



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 3 – THEME 2
INSTRUMENTATION D’UN CADRE BETON
RENFORCE PAR INCLUSIONS RIGIDES**

L. BRIANÇON – MCF (CNAM)



A.S.I.RI / FICHE SIGNALÉTIQUE

TITRE : A.S.I.RI. – TRANCHE 3 – THEME 2 – INSTRUMENTATION D’UN CADRE BETON RENFORCE PAR INCLUSIONS RIGIDES

RAPPORT N° : 3-09-2-3

DATE D’ETABLISSEMENT : NOVEMBRE 2009

AUTEURS : BRIANÇON

ORGANISMES CHARGES DE L’ACTION : CNAM

THEME DE RATTACHEMENT : 2

LETTRE DE COMMANDE :

1. Contexte

Le renforcement par inclusions rigides d'un ouvrage en béton armé (ouvrage PI777) devant assurer le passage du ruisseau dénommé le Rouillat a été instrumenté dans le cadre du thème 2 du projet national A.S.I.R.I. L'ouvrage représente un linéaire de 105 mètres. Ce chantier (contournement sud de Reims, A4 bis) se situe dans la commune de Champfleury au niveau du rond point diffuseur RD951 (51). Les inclusions rigides ont été réalisées par la société Durmeyer et les terrassements par la société Demathieu & Bard. Le Cnam, assisté par la société EGIS, a assuré cette instrumentation. Les capteurs ont été mis en place au cours de la semaine 42 et la centrale d'acquisition au cours de la semaine 43 de l'année 2008.

Les inclusions rigides de 360 mm de diamètre sont longues de 9 m sous le radier et de 10 m sous le remblai (Figure 1 - annexe 2). Il s'agit d'inclusions refoulantes mises en œuvre par vibrofonçage selon un maillage de 2,26m x 2,00m dans la zone instrumentée (annexe 1). Le taux de recouvrement est égal à 2,2 %. Ce type de pieu foré à refoulement latéral, est réalisé à l'aide d'un outil spécial, conçu par Durmeyer. L'outil (Figure 2) consiste en un fût tronconique augmentant par pas discontinus et dont les pales, de diamètre identique, sont disposées autour du corps central avec variation optimisée du pas. L'outil est terminé par un plateau de coupe à 2 dents. La fermeture/ouverture de la pointe est assurée par un bouchon perdu 150 mm, obturant, jusqu'à l'arrivée du béton, la colonne de bétonnage.

Une plateforme de transfert de charge d'une épaisseur de 0,5 m au droit de l'ouvrage et au droit des remblais a été réalisée en deux phases :

- 0,35 m mis en œuvre avant réalisation des inclusions, pour servir de plateforme de travail (Figure 3a),
- 0,15 m mis en œuvre près réalisation des inclusions et reprise de la couche précédente (recompactage).

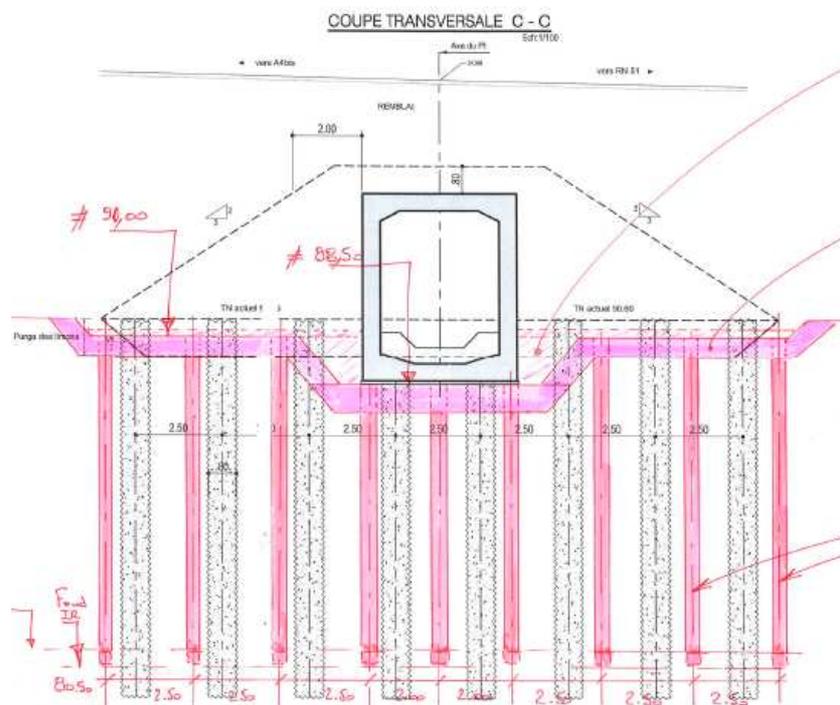


Figure 1 – Ouvrage renforcé

L'arase supérieure des inclusions rigides a été arrêtée en sous face de la plate-forme de transfert de charge. Cette plate-forme est constituée par un matériau limoneux traité aux liants hydrauliques, mis en œuvre et compacté comme une couche de forme conformément à la GTR pour satisfaire aux critères de réception de la plate-forme. Le cadre en béton armé a

ensuite été construit (Figure 3b) puis un remblai autoroutier a été mis en place autour et sur le cadre béton (Figures 3c et 3d).

Le sol compressible a été caractérisé par des sondages pressiométriques, pénétrométriques dynamiques et des sondages carottés (annexes 3 & 4).



Figure 2 – Dispositif de réalisation des inclusions rigides



Figure 3 – Construction du cadre béton renforcé

2. Instrumentation

L'instrumentation de cet ouvrage consiste à mesurer, sous le radier, la répartition de la charge à la base de la plate-forme de transfert de charge ainsi que les tassements différentiels entre le sol et les inclusions rigides. Huit capteurs de pression totale (CPT) ont été installés sous la plate-forme de transfert de charge (Figure 4). Les CPT 1 à 4 sont posés sur les inclusions rigides, leur gamme est de 50 bars. Les CPT 5 à 8 sont disposés horizontalement sur le sol et mesurent les augmentations de contrainte verticale, leur gamme est de l'ordre de 5 bars (les CPT 6 à 8 sont de forme rectangulaire). Les fiches d'étalonnage des 8 CPT sont données en annexe 5. Les CPT ont été disposés sur un lit de sable pour assurer leur horizontalité. Ils ont été ensuite recouverts par 10 cm de sable et par le matériau de la plate-forme de transfert de charge. Une grille d'alerte a été disposée entre le sable et le matériau limoneux traité afin de s'assurer que le malaxage des deux couches limoneuses formant la plate-forme de transfert de charge n'endommage pas les capteurs. (Figure 5).

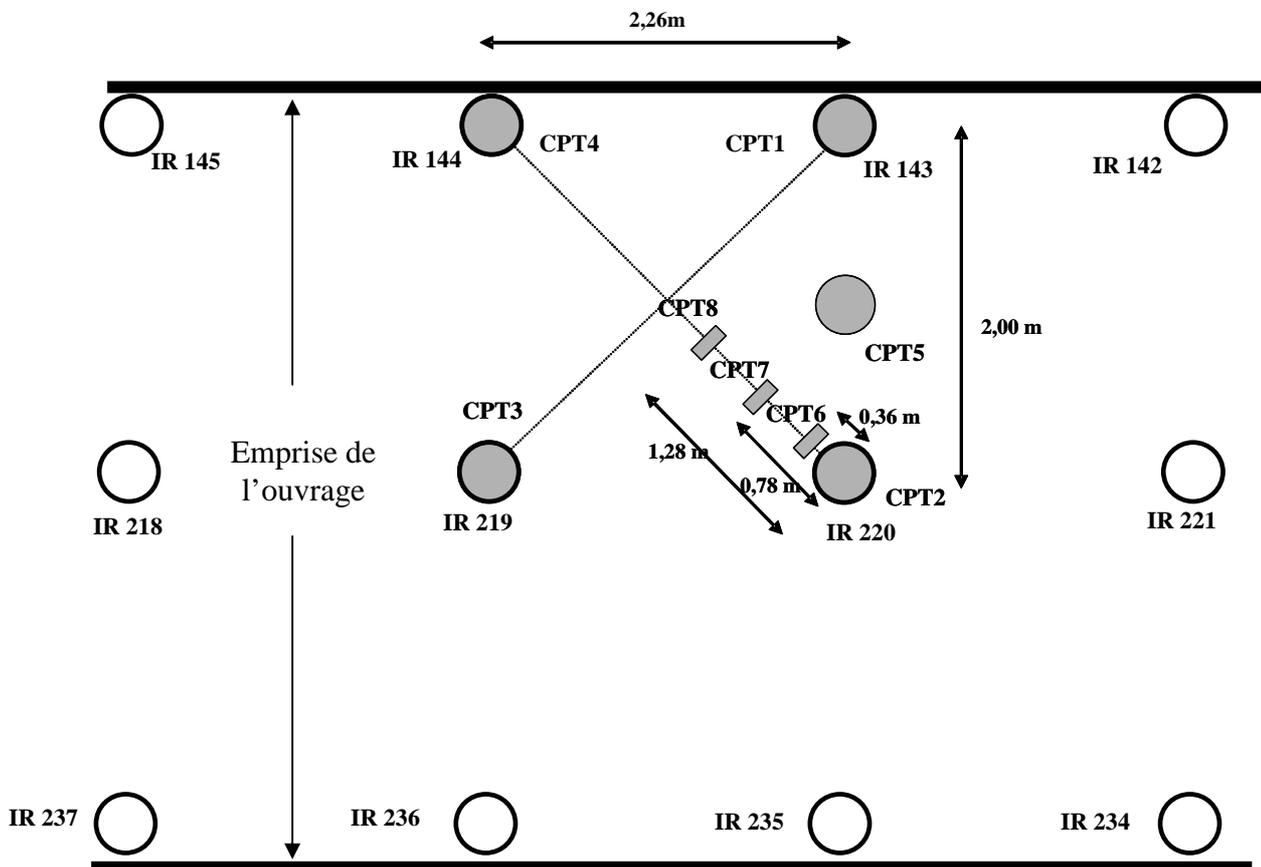


Figure 4 – Implantation des CPT

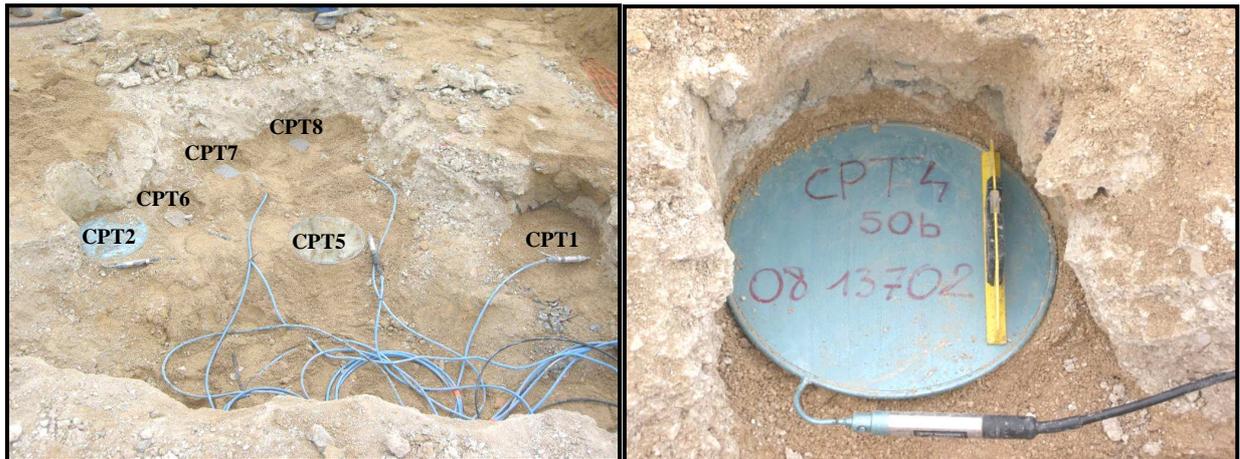


Figure 5 – Photos des CPT

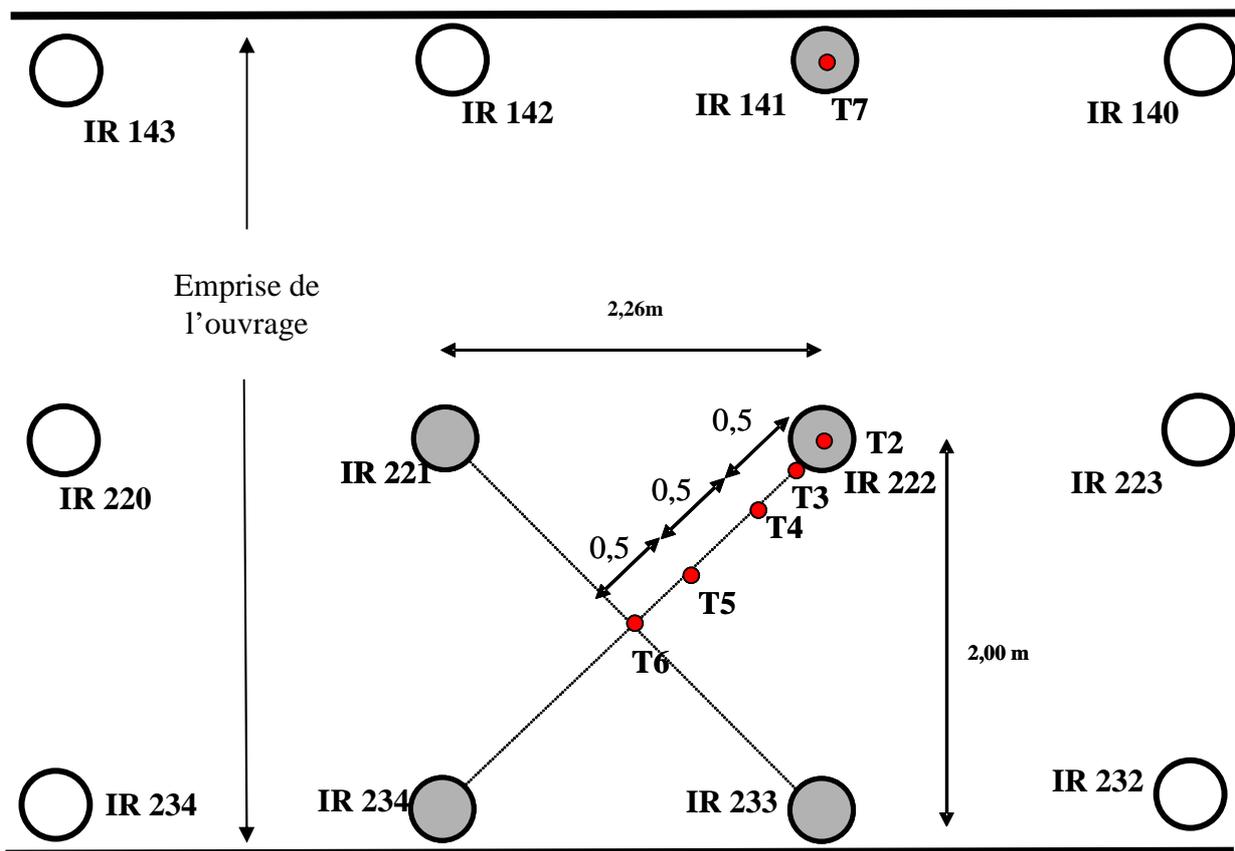


Figure 6 – Implantation des T

Le tassement des têtes d'inclusions et du sol sous la plate-forme de transfert de charge a été mesuré à l'aide de 6 transmetteurs de pression pour mesure de niveau, appelés transducteurs par la suite (Figure 6). Chaque transducteur est posé horizontalement sur un lit de sable (Figure 7). Les transducteurs sont connectés en série, deux à deux, à un récipient rempli d'anti-gel (Figure 8a) fixé dans un tube métallique prolongeant une inclusion rigide en dehors de l'emprise de l'ouvrage (Figure 8b) d'une part et à la centrale d'acquisition d'autre part. Le transducteur mesure la variation de pression entre sa position et le niveau du récipient. Un transducteur de référence fixé dans le tube, sous le réservoir permet de calculer le tassement des 6 autres transducteurs positionnés sous l'ouvrage. Les fiches d'étalonnage des transducteurs sont données en annexe 6.

Les capteurs sont connectés à un logger L420-20V préparé par la société EGIS (Annexe 7). Le L420-20V est conçu sur la base d'une centrale d'acquisition CR200 Campbell Scientific. Le L420-20V permet d'avoir une capacité de mesures fiables à moindre coût, avec un matériel robuste et alimenté par batterie. Le L420-20V est destiné à la mesure des capteurs à boucle de courant 4-20 mA, le nombre de voies étant limité à 20 capteurs. L'ensemble a été disposé dans un coffret métallique soudé au tube du réservoir des transducteurs (Figure 9a). Le coffret est fermé à l'aide de deux cadenas et l'accès au réservoir des transducteurs est lui aussi protégé. Les données sont collectées mensuellement (lors du changement de la batterie) en utilisant le logiciel PC400 de Campbell Scientific (Figure 9b).



Figure 7 – Photos des T

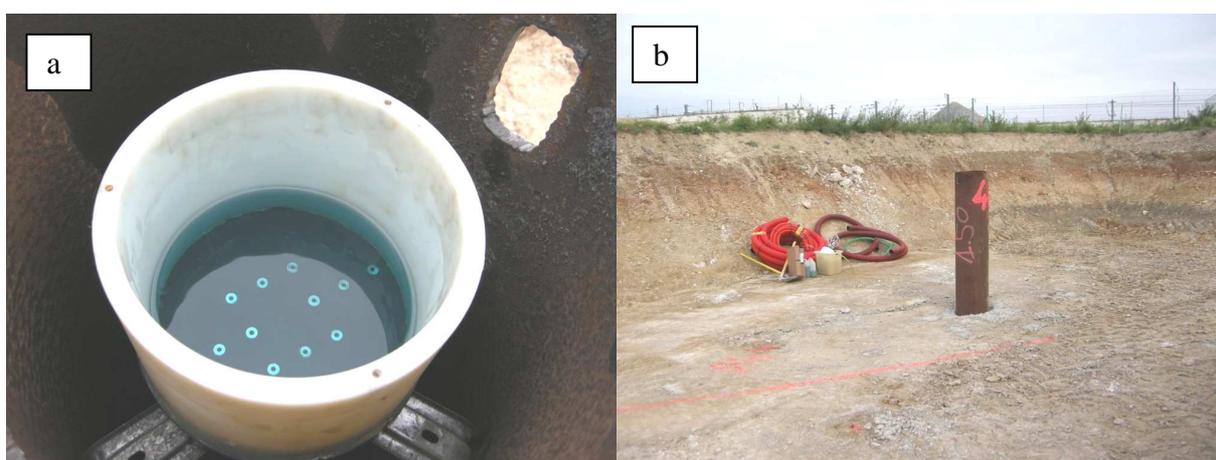
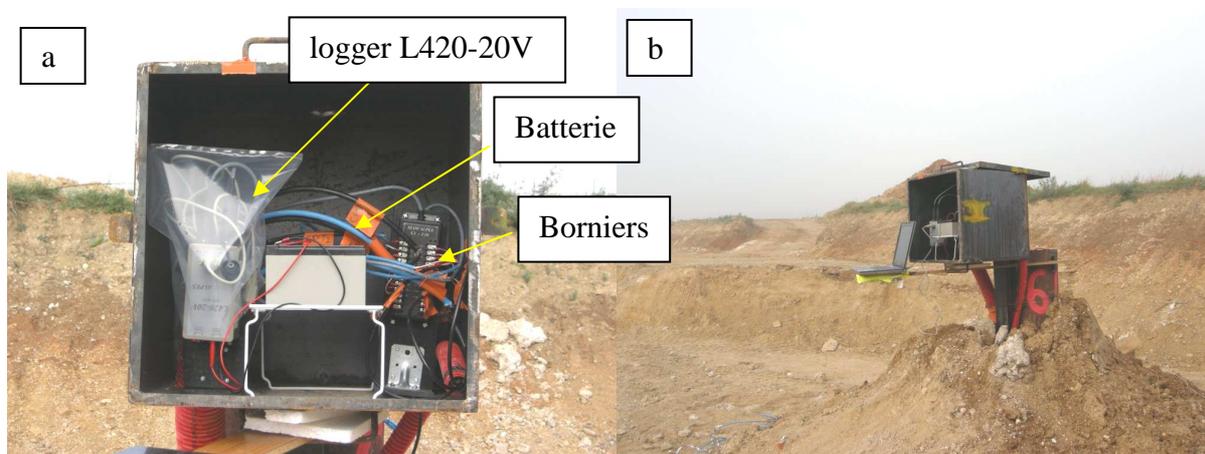


Figure 8 – Réservoir d'alimentation des transducteurs**Figure 9 – Centrale d'acquisition des données**

3. Fréquence des mesures

Deux mesures sont enregistrées quotidiennement. Le petit souci survenu en décembre avec la centrale d'acquisition a été résolu et les mesures ont été enregistrées sur toute la nouvelle période de janvier à avril 2009.

Le tableau I présente l'avancement des travaux. Pour la période avril-juin, nous n'avons malheureusement pas de données puisque la centrale a été noyée lors de la mise en place des talus. Nous avons effectué une mesure manuelle sur les CPT le 30 juin 2009 : tous donnaient un signal sauf le CPT 6. Tous les transducteurs étaient HS. Le remblai de la plate-forme supérieure de terrassement était à sa cote finale au droit de l'ouvrage instrumenté (charge estimée entre 160 à 180 kPa).

Tableau I. Phasage des travaux et mesures

Date	Intervention
28 - 31 octobre 2008	Fin matelas de répartition (2ème couche de 15cm)
04 - 05 novembre 2008	Béton de propreté sous radier : épaisseur 10 à 15 cm
12 novembre 2008	Béton de propreté sous mur en ailes
17 novembre 2008	Bétonnage radier plot 1* (IR 139 à 145, 218 à 224 et 231 à 236) : épaisseur 50 à 80 cm
20 novembre 2008	Bétonnage radier plot 3
16 au 21 avril 2009	Mise en œuvre des enrochements (50cm) dans la moitié aval de l'ouvrage
22 avril 2009	Liaisonnement au béton
27 avril 2009	Reconstitution du lit du Rouillat en dehors de l'ouvrage à l'aval
29-30 avril 2009	Enrochements aval et liaisonnement au béton
30 juin 2009	Fin remblai contigu (10 à 12 t/m ²) et mesures manuelles
16-06-09 au 04/07/2009	Remblai PST (16 à 18 t/m ²)
15-09-09 au 11/2009	Traitement PST (16 à 18 t/m ²)
08 octobre 2009	Dernières mesures manuelles
11/2009 au 03/2010	Approvisionnement CDF (16.5 à 18.5 t/m ²)
04/2010	Traitement CDF (16.5 à 18.5 t/m ²)
2011	Chaussée (17 à 19 t/m ²)

* Le plot 1 est celui concerné par CPT et tassomètres

Nous n'avons pas réussi à récupérer les données enregistrées par la centrale durant la période d'avril à mai. Nous avons réalisé une mesure manuelle finale le 08 octobre 2009. La construction de la chaussée n'avait pas débuté à cette date mais le terrassier voulait finir les talus et recouvrir le coffret métallique.

4. Mesures du transfert de charge

La figure 10 présente l'évolution du transfert de charge mesuré sur les têtes d'inclusion jusqu'en avril 2009, les valeurs mesurées manuellement le 30 juin et le 08 octobre 2009 sont aussi présentées. Les CPT 1, 3 et 4 donnent des valeurs similaires, on observe que les augmentations de contrainte sur les têtes d'inclusions correspondent aux augmentations de charge au droit du plot instrumenté. A la fin de la construction du remblai (30 juin 2009), l'augmentation de la contrainte se poursuit. Le CPT 2 donne des valeurs très supérieures à celles mesurées par les trois autres capteurs. L'analyse du transfert de charge permettra de vérifier le problème du CPT2.

On constate (Figure 11) que la contrainte mesurée sur le sol n'est pas négligeable. Les augmentations de contraintes mesurées sur le sol et sur les inclusions correspondent à des augmentations de surcharge lors de travaux. L'augmentation de contrainte sur le sol a tendance à se stabiliser à la suite de la fin de la construction des remblais. Au final les CPT 5, 7 & 8 donnent des valeurs semblables ce qui met en évidence que la contrainte se répartit de manière relativement homogène sur la surface du sol entre les inclusions. On pourrait observer toutefois que les contraintes sur le sol sont plus faibles immédiatement contre l'inclusion (CPT6) qu'à des distances plus grandes (CPT 5, 7 et 8)

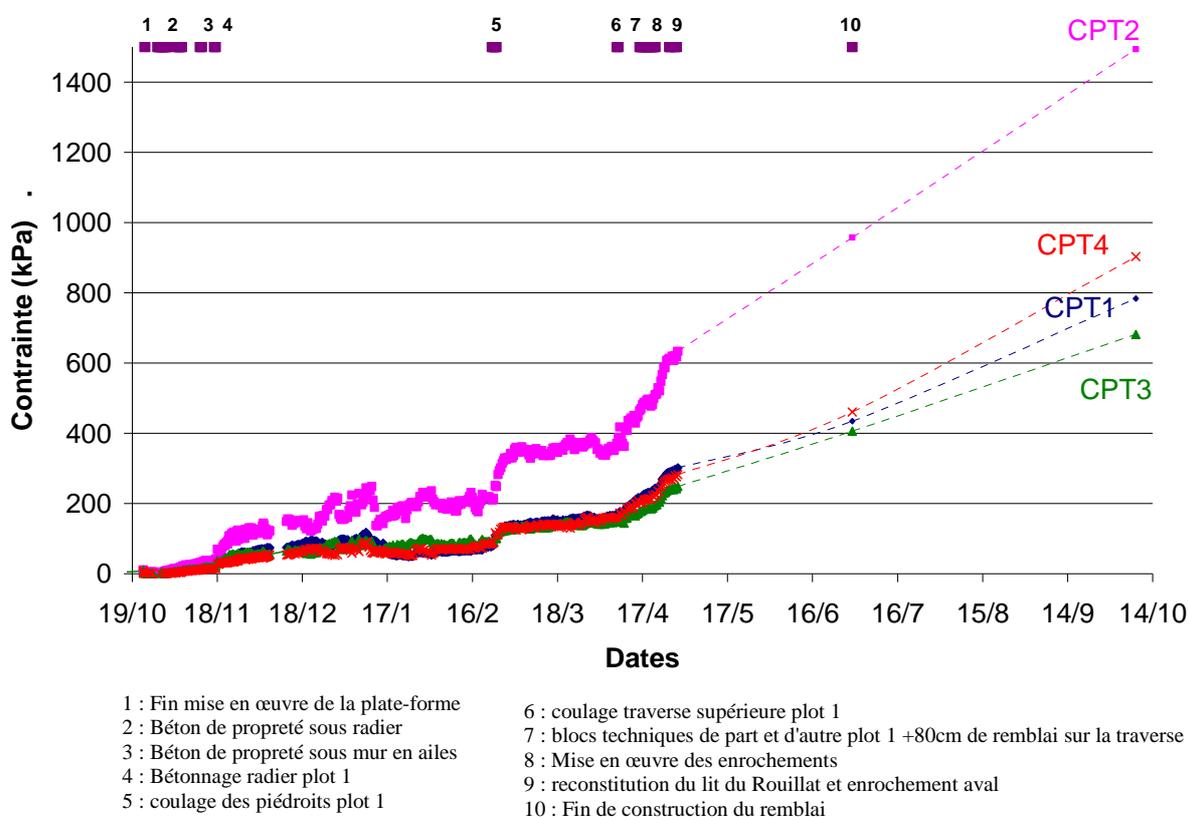


Figure 10. Mesure de la contrainte sur les IR

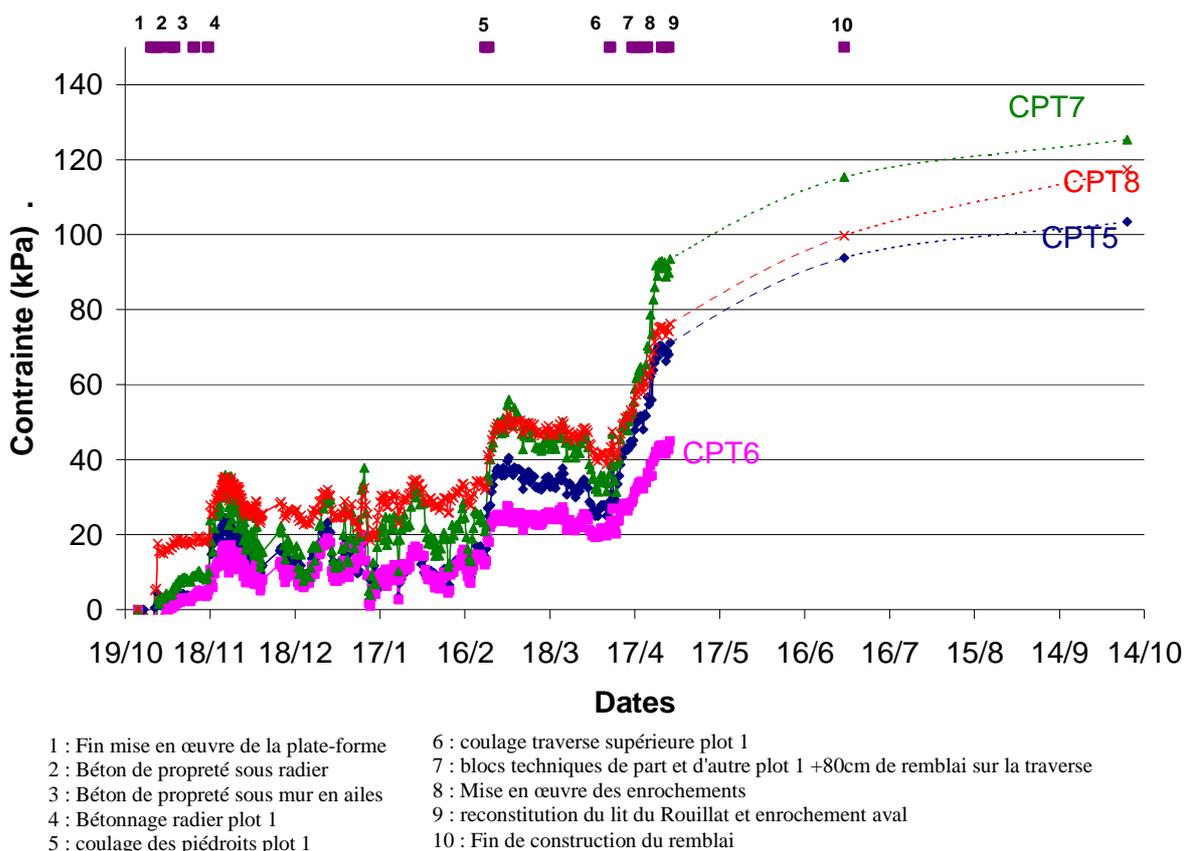


Figure 11. Mesure de la contrainte sur le sol

5. Mesures du tassement

La figure 12, présentant le tassement différentiel entre le sol et l'inclusion rigide n° 222, montre bien que le tassement différentiel se fait en grande partie lors de la mise en œuvre de la plate-forme. Les tassements différentiels mesurés fin avril atteignent 2 cm au centre de la maille. Les courbes présentant les profils de tassement à différentes dates (Figure 13) montrent qu'il y a un peu d'accrochage entre le sol et l'inclusion, que le profil est plat jusqu'à 1m du centre de l'inclusion et on observe un tassement légèrement plus prononcé au centre de la maille.

On retrouve une légère augmentation des mesures fin mars - avril correspondant au chargement (mise en œuvre des enrochements...). Ce tassement s'est peut-être poursuivi pendant les travaux car nous avons mesuré une augmentation de contrainte sur le sol jusqu'en octobre 2009 ; malheureusement nous n'avons plus pu enregistrer ces valeurs de tassement à partir du mois de mai.

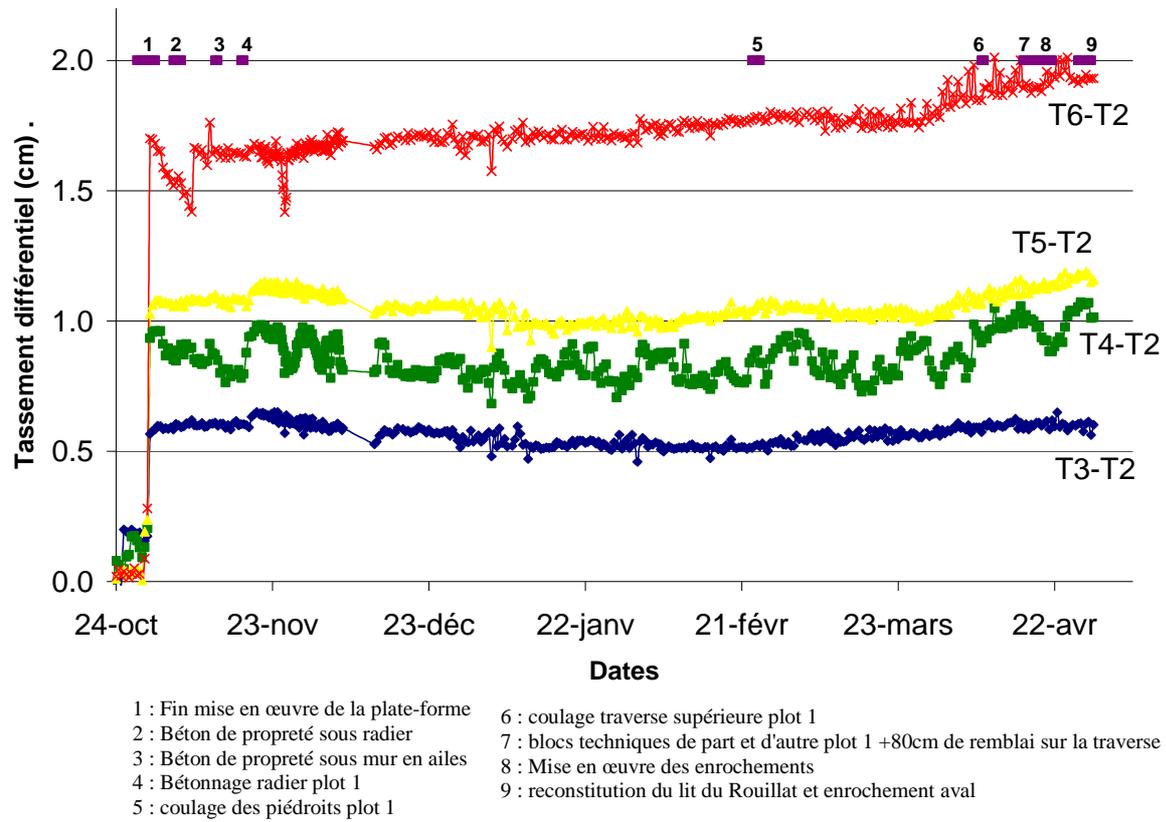


Figure 12. Mesure du tassement par rapport à la référence

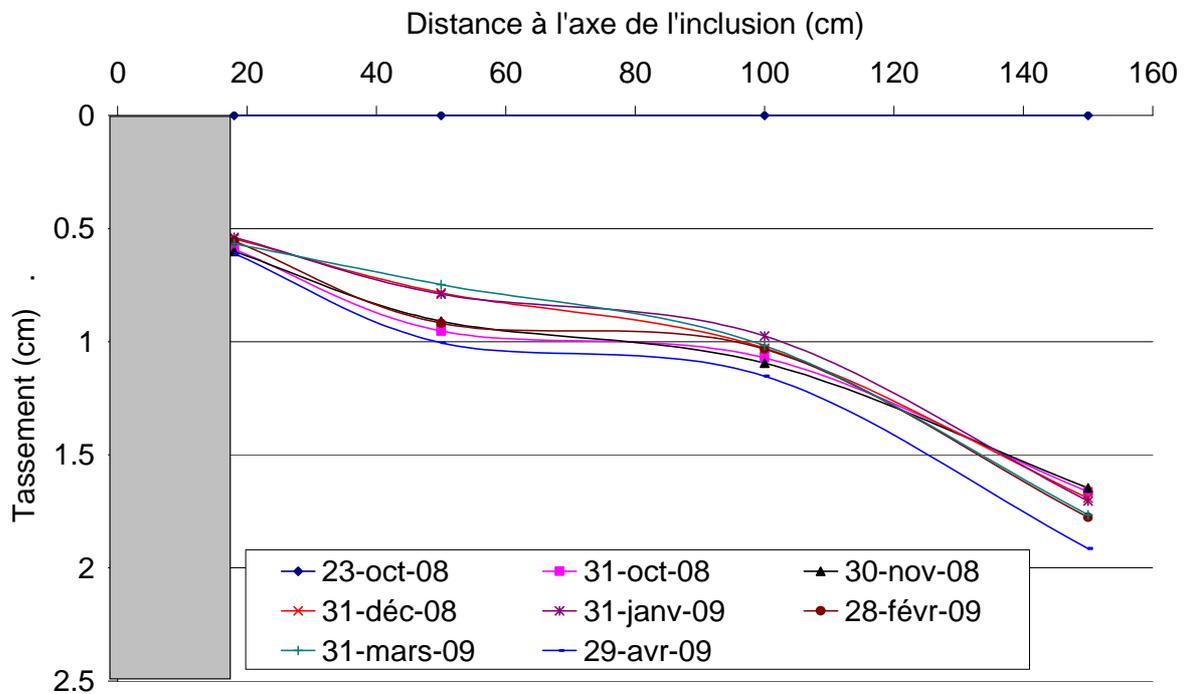


Figure 13. Profils de tassement

Les tassements mesurés sur les inclusions 141 et 222 par les capteurs T7 et T2 sont identiques ($s_{T2} - s_{T7} < 2\text{mm}$).

6. Essai de chargement

Un essai de chargement (Figure 14) a été réalisé par MB Fondations sur deux inclusions rigides notées G et H en dehors de l'emprise de l'ouvrage. L'inclusion G d'une longueur de 9m était renforcée par un H métallique type 100 alors que l'inclusion H de 10,6m de long n'était pas renforcée. Le sol de la zone d'essai a été caractérisé par un sondage pressiométrique et deux sondages pénétrométriques statiques. Ces essais sont présentés en annexe 8, les principaux résultats de ces essais sont :

- pour les deux inclusions rigides, 86% de la charge limite est reprise par frottement latéral,
- les pieux indiquent une portance globale élevée pour des longueurs relativement modestes, 9 m et 10.6 m, et un encastrement compris entre 4 et 5,60 m dans des craies de $p_l^* = 1,0 \text{ MPa}$ sous la pointe;
- les valeurs effectivement mesurées pour les termes de résistance de pointe k_p sont de l'ordre de 2,9 en moyenne pour une section de pointe,
- les valeurs effectivement mesurées pour les termes de frottements latéraux q_s , sont supérieures de 60 % aux valeurs proposées par la courbe Q_4 du Bulletin de Liaison n°191 de 1994 (cas de la craie hors nappe).

Les premières observations effectuées sur site lors de la confection des inclusions rigides G et H, ont montré que le procédé utilisé par l'entreprise Durmeyer s'apparentait à la technique des pieux vissés moulés.

Quatre essais de chargement sur inclusions rigides et deux sur le matelas de transfert de charge ont par ailleurs été réalisés par Groupe J. les résultats de ces essais sont présentés en annexe 9.



Figure 14. Essai de chargement (MB Fondations)

7. Analyse du transfert de charge

La charge appliquée en fin de construction de remblai est estimée entre 160 et 180 kPa, nous allons déterminer le transfert de charge vers les inclusions rigides à partir des mesures des capteurs de pression totale positionnés sur les têtes d'inclusions et sur le sol.

Avec $Q_{IR} = \sigma_{IRmes} \cdot S_{IR}$ et $Q_{sol} = \sigma_{solmes} \cdot (S_{maille} - S_{IR})$, on peut calculer la répartition de la charge entre les inclusions rigides et le sol (Tableau II) ; La prise en compte ou non de la mesure du CPT2 modifie peu les résultats en termes de charge appliquée.

Tableau II. Répartition de la charge

	σ_{IRmes} (kPa)	Q_{IR} (kN)	σ_{solmes} (kPa)	Q_{sol} (kN)	Q_{totale} (kN)
CPT1	784	130			
CPT2	1493	146			
CPT3	681	127			
CPT4	902	132			
CPT5			103	455	
CPT7			125	552	
CPT8			117	517	
Moyenne		130*		508	638
		133**			641

* Sans prendre en compte la mesure de CPT2

** En prenant en compte la mesure de CPT2

A partir des mesures, on trouve ainsi une contrainte moyenne appliquée :

$$\sigma_{moy} = \frac{Q_{totale}}{S_{maille}} = 140kPa$$

Cette valeur est inférieure à la charge estimée (160 kPa – 180 kPa) qui a pu être défini avec des coefficients de sécurité et on a observé par ailleurs sur les figures 10 et 11 que la contrainte mesurée augmentait encore en octobre 2009.

On peut aussi estimer l'efficacité E qui est la proportion de la charge totale reprise par les inclusions et mesurée sur les têtes d'inclusions :

$$E = \frac{Q_{IR}}{Q_{totale}} = 17\%$$

Cette efficacité relativement basse ne veut pas dire que le renforcement n'est pas adapté puisque le tassement différentiel mesuré est très acceptable. Ce résultat démontre que le paramètre d'efficacité estimé sur les têtes d'inclusions n'est pas représentatif de l'efficacité en tassement du renforcement.

8. Conclusion

L'ouvrage PI777 a fait l'objet d'une instrumentation dans le cadre du PN ASIRI. De nombreux essais complémentaires ont été réalisés par l'entreprise Durmeyer pour valider un cahier des charges sur la technique de réalisation d'inclusion rigide employée. Nous disposons donc, sur ce chantier, de nombreuses données qui permettront à vérifier les calculs analytiques et numériques développés dans le cadre du PN ASIRI :

- données géotechniques (annexes 3 & 4),
- essais de chargement (annexe 8 & 9),
- note de calcul sous Plaxis (annexe 10),

- des notes de calculs analytiques (annexes 12 & 13).

L'instrumentation a donné des résultats intéressants pour l'analyse des mécanismes, on peut simplement déplorer la détérioration de la centrale d'acquisition qui a empêché de mener le suivi des mesures jusqu'à la fin de la construction de l'ouvrage.

Le PN ASIRI tient à remercier tout particulièrement l'entreprise Durmeyer pour son implication et son aide précieuse sur ce chantier instrumenté.

Une fiche chantier a été créée pour ce chantier conformément aux recommandations du thème 2. Cette fiche est présentée en annexe 11.

Laurent Briançon
Maître de conférences
Chaire de Géotechnique - Cnam