

Remblais de faible épaisseur sur sol mou renforcé par inclusions rigides: essais de charge roulante 3D

Low thickness embankments on soft soil reinforced with rigid inclusions: 3D rolling tests

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

¹ *Université Gustave Eiffel, Laboratoire Centrifugeuse Géotechnique, Nantes, France*
thierry.dubreucq@univ-eiffel.fr

RESUME : Dans un modèle réduit, à l'échelle 1/10^{ème}, centrifugé, on étudie le report des efforts dus à une charge roulante, vers les inclusions rigides d'un sol renforcé en conditions tridimensionnelles, et incluant une géogridde. Avec un taux de couverture de 4,5%, la fondation composite est sollicitée par une charge roulante localisée de même largeur que l'espacement entre les inclusions rigides. Trois localisations sont étudiées, montrant des reports d'efforts variables dans l'espace et le temps, lors du passage de la roue.

ABSTRACT: In a scale-down, 1/10th, centrifuge model, we study the transfer of forces due to a rolling load, to the rigid inclusions of a reinforced soil under three-dimensional conditions, and including a geogrid. With a coverage ratio of 4.5%, the composite foundation is stressed by a localized rolling load of the same width as the spacing between the rigid inclusions. Three locations are studied, showing variable transfers of forces in space and time, when the wheel passes.

Mots-clés: amélioration des sols; charge roulante; modélisation physique; centrifugeuse; trafic

1 INTRODUCTION

L'amélioration des sols meubles à l'aide d'inclusions rigides verticales (IR) est aujourd'hui une technique largement répandue (Thorel et al., 2007 ; ASIRI, 2013; van Ekelén, 2020).

Dans le cadre du projet ASIRI (Amélioration et Renforcement des Sols par Inclusions RIgides) lancé en 2019 (Briançon et al., 2020), de nouvelles pistes de recherche ont été explorées, notamment le cas des charges roulantes sur des plateformes de transfert de charge (PTC) granulaires minces, un cas de figure qui n'avait guère retenu l'attention dans les études antérieures (Lukiantchuki et al., 2018).

Les efforts avaient surtout portés sur des essais de chargement vertical cyclique réalisés sur des modèles à l'échelle du laboratoire à 1×g (Wu et al., 2024 ; Liu et al., 2025).

Après une série de modélisations en centrifugeuse en deux dimensions (2D) au moyen d'un rouleau pesant et d'inclusions rigides (IRs) planes (Dubreucq et Thorel, 2025), les recherches portent désormais sur la modélisation en trois dimensions (3D) du comportement d'une PTC mince, placée sur un sol mou renforcé cette fois-ci par des IRs cylindriques, et soumise au trafic d'un roue rigide de faible largeur.

2 DISPOSITIF EXPERIMENTAL

2.1 Programme expérimental

Le modèle réduit au 1/10^{ème} est toujours constitué d'une plateforme sableuse de transfert de charge (PTC) d'épaisseur $H_{PTC} = 4/40$ cm (grandeur modèle/grandeur prototype), renforcée par une géogridde de forte raideur (GGR) (figure 1).

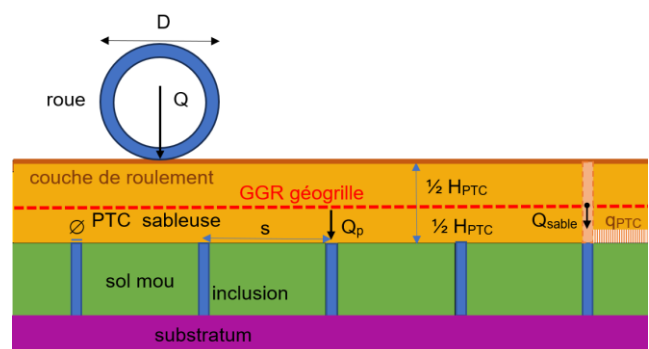


Figure 1 : Modèle 3D en coupe sur une ligne d'IRs

Les IRs de diamètre $\varnothing = 1,2/12$ cm forment un réseau à maille carrée, avec un entre-axe $s = 5/50$ cm. Le dispositif de la charge roulante a été développé dans une géométrie 3D. Le taux de couverture des IRs vaut $\alpha = 4,52$ %.

Pour simuler un trafic linéaire, la roue posée sur la PTC a un diamètre $D = 6/60$ cm et une largeur de $l = s = 5/50$ cm. La PTC est surmontée d'une fine couche de roulement en PVC.

Le dispositif de mesures est identique à celui du modèle 2D (figure 2, Dubreucq et al. 2022). Le modèle est placé dans un conteneur à face transparente pour permettre l'analyse des images du chargement roulant grâce à une caméra et un éclairage embarqués.

Le conteneur mesure 80 cm de long et 25 cm de large. Le modèle est soumis à une accélération centrifuge $N_g \times g = 10 \times 9,81$ m/s² appliquée à la base de la roue.

Le modèle réduit est conçu selon les lois d'échelle classiques de la modélisation physique appelées dans le tableau 1 (Garnier et al., 2001).

Tableau 1. Géométrie et facteurs d'échelle à $N_g \times g = 10 \times g$.

paramètres	unité	prototype		modèle	
H_{PTC}	cm	1	40	$1/N_g$	4
\varnothing	cm	1	12	$1/N_g$	1,2
s	cm	1	50	$1/N_g$	5
l	cm	1	50	$1/N_g$	5
D	cm	1	60	$1/N_g$	6
$\alpha = \pi \varnothing_{IR}^2 / 4s^2$	%	1	4,52	1	4,52
H_{PTC}/s	%	1	0,8	1	0,8

Tableau 2. Chronologie des essais (de gauche à droite)

chargement	roues « jumelées »		roue unique	
trafic	3 allers et 2 retours (3×A+2×R)			
axe de la roue par rapport aux IRs	au-dessus de la 1 ^{er} ligne, derrière le plan de symétrie de la vitre		au-dessus de la 3 ^{ème} ligne	à cheval sur les 2 ^{ème} et 3 ^{ème} lignes
géogrille	coupure longitudinale le long de la vitre		continue (sans effet de bord du conteneur)	

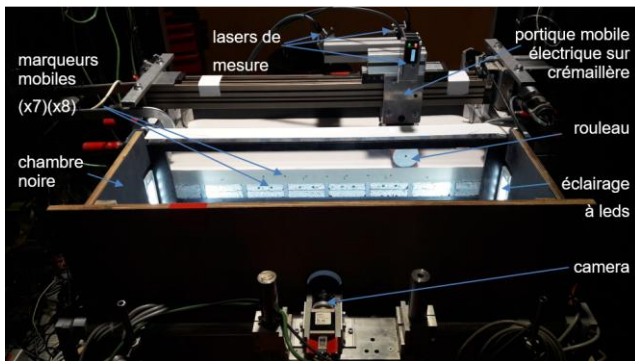


Figure 2: Dispositif de roulement (sur IRs 2D ou 3D) dans le conteneur à face transparente; dispositif de prise d'images

2.2 Charge roulante

La charge modèle est une roue constituée d'un court tube épais, en acier, de masse $m = 607$ g, d'une largeur $l = 5$ cm et d'un diamètre extérieur $D = 6$ cm. Cette largeur est égale à l'espacement entre les IRs. La vitesse de translation du portique mobile qui pousse la roue est fixée à 25 cm par minute (figure 3).

Un film PVC très flexible de 0,5 mm d'épaisseur placé sur la PTC empêche la roue de s'enfoncer dans le sable pendant les mouvements aller-retour, et constitue un renforcement négligeable. La roue est positionnée sur le film PVC avant la phase d'accélération centrifuge.

2.3 Instrumentation

Les IRs en aluminium de diamètre $\varnothing = 12$ mm sont encastrées en pied dans une plaque d'aluminium épaisse. 7 capteurs d'effort vertical sont fixés à la base de certaines IRs et la plaque substratum (figure 5).

La contrainte verticale sur la couche de polystyrène $\sigma_{v(\text{poly})}$ est mesurée à l'aide d'un tapis tactile flexible (1 mm d'épaisseur ; 16 cm de largeur ; 32 cm de longueur) (TactArray, PPS Company©), composé de 16×32 cellules tactiles de 1 cm² (figure 4.a), avec une résolution de 0,02 kPa sur une plage de mesure complète de 70 kPa.

Deux configurations, l'une avec tapis tactile et l'autre sans, ont été testées afin de vérifier que le tapis n'introduit pas de renforcement supplémentaire. En plaçant avec précision ce tapis tactile, une cellule de mesure peut alors couvrir chacune des têtes d'IRs.

Un capteur de déplacement laser (précision de $\pm 0,1$ mm, Baumer©), monté sur le portique mobile mesure les déplacements verticaux de la roue positionnée juste derrière la vitre (figure 2).

Dans la configuration testée, la caméra de prise d'images (acA4112-8gm/gc, Basler©) offre une résolution inférieure à 0,1 mm à l'échelle du modèle. Leur analyse permet d'évaluer les déformations du sable derrière la vitre.

Des marqueurs composés d'une pointe fixée au bord latéral de la géogrille et d'une tête enduite de graisse pour maintenir le contact avec la vitre permettent de suivre les déplacements de la géogrille derrière la vitre (figure 4.b). L'analyse des images n'est pas présentée dans cet article.

2.4 Matériaux

Dans des conditions réelles, la courte durée des charges roulantes par rapport aux temps de consolidation signifie que les sols argileux présentent généralement un comportement non consolidé et non drainé, et une réponse de déformation quasi élastique.

Dans les modèles d'essai, ce comportement est simulé à l'aide d'un polystyrène expansé (produit Th.38, Knauf©), de poids volumique $15,5 \text{ kg/m}^3$ et un module d'élasticité E_{poly} égal à 1 MPa déterminé à l'œdomètre. Sa limite d'élasticité est d'environ 80 kPa , ce qui garantit que la charge roulante à l'état limite de service Q_{ELS} n'entraînera pas son poinçonnement.

Le polystyrène est soigneusement installé dans le modèle en 2 couches de 2 cm d'épaisseur avec un centrage et un diamètre précis des trous de réservation pour éviter tout frottement latéral avec les IRs. Grâce à son coefficient de Poisson proche de zéro, le polystyrène comprimé ne transmet pratiquement aucune contrainte latérale. En conséquence, la charge verticale Q_p au sommet des IRs est égale à la force mesurée par le capteur vertical (fixé à la base, figure 5) moins le poids propre de l'inclusion.

La PTC est constituée d'un sable de Fontainebleau NE 34 ($d_{50} = 0,21 \text{ mm}$) moyennement dense d'indice de densité $I_d=0,73$, mis en œuvre par pluviation dans le conteneur. Sa masse volumique est de 1648 kg/m^3 . Son angle de frottement interne est égal à 41 degrés (Dano et al., 2024).

La fibre de verre GGR (Windhager©) est placée à mi-hauteur de la PTC, et couvre toute la surface du conteneur (figure 4.b). Elle présente une maille carrée de $1,6 \text{ mm}$ de côté pour une épaisseur de $0,4 \text{ mm}$. Avec une résistance à la traction de 10 kN/m à 1% d'allongement, elle offre une rigidité à la traction élevée de 1 MN/m en grandeur modèle.

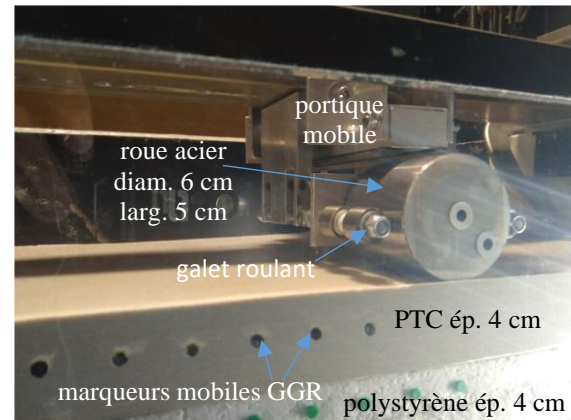


Figure 3 : Modèle 3D ; roue derrière la vitre du conteneur

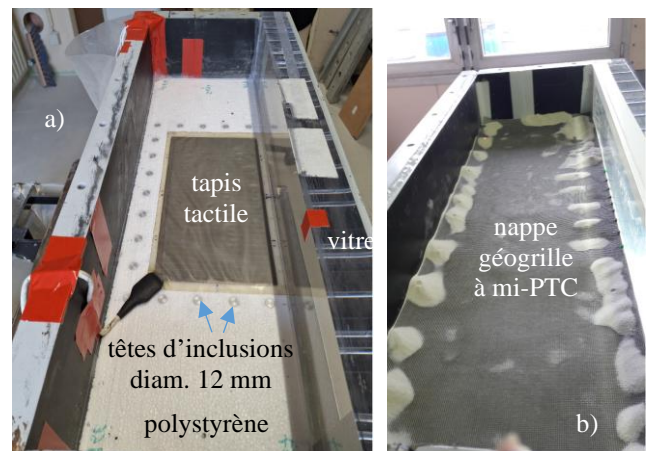


Figure 4 : construction du modèle : a) tapis tactile avant la pluviation du sable; b) pose de la GGR à mi-PTC.

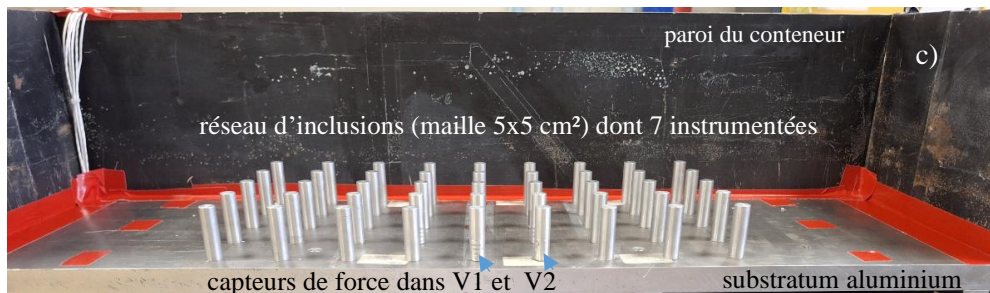


Figure 5 : Réseau d'inclusions dont 7 instrumentées à leur base; capteurs V^1 et V^2 sur la 1^{ère} ligne derrière la vitre (enlevée)

Conformément aux lois de similitude, le tableau 3 résume la correspondance entre les propriétés des matériaux et le poids de la roue. Pour rappel, les contraintes dans le modèle centrifugé et celles dans le prototype sont identiques afin de reproduire des frottements internes identiques.

Table 3: Caractéristiques des matériaux et du chargement.

matériaux et chargement ELS	unité	prototype		modèle à $N_g \times g$	
ρ_d	kg/m^3	1	1648	1	1648
J_{GGR}	N/m	1	10^7	$1/N_g$	10^6
$E_u = E_{\text{poly}}$	Pa	1	10^6	1	10^6
Q	N	1	5950	$1/N_g^2$	59,5

3 RESULTATS D'ESSAIS ET ANALYSE

3.1 Contrainte verticale à la base de la PTC

On s'intéresse à la répartition des contraintes verticales $\sigma_{v(\text{IR})}$ au-dessus des têtes des IRs et $\sigma_{v(\text{poly})}$ du sol mou analogue, sitôt la montée en accélération ($10 \times g$), puis au cours du premier roulage de la roue (1^{er}A).

3 configurations de trafic en aller et retour (A/R) sont étudiées chronologiquement sur la même PTC (figure 6):

- juste derrière la vitre sur la 1^{ère} ligne d'IRs;
- sur la 3^{ème} ligne d'IRs arrière;
- à cheval sur les 2^{ème} et 3^{ème} lignes d'IRs.

La roue en position initiale sur le bord droit du tapis se déplace de la droite vers la gauche au 1^{er}A. Après 3×A+2×R, la centrifugeuse est arrêtée le temps de positionner la roue sur les autres lignes d'IRs.

$$q_{TPC} = \rho_d \times N_g \times g \times H_{TPC(model)} = 6,5 \text{ kPa.}$$

L'effet de voûte initial (Marston, 1913) induit ce transfert de charge sur les IRs, hormis l'IR notée M³, en accord avec l'effort moindre mesuré en tête (cf. §.3.2) : le modèle physique reste imparfait malgré le soin apporté, à l'image du prototype réel...

3.1.1 Trafic sur la 1^{ère} ligne d'IRs derrière la vitre

Avant le roulage, les $\sigma_{v(IR)}$ moyennes à 10×g valent 30 kPa (figure 7.a). $\sigma_{v(poly)}$ varie de 2 kPa à la périphérie d'une IR, à 8 kPa environ au centre des mailles. Ces valeurs encadrent la contrainte calculée à la base de la PTC, sans effet de voûte (cf. figure 1):

Le tassement du polystyrène sous le poids de la PTC lors des montées à 10×g reproduit le tassement de consolidation d'un sol mou qui induit ce transfert.

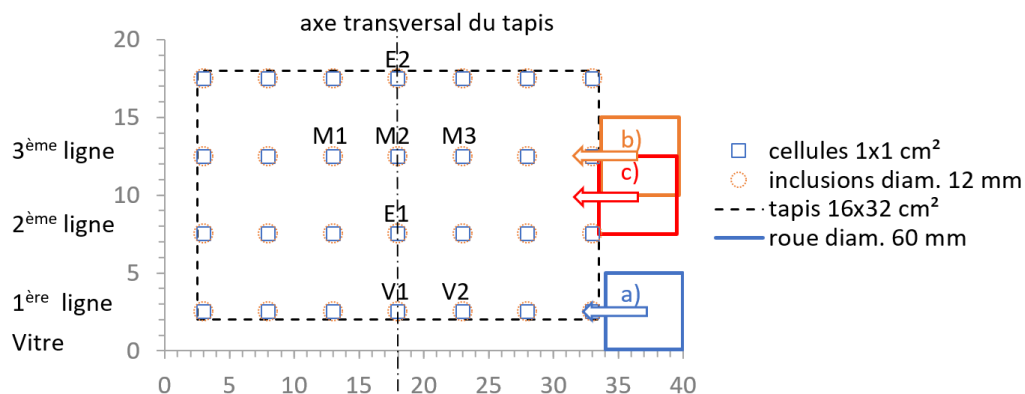


Figure 6 : Les sept inclusions avec leurs capteurs d'effort vertical; Roulage : a) sur la 1^{ère} ligne d'IRs derrière la vitre; b) sur la 3^{ème} ligne derrière la vitre; c) à cheval sur les 2^{ème} et 3^{ème} lignes d'IRs. Note: la 5^{ème} ligne est en dehors du tapis tactile.

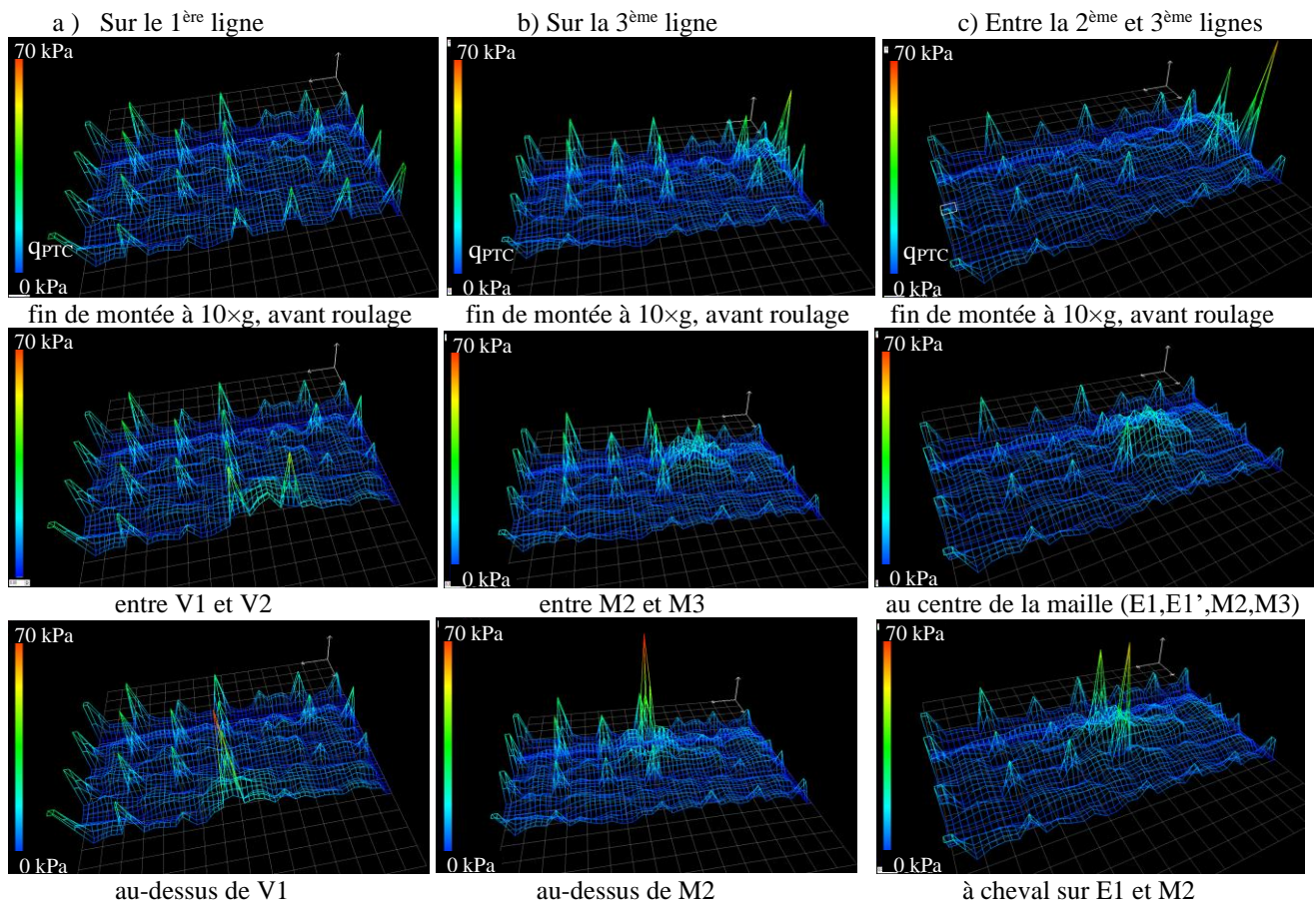


Figure 7 : $\sigma_{v(IR)}$ et $\sigma_{v(poly)}$ à 10×g ; effet de voûte à la fin de la montée en g, puis annihilation à l'aval après roulage.

En roulage, lorsque la roue se situe entre V^2 et V^1 , $\sigma_{v(IR)}$ monte jusqu'à 44 kPa et $\sigma_{v(poly)}$ atteint 20 kPa. Quand la roue passe à la verticale de V^1 , $\sigma_{v(IR)}$ atteint 67 kPa. Le roulage a annihilé par ailleurs l'effet de voûte initial sur V^2 située en aval.

3.1.2 Trafic sur la 3^{ème} ligne d'inclusions arrière

Avant le roulage, $\sigma_{v(IR)}$ est de l'ordre de 28 kPa (figure 7.b). La répartition de $\sigma_{v(poly)}$ est quasi la même que précédemment, hormis le voisinage de la vitre qui a subi un trafic ($3 \times A + 2 \times R$) et présente une contrainte plus homogène autour de 6 kPa seulement : la remontée en accélération n'a pas permis de retrouver la magnitude des effets de voûte initiaux. En roulage, lorsque la roue se situe entre M^2 et M^3 , $\sigma_{v(IR)}$ monte à 32 kPa, tandis que $\sigma_{v(poly)}$ atteint 22 kPa. Quand la roue passe à la verticale de M^2 , $\sigma_{v(IR)}$ atteint 69 kPa.

Les pics initiaux de $\sigma_{v(IR)}$ en aval de la roue ont donc disparus comme précédemment. À grande échelle, Van Eekelen et al (2007) ont observé cette annulation de l'effet de voûte sous le trafic des poids lourds, avec une instrumentation in situ de la route de Kyoto renforcée par des IRs. Le transfert des charges routières a ensuite repris avec la cessation du trafic et une continuation des tassements.

3.1.3 Trafic à cheval sur les 2^{ème} et 3^{ème} lignes d'IRs

Avant le roulage, $\sigma_{v(IR)}$ sur les IRs non encore sollicités est descendue à 18 kPa en moyenne (figure 7.c). La répartition de $\sigma_{v(poly)}$ est plutôt homogène avec une valeur comprise entre 4 et 7 kPa.

En roulage, lorsque la roue se situe au centre de la maille délimitée par E^1 , M^2 et M^3 , $\sigma_{v(IR)}$ monte à 33, 24 et 16 kPa respectivement, et $\sigma_{v(poly)}$ atteint 23 kPa au centre de la maille. Puis, quand la roue passe à cheval sur E^1 et M^2 , $\sigma_{v(IR)}$ atteint 45 et 57 kPa respectivement, pendant que $\sigma_{v(poly)}$ descend à 17 kPa entre deux.

3.2 Efficacité de transfert de charge

3.2.1 L'efficacité de transfert de la charge de la roue

Le transfert vers les IRs est étudié sur une distance parcourue par la roue d'environ 30 cm sur le modèle. Les efficacités sur modèle ou prototype sont égales.

Cette efficacité E_Q dépend de la distance d entre la roue et les IRs amont, dans le sens du déplacement (figure 8). On exprime E_Q avec l'équation suivante:

$$E_{Q(d)} = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{p(d)})_i}{n \times W_{PTC} + Q} \quad (1)$$

$Q_{p(d)i}$ désigne l'effort en tête de l'IR⁽ⁱ⁾ qui participe au transfert selon la position de la roue.

Q est le poids de la roue à $10 \times g$: $Q = m \times N_g \times g = 5,9$ daN en grandeur modèle.

n est le nombre de mailles intéressées par le transfert effectif de la charge Q vers ces IRs.

W_{PTC} est le poids du sable dans une maille à $10 \times g$: $W_{PTC} = s^2 \times H_{PTC} \times \rho_d \times N_g \times g = 1,6$ daN en grandeur modèle.

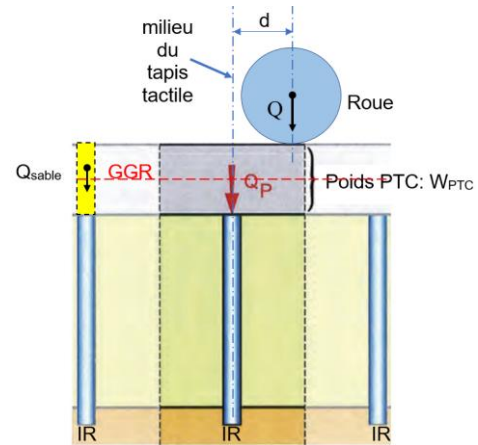


Figure 8 : Poids du sable dans une maille, effort en tête d'IR et distance de la roue à une ligne transversale d'IRs.

Les Q_{pi} mesurés sont supérieurs à ceux déduits des $\sigma_{v(IR)i}$ car une cellule du tapis ne couvre pas toute la section de l'IR. En effet, Q_p se répartit surtout en périphérie et moins au centre (Tardast et al., 2025).

3.2.2 Efficacité sur la 1^{ère} ligne d'IRs derrière la vitre

Cet essai simule en fait le trafic de 2 roues jumelées en raison de la symétrie induite par la vitre.

Lors du roulage sur la 1^{ère} ligne d'IRs juste derrière la vitre ($3 \times A$ et $2 \times R$), $Q_{p(d)}$ a été mesuré sur 7 IRs : V^1 et V^2 (1^{ère} ligne); E^1 (2^{ème} ligne); M^1 , M^2 , M^3 (3^{ème} ligne) et E^2 (4^{ème} ligne) comme indiqué sur la figure 9.

À l'effort à la base de l'IR est soustrait le poids de l'IR à $10 \times g$: $0,0122 \times 10 \times 9,81 = 0,12$ daN.

Un effet de voûte se manifeste à la fin de la montée à $10 \times g$ avec un effort en tête $Q_{p(d)}$ en grandeur modèle comprise entre 0,2 et 0,9 daN selon les IRs, soit des efforts bien plus importants que le poids du cylindre fictif de sable au-dessus d'une IR, $Q_{sable} = \pi \times \varnothing^2 / 4 \times H_{PTC} \times \rho_d \times N_g \times g = 0,073$ daN, calculé sans effet de voûte. Puis, le 1^{er} roulage modifie les chaînes de force entre les grains de sable, et élimine cet effet.

Les courbes $Q_{p(d)i}$ sont symétriques en A/R et s'aplatissent progressivement: ainsi les pics décroissent de 23% environ entre le 1^{er} et le 5^{ème} passage.

Q est transférée pour partie sur V^1 et V^2 ainsi que sur E^1 et sur E^1 . Les IRs éloignées E^2 , M^1 , M^2 et M^3 ne sont pas sollicitées. Sans capteur disponible, on adopte pour E^1 l'effort sur E^1 décalé de $\Delta(d/s) = 1$.

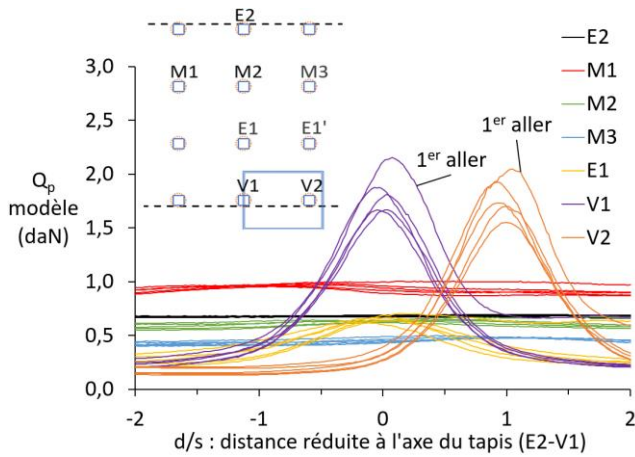


Figure 9: Q_p en roulage sur la 1^{ère} ligne d'IRs ($3 \times A + 2 \times R$).

L'efficacité initiale de transfert du poids de la PTC sur les IRs, avant le roulage à $10 \times g$, vaut en moyenne sur les 7 mailles instrumentées: $E_{(Q=0)} = 0,42$.

A l'approche de l'axe du tapis en $d = 0$, on retient au total huit mailles de transfert et une double charge, $4 \times W_{PTC} + 2 \times Q$, dans le calcul de $E_{Q(d)}$ quand d/s varie de 0 à 0,5 (figure 10).

L'efficacité $E_{Q(d)}$ moyenne vaut 0,29 durant le 1^{er} Aller, puis 0,24 sur les passages suivants ($2 \times A + 2 \times R$), malgré la coupure de la GGR à la vitre.

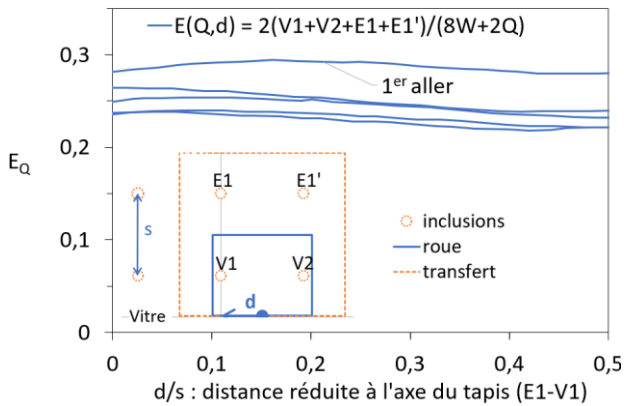


Figure 10: $E_{Q(d)}$ lors du roulage des roues jumelées ($2 \times Q$), derrière la vitre ($3 \times A + 2 \times R$), pour 2×4 mailles de transfert.

3.2.3 Efficacité sur la 3^{ème} ligne d'IRs arrière

Q est transférée pour partie sur $M^1 + M^2 + M^3$, ainsi que sur $E^1 + E^{1'}$, et $E^2 + E^{2'}$. Les autres IRs au voisinage, V^1 et V^2 , ne sont pas sollicités (figure 11). En l'absence de capteurs, on adopte pour $E^{1'}$ l'effort sur E^1 décalé de $\Delta(d/s) = 1$, de même pour $E^{2'}$ avec E^2 .

On retient donc six mailles de transfert, $6 \times W_{PTC}$, dans le calcul de $E_{Q(d)}$ quand d/s varie de 0 à 0,5 (figure 12).

L'efficacité $E_{Q(d)}$ vaut alors en moyenne 0,3 sur le 1^{er} Aller, puis de 0,26 sur les passages suivants ($2 \times A + 2 \times R$).

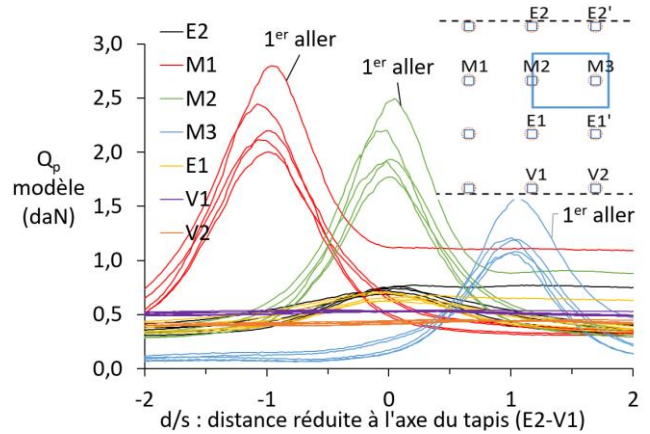


Figure 11: Q_p en roulage sur la 3^{ème} ligne d'IRs ($3 \times A + 2 \times R$)

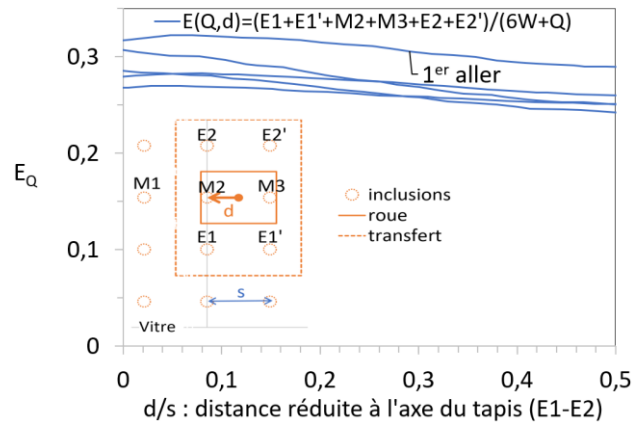


Figure 12: $E_{Q(d)}$ lors du roulage sur la 3^{ème} ligne d'IRs ($3 \times A + 2 \times R$), associée à 6 mailles de transfert.

3.2.4 Efficacité sur les 2^{ème} et 3^{ème} lignes d'IRs

Q est transférée pour partie sur $M^1 + M^2 + M^3$, ainsi que sur $E^1 + E^{1'}$ (figure 13). Les IRs adjacentes, E^2 , V^1 et V^2 , sont très peu sollicités.

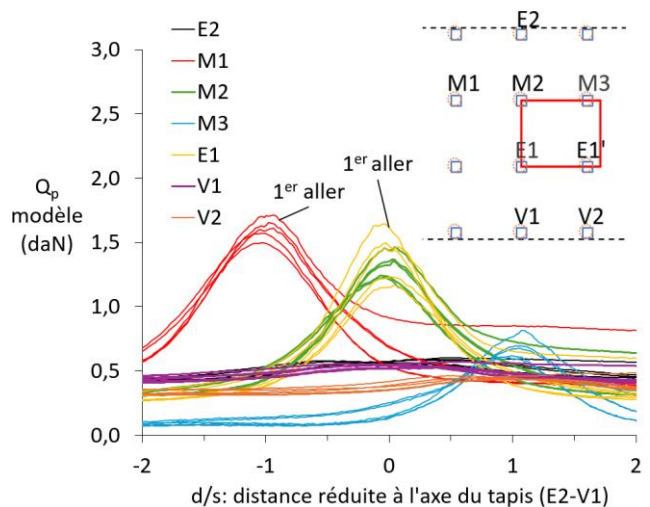


Figure 13: Q_p en roulage sur les 2^{ème} et 3^{ème} lignes d'IRs ($3 \times A + 2 \times R$).

On retient alors quatre mailles de transfert, $4 \times W_{PTC}$, dans le calcul de $E_{Q(d)}$ quand d/s varie de 0 à 0,5 (figure 14).

En l'absence de capteur, on adopte pour l'effort $Q_{p(d)}$ sur E^1 l'effort en tête de E^1 décalée de $\Delta(d/s) = 1$.

L'efficacité $E_{Q(d)}$ est ainsi de l'ordre 0,25 au cours de $3 \times A + 2 \times R$.

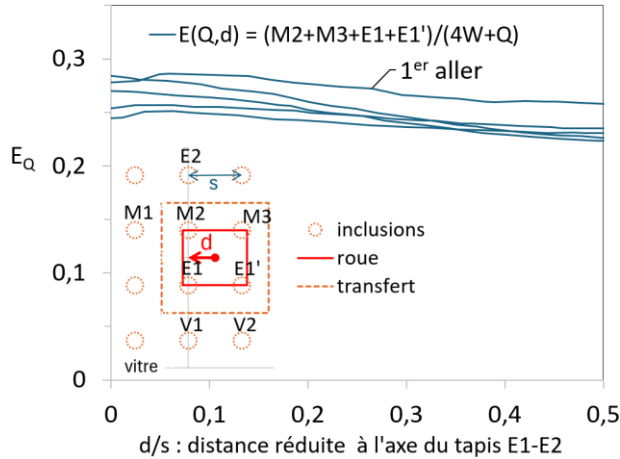


Figure 14: $E_{Q(d)}$ pour le roulage sur les 2^{ème} et 3^{ème} lignes IRs ($3 \times A + 2 \times R$), associée à 4 mailles de transfert de Q .

4 CONCLUSIONS

Dans le cadre de recherches sur le trafic sur les sols mous renforcés par des IRs, une expérimentation originale 3D a été réalisée en centrifugeuse dans un conteneur à face transparente.

Le modèle physique comporte une plateforme de transfert de charge granulaire d'épaisseur relativement faible au regard de l'entraxe des IRs ($H_{PTC}/s = 0,8$), renforcée par une géogrille de forte raideur. Les IRs sont disposées selon une maille carrée et encastées en pied, avec un taux de recouvrement α de 4,5%.

On a simulé le trafic linéaire en aller et retour d'une roue prototype à l'état limite de service (poids: 595 daN, diamètre: 60 cm, largeur: 50 cm), ainsi qu'un trafic équivalent de deux roues « jumelées ». La largeur de la roue est égale à l'entraxe des IRs.

Deux modalités de trafic ont été testées: une circulation au-dessus d'une seule ligne longitudinale d'IRs; une autre à cheval sur deux lignes d'IRs.

Avant tout roulage, l'efficacité initiale $E_{(Q=0)}$ de transfert de la PTC vers les IRs s'établit à 42% suite au tassement du sol mou analogue.

Puis, quelle que soit la modalité de roulage testée, E_Q se stabilise toujours autour de 25% à la fin du trafic de la roue en aller et retour.

Il reste à étudier en détail le tassement et les déformations dans la PTC, ainsi que la tension dans la

géogrille, dans le cas du trafic juste derrière la vitre du conteneur.

Les essais à venir porteront sur un modèle sans la géogrille, avec un trafic en allers et retours, ou encore en allers simples.

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.

ABREVIATIONS / NOTATIONS

A/R	: aller et retour de la charge roulante
PVC	: polychlorure de vinyle
GGR	: géogrille
PTC	: plateforme de transfert de charge
IR	: inclusion rigide cylindrique
ELS	: état limite de service
\emptyset	: diamètre de l'IR [m]
d	: entraxe de la roue à l'IR [m]
E_{poly}	: module élastique du polystyrène [kPa]
E_Q	: efficacité de transfert de charge [-]
E_u	: module non drainé du sol mou [kPa]
H_{PTC}	: épaisseur de la PTC [m]
I_d	: indice de densité du sable [-]
J_{GGR}	: raideur de la GGR [N/m]
l	: largeur de la roue [m]
m	: masse la roue [kg]
N_g	: nombre de g (9,81 m/s ²) [-]
Q	: poids de la roue [N]
Q_p	: force verticale en tête de l'IR [N]
q_{PTC}	: contrainte verticale à la base de la PTC [Pa]
Q_{sable}	: poids du sable au-dessus d'une IR [N]
D	: diamètre extérieur de la roue [m]
s	: entraxe des IRs, largeur de la maille [m]
W_{LTP}	: poids de la PTC dans une maille [N]
α	: taux de couverture des IRs [-]
ρ_d	: densité du sable sec de la PTC [kg/m ³]
$\sigma_{v(IR)}$: contrainte verticale sur la tête d'IR [N/m ²]
$\sigma_{v(poly)}$: contrainte verticale sur le sol mou [N/m ²]

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. : <https://asiriplus.fr/>
- Tardast A., Lajevardi H, Briançon L, Mirhosseini M, (2026), Experimental and numerical insights into

- geosynthetic behavior in pile-supported embankments, *Transportation Geotechnics*, Volume 56, , 101733,ISSN 2214-3912, <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2025.101733>.
- Briançon L, Thorel L, Simon B. ASIRI+ (2021): French National Research Program on soil Reinforcement with Rigid Inclusions. 4th Int. Conf. Transport. Geotech. (ICTG) Chicago, Illinois, USA Aug.30-Sept. 2. Postponed 24-27 may 2021. Proc. Adv. Transp. Geotech. IV, Lecture Notes in Civil Eng. 2020.165, paper 462. 6p. https://doi.org/10.1007/978-3-030-77234-5_54.
- Dano C, Thorel L, Dupla J-C, Benahmed N, Li Z. (2024). Compilation des propriétés physiques et mécaniques du sable de Fontainebleau NE34. *Rev. Fr. Geotech.* 2024, 179, 6. <https://doi.org/10.1051/geotech/2024027>.
- Dubreucq T.,Thorel L., Jagu A.,Lerat L., Alain Neel A.,Gaudicheau P., Audrain P.(2022), Effet en 2D d'une charge statique ou roulante sur une plateforme renforcée par des inclusions rigides, JNGG 2022, Lyon
- Dubreucq T.,Thorel L. (2025). Low thickness platform on soft soil reinforced with rigid inclusions: 2D rolling load tests in centrifuge, *Transportation Geotechnics* 56 (2026) 101800, <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2025.101800>
- Garnier J. Physical models in geotechnics: state of the art and recent advances, in: First Coulomb Lecture (2001). Caquot Conference, 3rd October, Paris. 1–51. <https://doi.org/10.1051/geotech/2020003>.
- Liu K, Xu S, Wen M, Feng W, Zhang Z, Wan Z, (2025) Investigation on load sharing ratio of piles and soil in GRPS embankment with different pile types and geogrid layers under long-term cyclic loading, *Transportation Geotechnics* 51 (2025) 101534. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2025.101534>
- Lukiantchuki J A, Oliveira J R M S, Pessin J, Almeida M S. (2018) Centrifuge modelling of traffic simulation on a construction waste layer. *Int. J. Phys. Mod. in Geotechnics*; 2018; 18(6): 290–300. <https://doi.org/10.1680/jphmg.17.00012>.
- Marston A, Anderson A O. (1913) The theory of loads on pipes in ditches and tests of cement and clay drain tile and sewer pipes, Iowa Engineering Experiment Station Bulletin, Iowa State College, Ames Iowa, 1913; 31.
- Thorel L, Baudoin G, Rault G, Derkx F, Buttigies S. Modélisation en centrifugeuse du renforcement de sols compressibles par inclusions rigides : dispositifs du transfert de charge par cisaillement (2007). 18^{ème} Congrès Français de Mécanique, Aug. 2007, Grenoble, France. hal-03358168.
- Van Eekelen S J M, Van M A, Bezuijen A. (2007). The Kyoto Road, a Full-scale Test, Measurements and Calculations. Proceedings of the 14th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Madrid, Spain. 2007; pp. 1533–1538. <https://doi.org/10.3233/978-1-60750-031-5-1690>.
- Van Eekelen S J M, Han J. (2020) Geosynthetic-reinforced pile-supported embankments: state of the art. *Geosynthetics International*. 2020; 112–141. <https://doi.org/10.1680/jgein.20.00005>.
- Wu P, Chen W, Feng W, Yin J, Ho T, Huang S. (2024) Load transfer mechanism of geotextile-reinforced sand layer over semirigid column-improved soft soil. *Acta Geotechnica* 19:2855–2871. <https://doi.org/10.1007/s11440-023-02213-8>