

# Etude de transfert de charge dans les plateformes granulaires, mixtes et traitées - Essais en vraie grandeur dans le port HAROPA

## *Study of load transfer in granular, mixed, and treated platforms - Full-scale tests in HAROPA port*

Julien Mannah<sup>1</sup>, Laurent Briançon<sup>2</sup>, Caroline Chalak<sup>3</sup>, Jérôme Vetillard<sup>4</sup>, Thomas Lenoir<sup>5</sup>, Hassan Farhat<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Arcadis ESG, INSA-Lyon, Lyon, France

<sup>2</sup> INSA-Lyon, GEOMAS

<sup>3</sup> Arcadis ESG

<sup>4</sup> HAROPA port

<sup>5</sup> Université Gustave Eiffel

<sup>6</sup> Arcadis ESG

**RÉSUMÉ** – Dans le cadre du PN ASIRI+, trois essais en vraie grandeur ont été réalisés dans le port HAROPA de Rouen pour tester l'efficacité de différents types des plateformes de transfert de charge (PTC) sur inclusions rigides soumises à des charges ponctuelles très lourdes (Patin de grue de 100 tonnes). L'objectif est de renforcer les quais existants avec ces plateformes pour les nouvelles grues portuaires.

**ABSTRACT** – As part of the ASIRI+ national project, three full-scale tests have been carried out in the HAROPA port of Rouen to test the efficiency of different types of load transfer platform (LTP). The aim of the tests is to improve understanding of the load transfer mechanisms of LTP on rigid inclusions subjected to heavy point loads (100-ton crane skid). The long-term aim is to strengthen existing quay with these platforms for new mobile harbor cranes.

## 1. Introduction

Le renforcement des sols compressibles par inclusions rigides est une technique qui a connu un développement remarquable depuis les années 90. Elle consiste à utiliser un système, formé par des inclusions rigides (IR) et une plateforme de transfert de charge (PTC) pour transmettre les charges appliquées à la surface au substratum par effet de cisaillement dans la PTC et frottement négatif dans le sol compressible (ASIRI, 2012).

La plateforme de transfert de charge est un élément important de ce dispositif de renforcement composite et son dimensionnement nécessite de nouvelles investigations pour proposer des méthodes capables de rendre compte de toute la complexité des mécanismes (Projet national ASIRI+, 2018). Dans ce contexte, trois essais en vraie grandeur ont été réalisés dans le port HAROPA de Rouen pour tester l'efficacité de différents types des PTC sur inclusions rigides soumises à des charges ponctuelles très lourdes (100 tonnes) simulant le patin d'une grue déchargeant la cargaison d'un bateau.

Les différentes PTC sont testées dans l'objectif de réaliser à terme ces plateformes sous les grues de déchargement. Les trois plots expérimentaux sont présentés à la figure 1 :

- Plot 1 : plateforme granulaire de 1,2 m d'épaisseur (principe de base ASIRI).
- Plot 2 : plateforme mixte de 1,2 m d'épaisseur composée de 60 cm de grave et 60 cm de sol traité permettant de s'appuyer sur les recommandations ASIRI pour la vérification du poinçonnement en tête d'inclusion.
- Plot 3 : plateforme en sol traité de 1,2 m d'épaisseur envisagée par HAROPA pour valoriser les matériaux du ports et inerte les pollutions du site.

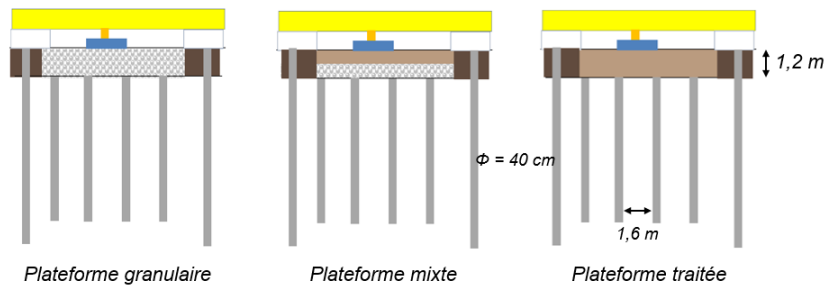


Figure 1. Plots expérimentaux

## 2. Caractérisation du sol traité

Le sol utilisé pour la PTC mixte et traitée est du limon de type F1 : limon peu plastique. La classification du sol est basée sur des essais de caractérisation au laboratoire en se référant au « Guide des terrassements des remblais et des couches de formes » (GTR, 2023).

Un traitement à 7% du ciment CEM III/A 42,5 N-LH, est choisi pour atteindre une résistance à la compression à 7 jours ( $R_c 7j > 2,5 \text{ MPa}$ ). Ce ciment, fourni par l'entreprise EQIOM est composé de 35% à 40% du clinker, 60% à 65% de laitier de haut fourneau et 0% à 5% de constituants secondaires et résiste bien aux environnements agressifs.

L'évolution des performances mécaniques du sol traité à 7 jours de cure, est présentée à la figure 2. La résistance au cisaillement du sol naturel et du sol traité est déterminée par des essais triaxiaux (Tableau 1). Pour chaque essai, deux échantillons sont testés et une valeur moyenne est considérée.

Une résistance à la compression à 7 jours de 2,58 MPa est mesurée, ce qui est conforme à l'objectif ( $R_c 7j > 2,5 \text{ MPa}$ ). La préparation du sol, la modalité de confection et de conservation des échantillons et la réalisation des essais (résistance à la compression, flexion, traction (essai brésilien) et cisaillement) sont faites en se référant aux normes françaises en vigueur.

Tableau 1. Cohésion et angle de frottement du sol naturel et traité (7j)

| Paramètres              | Sol naturel | Sol traité |
|-------------------------|-------------|------------|
| Angle de frottement (°) | 24,3        | 41,3       |
| Cohésion (kPa)          | 89          | 257        |

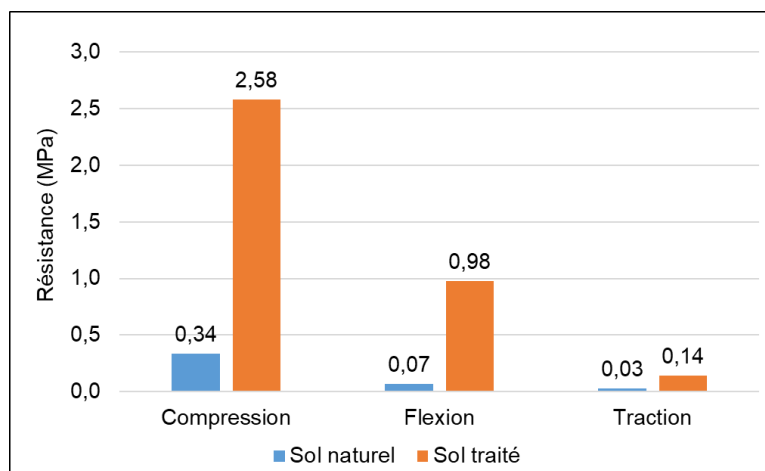


Figure 2. Evolution des résistances mécaniques du sol traité à 7j

### 3. Plots expérimentaux

#### 3.1. Planche d'essai

Une planche d'essai de 30 x 6 x 0,3 m du limon traité à 7% du ciment a été réalisée sur site pour vérifier les bonnes performances mécaniques du sol traité. Elle a été réceptionnée en portance après 3 jours de cure (mini dynaplaque). L'objectif était d'atteindre un module  $EV_{Dyn} > 80$  MPa. Trois zones d'études ont été testées en variant la teneur en eau et six essais à la dynaplaque ont été réalisés. Les modules de déformation dynamiques varient de 80 à 150 MPa avec une moyenne de 136 MPa, conforme à l'objectif :  $EV_{Dyn} > 80$  MPa.

#### 3.2. Renforcement du sol

Le site du plot expérimental est présenté dans la figure 3. Des IR refoulantes de 12 m de long et de 40 cm de diamètre, sont inscrites dans un maillage de 1,6 m. Quatre barres métalliques sont installées dans les inclusions (jaunes) servant de massif de réaction pour installer la poutre de chargement.



Figure 3. Site du plot expérimental

#### 3.3. Instrumentation

L'instrumentation du plot est présentée dans la figure 4. Les inclusions bleues sont les inclusions instrumentées. Des capteurs de tassement (T1-T6) et de contraintes (C1 - C8) sont installés pour observer le tassement du sol et le transfert de charge. Deux configurations (rectangles en pointillés) sont testées. Ils représentent le cas d'un patin de grue sur une inclusion et entre deux inclusions rigides.



Figure 4. Instrumentation du plot

Des semelles en béton de 2 x 1,5 x 0,4 m sont utilisées pour représenter les patins de grue sur les plateformes de transfert de charge. Elles sont instrumentées par des capteurs de déplacement à fil (D1, D2, D3) pour mesurer le tassement des semelles (Figure 5).

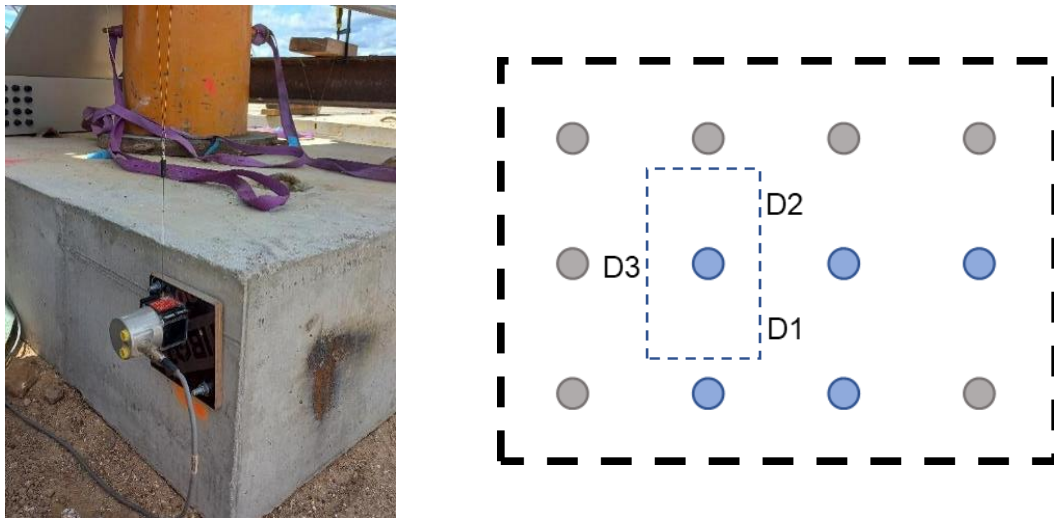


Figure 5. Instrumentation des semelles simulant les patins de grue

### 3.4. Plateformes de transfert de charge

Une couche de sable de 15 cm est installée sur les inclusions pour protéger les capteurs et les câbles lors de la mise en place des plateformes. Un premier essai de chargement a été réalisé initialement pour solliciter le sol et les inclusions en place avant la réalisation des plots expérimentaux.

Le premier plot consiste en une plateforme mixte de 1,2 m d'épaisseur formée de 60 cm de grave et 60 cm de sol traité. Après la réalisation de l'essai, la totalité de la plateforme mixte est enlevée pour installer une plateforme entièrement traitée avec une épaisseur de 1,2 m de sol traité (plot 2). Enfin, la plateforme traitée est enlevée pour mettre en place une plateforme granulaire de 1,2 m d'épaisseur formée de grave 0/31,5 mm. Les plateformes mixtes et traitées sont présentées à la figure 6.



Figure 6. (a) Plateforme mixte (b) Plateforme traitée

Le traitement du limon à 7% du CEM III/A 42,5 N, est réalisé à côté du site et le sol traité est transporté au niveau du plot pour la mise en place des plateformes mixtes et traitées. Des essais à la dynaplaque ont été réalisés pour les trois plateformes et on a eu un module dynamique conforme à l'objectif :  $EV_{Dyn} > 80 \text{ MPa}$ .

### 3.5. Chargement

Un système poutre/vérin (Figure 7) est utilisé pour l'application de la charge. Il est formé d'un contrôleur enregistreur (1) couplé au capteur de force de 5 tonnes (4), d'un groupe hydraulique qui contrôle le vérin (2), d'un vérin creux hydraulique (3), et de la poutre (5). La charge est appliquée par 5 cycles à 55 tonnes puis 5 cycles à 110 tonnes représentant le cycle moyen de chargement ( $\approx 5$  mins) d'une grue à quai port.



Figure 7. Système poutre/vérin pour l'application de la charge

## 4. Résultats

### 4.1. Etude des tassements

Le tassement moyen de la semelle est mesuré à partir des capteurs de déplacement à fil (Figure 5). Les résultats sont présentés à la figure 8 pour la 1<sup>ère</sup> configuration (semelle au-dessus d'une inclusion rigide).

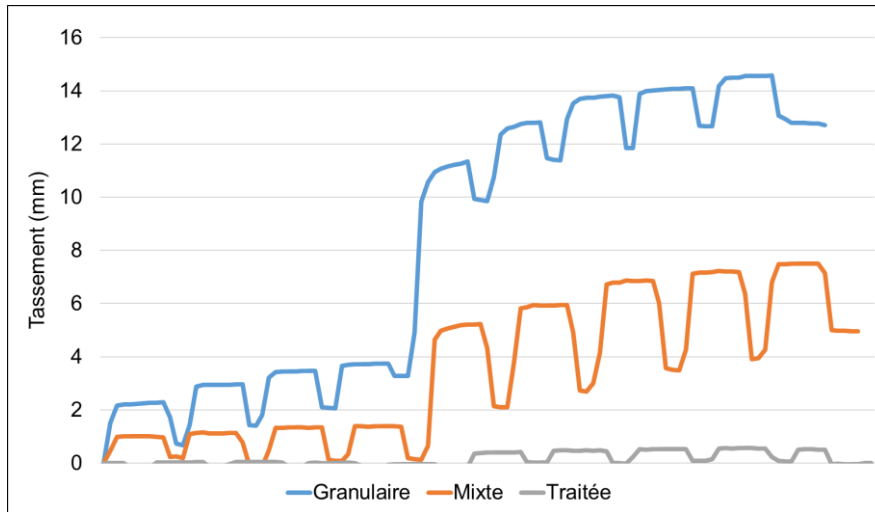


Figure 8. Tassement de la semelle

On constate que le tassement de la semelle est le plus important dans le cas de la plateforme granulaire. Pendant les premiers cycles à 55 tonnes, le tassement est relativement faible ( $\approx 3$  mm), puis augmente pour les cycles à 110 tonnes pour atteindre 14 mm. On note cependant que ce tassement commence à se stabiliser dans le temps, même avec un faible nombre de cycles de chargement. Malheureusement, il était impossible d'effectuer plus de cycles en raison de la durée, des coûts et des ressources disponibles pour cet essai. Cette étude se concentre donc sur le comportement à court terme des différentes plateformes sous chargement cyclique.

Le tassement de la semelle est moins important pour la plateforme mixte, avec des tassements moyens variant de 1 mm à 6 mm pour les cycles à 55 et 110 tonnes respectivement. Enfin, la plateforme traitée a montré les meilleurs résultats en termes de tassement de la semelle. Aucun tassement n'est observé pendant les cycles à 55 tonnes avec un tassement négligeable ( $\approx 0,5$  mm) pour les cycles à 110 tonnes.

Pour mieux observer et comparer le comportement des plateformes. Le tassement de la semelle est présenté en fonction de la contrainte au niveau de l'inclusion située juste en-dessous (Figure 9).

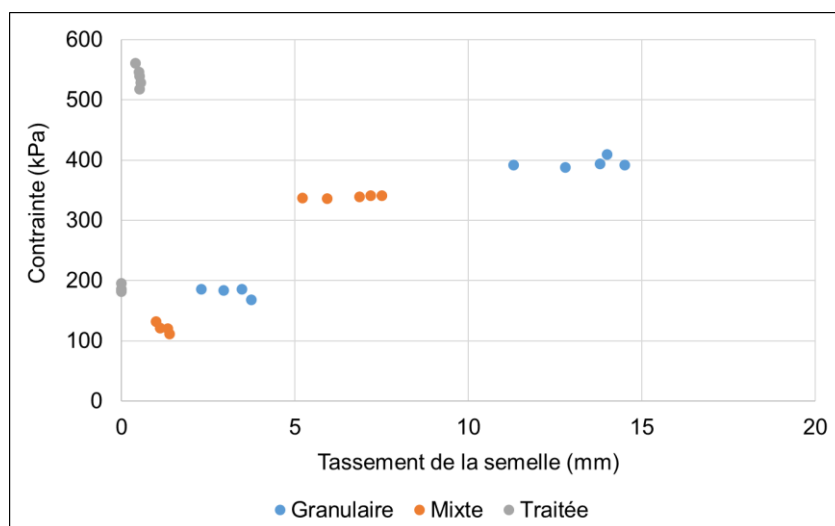


Figure 9. Comportement des plateformes

On remarque que pour la plateforme granulaire, il y a un bon report de charge au niveau de l'inclusion pendant les 1ers cycles ( $\approx 200$  kPa). Cependant, on constate que le tassement de la semelle augmente avec chaque cycle de chargement. Ce comportement est mieux observé pour les cycles à 110 tonnes où le tassement augmente de 11 à 15 mm. Ce comportement peut être assimilé à une dégradation de la PTC.

La plateforme mixte présente un plus faible report de charge pendant les cycles à 55 tonnes ( $\approx 120$  kPa) mais un meilleur comportement vis-à-vis du tassement de la semelle où on remarque un tassement constant ( $\approx 1$ mm). Ce comportement change pour les cycles à 110 tonnes où on remarque de nouveau une augmentation du tassement avec chaque cycle de chargement.

La plateforme traitée présente les meilleurs résultats de tassement et de report de charge avec des contraintes proches de 200 et 550 kPa pour les cycles à 55 et 110 tonnes respectivement. On remarque de plus qu'il n'y a pas de tassement pour les premiers cycles et un faible tassement constant ( $\approx 0,5$ mm) pour les cycles à 110 tonnes.

L'instrumentation du plot par des capteurs de tassement a montré un tassement négligeable au niveau du sol et des têtes des inclusions rigides pour les trois PTC avec une valeur moyenne inférieure à 2 mm.

#### 4.2. Etude des mécanismes de transfert de charge

La figure 10 présente le report de charge au niveau de l'inclusion rigide située sous la semelle (1<sup>ère</sup> configuration). On constate que dans le cas des plateformes granulaires et traitées, l'inclusion rigide est plus chargée que dans le cas d'une plateforme mixte. Lorsque nous passons à des cycles à 110 tonnes, c'est la plateforme traitée qui transfère plus la charge ( $\approx 550$  kPa) en comparaison avec les plateformes granulaires et mixtes ( $\approx 400$  et  $\approx 340$  kPa respectivement).

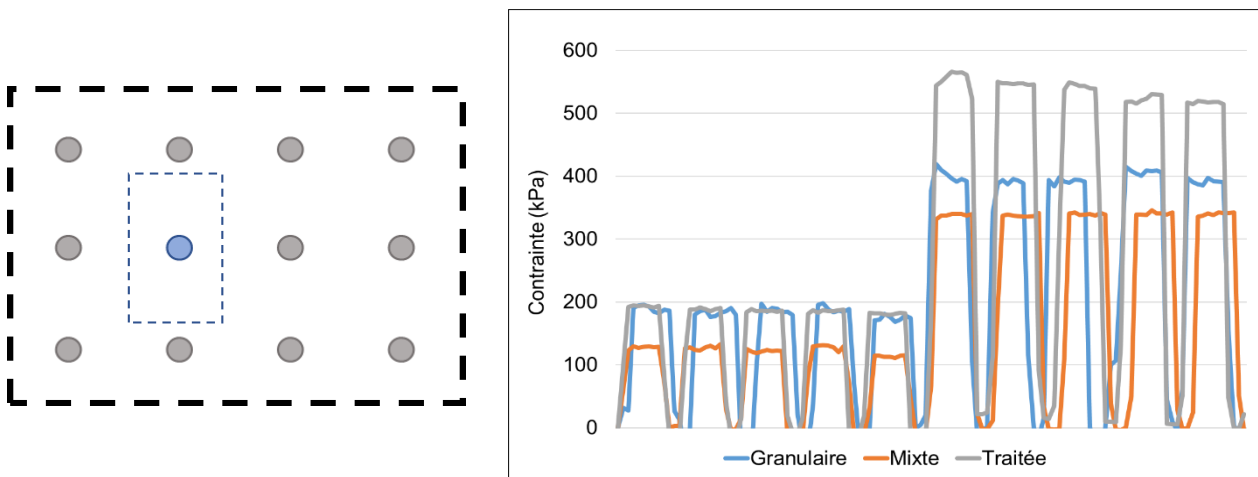


Figure 10. Report de charge

L'efficacité du système, mesurée pour la 1<sup>ère</sup> configuration est présentée à la figure 11. Il s'agit de calculer la charge totale dans une zone d'influence (constituée de la maille centrale et des 8 mailles adjacentes) et la part de cette charge reprise par les inclusions rigides des 9 mailles considérées. Les mesures ont montré que dans la 1<sup>ère</sup> configuration, la charge est répartie uniquement sur la zone d'influence. On remarque que même si l'inclusion C2 reprend plus de charge dans le cas d'une plateforme granulaire (figure 10), l'efficacité de la plateforme mixte est supérieure que celle de la plateforme granulaire du fait d'une meilleure répartition des charges sur les autres inclusions. La plateforme traitée présente la meilleure efficacité ( $\approx 7\%$  et  $\approx 12\%$  pour les cycles à 55 et 110 tonnes respectivement).

Le calcul de l'efficacité globale est basé sur l'hypothèse de répartition symétrique de charge. Les inclusions bleues sont les IR instrumentées (C1, C2, C4 et C5), on considère alors que C1=C9, C4=C7 et C5=C6=C8=C10.

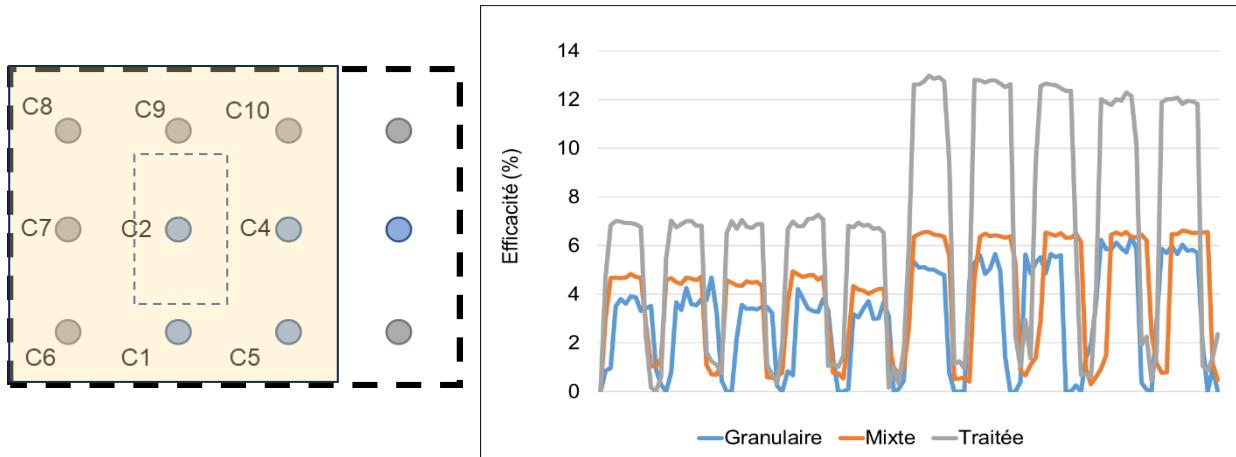


Figure 11. Efficacité globale

Les efficacités des trois plateformes restent relativement faibles, ce qui est normal pour un essai de courte durée (temps insuffisant pour la consolidation du sol, le cure de la PTC et la formation des mécanismes de transfert de charge dans la plateforme granulaire ...)

## 5. Remerciements

Ce travail a été mené dans le cadre du PN ASIRI+. Les auteurs tiennent à remercier tous les membres de ce projet pour leur soutien et leur confiance.

## 6. Conclusions

Dans le cadre du PN ASIRI+, trois types de PTC sur inclusions rigides sont testés dans le port HAROPA de Rouen dans l'objectif de réaliser à terme ces plateformes sous les grues de déchargement des navires.

- Plateforme granulaire
- Plateforme mixte grave/sol traité
- Plateforme traitée

Les essais ont montré que le traitement choisi était suffisant pour atteindre les résistances mécaniques souhaitées. Une résistance à la compression de plus de 2,5 MPa à 7 jours a été mesurée en laboratoire. Les modules dynamiques obtenus lors des essais sur la planche d'essai et les différentes plateformes avec la dynaplaque étaient conformes à l'objectif :  $EV_{Dyn} > 80$  MPa, ce qui indique que les plateformes étaient bien installées et répondaient aux critères et aux exigences requis.

Un tassement négligeable a été observé au niveau du sol et des têtes des IR pour les différentes plateformes mettant en évidence le bon fonctionnement du système et les mécanismes de transfert de charge au niveau des différentes PTC. Une dégradation de la PTC a été observée pour les plateformes granulaires et mixtes avec une augmentation du tassement de la semelle avec chaque nouveau cycle de chargement. Ce comportement n'a pas été observé pour la plateforme traitée.

La plateforme traitée a présenté le meilleur report de charge et la meilleure efficacité en tête des inclusions rigides. Par contre, l'efficacité globale des trois plateformes reste relativement faible, due à la grande épaisseur des PTC et à la rapidité des chargements ne permettant pas au sol compressible de consolider.

Cette étude, qui se concentre sur le comportement à court terme des différentes PTC sur IR sous chargement cyclique, présente un intérêt pour l'utilisation des plateformes en sol traité, qui offrent des avantages en termes de tassement, de report de charge et d'efficacité. Cependant, il est nécessaire de tester ces plateformes à long terme pour évaluer l'effet de la fatigue sur l'efficacité et le comportement des PTC et l'absence de comportement singulier notamment vis-à-vis du poinçonnement des PTC traitées en tête d'inclusion.

## **7. Références bibliographiques**

ASIRI (Ed.). (2012), Recommandations pour le dimensionnement, l'exécution et le contrôle

de l'amélioration des sols de fondation par inclusions rigides, Presses des ponts, Paris.

GTR. (2023), Guide Des Terrassements, Des Remblais et Des Couches de Forme, GTR.

Projet national ASIRI+ (Ed.). (2018), ASIRI+.