présence de la géogrille. Au fil des allers simples, les grains de sable au sein de la PTC se déplacent chacun vers un point d'accumulation et se bloquent les uns les autres.

La présence d'une géogrille à mi-PTC augmente les efforts en tête des IR dans un rapport de 1,5 environ lors des franchissements, comparativement au modèle sans géogrille.

En lien avec les mouvements des grains observés au sein de la PTC sableuse, le transfert de charge sur les IR avec une charge roulante *en allers simples sans géogrille* devient équivalent au fil des passages au transfert de charge *en allers-retours avec géogrille*.

Enfin, l'altitude de la géogrille au sein de la PTC modifie de manière importante l'effort en tête des IR au passage de la charge roulante en aller-retour: il augmente d'environ un tiers avec la géogrille positionnée à mi-hauteur de la PTC, par comparaison avec la géogrille posée sur les IR (et recouverte d'un non tissé). Ainsi le fonctionnement en *confinement* du sable à mi-épaisseur de la PTC est plus efficace que le fonctionnement en *membrane* d'un tel renforcement posé directement sur les IR, du moins vis-à-vis d'une charge roulante ELS.

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.

6. Références bibliographiques

ASIRI (French National Research Project on Rigid Inclusions). (2013). Recommandations pour la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des ouvrages sur sols améliorés par inclusions rigides verticales, IREX, Presses des Ponts, Paris, France.

ASIRI+ (Amélioration et Renforcement des Sols par Inclusions Rigides) :

<https://asiriplus.fr/>

Dubreucq T., Thorel L., Jagu A., Lerat L., Alain Neel A., Gaudicheau P., Audrain P., Effet en 2D d'une charge statique ou roulante sur une plateforme renforcée par des inclusions rigides, JNGG 2022, Lyon

Osman F, 2023, Macrogravity model tests of foundations on rigid inclusions subjected to rolling loads, Master in Civil Engineering, International Program "Geomechanics, Civil Engineering and Risks", Université Grenoble Alpes.