

RENFORCEMENT D'UN SOL COMPRESSIBLE PAR INCLUSIONS RIGIDES : ETUDE DES TRANSFERTS DE CHARGE AU SEIN DE LA PLATEFORME GRANULAIRE RENFORCEE PAR DES GEOSYNTHETIQUES*

SOFT SOIL IMPROVMENT BY RIGID INCLUSIONS: STUDY OF LOAD TRANSFERS WITHIN THE GRANULAR PLATFORM REINFORCED BY RIGID INCLUSIONS

Clara TERQUEUX¹, Laurent BRIANCON², Delphine JACQUELINE³, Philippe DELMAS⁴, Jérôme RACINAIS¹, Anne PANTET⁵, Philippe GOTTELAND⁶

¹ MENARD, Orsay, France

² INSA-Lyon, GEOMAS, Lyon, France

³ Cerema, Rouen, France

⁴ Expert, Paris, France

⁵ Université Le Havre Normandie, Le Havre, France

⁶ FNTF, Paris, France

RÉSUMÉ – Le renforcement de sol par inclusions rigides est une technique constituée d'un réseau d'inclusions et d'un matelas granulaire interposé entre le sol renforcé et l'ouvrage. Dans le cadre du projet national ASIRI+, six essais en vraie grandeur vont être réalisés au sein d'une fosse de 8m x 8m au Cerema de Rouen. Cet article présente la mise en place ainsi que les résultats du premier essai, réalisé sans nappes de géosynthétiques.

ABSTRACT – Soil reinforcement using rigid inclusions is a technique consisting of a network of inclusions and a granular mat interposed between the reinforced soil and the structure. As part of the national ASIRI+ project, six full-scale tests will be carried out in an 8m x 8m pit at Cerema in Rouen. This article presents the implementation and results of the first test, carried out without geosynthetic layers.

1. Introduction

L'amélioration de sol compressible par inclusions rigides est une technique de renforcement qui connaît, depuis les années 1990, un essor important. Cette technique a pour objectif de transférer la charge due à l'ouvrage vers un substratum plus résistant et moins compressible. Ce type de renforcement est composé :

- d'un réseau régulier d'inclusions rigides,
- d'une couche de matériau granulaire ou de sol traité située entre l'ouvrage et les têtes d'inclusions (appelé matelas de répartition, plateforme granulaire ou plateforme de transfert de charge, PTC).

Les mécanismes de transfert de charge développés au sein du matelas de répartition, appelés « effet voûte », ainsi que ceux dus au frottement présent le long de l'inclusion interviennent dans le phénomène complexe d'interaction sol/structure. Le projet national ASIRI, (Amélioration des Sols par Inclusions Rigides), qui s'est déroulé de 2005 à 2011, s'est attaché à définir, conduire et interpréter les expérimentations et modélisations numériques nécessaires à la compréhension des mécanismes grâce auxquels ce système de fondation fonctionne. Des recommandations quant à la conception, au dimensionnement et à la réalisation d'un renforcement de sol par inclusions rigides ont pu être proposées au terme de ce projet (ASIRI, 2012).

Grâce à un retour d'expérience sur les différents projets réalisés depuis la publication des recommandations ASIRI (2012), 3 nouveaux axes de recherche ont pu être établis :

- Axe 1 : étude des plateformes de transfert de charge (PTC),
- Axe 2 : comportement des ouvrages sous sollicitations quasi-statiques et/ou inclinées,
- Axe 3 : comportement des ouvrages sous sollicitations dynamiques et sismiques.

Un nouveau PN, nommé ASIRI+, a été élaboré pour répondre à ces problématiques. Cet article présente le premier essai en vraie grandeur réalisé dans le cadre du premier axe de recherche (Briançon et al., 2020).

2. Protocole expérimental

Dans le cadre de la tâche 1 du projet ASIRI+, 6 essais en vraie grandeur sont réalisés au Cerema de Rouen. Cette communication présente la mise en place et les résultats du premier essai, sans nappes de renforcement horizontales.

Les objectifs du premier essai sont :

- Analyser les mécanismes de report de charge vers les têtes d'inclusions,
- Mesurer le tassement en différents points lors de la montée du remblai,
- Valider le sol analogique utilisé pour simuler le comportement du sol compressible,
- Valider l'instrumentation à mettre en place pour les essais suivants.

2.1. Fosse expérimentale

Les essais sont réalisés dans une fosse étanche de 8 m x 8 m x 1 m mise à disposition par le Cerema de Rouen (Figure 1). Elle permet d'accueillir un réseau carré de 16 inclusions rigides espacées les unes des autres de 2 m dont les caractéristiques sont définies dans le Tableau 1. Un remblai de 1,5 m de hauteur est construit afin de surcharger le sol.

Tableau 1. Caractéristiques des inclusions rigides

Matériau	Module élastique (GPa)	Diamètre (mm)	Hauteur (mm)
Béton armé (% acier)	35	300	1000

On notera que le module du béton a été calculé à 100 jours de leur coulage.

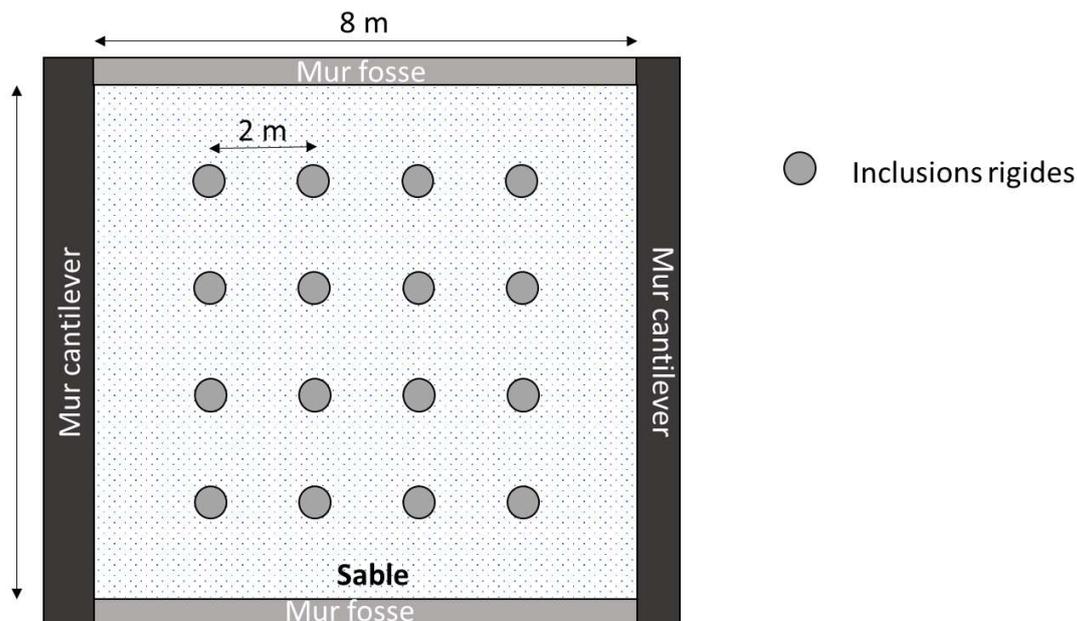


Figure 1. Vue du dessus de la fosse expérimentale

2.2. Matériaux utilisés

2.2.1 Sol compressible analogue

Le sol compressible est simulé par une couche de 10 cm de panneaux de carton alvéolaire (biocofra), 50 cm de granulats caoutchouteux issus du recyclage de pneumatiques usagés (deltagom) et de 37,5 cm de sable. L'utilisation d'un sol analogue permet de simuler un tassement en deux temps :

- Grâce à la compressibilité du deltagom lors de la montée du remblai,
- Grâce à la biodégradation du biocofra par l'eau.

Ce qui permet de simuler, dans un premier temps, le tassement d'un sol fortement compressible et dans un second temps la disparition complète de la réaction entre le sol compressible et la plateforme de transfert de charge.

Des essais d'identification et de compressibilité ont été réalisés sur le deltagom (Tableau 2). Une granulométrie par tamisage à sec a permis de mettre en évidence des particules de diamètre variant de 2 mm à 8 mm. Ce matériau étant élastique, il est réutilisé à chaque essai.

Tableau 2. Caractéristiques du deltagom

Indice des vides e_0	ρ_s (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	E_{oed} (MPa)
0,98	1	0,51	0,084

Des essais ont également été réalisés sur le biocofra afin de mettre en évidence sa forte résistance à la compressibilité, de l'ordre de 50 kPa, lorsqu'il est sec. Cependant, lorsqu'il est humidifié, il perd ses propriétés résistantes et s'affaisse sur toute son épaisseur.

Trois essais ont également été réalisés dans une cuve de 2 m x 1,1 m x 1,1 m dans le but de valider l'utilisation de ce sol analogue lors des essais en vraie grandeur. Cette campagne expérimentale a permis de mettre en évidence une compressibilité de l'ordre de 15% pour le deltagom sous une charge de 100 kPa et un tassement uniforme équivalent à l'épaisseur du biocofra lors de sa dissolution en présence d'eau.

2.2.2. Sable

Le sable mis en place entre la couche de deltagom et la plateforme granulaire a été caractérisé à la boîte de cisaillement 300*300 (Tableau 3).

Tableau 3. Paramètres de cisaillement du sable

Poids volumique γ (kN/m ³)	19
Angle de frottement ϕ' (°)	32
Cohésion c' (kPa)	0

2.2.3. Plateforme granulaire

Le matériau granulaire a été identifié avec la même boîte de cisaillement. Ce matériau est une grave naturelle de granulométrie 0/31,5.

Tableau 4. Paramètres de cisaillement de la PTC

Poids volumique γ (kN/m ³)	19
Angle de frottement ϕ' (°)	40
Cohésion c' (kPa)	2

2.2.4. Remblai

Le remblai a également été identifié avec la même boîte de cisaillement (Tableau 5). Ce matériau est une grave naturelle argileuse de granulométrie 0/63.

Tableau 5. Paramètres de cisaillement du remblai

Poids volumique γ (kN/m ³)	18
Angle de frottement ϕ' (°)	33
Cohésion c' (kPa)	8

2.3. Composition de la fosse

La fosse expérimentale (Figure 2) se constitue des différentes couches suivantes :

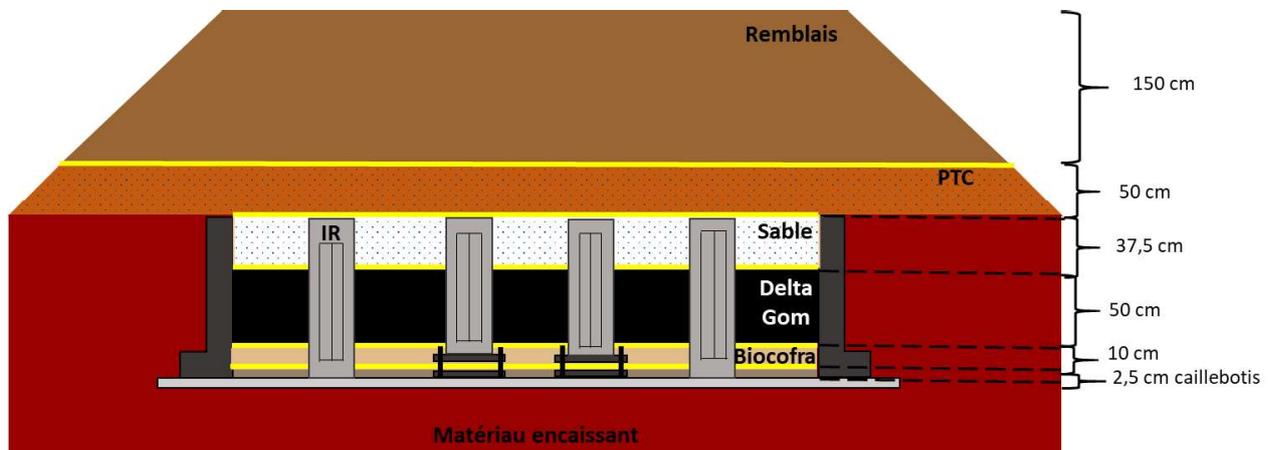


Figure 2. Présentation de la fosse expérimentale

Le lit de caillebotis permet d'assurer une saturation en eau du biocofra par le bas.

2.4. Instrumentation

Dans le cas d'un essai en vraie grandeur, le nombre d'inclusions rigides doit être suffisant pour que la mesure ne soit pas affectée par les effets de bord. Dans le cas d'un maillage carré, seize inclusions permettent une mesure de la maille centrale dans de bonnes conditions (Briançon and Simon, 2012). L'instrumentation de ce plot est donc concentrée sur les quatre inclusions centrales.

2.4.1. Transfert de charge

Afin de mettre en évidence le bon transfert de charge vers les têtes d'inclusions, 10 capteurs de pression totale (CPT) ont été installés sur les têtes d'inclusions et dans le sol à différents niveaux (Figure 3). Les capteurs positionnés sur les têtes d'inclusions (CPT1 à CPT4) sont de même diamètre que ces dernières. Dans le sol, le CPT0 est positionné sur le toit du Deltagom, le CPT6 sur le toit du sable. Les CPT 11 et 12 sur la plateforme granulaire (Figure 3). 4 anneaux de force (F1 à F4) sont positionnés en pied des quatre inclusions centrales entre deux platines métalliques pour déduire la contrainte en pied d'inclusion (Figure 3).

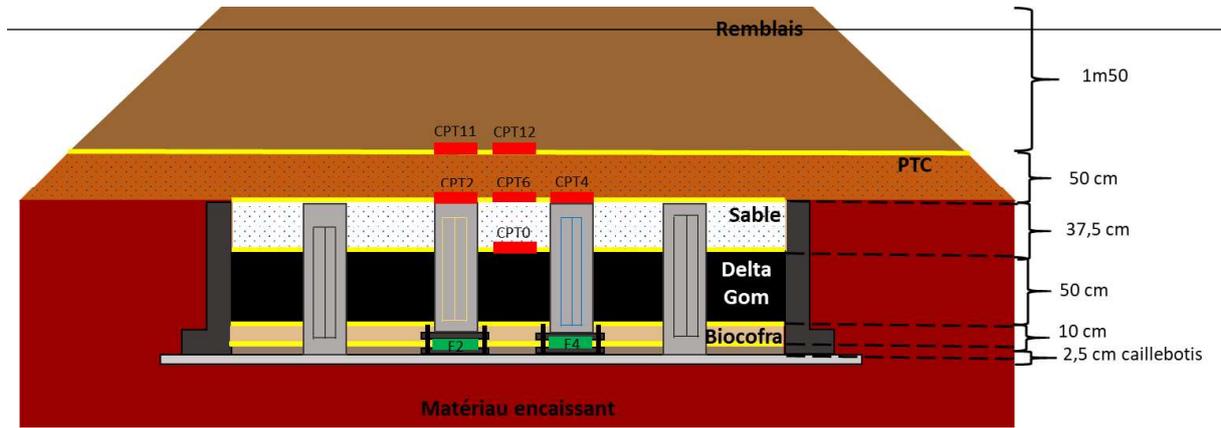


Figure 3. Positions des CPT et des anneaux de force

2.4.2. Tassement du sol

14 capteurs de tassement (T1 à T14, Figure 4) ont été mis en place dans le sol à différents niveaux pour mesurer le tassement du deltagom pendant la montée du remblai, du biocofra lors de sa dissolution et de mettre en évidence le plan d'égal tassement au sein du remblai.

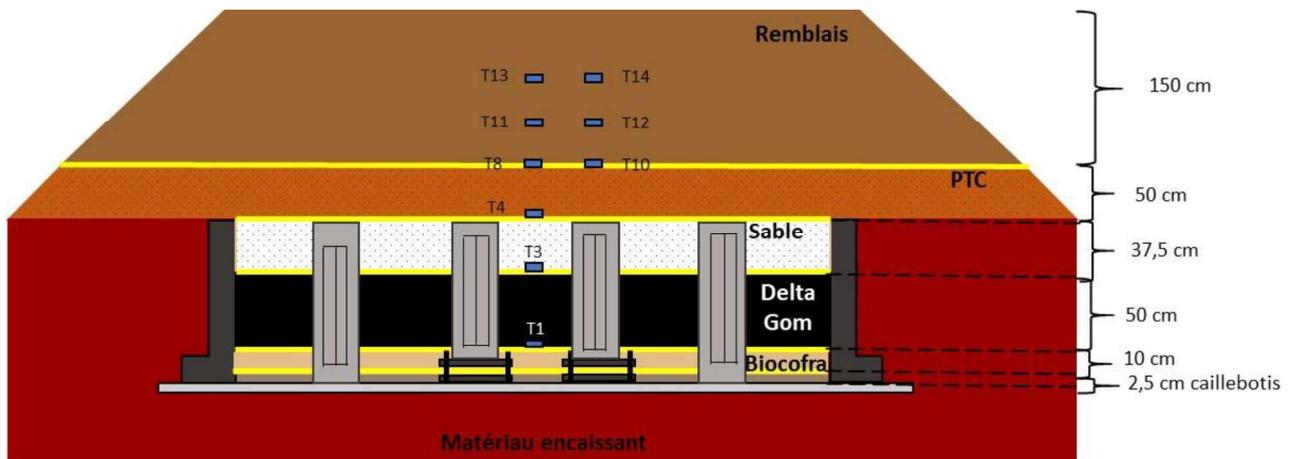


Figure 4. Positions des capteurs de tassement

2.4.3. Centrale d'acquisition

Afin de récupérer les données des différents capteurs, une DATATAKER DT85 GM a été utilisée. Chaque capteur est connecté sur une voie préalablement configurée.

2.5. Programme de chargement

L'évaluation du transfert de charge et des tassements s'est faite :

- pendant la mise en place de la couche de sable, de la plateforme granulaire et du remblai,
- durant une période d'un mois après la construction du remblai,
- lors de la dissolution du biocofra.

3. Résultats

3.1. Transfert de charge

Afin de mettre en évidence le bon report de charge sur les têtes d'inclusions, plusieurs couplages de capteurs vont être étudiés. L'évolution de la charge sera présentée à partir

de la mise en œuvre de la PTC. Sur la Figure 5, les capteurs CPT0, CPT6 et CPT12 sont situés au centre du maillage, respectivement au toit du delta gom, au toit du sable et au toit de la PTC.

On observe une augmentation des contraintes sur le sol lors de la montée du remblai et lors des phases de compactage. A charge constante (après la construction du remblai), les contraintes mesurées sur le sol diminuent. On observe donc bien un transfert de charge vers les inclusions rigides.

Ce transfert de charge est mesuré par les capteurs localisés sur les têtes et en pied d'inclusions (Figure 6). La contrainte augmente pendant les phases de chargement, diminue légèrement pendant le compactage de la plateforme granulaire et augmente à la fin de la construction du remblai, à charge constante.

La différence de contrainte mesurée au toit et en pied d'inclusion (CPT_IR et CPT_F, Figure 6) peut s'expliquer par la présence de frottement négatif le long de l'inclusion et en particulier dans la couche de sable.

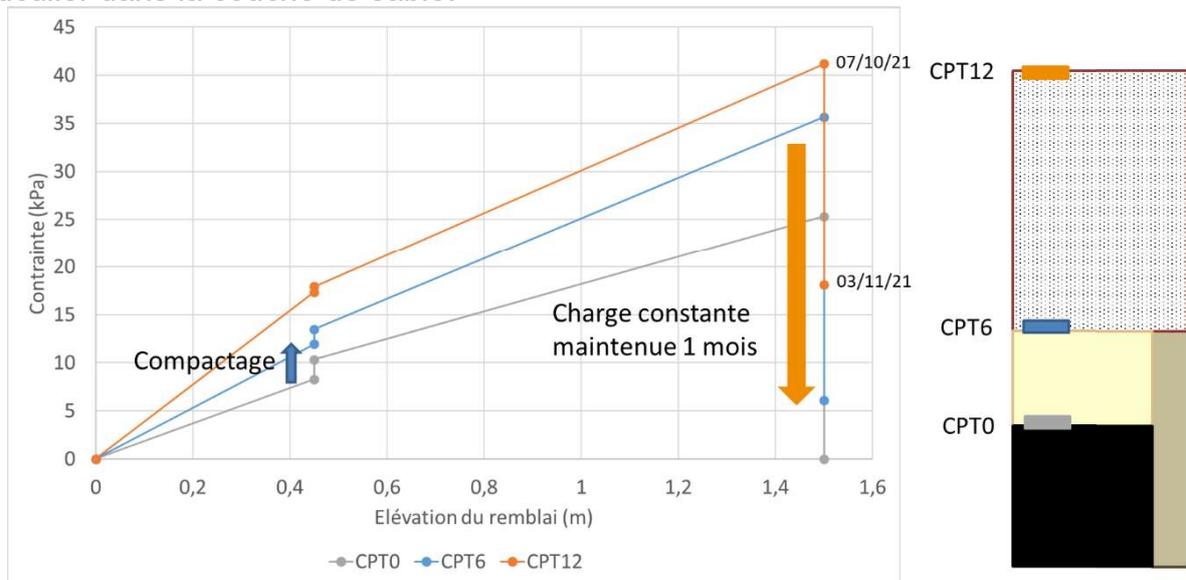


Figure 5. Evolution de la contrainte sur le sol lors de la mise en œuvre de la PTC et du remblai

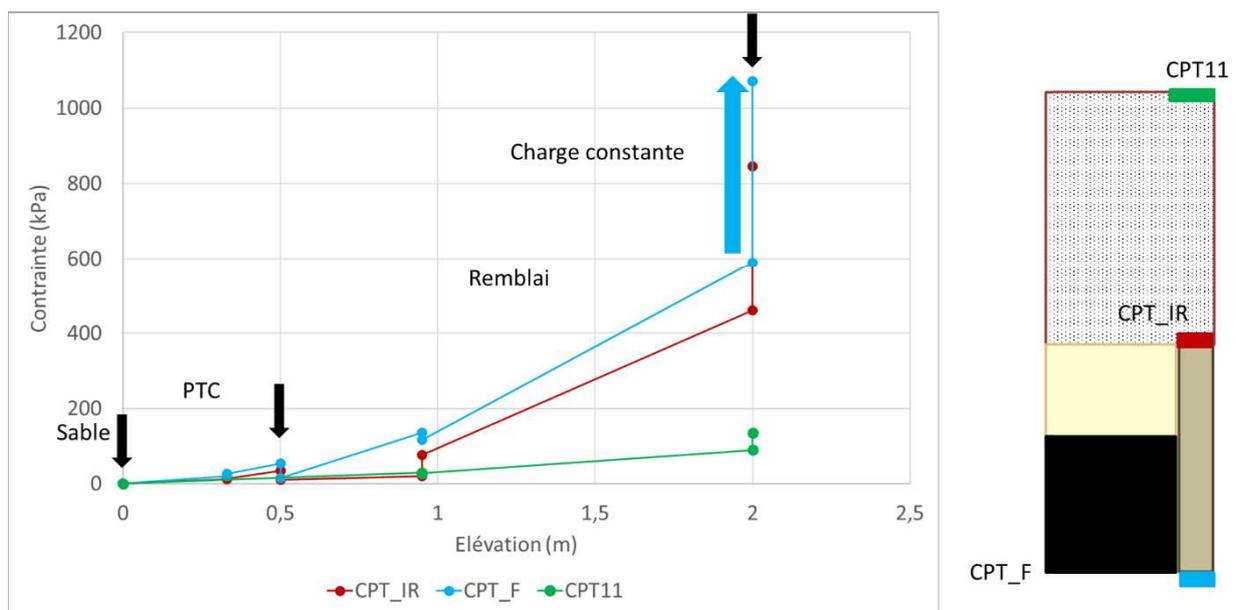


Figure 6. Evolution de la contrainte moyenne en pied et en tête d'IR

En croisant les données des deux graphiques, on note que la contrainte mesurée par le CPT11 au droit de l'inclusion rigide, 150 kPa, est plus élevée que la contrainte mesurée sur le sol, 40 kPa, ce qui traduit bien le transfert de charge vers les inclusions rigides.

Lors de la dissolution du biocofra, la contrainte en tête et en pied d'inclusion augmente continuellement, le transfert de charge s'effectue bien vers les inclusions. On obtient une efficacité de l'ordre de 41% avant la dissolution du biocofra et 72% à la fin de l'essai. Cette différence d'efficacité met en avant le lien fort qu'il y a entre efficacité et réaction du sol compressible.

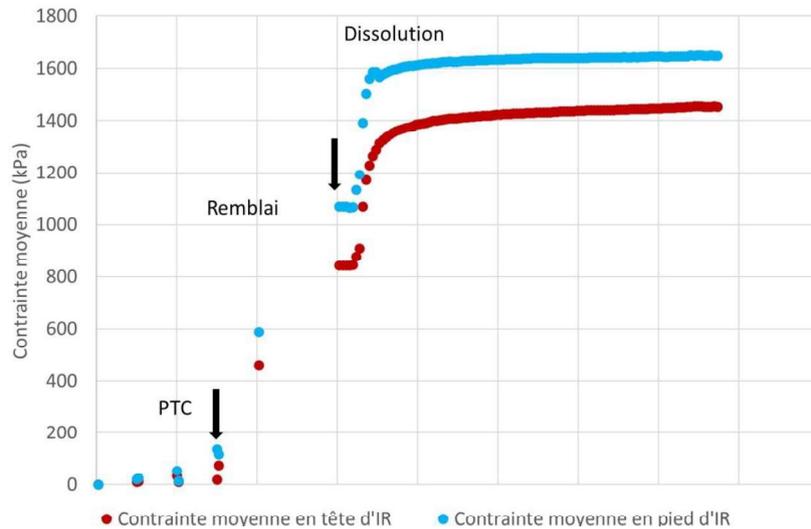


Figure 7. Evolution de la contrainte moyenne en pied et en tête d'IR en fonction du temps

3.2. Tassement du sol

L'évolution du tassement au centre de la maille est présentée sur la Figure 8 par les capteurs T3, T4 et T8 respectivement au toit du deltagom, au toit du sable et au toit de la PTC. Le deltagom tasse de 70 mm pendant la mise en place du sable puis de 30 mm lors de la mise en œuvre de la plateforme granulaire et de 50 mm lors de la construction du remblai. Si on retire les 20 mm de tassement de biocofra mesuré par le capteur T1, le tassement du deltagom correspond à une déformation de 26 % qui est supérieure à celle mesurée en laboratoire. Cependant seul le tassement compté à partir de la mise en place de la plateforme granulaire, soit un tassement de 80 mm, doit être pris en compte comme celui correspondant au tassement du sol compressible.

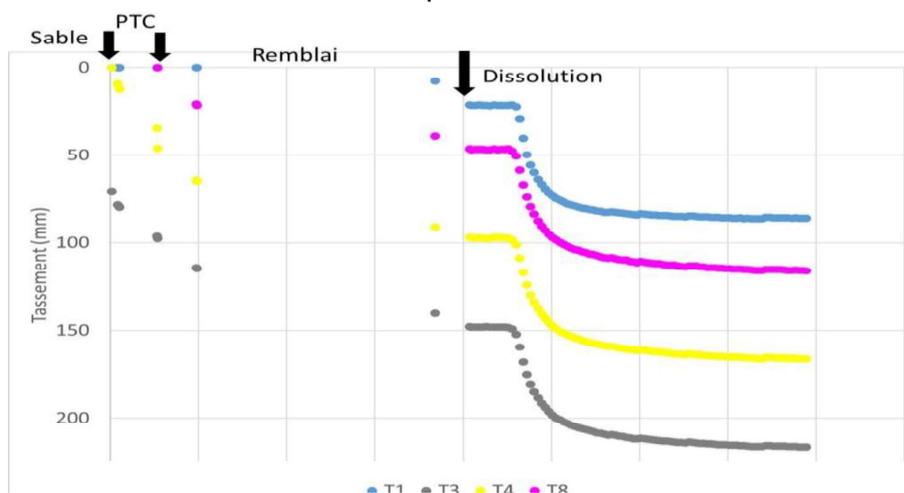


Figure 8. Evolution du tassement au centre de la maille lors de la mise en place des matériaux

La couche de sable tasse de 20 mm lors de la mise en place de la plateforme granulaire puis ne se déforme plus pendant la construction du remblai. La plateforme granulaire, bien compactée, ne se déforme pas pendant la montée du remblai.

On observe une légère augmentation du tassement après la construction du remblai expliquant le transfert de charge mesuré dans le même temps (Figures 5 et 6). La dissolution du biocofra entraîne une réactivation du tassement de 70 mm à tous les niveaux. Ce tassement augmente pendant 5 h puis il est complètement stabilisé au bout de 24h.

4. Conclusions

La réalisation du 1^{er} essai en vraie grandeur, mis en place sans nappes de géosynthétiques, a permis de mettre en évidence le transfert de charge vers les têtes d'inclusions tout en contrôlant le tassement du sol sous-jacent. Une attention particulière a été portée à la mise en œuvre des matériaux ainsi qu'à l'instrumentation utilisée afin d'avoir un essai répétable et afin de pouvoir comparer les résultats des essais à venir.

Le sol analogique utilisé pour simuler le sol compressible a parfaitement joué son rôle. L'instrumentation mise en place a permis de mesurer très précisément les mécanismes de transfert de charge mettant en évidence qu'une grande partie des mécanismes se développe pendant les phases de construction. Cette observation valide notre choix d'avoir essayé de modéliser au mieux le comportement du sol compressible et les phases de construction.

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. Références bibliographiques

ASIRi (2012). Recommandations pour la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des ouvrages sur sols améliorés par inclusions rigides verticales (Recommandations Projet National ASIRi), Presse des Ponts - IREX Paris.

Briançon L. and Simon B. (2012). Performance of Pile-Supported Embankment over Soft Soil: Full-scale experiment. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138 (4), 551 – 561.

L. Briançon, L. Thorel, B. Simon (2020). Le projet ASIRI+ : Amélioration et Renforcement des Sols par Inclusions Rigides. *Proceeding of JNGG 2020*, 02-03 nov. 2020, Lyon, France