



Amélioration des Sols par Inclusions Rigides

Opération du Réseau Génie Civil et Urbain

OPERATION DU RESEAU GENIE CIVIL & URBAIN

**A.S.I.R.I. – TRANCHE 2 – THÈME 1
RAPPORT FINAL**

L. BRIANÇON – MCF (CNAM)



A.S.I.R.I / FICHE SIGNALÉTIQUE

TITRE : A.S.I.R.I. – TRANCHE 2 – THEME 1 : RAPPORT FINAL
RAPPORT N° : 2-08-1-01
DATE D'ÉTABLISSEMENT : JUILLET 2008
AUTEURS : BRIANÇON
ORGANISMES CHARGES DE L'ACTION : CNAM
THEME DE RATTACHEMENT : 1
LETTRE DE COMMANDE :

1. Rappel sur la configuration des plots et de l'instrumentation

Le chantier expérimental de Chelles est constitué des quatre plots (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 dans une plateforme granulaire disposée à la base du remblai,
- plot 4R renforcé par inclusions rigides et par deux géogrilles dans une plateforme granulaire disposée à la base du remblai.

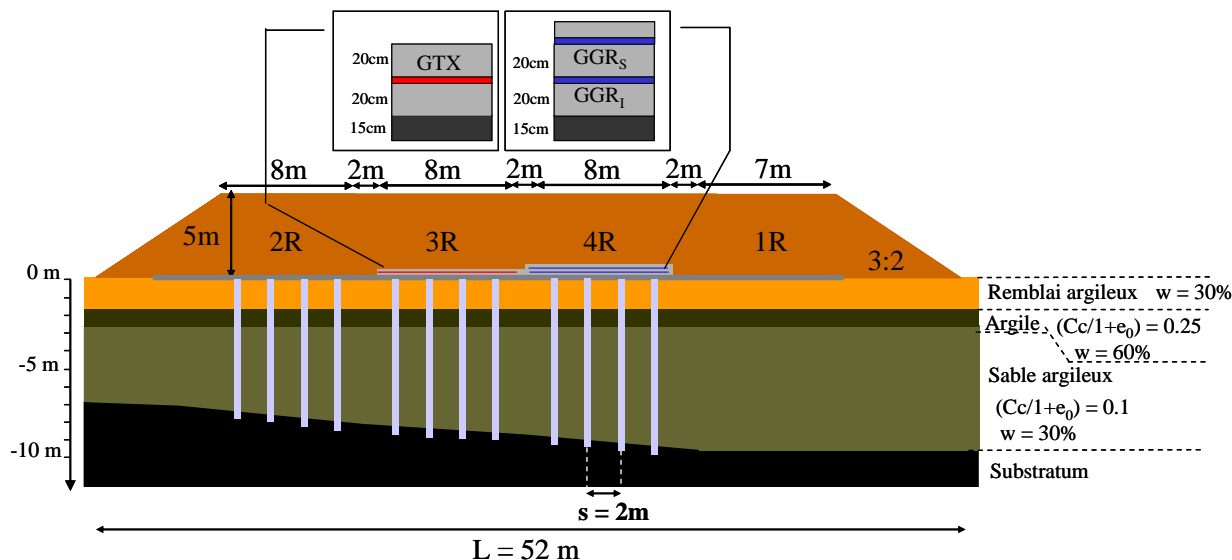


Figure 1 – Configuration des plots expérimentaux

L'instrumentation présentée dans le rapport 2-07-1-01 est détaillée en annexe 1 pour rappel. Elle permet de mesurer le report de charge, les déplacements verticaux des inclusions rigides et du sol, les variations de pression interstitielle et la cote de la nappe, les déformations des inclusions rigides et des nappes géosynthétiques, les déplacements latéraux du sol et l'inclinaison des inclusions rigides en pied de talus.

Les mesures ont été effectuées du début de la mise en œuvre du remblai en août 2007 jusqu'au retrait du remblai en février 2008.

2. Résultats du piézomètre et des CPI

Les deux piézomètres situés à la même profondeur et dans les plots 1R et 2R donnent des résultats similaires en dehors de la phase de mise en place du remblai. Les valeurs de pression interstitielle ramenées en hauteur de nappe équivalente donnent des résultats proches de ceux mesurés par le piézomètre en dehors de la période de la mise en œuvre du remblai.

Lors de la mise en œuvre du remblai, on note une augmentation de la pression interstitielle, plus prononcée dans le plot non renforcé (1R). Cette pression est rapidement dissipée dans les deux plots.

La bonne concordance des mesures effectuées par les deux capteurs de pression interstitielles avec les mesures du piézomètre valide l'instrumentation et la bonne mise en œuvre qui reste délicate pour ce type de capteurs.

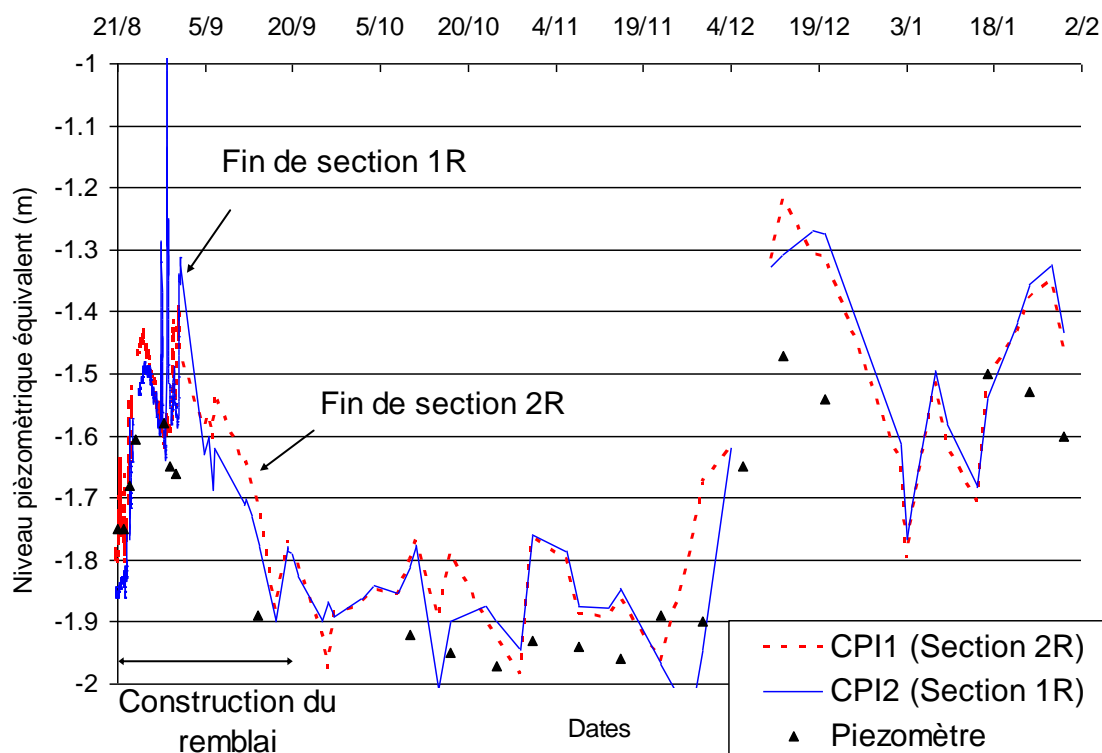


Figure 2 – Mesure du niveau piézométrique par différents moyens

3. Transfert de charge et efficacité

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 3). 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.

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.

Deux capteurs de pression totale rectangulaire (CPTH1 & CPTH2) positionné sur le fut des inclusions rigides à quelques centimètres de leur tête permettent d'évaluer la contrainte horizontale appliquée sur les inclusions rigides. Les deux capteurs donnent des valeurs comparables validant les mesures (Figure 4). Le frottement négatif appliqué entre les deux capteurs CPT1 et CPT4, distants de 50 cm, peut être évalué en première approximation par :

$$F_n = (\sigma_{CPT4} - \sigma_{CPT1}) \cdot S \quad (\text{éq. 1})$$

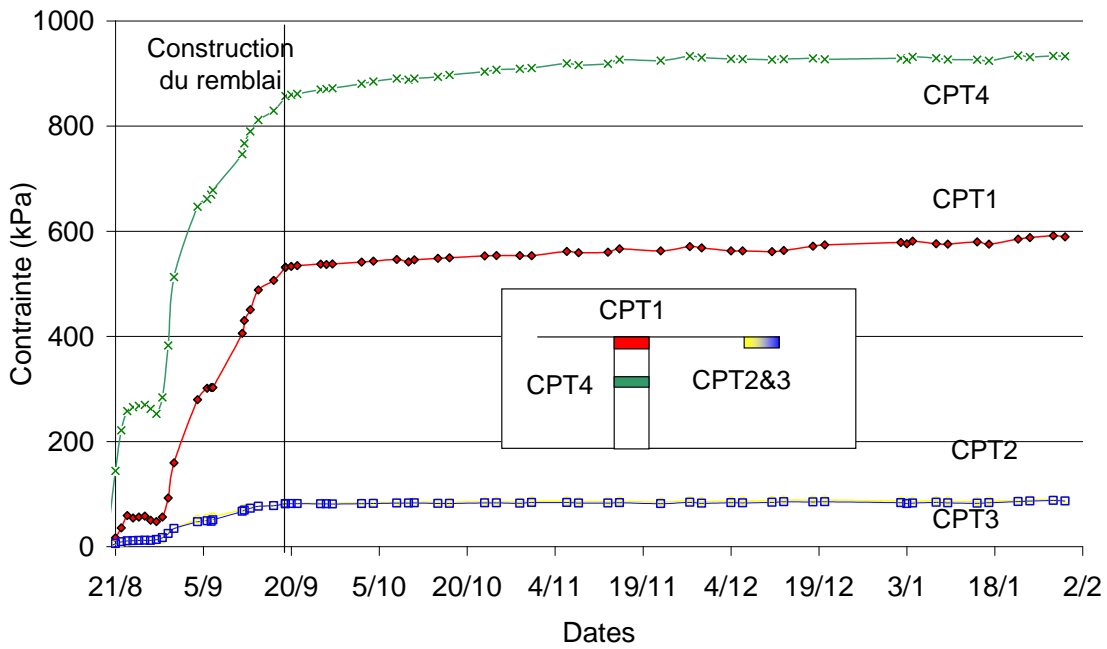


Figure 3 – Mesure du transfert de charge dans le plot 2R

Par ailleurs,

$$F_n = \pi \cdot D \cdot H \cdot \sigma_H \cdot K \tan \delta \quad (\text{éq. 2})$$

Malheureusement, il n'est pas possible d'évaluer le paramètre $k \tan \delta$ car la mise en place des capteurs le long du fût a nécessité une déstructuration du sol en place ; les mesures de la contrainte horizontale appliquée sur le fut sont donc difficilement exploitables et ne représentent pas les valeurs réelles de la contrainte horizontale appliquée sur l'inclusion rigide.

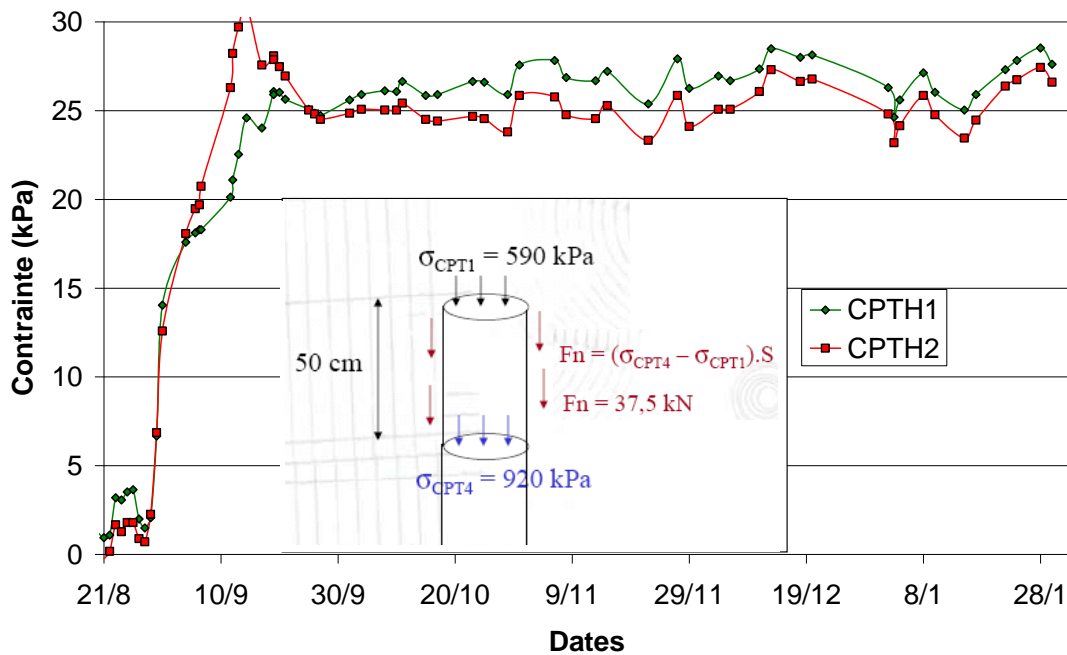


Figure 4 – Mesure de la contrainte horizontale appliquée sur le haut des inclusions du plot 2R

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 5) et 2500 kPa dans le plot 4R (Figure 6).

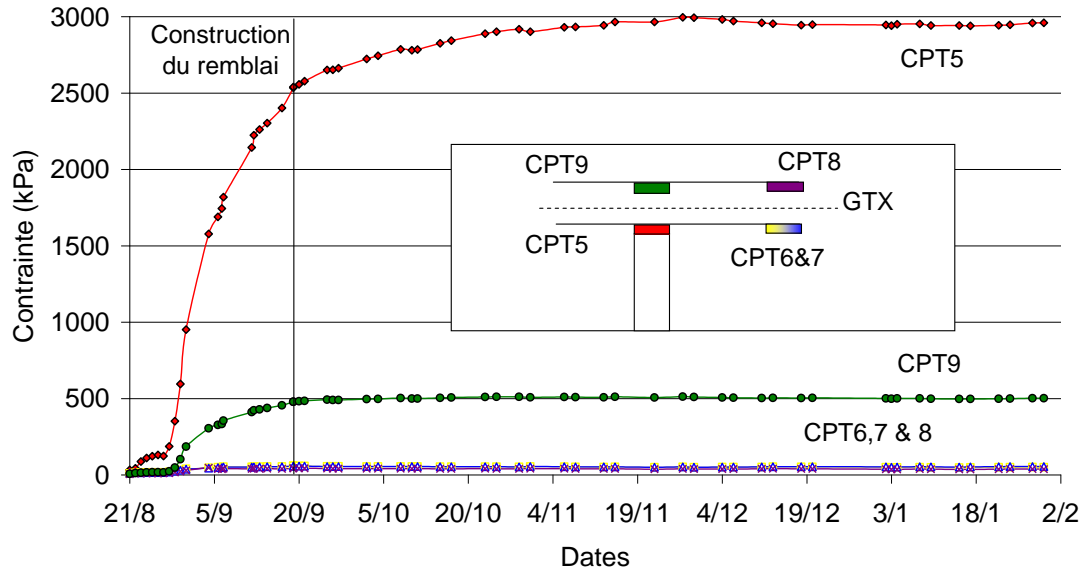


Figure 5 – Mesure du transfert de charge dans le plot 3R

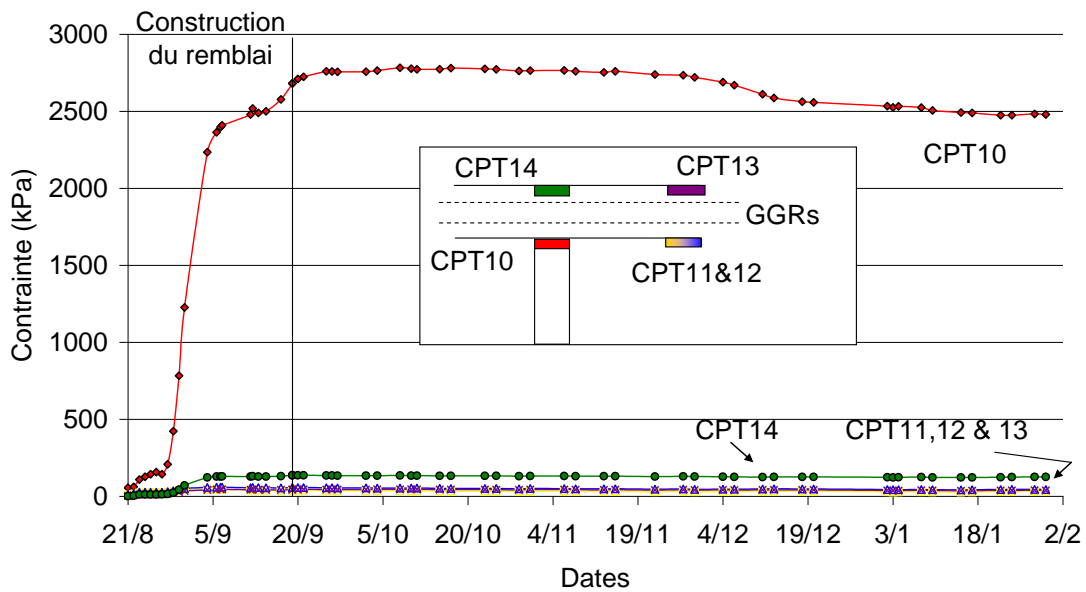


Figure 6 – Mesure du transfert de charge dans le plot 4R

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 ($\sigma_{CPT9} = 510$ kPa) que dans le plot 4R ($\sigma_{CPT14} = 130$ kPa). Il est à noter que la valeur mesurée à la base du remblai au droit des inclusions rigides dans le plot 3R ($\sigma_{CPT9} = 510$ kPa) est comparable à

celle mesurée à la base du remblai au droit des inclusions rigides dans le plot 2R ($\sigma_{CPT1} = 590$ 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 σ_{CPT10} décroît après avoir atteint sa valeur maximum.

La figure 7 propose une synthèse des contraintes mesurées au droit des têtes d’inclusions. On note l’importance de la présence d’une plateforme de transfert de charge à la base du remblai pour atteindre une efficacité maximale du renforcement.

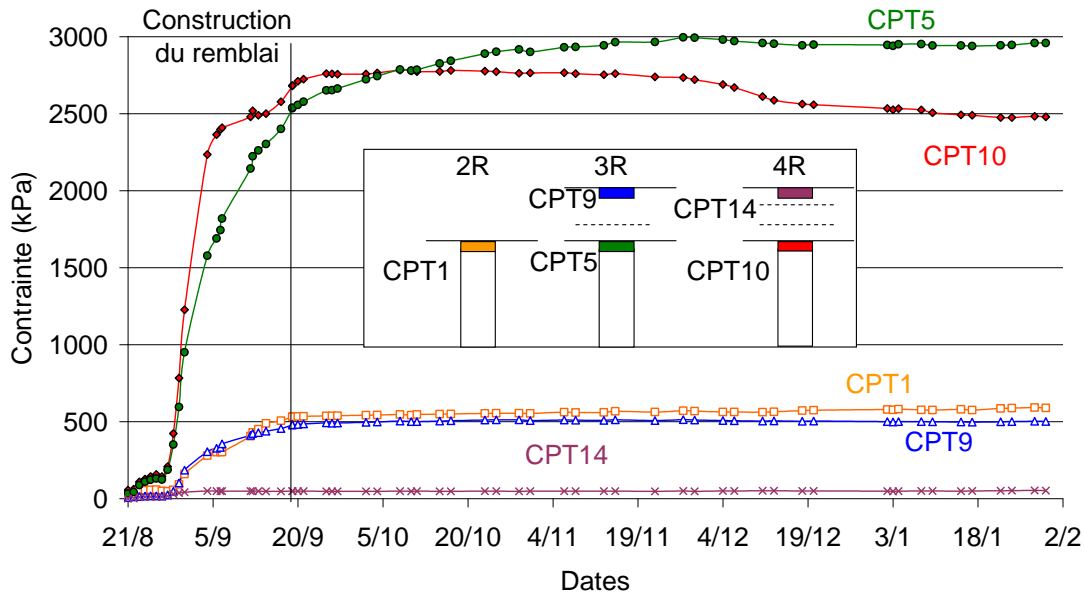


Figure 7 – Comparaison du transfert de charge dans les différents plots

L’efficacité a été calculée pour les trois plots (Tableau I). Nous rappelons que l’efficacité E est le rapport entre la charge réellement appliquée sur une tête d’inclusion et la charge appliquée sur une maille. L’efficacité est maximum si toute la charge appliquée sur la maille est reprise sur la tête d’inclusion.

Tableau I. Efficacité des renforcements

Plot	2R	3R	4R
Efficacité	17,9 % (27,8 %) ¹	89,5 %	74,6 %
Taux de transfert de charge à la fin de la construction du remblai	90 % (92 %)	86 %	108 %

¹ : évaluée à 50 cm sous la tête de l’inclusion

On peut d’ores et déjà remettre en question la pertinence du paramètre E pour évaluer l’efficacité de ces dispositifs. En effet, ce paramètre a été (historiquement) défini à la suite d’essais en laboratoire pour lesquels le sol sous-jacent n’était pas pris en compte. Or s’il existe une couche de sol de bonne qualité permettant une reprise d’une partie de la charge, l’efficacité sera moindre mais le tassement différentiel sera diminué, ce qui a priori est le but recherché.

Il est donc préférable d'évaluer l'efficacité en termes de tassement et non de report de charge mesuré sur les têtes d'inclusions.

Le transfert de charge mesuré dans le plot 2R montre que le sol sous-jacent peut participer au transfert de charge par frottement. Il est important de considérer cette couche de sol dans le dimensionnement car elle est souvent présente soit naturellement (remblai existant à la surface) soit rapportée (plateforme de trafic). Dans certains cas, la présence de têtes coiffant les inclusions rigides peut avoir une influence défavorable sur les tassements puisqu'elle diminue ou supprime le frottement sol/inclusion dans la zone où il est le plus important. La présence de tête peut donc dans certains cas abaisser le point neutre et donc solliciter le sol compressible sur une plus grande profondeur.

Un petit calcul simple permet de vérifier si la contrainte sur le sol mesurée et celle calculée à partir de la mesure de la contrainte sur l'inclusion rigide sont concordantes en supposant que la contrainte est uniforme sur le sol. Le tableau II présente cette vérification.

Tableau II. Vérification de la mesure de la contrainte sur le sol

Plot	σ_{IRmes} (kPa)	$\sigma_{solcalc}$ (kPa)	σ_{solmes} (kPa)	$\sigma_{solmesPTF}$ (kPa) *
2R	590	80	87	87
3R	3000	10	50	43
4R	2500	25	35	25

* mesurée à partir de la mise en œuvre de la plateforme granulaire

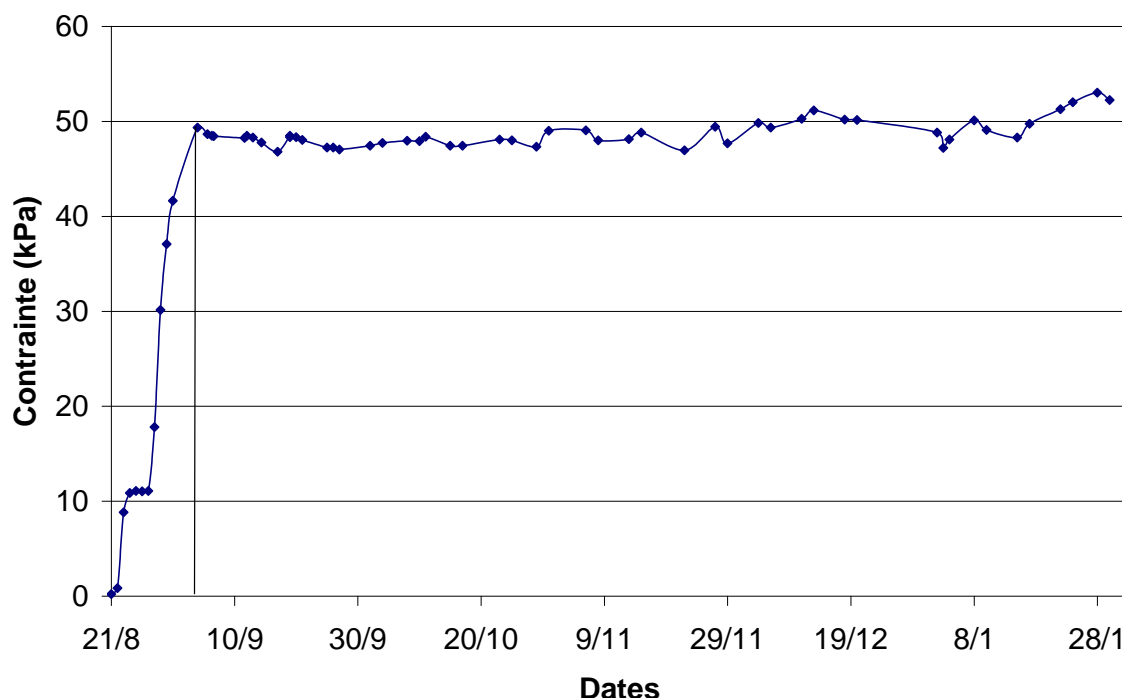


Figure 8 – Mesure de la contrainte appliquée à la base du remblai 1R

Les résultats sont concordants pour le plot 2R. Pour les deux plots disposant d'une plateforme granulaire, on peut expliquer les écarts par le compactage de la plateforme au droit des capteurs qui peut fausser les mesures. La mesure de la contrainte sur un sol compressible reste

délicate, l'écart entre la mesure du capteur CPT15 (Figure 8) situé sous le remblai du plot 1R ($\sigma = 53 \text{ kPa}$) et la contrainte appliquée ($\sigma = \gamma.H = 19.5 = 95 \text{ kPa}$) illustre ces difficultés à bien mesurer la contrainte.

4. Déformation des IR

Les extensomètres à corde vibrante positionnés dans les inclusions rigides à quelques centimètres de leur tête permettent de calculer la contrainte appliquée (Figure 9), connaissant le module du béton. Notons qu'un capteur du plot 4R n'a jamais fonctionné et que deux capteurs du plot 2R n'ont pas été pris en compte pour l'analyse.

Cette mesure reste délicate, la verticalité des capteurs ne pouvant être contrôlée pendant le retrait du béton. De plus, il est difficile d'estimer précisément le frottement latéral pour chaque plot et de savoir si ce frottement n'est pas perturbé par la nature des renforcements horizontaux. Il n'a pas été possible de retrouver par un calcul simple ($\sigma = E.\epsilon$) les contraintes appliquées sur les têtes d'inclusions à partir des déformations mesurées dans les inclusions à quelques centimètres de la tête.

A partir des essais d'écrasement sur les éprouvettes de béton (annexe 7 du rapport 2-07-1-01), il est possible de déterminer le module instantané à partir de l'équation 3 :

$$E_i = 11000 \sqrt[3]{f_{c,j}} = 36,5 \text{ GPa} \quad (\text{éq.3})$$

Et déduite le module différé par l'équation 4 :

$$E_d = \frac{E_i}{3} = 12 \text{ GPa} \quad (\text{éq.4})$$

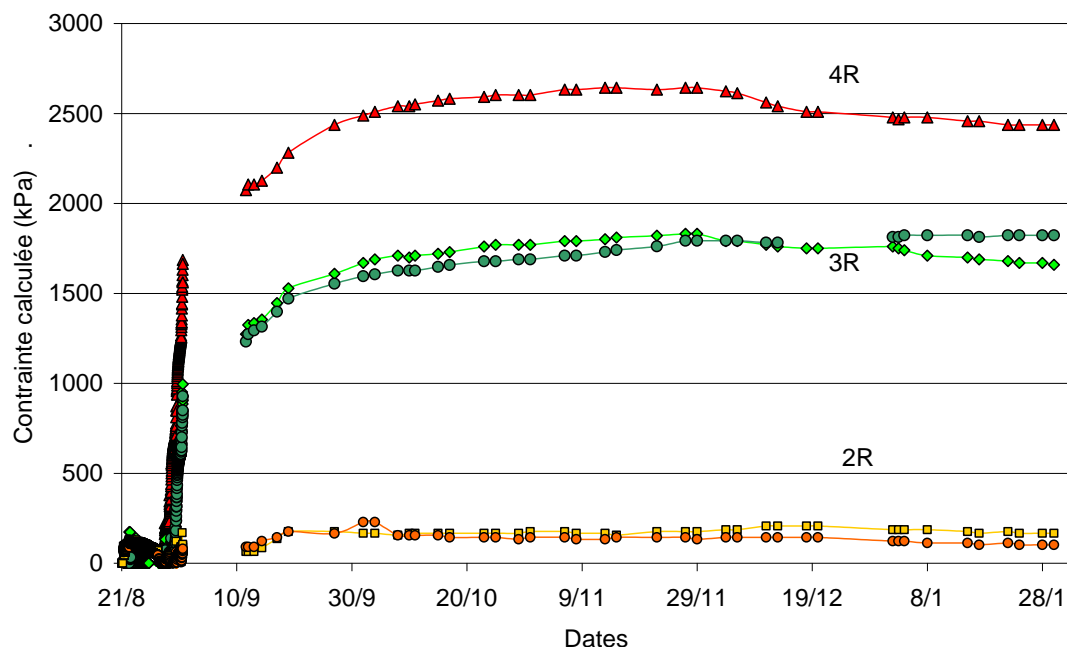


Figure 9 – Calcul de la contrainte appliquée sur les têtes d'inclusions à partir de la mesure de la déformation par les extensomètres à corde vibrante en considérant un module du béton $E = 17 \text{ GPa}$.

En appliquant ce module aux valeurs de déformation mesurées par les ECV, on ne retrouve pas les valeurs de contrainte mesurées par les CPT. De plus l'évaluation du module différé par l'équation 4 ne fait pas l'unanimité...

Ne disposant pas du module exact du béton, nous en avons calculé un sur le plot 4R pour retrouver les valeurs mesurées par le capteur de pression totale CPT₁₀ positionné sur la tête de l'inclusion. Avec un module $E = 17 \text{ GPa}$ ($\approx E_i / 2$), la courbe de la contrainte calculée sur le plot 4R est concordante avec celle de la contrainte mesurée par le capteur CPT₁₀. Par contre, la prise en compte de ce module entraîne une sous-estimation de la contrainte calculée dans les deux autres plots (Figure 9).

Même si en valeur, les extensomètres à corde vibrante ne permettent pas de retrouver les contraintes mesurées par les CPT, nous observons que l'allure des courbes de contrainte calculées est très semblable à celles tracées à partir des mesures des capteurs de pression totale. Notamment, nous retrouvons la décroissance de la courbe du plot 4R et sensiblement les mêmes pourcentages de taux de transfert de charge à la fin de la construction du remblai. Même si cette instrumentation ne permet pas de déterminer les reports de charge vers les têtes d'inclusions rigides, elle permet de valider les mesures réalisées par les capteurs de pression totale. L'utilisation de ces capteurs de déformation pour déterminer la contrainte appliquée sur les inclusions rigides nécessiterait l'emploi de capteurs possédant une distance entre flasque plus importante et des flasques de plus grande section pour assurer une bonne stabilité des capteurs et une intégration de la mesure de la déformation sur une plus grande distance.

5. Tassement du sol compressible

Les mesures du tassement, au niveau du terrain naturel, par les transducteurs et la première bague magnétique des deux tassomètres mettent en évidence une très bonne concordance des mesures (Figure 10). Le plot non renforcé (1R) atteint un tassement de 23 à 26 cm. Le tassement du plot renforcé (2R) est significativement réduit de près de 60 % à la base du remblai. Cette réduction de tassement est aussi observée en profondeur : 70 % à -2 m et 80 % à -5 m.

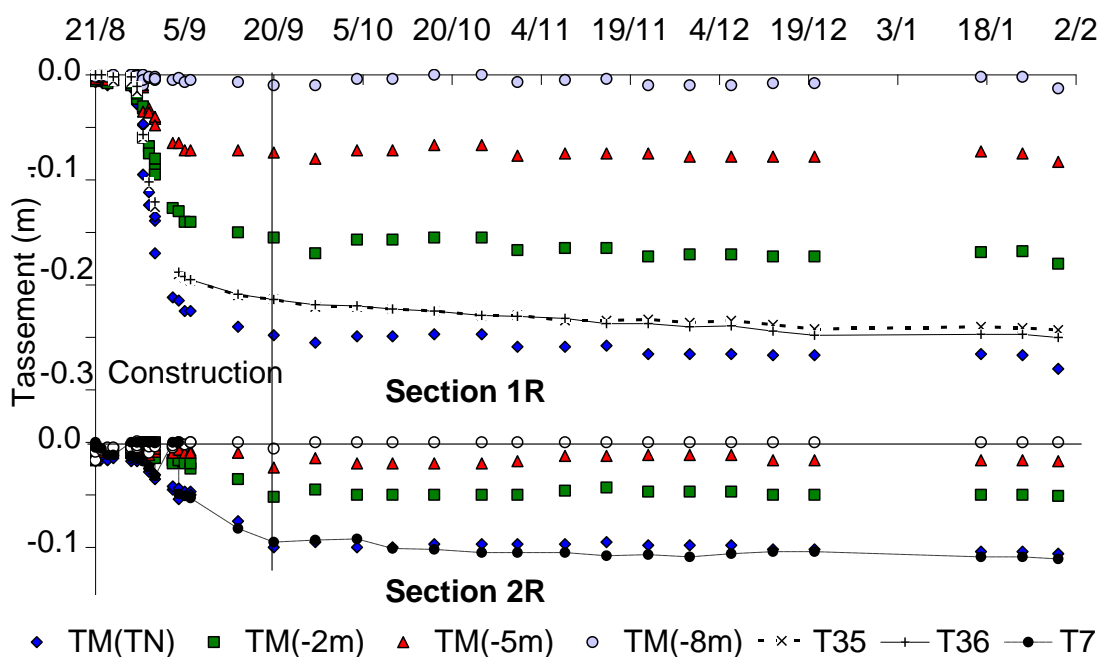


Figure 10 – Mesure du tassement du sol à l'aide des tassomètres magnétiques et des transducteurs

Le renforcement n'accélère pas, dans le cas présent, le temps de tassement qui est déjà très court pour le plot non renforcé.

6. Tassement au niveau des têtes d'inclusions

Les profils de tassement, mesurés à l'aide des transducteurs au niveau des têtes d'inclusions sont présentés pour les trois plots pour différentes dates (Figure 11 à 13). On peut considérer que le remblai est en construction jusqu'à la date du 19 septembre 2008 même si le phasage de sa mise en œuvre n'a pas permis de rehausser tous les plots dans le même temps.

Dans le plot 2R, le tassement de l'inclusion est de l'ordre de 8 mm (Figure 11). Le tassement du sol présente un profil très plat jusqu'à 30 cm de la périphérie de l'inclusion (Figure 11). 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 (Figure 14 (T3 – T2)) met en évidence un phénomène d'accrochage du sol au moins sur les 10 premiers centimètres voisin de la périphérie de l'inclusion.

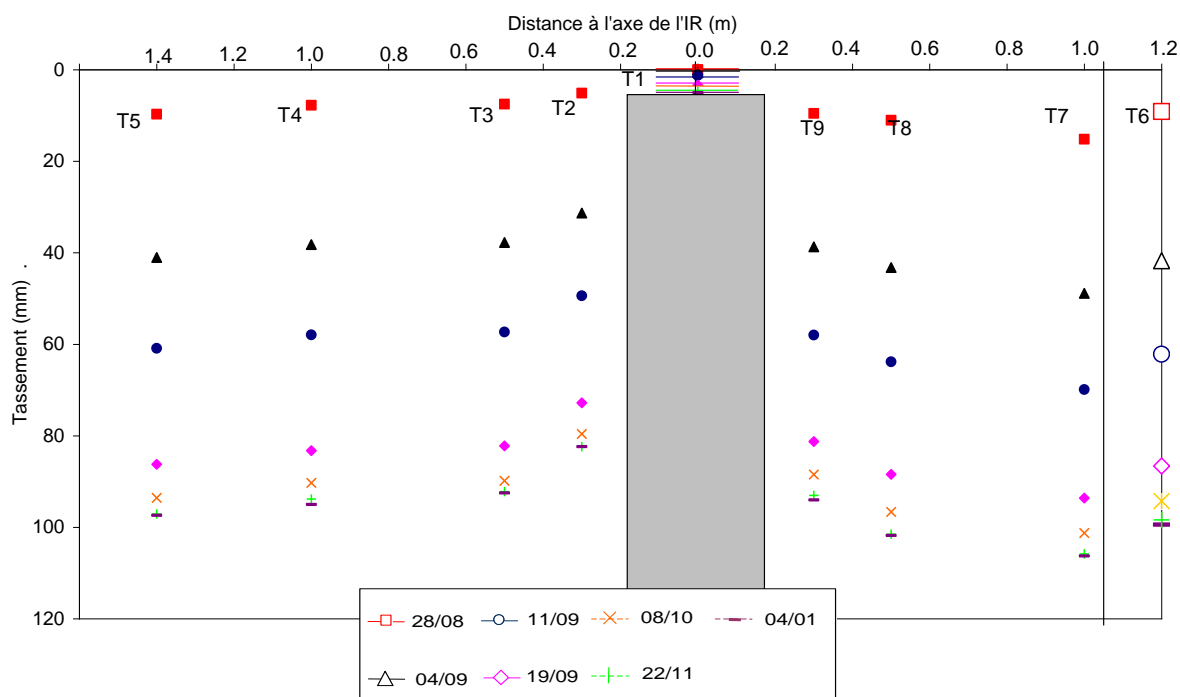


Figure 11 – Mesure du tassement des IR et du sol dans le plot 2R

Les profils de tassements sur la diagonale sont comparables à ceux mesurés sur le côté de la maille.

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. 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 (cf paragraphe 8).

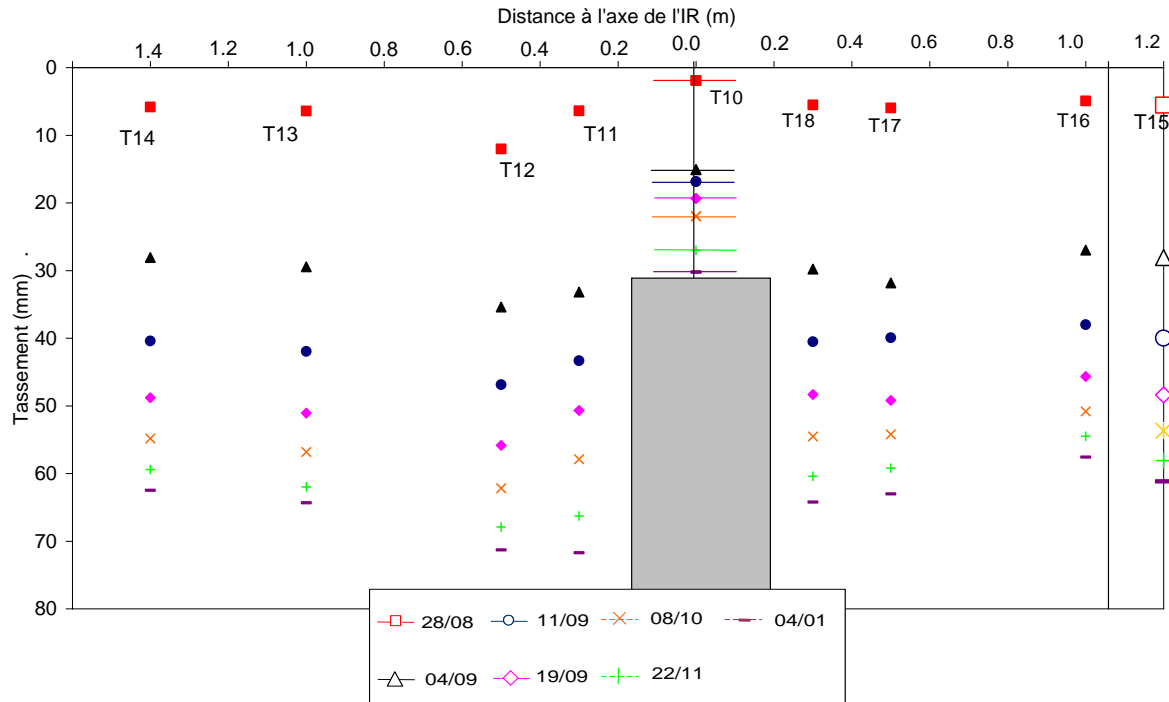


Figure 12 – Mesure du tassement des IR et du sol dans le plot 3R

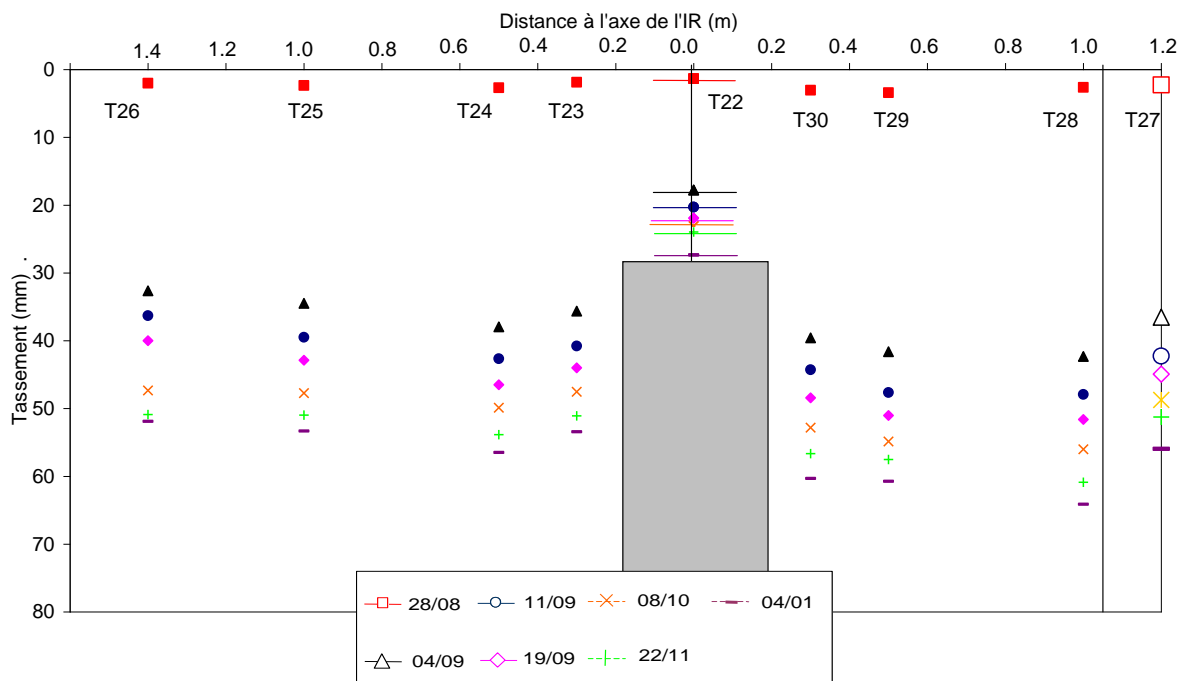


Figure 13 – Mesure du tassement des IR et du sol dans le plot 4R

Le tassement différentiel entre le sol et les inclusions se produit pendant la mise en œuvre du remblai, ensuite ce tassement différentiel se stabilise (Figure 15).

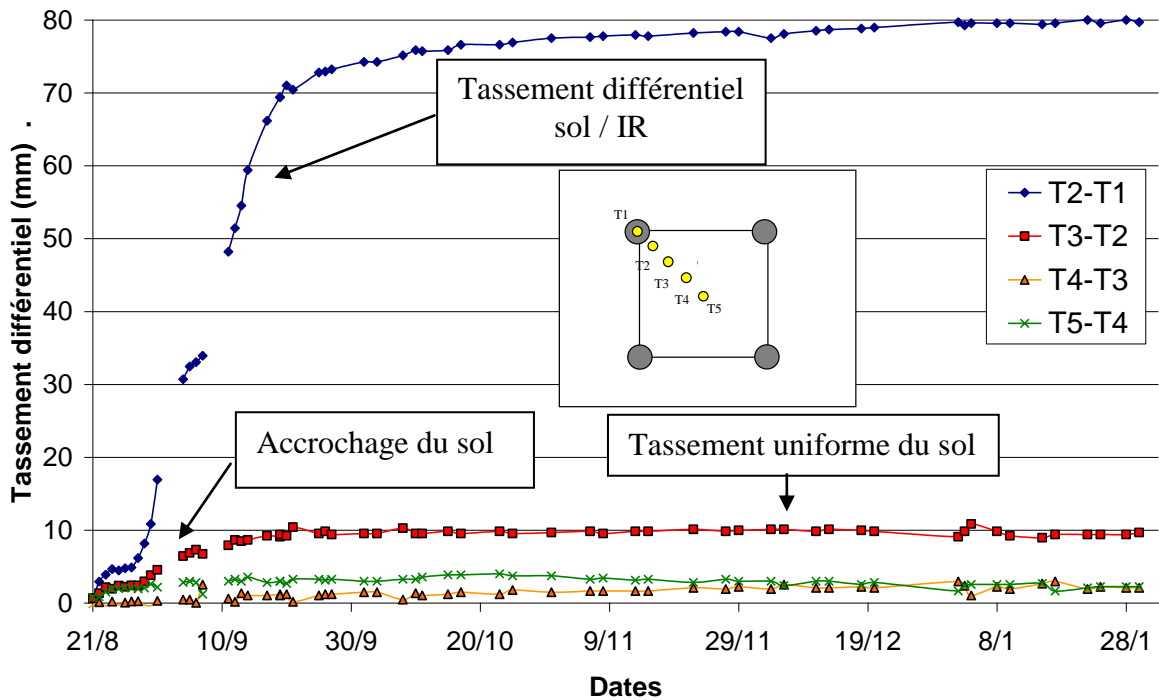


Figure 14 – Tassement différentiel de 2 capteurs consécutifs du plot 2R

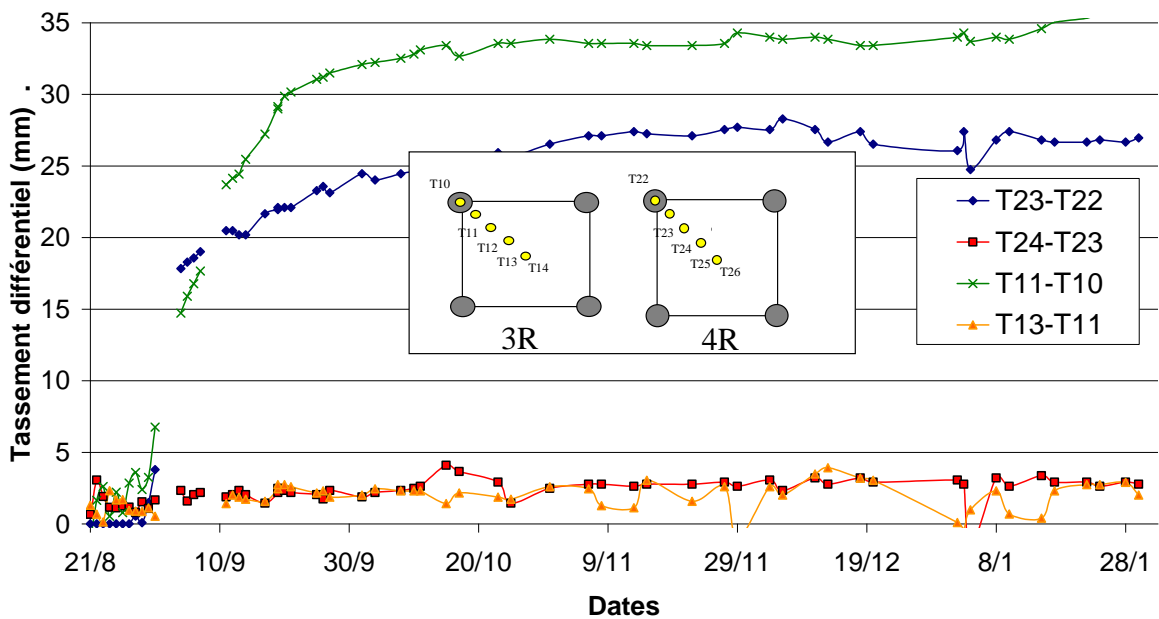


Figure 15 – Tassement différentiel de 2 capteurs consécutifs des plots 3R & 4R

Les plots renforcés réduisent nettement le tassement compté à partir du début de la construction du remblai (Tableaux III) ou à partir de la fin de la mise en œuvre du remblai (Tableaux IV). 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. Cette observation renforce les doutes émis sur la pertinence du paramètre E au paragraphe 3.

Tableau III. 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 IV. 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

7. Tassement au-dessous et au-dessus de la plateforme de transfert de charge

La comparaison du tassement mesuré au-dessus et en dessous de la plateforme montre une légère différence de comportement entre les plots 3R et 4R. Pour chaque plot, on note s le tassement mesuré sous la plateforme et $\alpha.s$ le tassement mesuré au dessus. On observe que le tassement est plus faible au-dessus de la plateforme et que la diminution de tassement augmente avec le temps. Les variations mesurées restent toutefois peu significatives : de telles plates-formes de transfert de charge ne permettent pas d'obtenir un plan d'égal tassement au-dessus de la plate-forme.

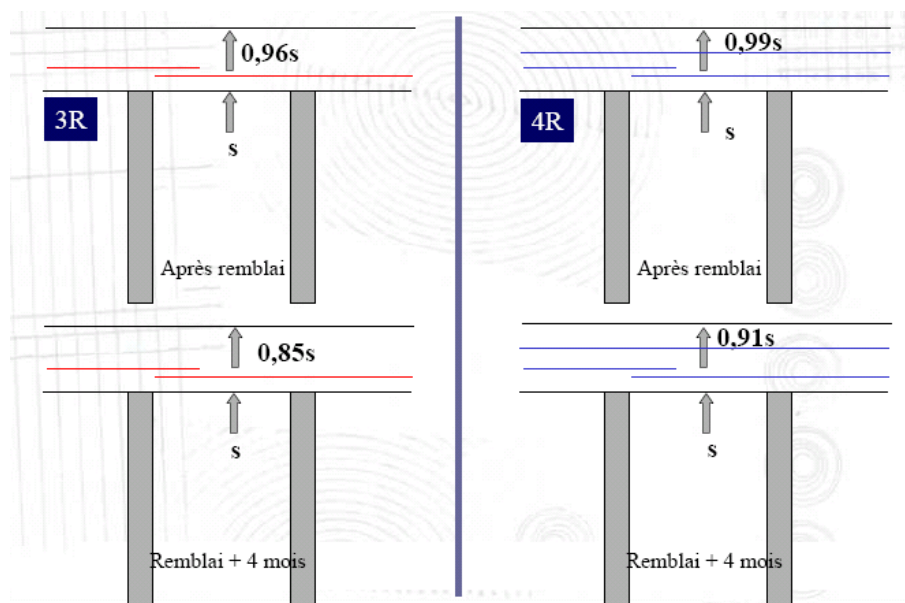


Figure 16 – Comparaison du tassement mesuré au-dessus et en dessous de la plateforme de transfert de charge

8. Déformation des nappes géosynthétiques

La figure 17 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 17a) et sur le côté d’une maille (Figure 17b). 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 plateforme. 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.

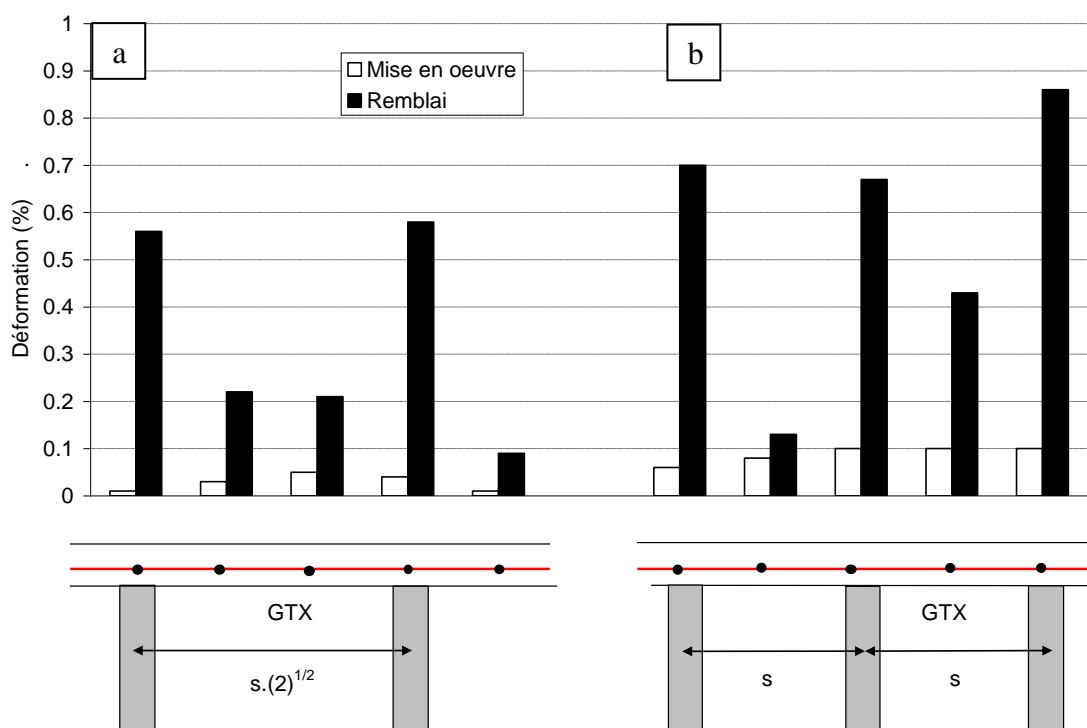


Figure 17 – Déformation du géotextile

La figure 18 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 18a) et supérieure (Figure 18b). 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 et qu’elles ne sont pas du tout sollicitées au droit du sol.

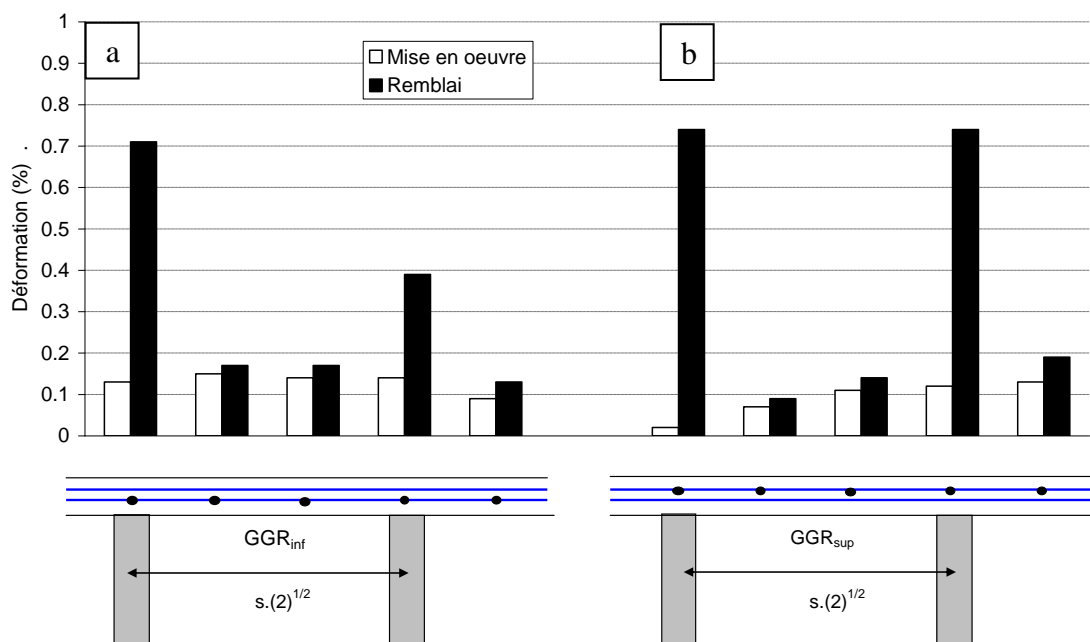


Figure 18 – Déformation des géogrilles

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 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.

9. Tassement dans les zones de recouvrement

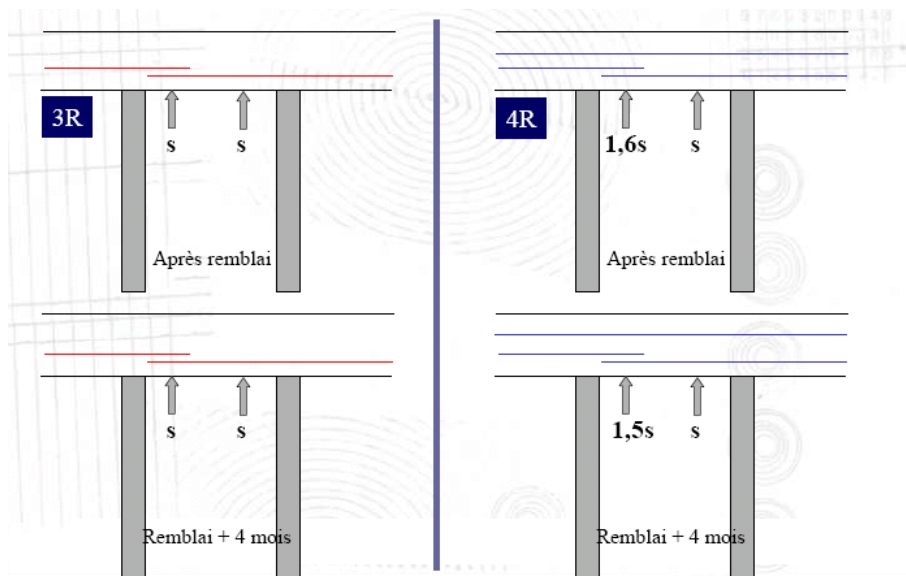


Figure 19 - Tassement mesuré sous les zones de recouvrement

La différence de comportement des nappes géosynthétiques peut être aussi observée en mesurant le tassement sous les zones de recouvrement (Figure 19). 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 semblé t-il « ouvert » les zones de recouvrement des nappes géogrilles.

10. Déplacements latéraux en pied de talus et inclinaison des IR

L'inclinaison des inclusions rigides en pied de talus est quasiment nulle (Figure 20), ces inclusions ne nécessitent donc pas de renforcement métallique pour assurer la stabilité en pied de talus.

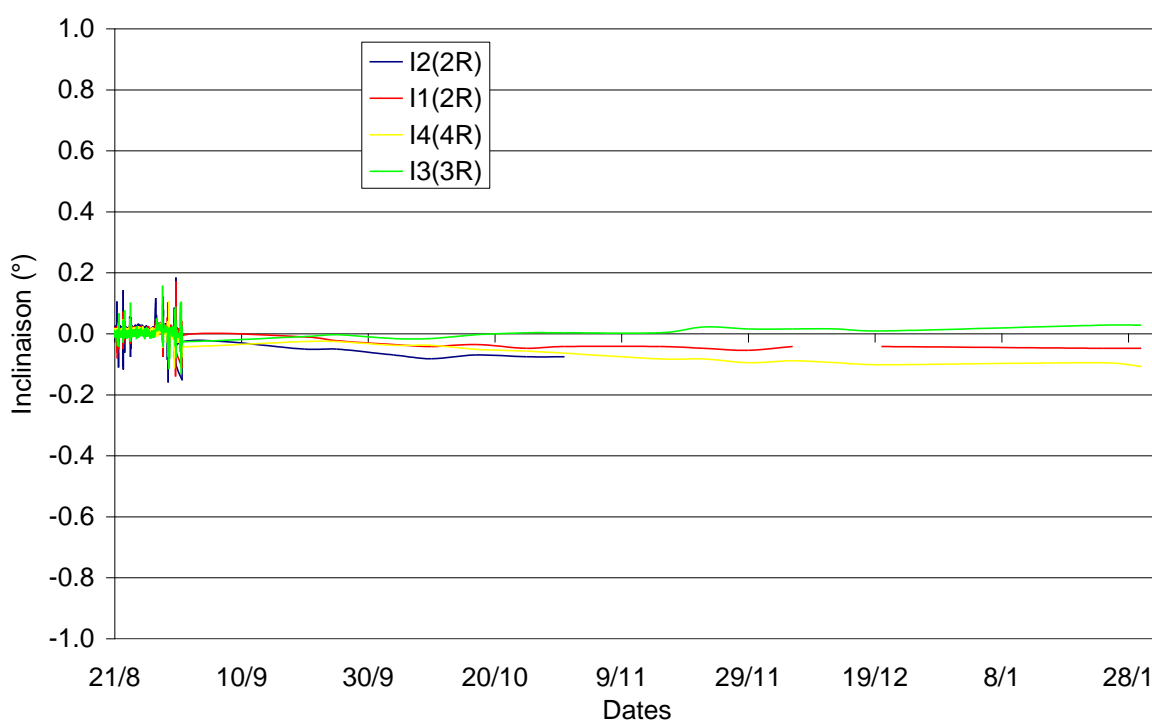


Figure 20 – Mesure de l'inclinaison des inclusions rigides en pied de talus

Le déplacement latéral en pied de talus, mesuré sur le plot 1R, est de l'ordre de 30 mm. Ce déplacement est diminué de plus de moitié dans les plots renforcés. Les déplacements latéraux étant relativement faibles, on n'observe pas de réduction significative due à l'interposition des nappes géosynthétiques.

On observe que les déplacements latéraux sont maximum dans la couche d'argile située à 1,5 m de profondeur et identifiée comme la couche la plus compressible.

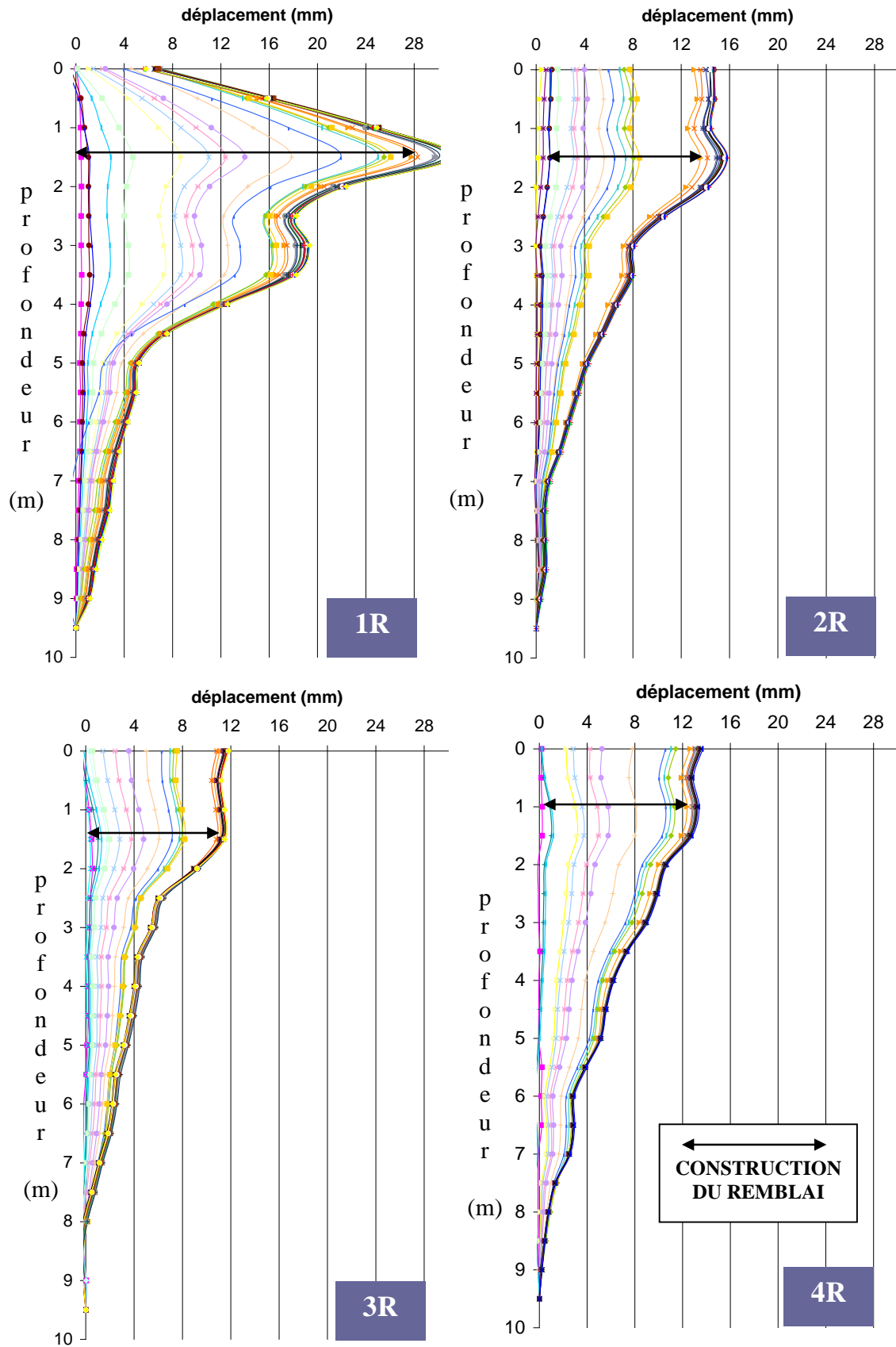


Figure 21 – Mesure du déplacement latéral en pied de talus

11. Retrait du remblai

Au début du mois de février 2008, le remblai a été retiré par la société Guintoli pour laisser place au chantier réel. Le matériau n'a pas été racheté comme initialement espérer. Certains capteurs ont pu être récupérés : CPT, CPTH, Transducteurs. Ils ont pu être réutilisés dans le cadre du thème 2, notamment sur le chantier réel de Chelles. D'autres capteurs ont été laissés pour être réutilisés par GTS pour les mesures du chantier réels : inclino sur IR, tubes inclinométriques, CPT dans IR, CPI, ECV, piézo. Malheureusement le peu d'intérêt porté par le maître d'œuvre et le maître d'ouvrage sur nos activités de recherche a fait que la société Guintoli a arraché les points de mesure et ainsi rendu inaccessible les mesures des différents capteurs laissés en place. Nous le regrettons.

12. Analyse

Cette première analyse repose uniquement sur l'observation des mécanismes identifiés par les instruments de mesures et la comparaison avec les essais réalisés in situ. Une analyse plus complète sera proposée à la suite de la réflexion des membres d'un groupe de travail composé de quelques personnes ayant participées à la réalisation du chantier expérimental ou du benchmark.

12.1 Identification des mécanismes

Le transfert de charge se fait par une combinaison de mécanismes dépendants de 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 du sol chargé vers les inclusions. Ce transfert est d'autant plus important que la couche superficielle du sol est de bonne qualité. Les mesures de tassement du sol compressible (Figure 10) montrent que le tassement est fortement diminué à 2 m de profondeur et on peut estimer que le point neutre se situe entre 2 et 5 m de profondeur.

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 existe même si nous n'avons malheureusement pas installé de moyen 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. L'instrumentation dans le cadre du thème 2 du chantier réel de Chelles sur un profil semblable aux plots expérimentaux (maille, hauteur de remblai...) permettra cette comparaison. En effet le renforcement du chantier réel dispose d'une plateforme granulaire sans géosynthétique.

Les mesures de déformation des nappes (Figures 17 et 18), de tassement sous les zones de recouvrement (Figure 19), les mesures de contrainte au-dessus de la plateforme (Figure 7) 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 17). 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 12). L'inclusion étant très chargée et peu ancrée, elle tasse (Figure 12) mais elle transfère qu'une très faible part de sa charge au sol avoisinant 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 on observe les mêmes répartitions de contrainte qu'à la base du plot 2R 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 18). 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. Lors de la construction du remblai, les géogrilles travaillent exclusivement à la périphérie des inclusions rigides. L'inclusion étant très chargée et peu ancrée, elle tasse (Figure 13) et redistribue une part de sa charge au sol avoisinant.

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.

12.2. Corrélation avec les essais de chargement

Les mesures de tassement en tête en fonction de la charge mesurée sur les têtes d'inclusions sont comparées pour les trois plots renforcés à la courbe de tassement en tête en fonction de la réaction en pointe de l'inclusion ancrée de l'essai de chargement du LCPC (Figure 22).

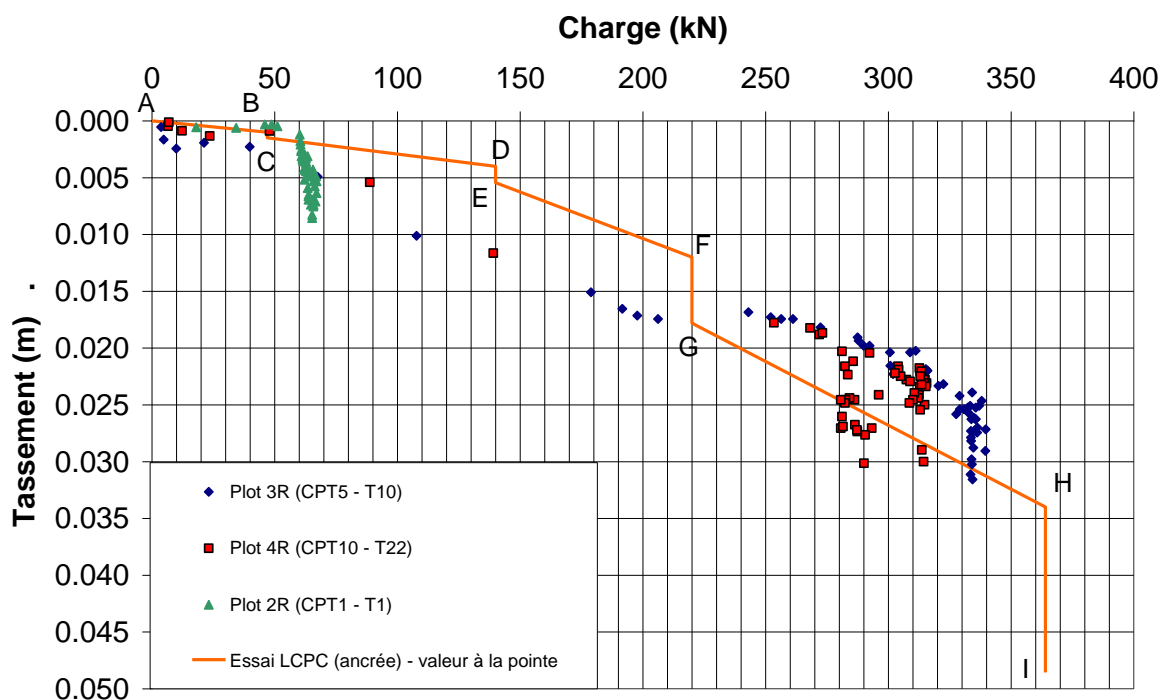


Figure 22 – Comparaison avec les essais de chargement

Sur la courbe de l'essai de chargement, on distingue plusieurs segments :

- AB : application d'une charge de 150 kN,
- BC : fluage pendant 30 minutes sous 150 kN,
- CD : application d'une charge de 300 kN,
- DE : fluage pendant 30 minutes sous 300 kN,
- EF : application d'une charge de 450 kN,
- FG : fluage pendant 30 minutes sous 450 kN,
- GH : application d'une charge de 600 kN,
- HI : fluage pendant 30 minutes sous 600 kN.

Malgré le faible nombre de paliers de chargement et le non enregistrement des données de tassement au cours de l'application d'une charge, on constate en comparant les pentes des segments de chargement aux pentes des courbes de mesures des plots que les inclusions sous le remblai expérimental travaillent essentiellement en pointe.

13. Conclusion

Ce chantier expérimental a été réalisé dans des conditions assez difficiles : nous disposions en effet d'un délai très court pour réaliser le remblai renforcé et l'instrumentation pour disposer de suffisamment de temps pour suivre les mesures. La centrale d'acquisition a été rapidement volée, le Conseil Général de Seine et Marne ne nous a pas facilité la tâche et nous avons rencontré quelques difficultés lorsque nous avons dû rendre le terrain... Malgré tout, ce chantier a permis d'améliorer les connaissances dans le domaine du renforcement des sols par inclusions rigides et sera un élément important pour la suite du projet national. L'instrumentation mise en place était tout à fait adaptée aux mesures réalisées.

Je tiens à remercier les différents participants de ce projet et tout particulièrement Keller, EGIS, TenCate et GTS (lors de la phase du retrait du remblai) qui se sont fortement investis pour que cette expérimentation soit une réussite.