

# Etude expérimentale du comportement des plateformes en sol traité sur inclusions rigides

## *Experimental study of the behavior of treated platforms on rigid inclusions*

Julien Mannah<sup>1</sup>, Laurent Briançon<sup>2</sup>, Caroline Chalak<sup>3</sup>, Daniel Dias<sup>4</sup>, Karen Varain<sup>5</sup>,  
Thomas Lenoir<sup>6</sup>, Hassan Farhat<sup>7</sup>

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

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

<sup>3</sup> Arcadis ESG

<sup>4</sup> Université Grenoble Alpes

<sup>5</sup> Cerema

<sup>6</sup> Université Gustave Eiffel

<sup>7</sup> Arcadis ESG

**RÉSUMÉ** – Dans le cadre du PN ASIRI+, deux essais en vraie grandeur ont été programmés pour tester l'efficacité des plateformes de transfert de charge (PTC) en sol traité sur inclusions rigides. Un programme expérimental a été préalablement mené pour trouver le meilleur traitement en tenant compte des effets environnementaux et économiques. Les remblais expérimentaux ont été conduits dans une fosse expérimentale de 8 m x 8 m contenant 16 inclusions rigides. Une instrumentation a permis de mesurer les mécanismes de transfert de charge, le tassement et le comportement à la rupture de la PTC.

**ABSTRACT** – As part of the ASIRI+ national project, two full-scale tests have been carried out to test the efficiency of treated load transfer platform (LTP) over rigid inclusions. An experimental program has been conducted to find the best treatment for the LTP with consideration for the environmental and the economic effects. The tests have been carried out in an 8 m x 8 m pit with 16 rigid inclusions. Instrumentation is installed to monitor the load transfer mechanisms, the behavior and the failure of the LTP.

## 1. Introduction

L'amélioration du sol par inclusions rigides (IR) est une technique de renforcement du sol qui s'est largement répandue au cours des dernières années (Briançon *et al.*, 2020). De nombreuses approches de dimensionnement existent pour cette technique, mais il reste toujours des améliorations à apporter pour appréhender toute la complexité du problème, d'où la nécessité de rédiger des documents qui encadrent l'utilisation de cette technique. C'est avec cet objectif que le projet national ASIRI (Amélioration du Sol par Inclusions Rigides) a été mené en France entre 2005 et 2011. Il a abouti après 6 ans de travail, à la rédaction des recommandations ASIRI (2012). Après quelques années d'utilisation, la profession a ressenti le besoin d'apporter des compléments pour aborder certains points non traités dans les recommandations ASIRI. C'est pourquoi le PN ASIRI+ (2019-2024) est aujourd'hui mené par 43 entreprises et institutions académiques pour aboutir à des nouvelles recommandations (Projet national ASIRI+, 2018).

Le renforcement du sol par inclusions rigides est une technique qui consiste à réaliser des inclusions, généralement en béton, jusqu'à un substratum et utiliser une couche de sol granulaire appelée « Plateforme de transfert de charge » ou « matelas » pour assurer le transfert de la charge appliquée en surface vers les têtes des inclusions rigides.

L'utilisation des plateformes de transfert de charge granulaires est assez courante dans les projets de renforcement du sol par inclusions rigides (Girout *et al.*, 2013). Cependant, l'exploitation des ressources naturelles a fortement augmenté dû à la croissance démographique et l'évolution du marché de la construction d'où la nécessité de trouver une solution alternative afin de limiter la pression sur les ressources en matériaux granulaires. Dans ce contexte, un traitement de sol peut être envisagé afin d'utiliser le sol in situ, généralement de mauvaise qualité, d'améliorer ses caractéristiques et le rendre apte à retenir une structure de manière durable (Das, 2021).

Dans le cadre du projet national ASIRI+, deux essais en vraie grandeur ont été programmés pour tester l'efficacité des PTC en sol traité. Cette communication présente la caractérisation et le traitement de la plateforme de transfert de charge, le dispositif expérimental, l'instrumentation et les principaux résultats.

## 2. Caractérisation du limon de Dieppe traité

Le sol utilisé pour la plateforme de transfert de charge dans cette étude est un limon qui provient d'un chantier de la RN27 de la déviation de la commune de Dieppe à Arques. Sa teneur en eau naturelle est comprise entre 17 et 23%.

Dans le but d'avoir les mêmes conditions du sol pour tous les essais de caractérisation et les essais de résistance mécaniques du sol traité, le matériau a été homogénéisé, séché et broyé afin d'obtenir une fraction du limon de Dieppe inférieure à 2 mm.

Des essais de caractérisation du sol ont permis de connaître la nature du limon de Dieppe en se référant aux normes françaises et aux classifications existantes. Dans cette étude le « Guide des terrassements des remblais et des couches de formes - 2023 » (GTR, 2023) a été utilisé pour la classification du sol. Le limon de Dieppe est un sol de type F1 : Limon peu plastique.

### 2.1. Formules de traitement

Dans cette étude, trois formules de traitement ont été évaluées :

- Traitement 1 (SCC) : Sol + 1% de Chaux + 4% de Ciment

Ce traitement a été choisi en se référant au guide technique du traitement des sols (GTS, 2000) et à l'état de l'art. Un dosage de 1 à 3% de chaux et de 4 à 7% de ciment est assez courant. Le limon de Dieppe est un sol peu argileux d'où le choix d'utiliser un traitement à la chaux faiblement dosé (1%) et un traitement à 4% de ciment. La chaux utilisée est une chaux vive et le ciment est de type CEM II 32,5.

- Traitement 2 (SCCO) : Sol + 1% de Chaux + 4% de Compaxem®

Un deuxième traitement à base d'argile a été choisi pour prendre en compte les effets environnementaux et écologiques. Le Compaxem® est un liant conforme à la norme NF P15- 108 « Liants hydrauliques routiers : Composition, spécifications et critères de conformité » qui est adapté au traitement des sols avec un délai de maniabilité de 1h à 1h30. Ce liant est formé de 40% de metakaolin (produit issu de la calcination de l'argile kaolinite) et de 60% de ciment.

- Traitement 3 (SA) : Sol + 5% d'Argiliant+®

Un troisième traitement a été choisi pour tester un second liant écologique, l'Argiliant+®. Le liant est conforme à la norme NF P15-108 et est adapté au traitement du sol avec un

délai de maniabilité de 6 heures. Ce liant est composé de 50% de metakaolin, 30% de ciment et de 20% de chaux calcique.

Le Tableau 1 rappelle les formulations des trois traitements.

Tableau 1. Formules de traitement

Traitement	Notation	Chaux (%)	Ciment (%)	Metakaolin (%)
1% Chaux + 4% Ciment	SCC	1	4	-
1% Chaux + 4% Compaxem®	SCCO	1	2,4	1,6
5% Argiliant+®	SA	1	1,5	2,5

## 2.2. Essais de résistance mécanique

La résistance mécanique du sol traité dépend des conditions de cure, de confection des éprouvettes et des propriétés physico-chimiques du sol, d'où la nécessité d'avoir une homogénéité globale sur l'ensemble des essais. Ainsi, toutes les éprouvettes ont été préparées à une teneur en eau optimale et à une densité sèche supérieure à 95% des densités sèches maximales obtenus par les essais Proctor. Ensuite, elles ont été placées dans des sacs plastiques fermés et imperméables à une température de conservation de  $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$  conformément à la norme NF P98-114-3 pour assurer les mêmes conditions de cure.

Des essais de résistance mécanique (compression, flexion, traction et cisaillement) ont ensuite été réalisés à 7, 14, 21, 28 et 90 jours afin d'évaluer les propriétés mécaniques des sols traités à court et à long termes.

La résistance au cisaillement a été déterminée par des essais triaxiaux. Les résultats montrent que le sol naturel a un angle de frottement de  $27,9^\circ$  et une cohésion de 34 kPa. On remarque que l'angle de frottement ne varie pas beaucoup avec le traitement. Par contre, on remarque une augmentation de la cohésion des sols traités avec le traitement SCC qui présente la meilleure cohésion à long terme à 550 kPa (Figure 1).

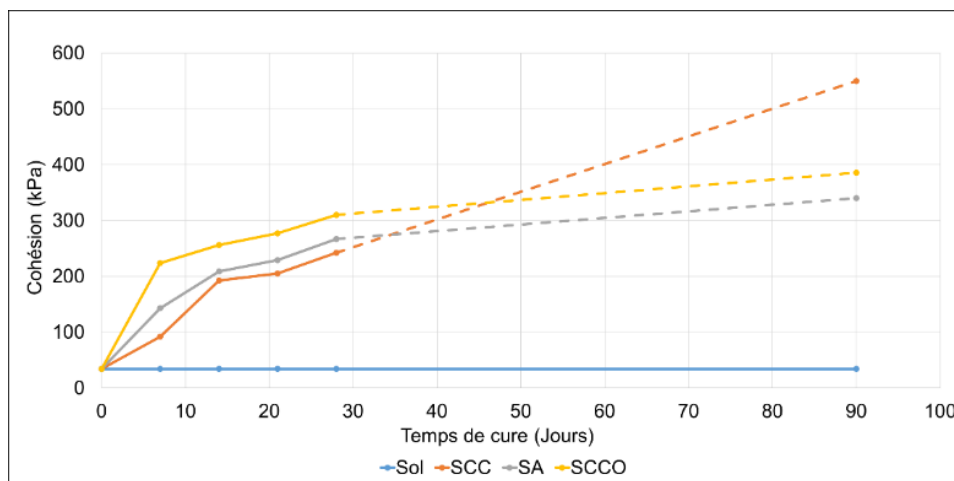


Figure 1. Evolution de la cohésion

L'évolution des autres propriétés mécaniques est présentée à la figure 2 à travers les résistances à la traction, flexion et compression. Le traitement SCC présente toujours les meilleurs résultats à long terme par rapport au SCCO et au SA.

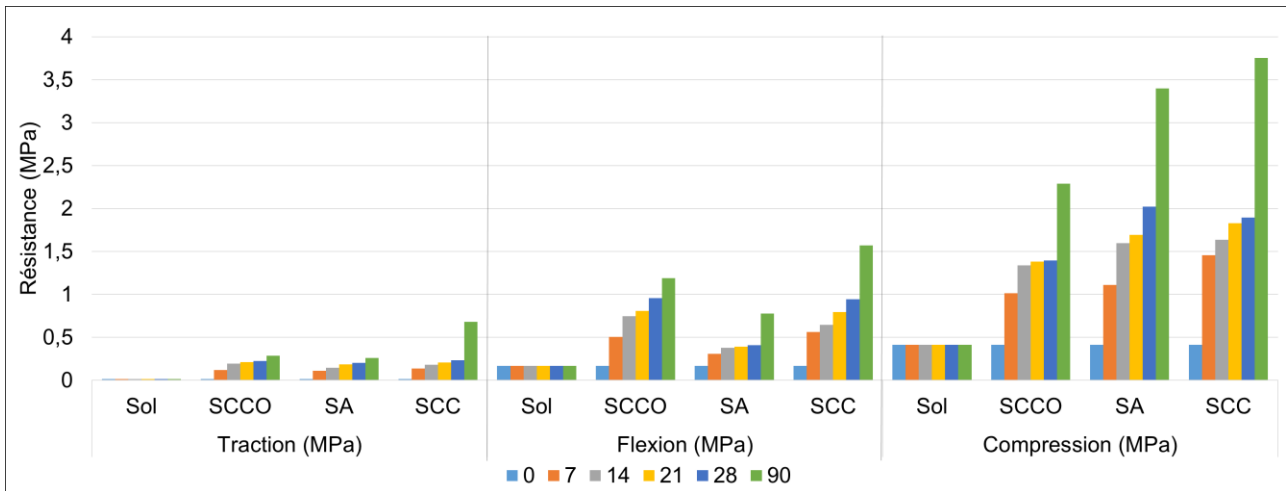


Figure 2. Evolution des résistances mécaniques

### 3. Fosse expérimentale du Cerema

La fosse du Cerema permet de construire en laboratoire un remblai sur inclusions rigides à l'échelle 1. La fosse d'une surface de 64 m<sup>2</sup>, permet d'accueillir 16 inclusions rigides de 30 cm de diamètre et 1 m de hauteur, inscrites dans un maillage de 2 m (Figure 3).

Une première couche de caillebotis de 2,5 cm d'épaisseur a été installée suivie d'une couche de biocofra de 10 cm (planches de carton alvéolaires). Le biocofra est très rigide quand il est sec, mais se dissout uniformément sur toute son épaisseur en présence d'eau d'où la nécessité d'utiliser les caillebotis pour faciliter l'alimentation de l'eau sous le Biocofra. La dissolution du biocofra est utilisée après toutes les étapes de construction et de surcharge afin d'imposer un tassement supplémentaire.

Une couche de Deltagom (granulats de pneu) de 40 cm a ensuite été installée sur le Biocofra et une couche de sable de 37,5 cm complète le multicouche. Les deux couches (Deltagom-sable) permettent de simuler la compressibilité d'un sol mou. Le taux de compressibilité souhaité est obtenu en jouant sur les épaisseurs des deux couches.

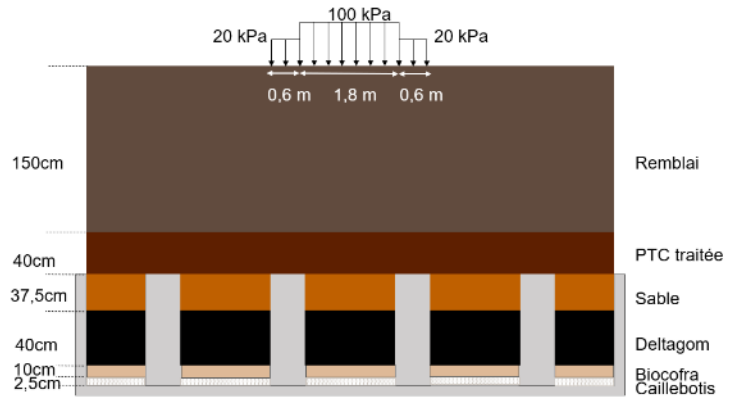
Pour la plateforme de transfert de charge en sol traité, le 1<sup>er</sup> traitement SCC (sol + 1% chaux + 4% ciment) a été choisi. Le traitement n'a pu être effectué dans la fosse sous risque de consommer tout le tassement du Deltagom et endommager les têtes des inclusions et les capteurs. Le sol a été préparé à côté de la fosse et traité à la chaux, puis le traitement au ciment a été effectué une heure plus tard. Cette procédure a permis de diminuer la teneur en eau du sol, facilité la floculation des particules et amené le sol à un état optimal et idéal pour obtenir un traitement efficace. Le mélange a ensuite été transporté jusqu'à la fosse et installé en deux couches de 20 cm compactées.

La plateforme traitée de 40 cm d'épaisseur a été chargée après 14 jours de cure. Ce temps de cure a été choisi pour que la plateforme atteigne des résistances mécaniques suffisantes et pour qu'elle puisse supporter les différents chargements. Un remblai de 1,5 m de hauteur a été installé sur la PTC traitée pour simuler un chargement réel d'un chantier. Il a été laissé pendant un mois pour avoir suffisamment de temps pour atteindre l'équilibre du système. Ensuite, des surcharges ont été ajoutées sur le remblai et ont été laissées pendant 14 jours supplémentaires avant la dissolution du Biocofra.

Une instrumentation a été installée avec des capteurs de contrainte et de tassement au fur et à mesure de la montée des différentes couches de sol pour observer les mécanismes de transfert de charge et évaluer l'efficacité de la plateforme traitée.



(a)



(b)

Figure 3. (a) Fosse de Cerema (b) Dispositif expérimental

## 4. Résultats

Afin de comprendre les mécanismes de transfert de charge et le comportement de la plateforme traitée, l'évolution des contraintes et des tassements est étudiée ainsi que le comportement de la PTC et les mécanismes de rupture.

### 4.1. Evolution de la contrainte

L'évolution de la contrainte au niveau des pieds et des têtes des inclusions rigides ainsi qu'au niveau du sable (sol) est présentée à la figure 4 pour les différentes phases de construction.

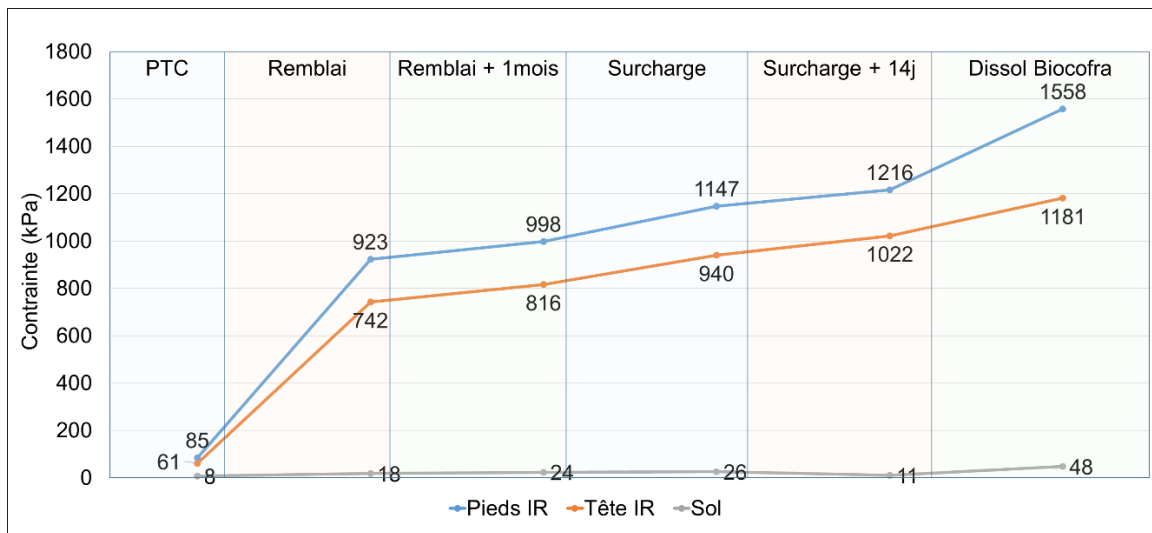


Figure 4. Evolution de la contrainte

On observe un transfert de charge important vers les inclusions pour les différentes phases de construction. On note aussi que la contrainte au niveau des pieds des IR est plus importante qu'au niveau des têtes dû au frottement négatif tout au long de l'inclusion, ce qui montre le bon fonctionnement du système, des capteurs et permet de valider le protocole expérimental.

La contrainte sur les têtes des inclusions rigides atteint 742 kPa à la fin de la construction du remblai et augmente de 10% seulement pour atteindre 816 kPa pendant le mois qui suit la construction. Ce même essai a été réalisé par Terqueux *et al.*(2022) pour une plateforme granulaire en utilisant le même dispositif expérimental et la même instrumentation. Dans le cas de la PTC granulaire, la contrainte en tête des IR atteignait 463 kPa à la fin de la construction du remblai et augmentait de 39% pendant le mois de pause. Cette comparaison met en évidence des mobilisations du transfert de charge différentes selon la nature de la PTC.

#### 4.2. Evolution du tassement

Des capteurs de tassement ont été installés sur un axe vertical, au centre de la fosse sur les différentes couches du sol pour observer l'évolution du tassement. L'instrumentation et les résultats sont présentés à la figure 5. On observe un tassement homogène au niveau des différentes couches du sol, ce qui indique un poinçonnement au niveau des inclusions rigides. La rupture se fait au niveau de la dernière phase (dissolution du Biocofra) où le tassement augmente pour atteindre une valeur d'environ 20 cm. On remarque aussi le bon fonctionnement du biocofra, qui est rigide quand il est sec et maintient un tassement nul pendant toutes les phases de construction et puis disparaît presque totalement (tassement T1  $\approx$  9,2 cm) lors de sa dissolution.

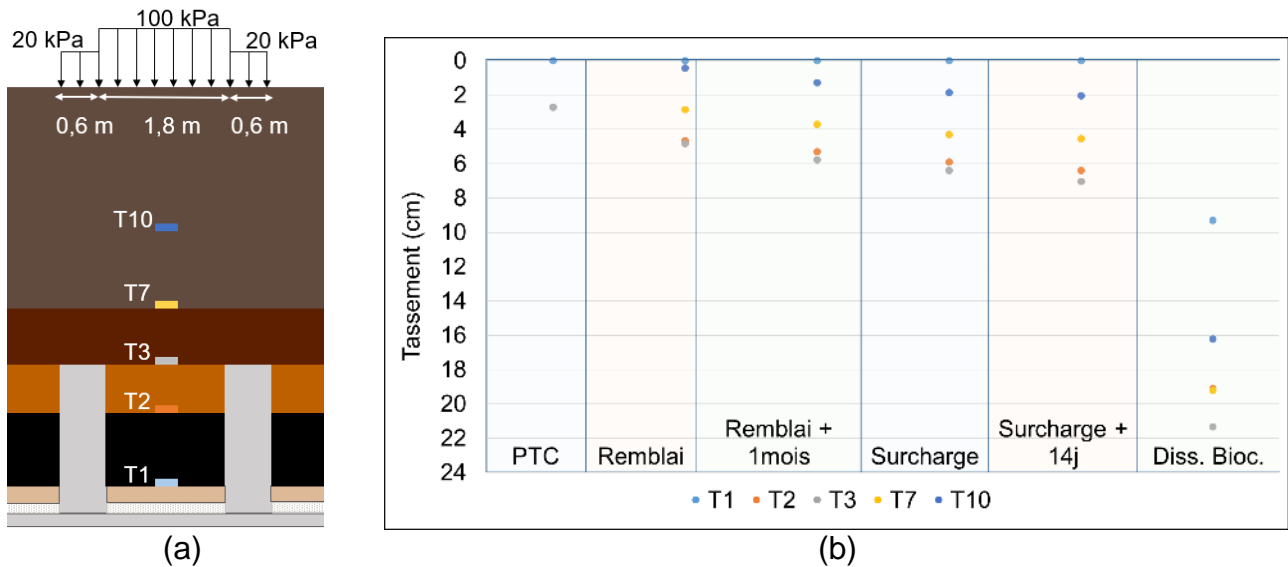


Figure 5. (a) Instrumentation (b) Evolution du tassement

#### 4.3. Comportement et rupture de la plateforme

Le comportement de la plateforme traitée est assimilé à une dalle rigide. La contrainte est présentée en fonction du tassement au niveau de la PTC traitée à la figure 6. On remarque que lors de la mise en place du remblai, la contrainte augmente pour atteindre 50 kPa. Après 1 mois, le tassement augmente pour une contrainte stable, ce qui indique que la plateforme supporte la charge au début et puis commence à tasser d'une façon homogène en poinçonnant au niveau des IR.

On remarque un comportement similaire lors de la mise en place des surcharges et de la dissolution du biocofra, où on observe une chute de la contrainte jusqu'à 10 kPa à cause de la rupture brutale de la PTC. Au moment de cette rupture, les capteurs de contrainte ne sont plus en contact avec le remblai pendant quelques instants ce qui explique la chute de la contrainte qui augmente de nouveau due au fait que le remblai et les surcharges s'effondrent sur la PTC. Finalement, après la rupture de la plateforme en sol traité, on observe un poinçonnement final de 20 cm.

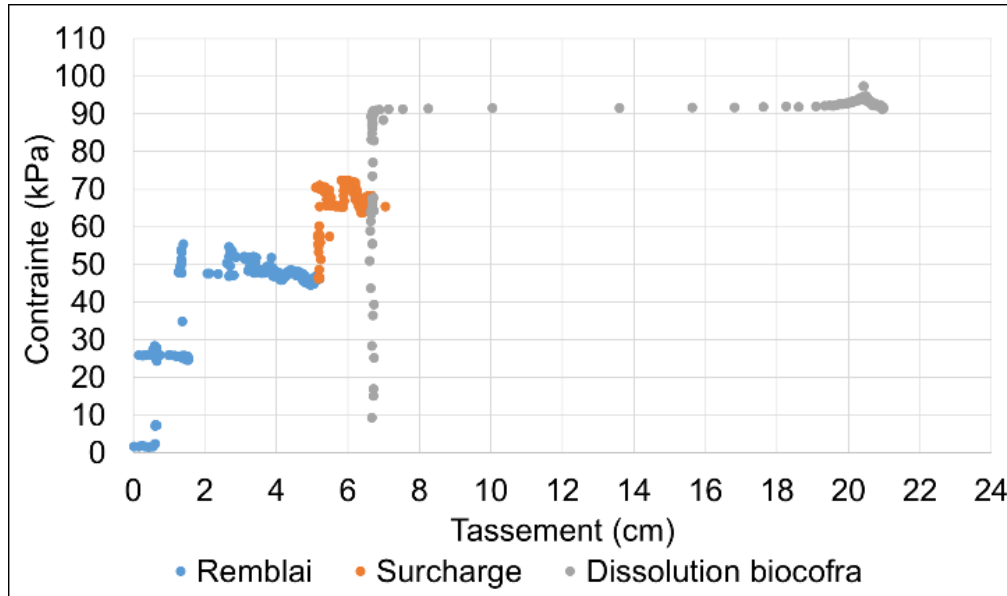


Figure 6. Comportement de la PTC traitée

Après démontage du dispositif expérimental, les mécanismes de rupture ont été visualisés. On remarque que la plateforme traitée, initialement de 40 cm d'épaisseur, poinçonne de 20 cm avec un écrasement de 10 cm au niveau des têtes des IR. L'état initial et final de la plateforme ainsi que la rupture sont présentés dans la figure 7.

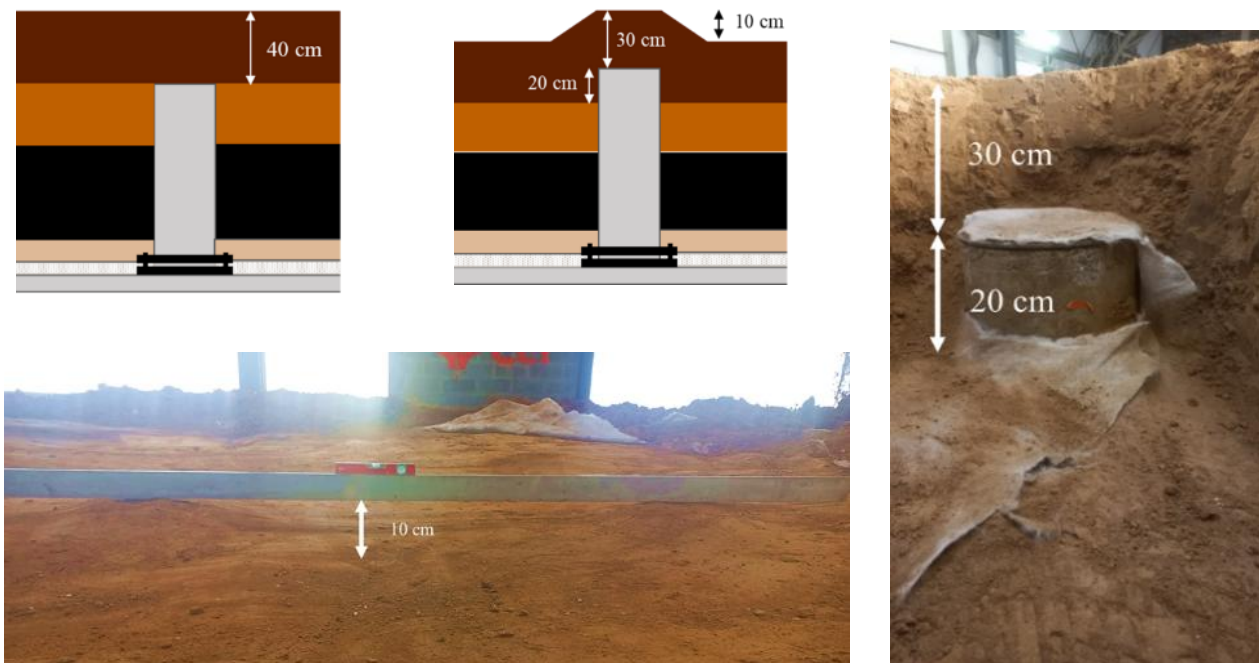


Figure 7. Rupture de la plateforme traitée

## 5. Conclusions

Dans le cadre du PN ASIRI+, un premier essai en vraie grandeur a été réalisé dans la fosse expérimentale du Cerema de Rouen pour tester l'efficacité des plateformes de transfert de charge en sol traité sur inclusions rigides.

Tout d'abord, la plateforme traitée a été installée et contrôlée. Le protocole expérimental a été validé (fonctionnement des capteurs, dissolution du biocofra, compressibilité du sol).

Ensuite, l'instrumentation a permis de mettre en évidence les mécanismes de transfert de charge et de frottement négatif au niveau des inclusions rigides. Le transfert de charge a été immédiat dans la PTC traitée contrairement à la plateforme granulaire où les mécanismes de transfert de charge étaient un peu plus progressifs. Un meilleur transfert de charge pour la plateforme traitée par rapport à la plateforme granulaire a été observé.

Enfin, la plateforme traitée se comporte comme une dalle rigide sur inclusions rigides et une rupture par poinçonnement a été observée au droit des inclusions à la fin de l'essai.

Un deuxième essai est en cours de réalisation au moment de la rédaction de cette communication avec quelques modifications par rapport au 1<sup>er</sup> essai. Une plateforme de travail de 10 cm traitée à 2% de chaux sera ajoutée sous la plateforme traitée afin d'assurer l'homogénéité du compactage et de réduire le poinçonnement ainsi que les « points durs » au droit des inclusions. Un gammadensimètre sera également utilisé pour contrôler la densité de la PTC traitée.

## 6. 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.

## 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.
- Briancon, L., Simon, B. and Thorel, L. (2020), "Le projet ASIRI+ : Amélioration et Renforcement des Sols par Inclusions Rigides", JNGG2020, p. 8
- Das, G. (2021), Evaluation of kneading compaction method and the long-term performances of lime-treated soils., Ecole centrale de Nantes.
- GTS. (2000), Guide Technique Traitement Des Sols à La Chaux et/Ou Aux Liants
- Girout, R., Blanc, M. and Thorel, L. (2013), "Apport des géosynthétiques dans le renforcement par inclusions rigides des sols compressibles", p. 11
- GTR. (2023), Guide Des Terrassements, Des Remblais et Des Couches de Forme, GTR. Hydrauliques - Application En Remblais et Couches de Forme – SETRA / LCPC, 2000.
- Projet national ASIRI+ (Ed.). (2018), ASIRI+.
- Terqueux, C., Briancon, L., Delmas, P., Jacqueline, D., Racinais, J., Pantet, A. and Gotteland, P. (2022), "Renforcement d'un sol compressible par inclusions rigides : étude des transferts de charge au sein de la plateforme granulaire renforcée par des géosynthétiques", JNGG2022