

APPORT DU RENFORCEMENT GÉOSYNTHÉTIQUE DANS LES REMBLAIS FONDÉS SUR INCLUSIONS RIGIDES – APPROCHE EXPÉRIMENTALE

ROLE OF THE GEOSYNTHETIC IN THE REINFORCEMENT OF PILE-SUPPORTED EMBANKMENT : EXPERIMENTAL STUDY

Laurent BRIANÇON¹, Philippe DELMAS¹, Guillaume FAUCHEUX¹, Johan ANDROMEDA²

¹ CNAM, Chaire de Géotechnique, Paris, France

² Ménard, Nozay, France

RÉSUMÉ – Le projet national français A.S.I.R.I. a été initié pour améliorer les connaissances sur le renforcement par inclusions rigides verticales et proposer des règles de mise en œuvre et de dimensionnement. Dans le cadre de ce projet, une expérimentation en vraie grandeur constituée de quatre plots d'essai sous un remblai a été réalisée. L'instrumentation a permis de mesurer les variations de pression interstitielle dans le sol compressible, le transfert de charge vers les têtes d'inclusions, le tassement des inclusions rigides et du sol compressible, les déplacements latéraux en pied de talus du sol et des têtes d'inclusions et les déformations des nappes géosynthétiques. Cette communication présente les résultats de cette expérimentation.

Mots-clés : Inclusions rigides, remblais, géosynthétiques, instrumentation, renforcement.

ABSTRACT – The French national research project (ASIRI) was launched to improve the knowledge in this field and to draft of a document constituting the Guidelines for the setting up and the design of embankments and pavements on ground reinforced by rigid piles. In this frame, a full-scale experimentation of embankment reinforced by geosynthetics and rigid piles over soft soil was carried out. Several instrumentations are installed for monitoring the evolution of pore water pressure, load transfer toward piles, differential settlements between a pile and its surrounding soil, lateral displacement at the toe of the slope and geosynthetic strain. This paper presents the results of this experimentation.

Keywords: Rigid inclusions, embankment, geosynthetics, instrumentation, reinforcement.

1. Introduction

Le renforcement des sols compressibles par inclusions verticales rigides est une technique courante. Cependant, les quelques méthodes de dimensionnement existantes ne prennent pas en compte toute la complexité des mécanismes développés dans ces ouvrages renforcés (Briançon et al., 2004) : différents modes de transfert de charge sont proposés, la réaction du sol est rarement prise en compte, le rôle joué par les nappes géosynthétiques disposées dans la plate-forme de transfert de charge n'est pas clairement identifié...

À partir de ce constat, un projet national français A.S.I.R.I. (Amélioration des Sols par Inclusions Rigides) a été initié pour améliorer les connaissances sur le renforcement par inclusions rigides verticales et proposer des règles de mise en œuvre et de dimensionnement. Dans le cadre de ce projet, une expérimentation en vraie grandeur sous remblai a été réalisée. Quatre plots expérimentaux présentant différentes variantes de renforcement ont été testés sous un remblai de 5m de hauteur. Une instrumentation très complète a été mise en place. L'ensemble des mesures a validé l'efficacité du renforcement par inclusions rigides et a permis d'identifier les mécanismes de transfert de charge.

2. Site expérimental

2.1. Contexte

L'expérimentation en vraie grandeur de renforcement de remblais sur sol compressible par inclusions rigides a été conduite par la chaire de géotechnique du Cnam qui a coordonné les actions, assuré l'instrumentation et le suivi du chantier avec les partenaires du projet national A.S.I.R.I.

Cette expérimentation s'est déroulée de juillet 2007 à fin janvier 2008 sur un terrain situé en région parisienne et mis à la disposition du projet par le Conseil général de Seine et Marne en attente de l'aménagement de la liaison sud de Chelles.

2.2. Caractérisation du sol en place

Différents sondages ont été réalisés pour déterminer l'épaisseur de la couche compressible et la caractériser : 8 essais pénétrométriques statiques (PS) et 2 sondages carottés (SC). Le sol prélevé à partir des deux sondages carottés a été utilisé pour des essais de caractérisation et des essais de compressibilité. Le sol en place est homogène et présente une compressibilité moyenne ($C_c/(1+e_0)$ variant de 0,1 à 0,25). Des essais de laboratoire ont permis d'identifier une argile peu plastique plus ou moins sableuse. La hauteur de la nappe a été contrôlée à l'aide d'un piézomètre et se situe à -2 m. L'épaisseur de la couche compressible varie entre 8 m et 10,5 m sous la zone expérimentale (Figure 1)

3. Plots expérimentaux

3.1. Description

Quatre remblais expérimentaux de 5 m de hauteur ont été mis en œuvre sur ce site (Figure 1) :

- plot 1R de référence non renforcé par inclusions rigides,
- plot 2R renforcé par inclusions rigides,
- plot 3R renforcé par inclusions rigides et par une nappe géotextile à la base du remblai,
- plot 4R renforcé par inclusions rigides et par deux géogrilles à la base du remblai.

Chaque plot est constitué du corps du remblai de 64 m² et de deux talus de pente 3/2. Les quatre plots sont alignés dans un axe NE-SW. Les plots sont distants de 2 m. Les plots 1R et 2R disposent d'un troisième talus dans l'axe NE-SW de pente 3/2. Seuls les talus NW des plots sont renforcés par inclusions rigides. L'instrumentation a été installée sous le corps du remblai et les talus NW.

Les trois plots renforcés par inclusions rigides contiennent 16 inclusions chacun sous le corps de remblai et 16 inclusions sous le talus renforcé. Les inclusions forment un maillage carré de 2 m de côté (Figure 2).

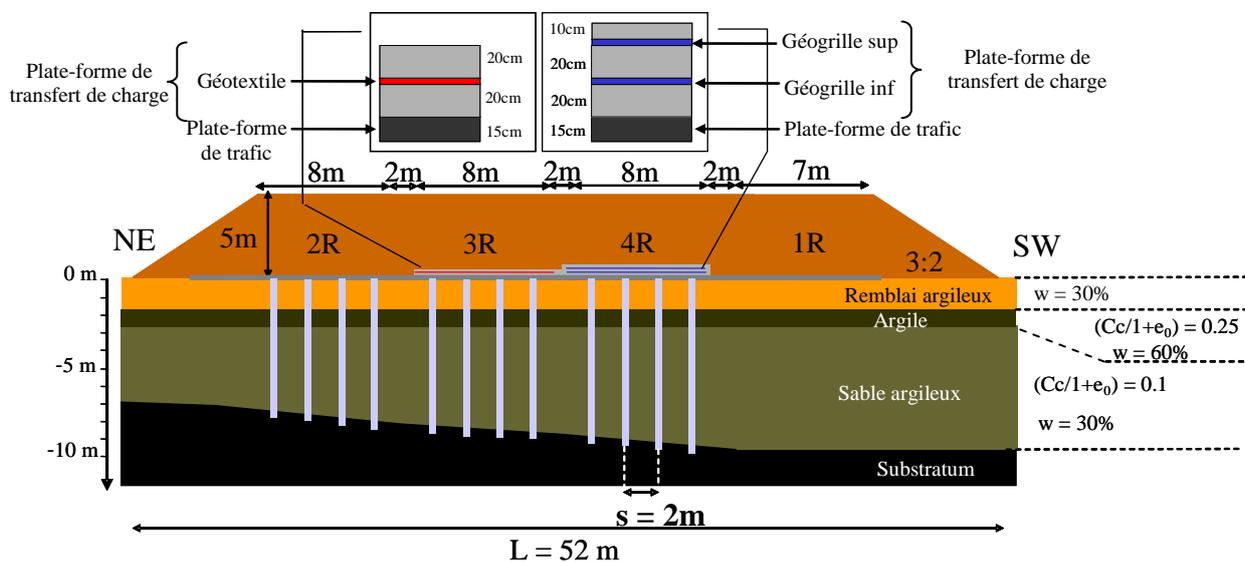


Figure 1. Descriptions des quatre plots expérimentaux

3.2. Réalisation

Après retrait de la couche végétale, une plateforme de trafic de 15 cm d'épaisseur, en gravier roulé 0-70, a été mise en place sur la zone de circulation de la foreuse réalisant les inclusions rigides et sur le plot 1R. La société Keller a réalisé les inclusions rigides refoulantes de 38 cm de diamètre et recepées à la base de la plateforme de trafic. Le béton utilisé présente une résistance à la compression égale à 35 MPa. Chaque inclusion rigide est ancrée d'une trentaine de centimètres dans la couche de sol dur.

observée en profondeur : 70 % à -2 m et 80 % à -5 m (Tableau I). Le renforcement n'accélère pas, dans le cas présent, le temps de tassement qui est déjà très court pour le plot non renforcé.

Tableau I. Mesure du tassement dans le sol compressible

Plot	TN		-2m (TM)	-5m (TM)	-8m (TM)
	TM	T			
1R	266 mm	247 mm 240 mm	169 mm	73 mm	2 mm
2R	109 mm	105 mm	50 mm	17 mm	0 mm

Dans le plot 2R, le tassement de l'inclusion est de l'ordre de 8 mm (Figure 3). Le tassement du sol présente un profil très plat jusqu'à 30 cm de la périphérie de l'inclusion (Figure 3). Dans cette zone proche de l'inclusion, nous ne pouvons pas définir le profil exact du tassement car il n'y a qu'un capteur positionné à 10 cm de la périphérie de l'inclusion. Cependant le tassement différentiel de deux capteurs consécutifs met en évidence un phénomène d'accrochage du sol au moins sur les 10 premiers centimètres voisins de la périphérie de l'inclusion.

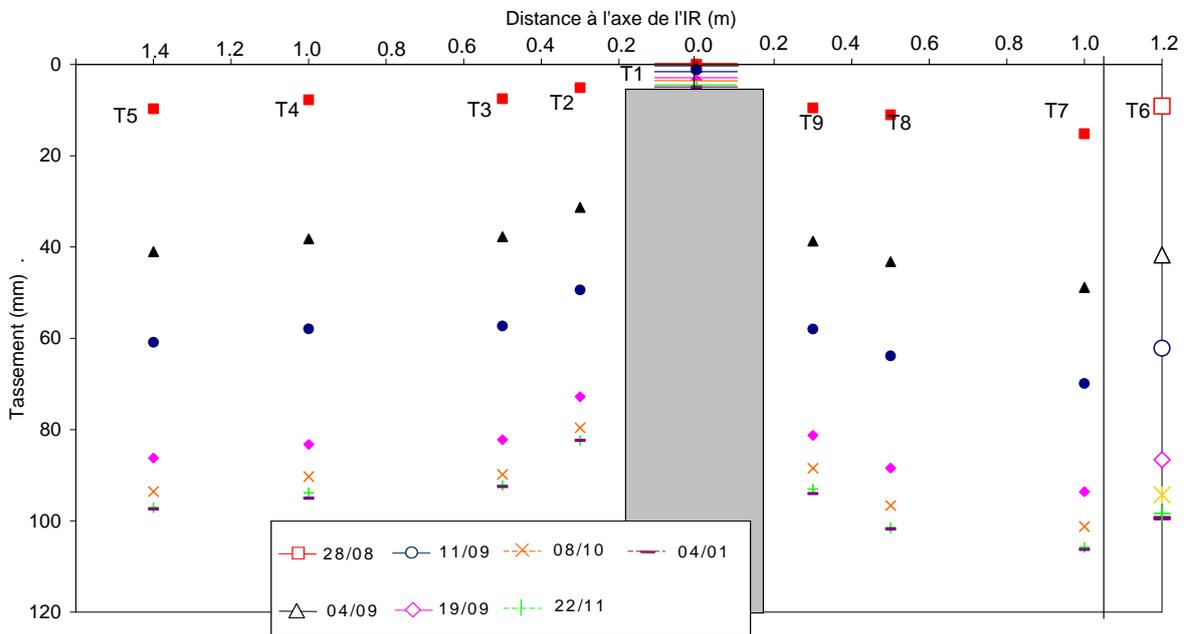


Figure 3. Mesure du tassement des IR et du sol dans le plot 2R

Les plots renforcés par une plateforme granulaire (3R & 4R) présentent des profils de tassements un peu différents de ceux observés sur le plot 2R. Pour les plots avec plateforme, on observe un plus grand tassement des inclusions (31 mm pour 3R et 28 mm pour 4R) en adéquation avec les niveaux de contrainte appliquée sur les inclusions (Figures 4 et 5). Dans les deux cas, le tassement mesuré à proximité de l'inclusion rigide est légèrement supérieur à celui mesuré par les capteurs plus éloignés des inclusions rigides. Cette différence peut être attribuée à un confinement du sol à la périphérie de l'inclusion dû à la mise en tension des nappes géosynthétique dans cette zone. Le tassement différentiel entre le sol et les inclusions se produit pendant la mise en œuvre du remblai, ensuite ce tassement différentiel se stabilise et le sol tasse comme l'inclusion rigide.

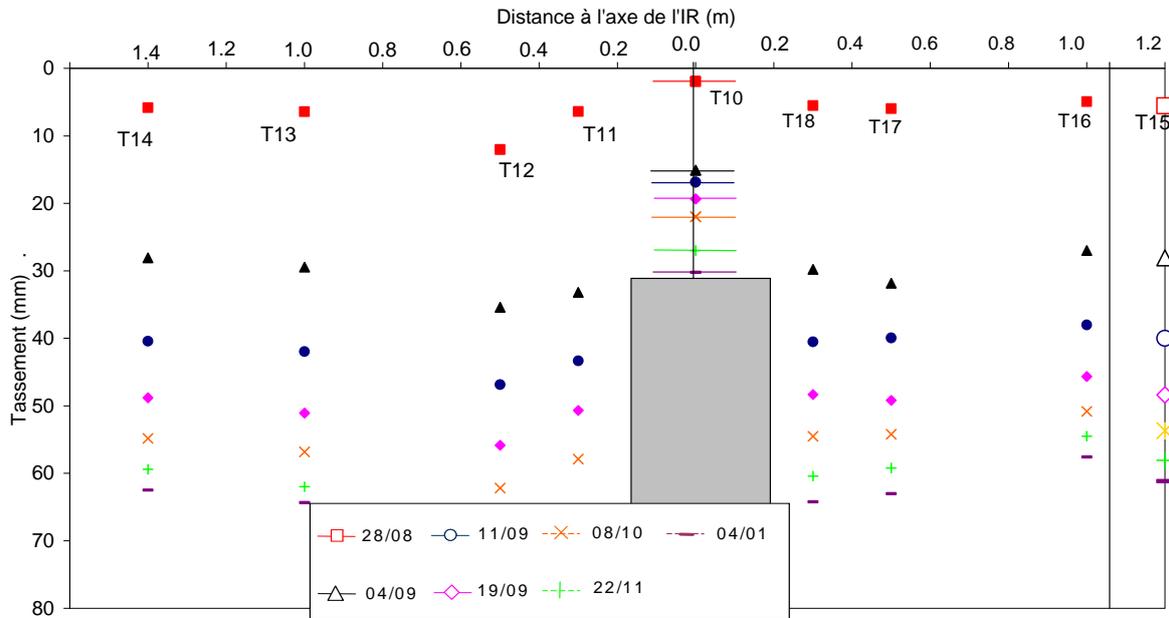


Figure 4. Mesure du tassement des IR et du sol dans le plot 3R

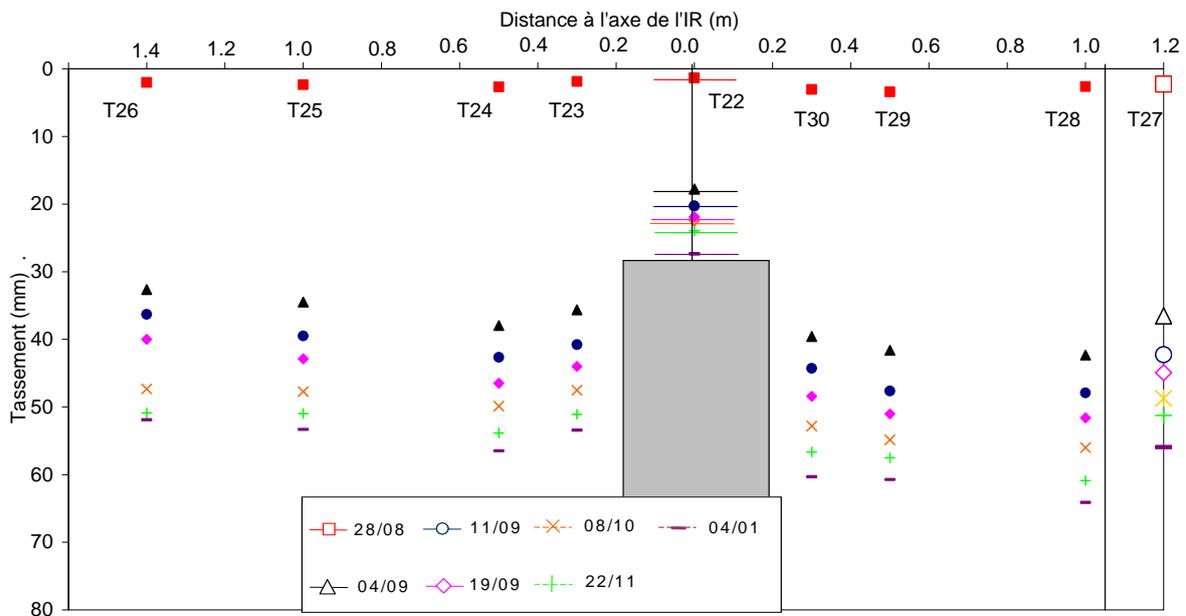


Figure 5. Mesure du tassement des IR et du sol dans le plot 4R

Le tassement sous les zones de recouvrement des nappes géotextiles n'est pas affecté par le compactage ni lors du remblaiement de telle sorte que le tassement est identique sous les zones de recouvrement et sous les nappes. Ce n'est pas le cas pour les géogrilles, où on observe une augmentation de tassement sous les zones de recouvrement notamment lors de la phase de mise en œuvre. Le compactage de la plateforme a semble-t-il « ouvert » les zones de recouvrement des nappes géogrilles.

Les plots renforcés réduisent nettement le tassement compté à partir du début de la construction du remblai (Tableau II) ou à partir de la fin de la mise en œuvre du remblai (Tableau III). La comparaison entre le tassement mesuré dans le plot 2R et ceux des plots 3R et 4R montre toute l'importance du rôle jouée par une plateforme de transfert de charge. La combinaison de cette plateforme (qui transfère la charge vers les inclusions) et d'un faible ancrage des inclusions permet d'obtenir un tassement différentiel moindre au niveau des têtes d'inclusions. Ce tassement différentiel est un paramètre dimensionnant, notamment lorsque le remblai est de faible épaisseur. Il est à noter que bien que l'efficacité E du plot 3R soit supérieure à celle du plot 4R, le tassement différentiel est plus faible dans le plot 4R.

Tableau II. Tassement compté à partir du début de la construction du remblai

Plot	1R	2R	3R	4R
Tassement du sol	260 mm	105 mm	71 mm	64 mm
Tassement différentiel sol/IR		97 mm	41 mm	37 mm

Le site expérimental présente un tassement après mise en œuvre du remblai relativement faible ; il est nécessaire, lors du dimensionnement, d'imposer un critère de tassement après mise en œuvre du remblai afin de tirer bénéfice du renforcement. Le renforcement doit permettre d'obtenir un tassement maîtrisé et stabilisé à la fin de la mise en œuvre du remblai et doit être suffisamment « souple » pour éviter des tassements différentiels trop importants au niveau des têtes d'inclusions.

Tableau III. Tassement compté à partir de la fin de la mise en œuvre du remblai

Plot	1R	2R	3R	4R
Tassement du sol	35 mm	18 mm	14 mm	10 mm
Tassement différentiel sol/IR		15 mm	7 mm	6 mm

4.2. Transfert de charge

Le transfert de charge vers les têtes d'inclusions se fait en grande partie pendant la mise en œuvre du remblai puisque 97 % de la charge finale est appliquée sur les têtes à la fin du chargement. Les deux capteurs positionnés sur le sol à la base du remblai du plot 2R mesurent la même contrainte (Figure 6). Au niveau de la tête d'inclusion, la contrainte mesurée (= 590 kPa) est très inférieure à la valeur représentant un report total de la charge de la maille (= 3350 kPa) sur l'inclusion. Cette contrainte augmente rapidement en profondeur (= 920 kPa à 50 cm de la tête d'inclusions). Cette augmentation de contrainte dans l'inclusion est due à un transfert de charge qui se fait par frottement dans la couche superficielle (remblai argileux et plateforme de trafic) dont les caractéristiques mécaniques semblent permettre une bonne participation du sol support aux mécanismes de transfert de charge.

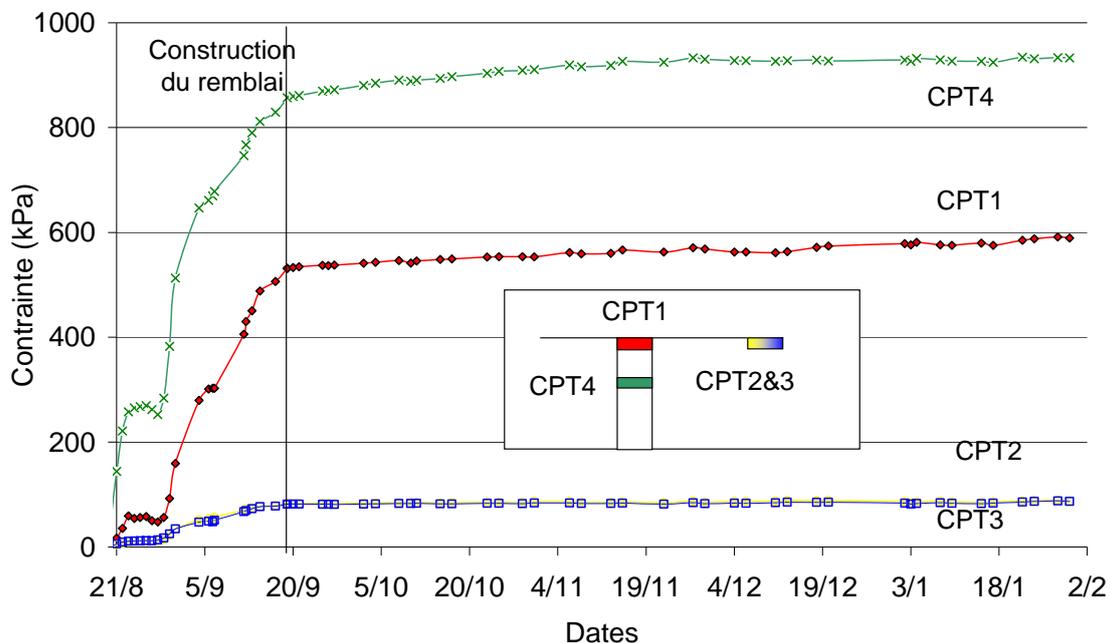


Figure 6. Mesure du transfert de charge dans le plot 2R

Le faible report de charge sur les têtes d'inclusions peut s'expliquer par l'absence de plateforme de transfert de charge granulaire à la base du remblai et par la technique de mise en œuvre des inclusions rigides. En effet le refoulement du sol peut améliorer le sol à proximité de l'inclusion, le transfert de charge peut s'appliquer alors à une section supérieure à celle de l'inclusion. Les moyens de mesures (capteur de même section que la tête) ne permettent pas d'apprécier exactement la distribution de contrainte et peuvent sous-estimer le report de charge réel.

Le transfert de charge vers les têtes d'inclusions est significativement plus grand dans les plots disposant d'une plateforme granulaire renforcée par des nappes géosynthétiques puisque la contrainte mesurée sur les têtes d'inclusions atteint des valeurs de l'ordre de 3000 kPa dans le plot 3R (Figure 7) et 2500 kPa dans le plot 4R (Figure 8).

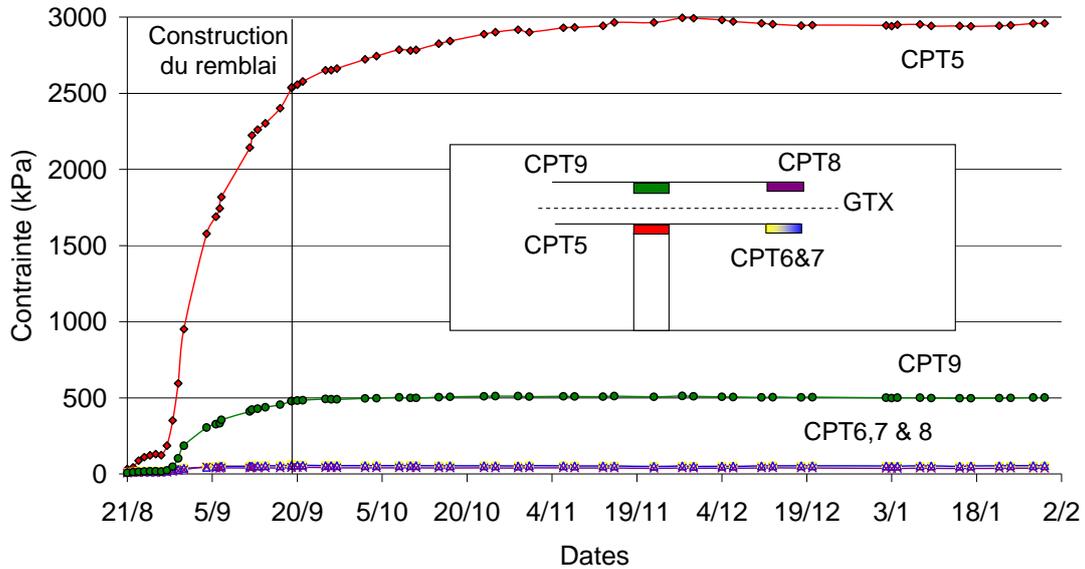


Figure 7. Mesure du transfert de charge dans le plot 3R

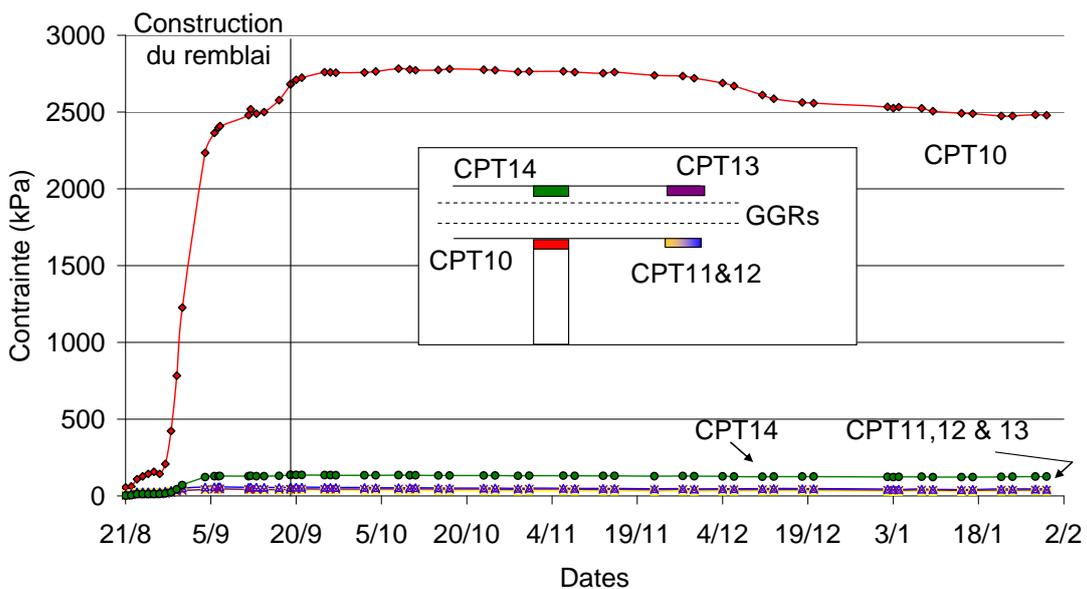


Figure 8. Mesure du transfert de charge dans le plot 4R

Pour ces deux plots, la contrainte mesurée sur le sol est négligeable. On note que les plateformes de transfert de charge se comportent différemment selon la nature du renforcement géosynthétique. En effet, la contrainte mesurée au droit des têtes d'inclusions au dessus de la plateforme de transfert de charge est plus grande dans le plot 3R ($\sigma_{\text{CPT9}} = 510$ kPa) que dans le plot 4R ($\sigma_{\text{CPT14}} = 130$ kPa). Il est à noter que la valeur mesurée à la base du remblai au droit des inclusions rigides dans le plot 3R ($\sigma_{\text{CPT9}} = 510$ kPa) est comparable à celle mesurée à la base du remblai au droit des inclusions rigides dans le plot 2R ($\sigma_{\text{CPT1}} = 590$ kPa).

Dans le plot 3R, la contrainte directement mesurée sur les têtes d'inclusion atteint sa valeur maximum quelques jours après la construction du remblai puis se stabilise. Dans le plot 4R, il y a redistribution de la contrainte vers le sol puisque la contrainte mesurée par le capteur CPT₁₀ décroît après avoir atteint sa valeur maximum.

4.3. Déformation des nappes géosynthétiques

La figure 9 présente les mesures de déformation dans le plot 3R de la nappe géotextile après la mise en œuvre de la plateforme de transfert de charge et après la mise en œuvre du remblai. Ces mesures sont effectuées en 5 points sur la diagonale d'une maille (Figure 9a) et sur le côté d'une maille (Figure 9b). De par la symétrie des mesures, on constate que l'instrumentation est adaptée à la mesure ; toutefois on peut supposer que des glissements entre la bande de Géodetect et la nappe géotextile sont possibles et ainsi la mesure peut être inférieure à la déformation réelle de la nappe.

On observe que la nappe géotextile est très peu sollicitée lors du compactage de la plate-forme. A la suite de la mise en œuvre du remblai, la nappe géotextile se déforme principalement au niveau des inclusions rigides, elle est beaucoup moins sollicitée au droit du sol compressible. Enfin on note que les déformations sont plus importantes dans le sens des renforts, c'est-à-dire sur le côté de la maille.

La figure 10 présente les mesures de déformation dans le plot 4R des deux géogrilles après la mise en œuvre de la plateforme de transfert de charge et après la mise en œuvre du remblai. Ces mesures sont effectuées en 5 points sur la diagonale d'une maille de la géogrille inférieure (Figure 10a) et supérieure (Figure 10b). Comme pour les mesures réalisées dans le plot 3R, l'instrumentation semble bien adaptée à la mesure.

Les géogrilles semblent plus sensibles au compactage que le géotextile. La géogrille inférieure se déforme plus lors de la mise en œuvre de la plateforme granulaire puisqu'elle subit plus de passes de compactage. Lors de la mise en œuvre du remblai, on constate que les géogrilles se déforment principalement vers les inclusions bien que cette déformation reste faible et qu'elles ne sont pas du tout sollicitées au droit du sol.

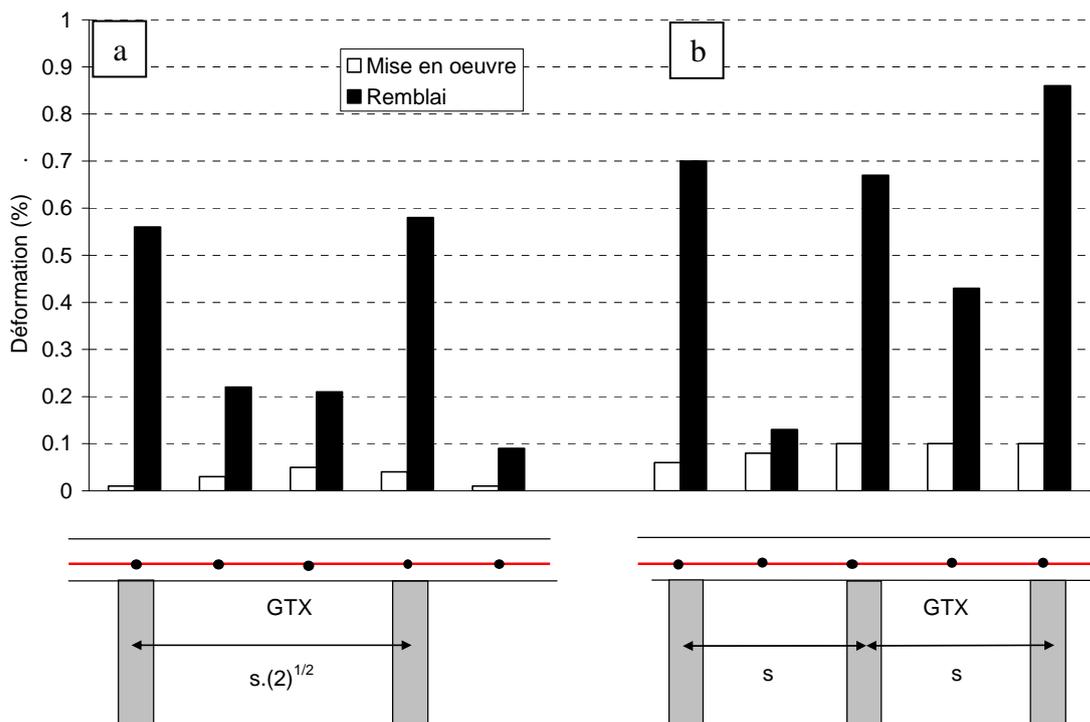


Figure 9. Déformation du géotextile

Les mesures de déformation permettent de constater que les nappes géosynthétiques n'ont pas le même comportement. La nappe géotextile travaille en membrane lors de la mise en œuvre du remblai et semble se déformer faiblement dans une zone périphérique aux inclusions rigides. Les géogrilles sont prétendues lors du compactage de sorte à former un complexe granulaire renforcé qui transfère la charge vers les têtes d'inclusions lors de la mise en œuvre du remblai. Là encore, les nappes travaillent principalement dans une zone périphérique aux inclusions rigides. Pour les deux plots, la mesure de déformation au niveau des inclusions se fait au droit des têtes, on peut supposer (d'après le profil des tassements) que cette déformation est plus importante dans la périphérie de l'inclusion.

La différence de comportement des nappes géosynthétiques peut être aussi observée en mesurant le tassement sous les zones de recouvrement. Le tassement sous les zones de recouvrement des nappes géotextiles n'est pas affecté par le compactage ni lors du remblaiement. Ce n'est pas le cas pour les

géogrilles, où on observe une augmentation de tassement sous les zones de recouvrement notamment lors de la phase de mise en œuvre.

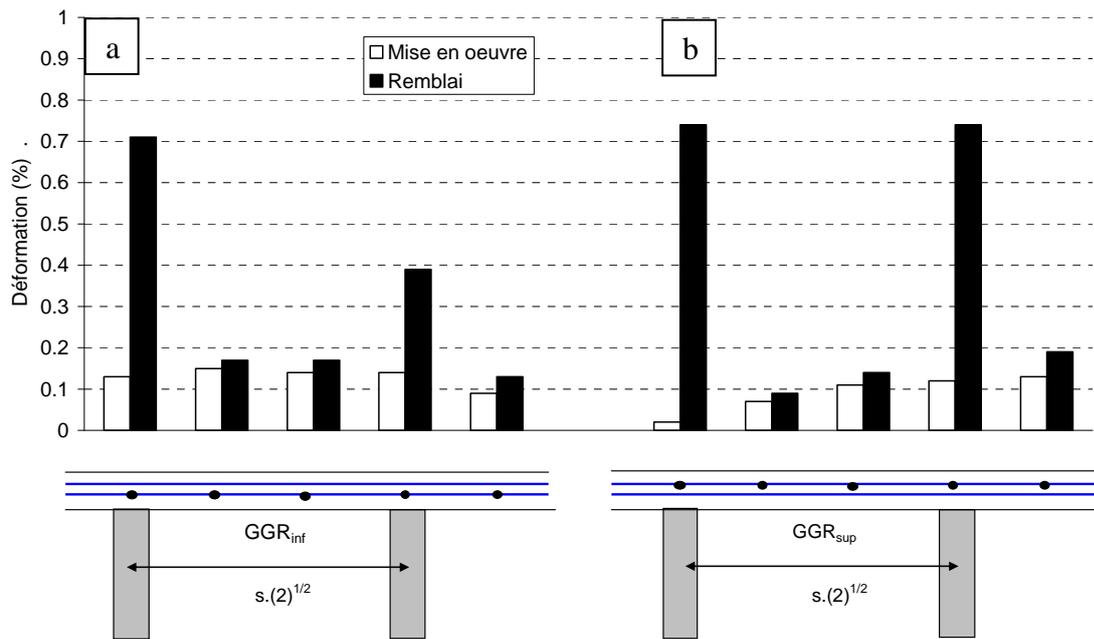


Figure 10. Déformation des géogrilles

5. Analyse des mécanismes

Le transfert de charge se fait par une combinaison de mécanismes dépendants de la présence ou non de certains éléments de renforcement.

Dans le cas de l'absence d'une plateforme de transfert de charge, la répartition de la charge vers les têtes d'inclusions se fait à la base du remblai. Ces mécanismes de transfert de charge ne permettent pas d'obtenir une efficacité importante au niveau des têtes puisque seulement 1/6^e du poids de la maille est repris par l'inclusion ; le sol support est donc assez fortement chargé. Un second transfert de charge vers les inclusions est fait par frottement. Ce transfert est d'autant plus important que la couche superficielle du sol est de bonne qualité. Ce transfert de charge nécessite un déplacement important du sol au niveau des têtes et donc un tassement différentiel sol / inclusion inacceptable dans le cas d'un remblai de faible épaisseur. Dans le cas traité (remblai d'une épaisseur de 5m), on peut estimer qu'un plan d'égal tassement se situe dans le remblai même si nous n'avons malheureusement pas installé les moyens pour le mesurer.

La présence d'une plateforme de transfert de charge améliore très nettement de transfert vers les inclusions. N'ayant pas réalisé de plot avec plateforme granulaire sans géosynthétique, il n'est pas possible d'identifier la part du rôle des nappes géosynthétiques.

Les mesures de déformation des nappes (Figures 9 et 10), de tassement sous les zones de recouvrement, les mesures de contrainte au-dessus de la plateforme (Figures 7 et 8) montrent que pour des tassements comparables, les mécanismes de transfert de charge sont différents selon la nature des nappes géosynthétiques. Dans le cas du plot 3R, la nappe géotextile se met en tension pendant la mise en œuvre du remblai et travaille essentiellement dans une zone périphérique à l'inclusion rigide (Figure 9). Cette mise en tension a tendance à confiner le sol situé autour de l'inclusion générant des tassements plus importants dans la périphérie de l'inclusion (Figure 4). L'inclusion étant très chargée et peu ancrée, elle tasse (Figure 4) mais elle transfère qu'une très faible part de sa charge au sol avoisinant (Figure 7) qui tasse autant que l'inclusion, l'ensemble se stabilise lorsque l'inclusion peut reprendre l'ensemble des efforts transmis (pointe et frottement positif sur la partie inférieure de l'inclusion). Au-dessus de la plateforme de transfert de charge (Figure 7) on observe les mêmes répartitions de contrainte qu'à la base du plot 2R (Figure 6) comme si des inclusions fictives prolongées les inclusions dans la plateforme de transfert de charge. Dans le cas du plot 4R, les géogrilles sont prétendues pendant le compactage de la plateforme de transfert de charge (Figure 10). Cette pré-tension a tendance à favoriser des chemins préférentiels de transfert de charge au sein de la plate-forme. Ainsi,

au-dessus de la plateforme nous observons peu de différence entre la contrainte mesurée au droit de l'inclusion et celle mesurée au droit du sol (Figure 8). Lors de la construction du remblai, les géogrilles travaillent exclusivement à la périphérie des inclusions rigides (Figure 10). L'inclusion étant très chargée et peu ancrée, elle tasse (Figure 5) et redistribue une part de sa charge au sol avoisinant (Figure 8).

En première analyse, il n'est pas aisé d'expliquer les différences de transfert de charge observées dans les plots 3R et 4R. En effet, pour un tassement semblable des inclusions rigides, la charge reprise par les inclusions du plot 3R est nettement supérieure à celle reprise par les inclusions rigides du plot 4R. Cette différence ne s'explique pas par l'ancrage des inclusions puisqu'il est identique dans les deux plots. Une analyse plus complète, avec une modélisation numérique des nappes, permettra de vérifier si la différence de transfert de charge observée peut être expliquée par la nature des renforcements géosynthétiques.

6. Conclusions

Dans le cadre du projet national A.S.I.R.I., une expérimentation en vraie grandeur sous remblai renforcé par inclusions rigides a été réalisée. L'instrumentation mise en place était tout à fait adaptée aux mesures réalisées. L'ensemble des mesures a permis d'acquérir des données expérimentales de tout premier ordre concernant le comportement des remblais sur inclusions rigides. Certains mécanismes de transfert de charge ont été identifiés. Les mesures ont permis de vérifier l'influence de la réaction du sol sous la plate-forme granulaire mettant à défaut les hypothèses conservatives de certaines méthodes de dimensionnement.

L'importance de la présence d'une plate-forme de transfert de charge a été démontrée en terme de transfert de charge vers les inclusions, cependant, dans le cas présent, le dispositif semble aussi efficace en son absence, en termes de tassement. Lorsque le sol en place combiné à la plateforme de trafic présente une couche superficielle d'assez bonne qualité pour assurer un transfert de charge par frottement, l'efficacité en contrainte déterminée sur les têtes d'inclusions n'est pas forcément représentative de l'efficacité réelle du dispositif. Les mesures montrent que pour des tassements comparables, les mécanismes de transfert de charge semblent être différents selon la nature des nappes géosynthétiques renforçant les plates-formes granulaires. Cette base de données constitue un acquis important du Projet National, au cœur des actions qui se poursuivent pour confronter et valider les méthodes de dimensionnement de ces ouvrages.

7. Remerciements

Les auteurs remercient les différents partenaires du projet national A.S.I.R.I. : Fondasol, IREX, Keller, LCPC, Scétauroute, Socotec, Tencate Geosynthetics pour leur participation active à cette expérimentation en vraie grandeur, le Conseil Général de Seine et Marne pour le prêt du site ainsi que le Réseau Génie Civil et Urbain et la DRAST pour leur soutien.

8. Références bibliographiques

Briançon L., Kastner R., Simon B., Dias D. (2004). Le renforcement des sols par inclusions rigides. Proc. of the International symposium on Ground Improvement (ASEP-GI), Paris, France, pp.15-44.