

# RENFORCEMENT D'UN REMBLAI AUTOROUTIER EN LIMITE DE STABILITE

## **SOIL REINFORCEMENT BY TRENCHMIX® AND CMC® RIGID INCLUSIONS UNDER AN EMBANKMENT AT THE SLOPE STABILITY LIMIT.**

Laurent BRIANÇON<sup>1</sup>, Fanny MAUCOTEL<sup>2</sup>, François PLOUVIER<sup>2</sup>, Jérôme RACINAIS<sup>2</sup>, Hubert SCACHE<sup>2</sup> et Benjamin THOMAS<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> GEOMAS, INSA LYON, Villeurbanne, France

<sup>2</sup> MENARD, Orsay, France

**RÉSUMÉ** – Dans le cadre de la construction de l'autoroute A304, un remblai a été construit sur un flanc de colline initialement en limite de stabilité. Une solution innovante a été proposée par la société Menard pour assurer la stabilité de ce remblai : elle consiste en la mise en œuvre de panneaux transversaux de Trenchmix® associés à des inclusions rigides. Une section a été instrumentée pour s'assurer de l'efficacité du dispositif.

**ABSTRACT** – As part of the A304 Motorway project, located in North-East France, an embankment was built on the side of a hill which is at the slope stability limit. Menard designed and executed an innovative solution to deal with this stability issue: transversal Trenchmix® panels were installed, associated with CMC® rigid inclusions. A section has been monitored to test the solution performance.

### 1. Introduction

L'autoroute A304 est une future autoroute de liaison gratuite à 2x2 voies qui prolongera l'autoroute A34 par un nouvel itinéraire long de 31 km depuis le sud de Charleville-Mézières jusqu'à la déviation existante de Rocroi - Gué d'Hossus. Ce projet possède sa continuité en Belgique par l'aménagement programmée de la RN5 en autoroute (itinéraire E420) sur 64 km. Une partie importante de l'itinéraire en Belgique est déjà aménagée à 2 fois 2 voies. Ce projet de portée européenne s'inscrit par conséquent sur une grande liaison autoroutière Charleroi - Charleville-Mézières - Reims qui reliera le ring autoroutier de Charleroi à l'autoroute A4 à l'Est de Reims.

A proximité de la commune de Warcq, dans les Ardennes Françaises, la construction du tronçon de l'A304 requiert la création d'une zone de remblai sur sols compressibles, sur environ 600 m. Sans mise en œuvre de renforcement de sol, ce projet ne serait pas réalisable car cela conduirait à des glissements de terrains liés notamment au déplacement de la frange superficielle des terrains et ce jusqu'à une profondeur d'environ 7 m. Il s'est donc avéré nécessaire de recourir à des solutions de renforcement de sol permettant de garantir à la fois la stabilité de l'ensemble et de réduire les tassements post-construction.

### 2. Conditions géotechniques

De nombreuses campagnes de reconnaissance de sol ont eu lieu de l'avant-projet (2004) à la phase d'exécution des travaux (2016), comprenant des sondages carottés, des sondages au pénétromètre statique et dynamique, des forages à la tarière continue, des sondages pressiométriques, des sondages à la pelle, des sondages inclinométriques et piézométriques.

Le profil de sol typique est constitué d'une première couche d'argile marneuse molle de 5 à 6 m d'épaisseur ( $p_l^* = 0,30$  MPa,  $E_m = 2,8$  MPa), suivie d'une succession de couches

de marnes très altérées et altérées allant jusqu'à 10 m d'épaisseur ( $p_l^* = 0,30$  MPa à 0,62 MPa,  $E_m = 2,8$  à 4,4 MPa). S'en suit une couche de marne saine de bonne caractéristique ( $p_l^* = 3$  MPa,  $E_m = 25$  MPa). L'épaisseur de ces couches varie de manière importante sur les 600 m du projet.

### 3. Méthode de dimensionnement

La solution retenue consiste à combiner deux techniques de renforcement de sol : les Colonnes à Module Contrôlé (CMC<sup>®</sup>) et le Trenchmix<sup>®</sup> :

- Les CMC<sup>®</sup>, arrangées selon une maille rectangulaire et qui peuvent traverser les couches de sols compressibles même sur une grande épaisseur, augmentent la raideur verticale du sol. Les CMC<sup>®</sup> viennent s'ancrer dans les marnes saines
- Les voiles de Trenchmix<sup>®</sup>, installés à intervalles réguliers entre les rangées de CMC<sup>®</sup> dans la direction perpendiculaire à l'axe du remblai, augmentent la raideur horizontale du sol sur sa partie supérieure. Les voiles de Trenchmix traitent la couche d'argile marneuse et viennent s'ancrer dans la couche de marne très altérée. Ils interceptent ainsi les potentiels cercles de rupture de surface et contribuent à réduire sensiblement les déplacements latéraux. Par conséquent, les CMC<sup>®</sup> ne sont pas soumises à des moments fléchissants ou des efforts de cisaillement élevés et n'ont pas besoin d'être renforcées.

D'une part, l'intégrité des CMC<sup>®</sup> est assurée du fait de la réduction des déplacements latéraux par les voiles de TM. D'autre part, les CMC<sup>®</sup> supportent la majeure partie de la charge du remblai ce qui permet de réduire les contraintes dans les voiles de Trenchmix<sup>®</sup> à des valeurs acceptables. Le dimensionnement de cette solution prend en compte de nombreuses interactions entre le sol et les deux éléments de renforcement ; il nécessite donc de faire appel à des calculs détaillés aux éléments finis. La Figure 1 présente la vue en coupe de la solution de renforcement de sol mise en œuvre pour ce projet.

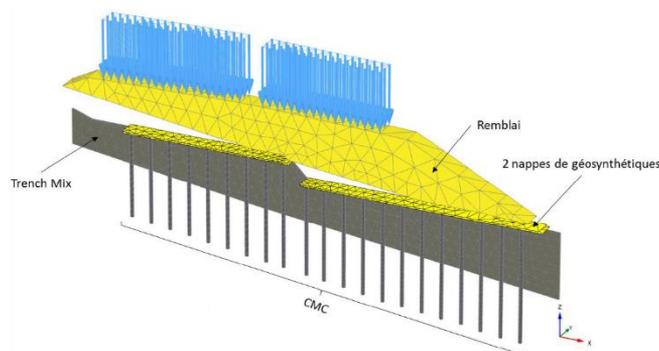


Figure 1 - Modélisation 3D de la solution de renforcement de sol Trenchmix<sup>®</sup> et CMC<sup>®</sup> (Vue en coupe, perpendiculaire au tracé de l'autoroute)

Les voiles de Trenchmix<sup>®</sup>, ayant une épaisseur de l'ordre de 40 cm, sont installés toutes les deux à trois rangées de CMC<sup>®</sup>. Les CMC<sup>®</sup> ont des diamètres usuels pouvant varier de 28 à 42 cm et sont arrangées selon des mailles carrées ou rectangulaires dont l'espacement varie en fonction de la hauteur de remblai, de la compressibilité du sol et des critères de tassements.

La résistance à la compression demandée pour le matériau mixé des tranchées était de 800 kPa à 28 jours. Le module de déformation considéré dans les calculs était de  $E_{50} > 150$  MPa. Le dimensionnement du projet devait justifier la bonne adaptation de la solution

proposée vis-à-vis de trois problématiques principales : la maîtrise des tassements, la maîtrise des déplacements horizontaux, et la stabilité générale du remblai.

Une grande partie du dimensionnement du projet a été réalisée par un calcul aux éléments finis, en utilisant le logiciel Plaxis. La première étape du dimensionnement a consisté à justifier un modèle en 2 dimensions équivalent à un modèle en 3 dimensions afin de faciliter la nature et la durée des calculs. Un modèle 3D a tout d'abord été mis au point, à partir duquel les caractéristiques équivalentes du modèle 2D ont pu être calculées. S'en est ensuite suivie une comparaison du modèle 3D initial avec le modèle 2D équivalent afin de vérifier la validité du raisonnement. La Figure 2 présente un exemple de comparaison de résultats obtenus entre les modèles 2D et 3D, pour une des sections du projet.

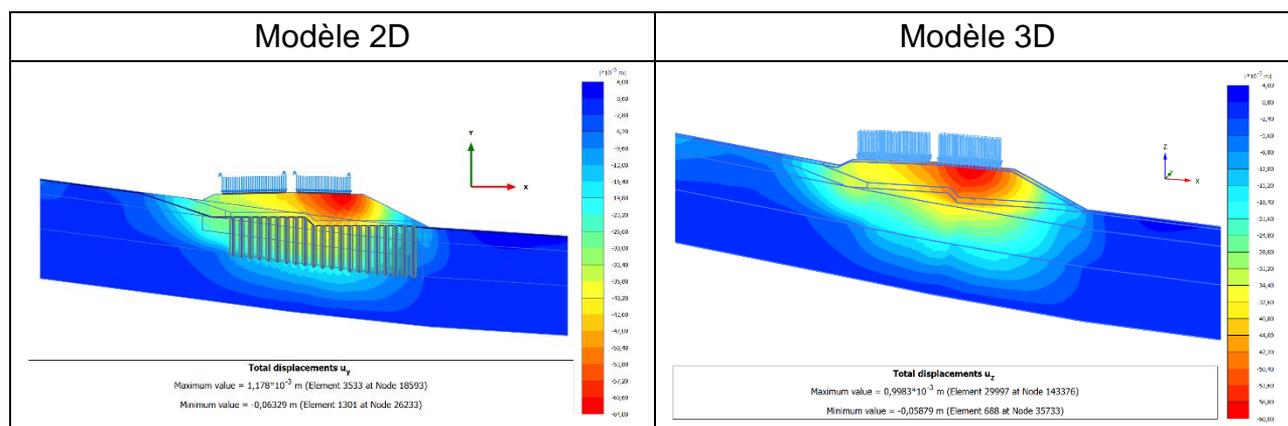


Figure 2 - Comparaison des déplacements verticaux obtenus avec les modèles 2D et 3D

Une fois le modèle 2D équivalent validé, les trois problématiques géotechniques identifiées ci-dessus ont été justifiées avec les logiciels Plaxis et Talren. La Figure 3 présente les tassements à court terme obtenus après la montée du remblai.

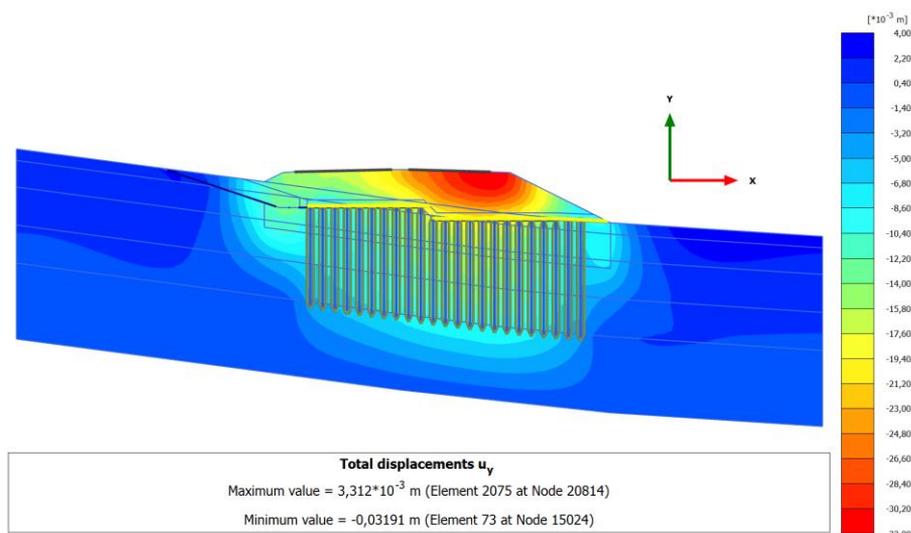


Figure 3 - Calcul des tassements à court terme après la montée du remblai

La Figure 4 présente les tassements à long terme obtenus après application de la surcharge d'exploitation. Les tassements résiduels (post-construction), obtenus par différence des tassements à long terme et des tassements à court terme, sont estimés entre 25 mm et 40 mm. La Figure 5 présente les valeurs des déplacements horizontaux maximum obtenus à long terme. Le tassement calculé est de l'ordre de quelques dizaines de millimètres, ce qui est conforme aux spécifications du projet. La Figure 6 présente les résultats du calcul de stabilité, calcul réalisé avec le logiciel Talren. Ce calcul justifie le fait qu'avec le renforcement de sol par Trenchmix® et CMC®, la stabilité du remblai est assurée.

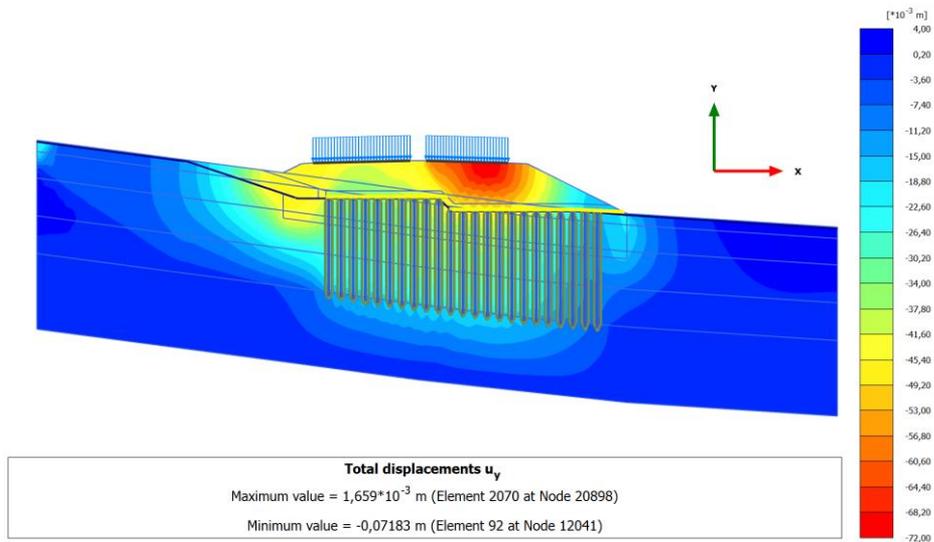


Figure 4 - Calcul des tassements à long terme après application de la surcharge d'exploitation

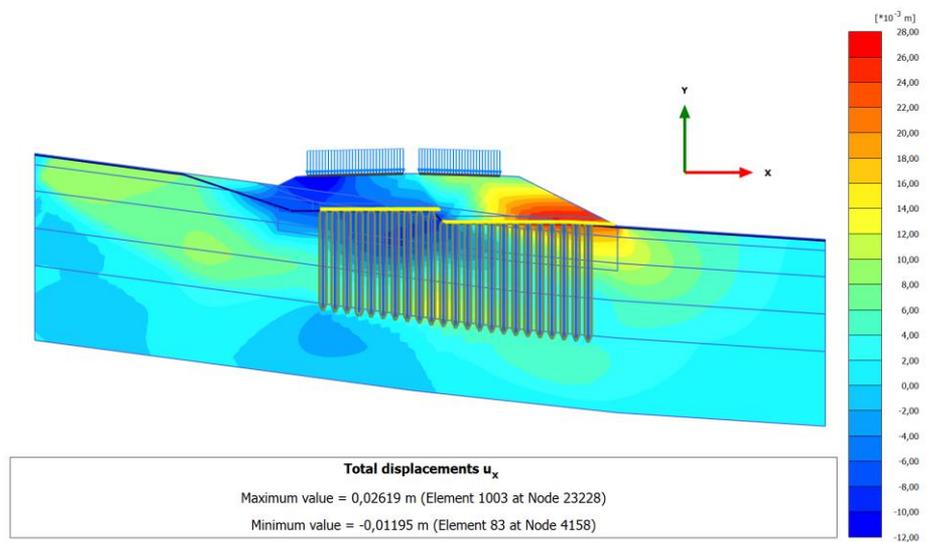


Figure 5 - Calculs des déplacements horizontaux à long terme

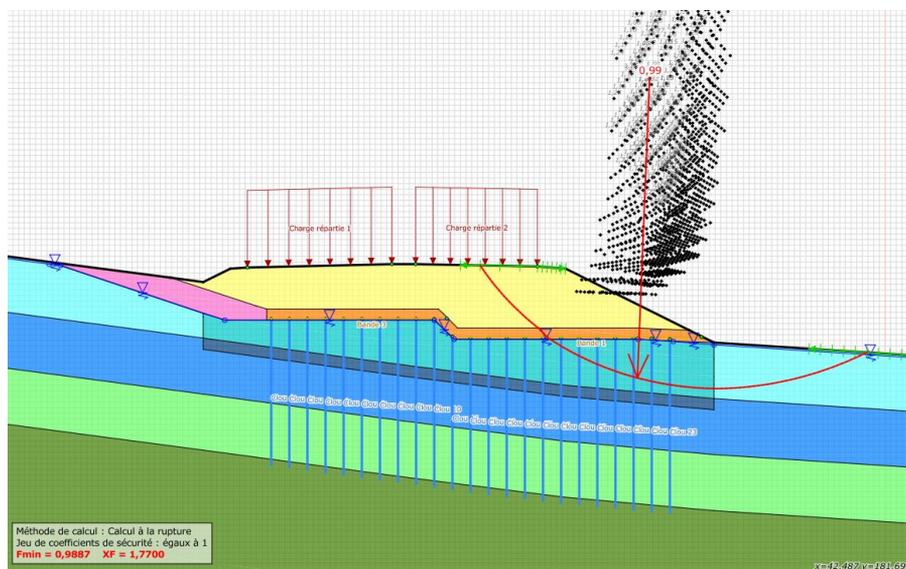


Figure 6 - Calcul de stabilité en conditions drainées avec TM® + CMC® (FS = 1,77)

#### **4. Détails de la construction**

Les 600 m de tronçon autoroutier ont été traités avec succès en environ 5 mois avec un atelier de Trenchmix® pour installer les 173 voiles, ce qui représente environ 14 000 m<sup>3</sup> de tranchées. Les travaux de CMC® ont été réalisés dans la continuité de ceux de Trenchmix®. Plus de 4 500 CMC® ont été installées, soit environ 50 000 mètres linéaires de forage. Les travaux de réalisation de Trenchmix® ont été contrôlés par des tests d'écrasement :

- Des prélèvements de coulis, prélevés à la sortie de la centrale à coulis,
- Des prélèvements de voile, prélevés sur site, après réalisation de la tranchée.

Les différents résultats obtenus au fur et à mesure du chantier ont permis d'optimiser les quantités de ciment nécessaires à l'obtention des critères du dimensionnement. Les travaux de réalisation de CMC® ont été contrôlés par de nombreux tests, dont des tests de consistance, d'écrasement et d'essais chargement.

#### **5. Instrumentation**

L'objectif de cette instrumentation était de vérifier le bon report de la charge vers les inclusions rigides et que les tassements et déplacements latéraux soient maîtrisés. Dix-huit capteurs et quatre forages instrumentés ont été installés sous la plateforme de transfert de charge et dans le sol compressible. Les capteurs suivants ont été installés sous le remblai (Figures 7 et 8) :

- Cinq capteurs de pression totale (CPT) pour mesurer le transfert de charge : deux sur CMC® (CPT1 et CPT2), un sur le sol (CPT4), un sur une paroi de Trenchmix® (CPT5) et un annulaire autour de la tête d'une CMC® (CPT3),
- Un tassomètre magnétique en forage (MPE) pour mesurer le tassement du sol compressible à l'aide de 8 bagues magnétiques,
- Treize capteurs de tassement (notés S),
- Trois inclinomètres en forage de 25 m de long situés en pied de remblai.

Les capteurs de tassement sont des transmetteurs de pression connectés en série par une ligne hydraulique à un réservoir rempli d'antigel fixé sur un support disposé en dehors de l'emprise de l'ouvrage d'une part, et par une ligne électrique à la centrale d'acquisition d'autre part. Le réservoir maintient le système toujours saturé et à charge constante. Le transmetteur mesure la variation de pression entre sa position et le niveau du réservoir. Un transmetteur de référence est fixé sous le réservoir et permet de calculer le tassement des autres transmetteurs positionnés sous l'ouvrage. Chaque transmetteur est compensé en pression atmosphérique par un capillaire couplé au câble électrique. Chaque transmetteur posé sur le sol est fixé sur une platine rectangulaire, les transmetteurs destinés à mesurer le tassement des inclusions rigides et des parois de Trenchmix® sont directement posés sur le béton,

Les capteurs de pression totale et les capteurs de tassement sont connectés à une centrale d'acquisition qui enregistre les mesures à une fréquence définie selon les phases du chantier et qui les transmet hebdomadairement. Les mesures en forage ont été réalisées deux fois par jour pendant la construction du remblai, puis une fois par semaine au cours des trois mois suivant la fin de la construction du remblai et à une fréquence décroissante avec le temps sur une période totale de 2 ans.

Remarque : aucune mesure de contrainte ou de tassement n'a été mesurée entre le 09/02/18 et le 28/03/18 (problème d'enregistrement au niveau de la centrale d'acquisition) et les mesures ont été arrêtées dès que les valeurs étaient stabilisées.

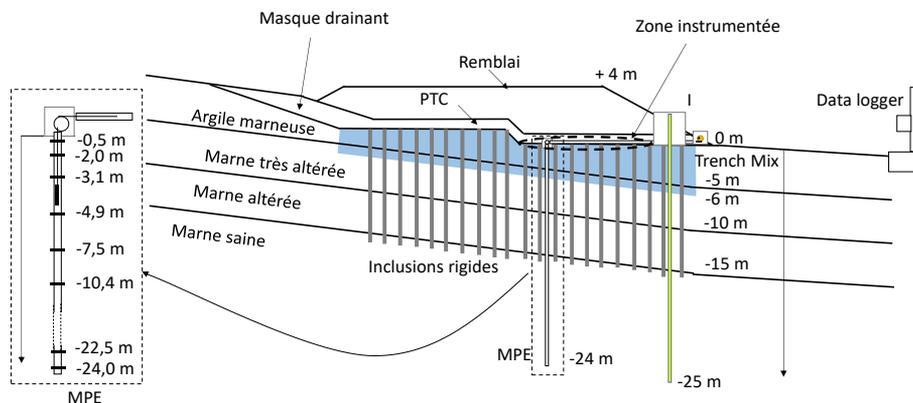


Figure 7 - Implantation des forages instrumentés

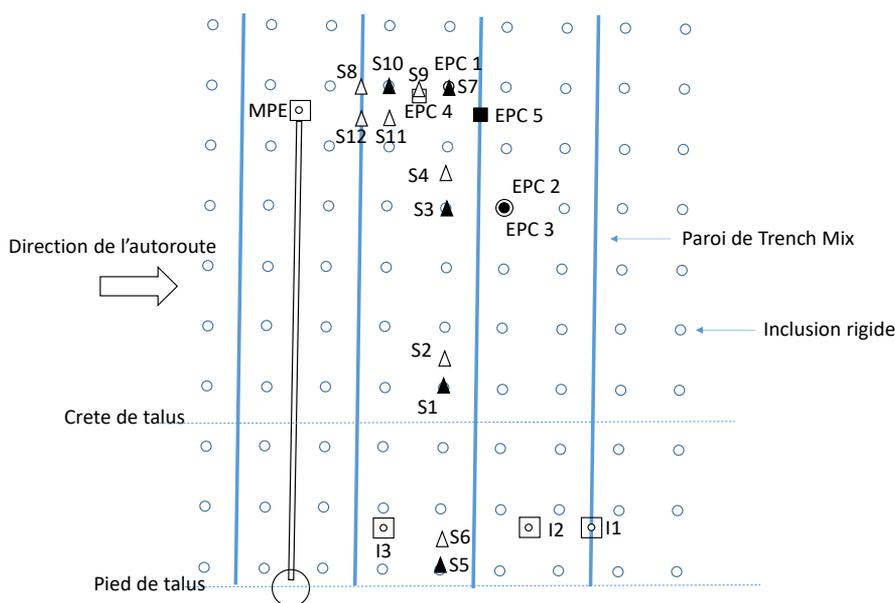


Figure 8 - Implantation des capteurs

## 6. Présentation des résultats et discussion

Les mesures des capteurs de pression totale affichent une contrainte stable d'environ 950 kPa au droit de la CMC<sup>®</sup>. Cela représente un effort normal de 67 kN. Le remblai seul, à l'échelle de la maille, apporte 288 kN. La CMC<sup>®</sup> reprend donc 23 % des efforts en tête. Les calculs Plaxis ont affiché, en phase d'exploitation, une charge en tête de CMC<sup>®</sup> de 105 kN, pour un effort total (remblai + surcharge d'exploitation liée à l'autoroute) de 346 kN, soit une reprise d'effort par la CMC<sup>®</sup> de 30 %. La proportion de la charge qui passe en tête de CMC<sup>®</sup> est donc sensiblement la même que celles mise en avant lors des calculs Plaxis. Il est également intéressant de remarquer qu'une portion non nulle de la contrainte est reprise par le capteur annulaire CPT3 situé à proximité immédiate d'une CMC.

Le tassement des CMC<sup>®</sup> seules, mesuré entre mai 2017 et janvier 2018 sous le corps du remblai (S3, S7 et S10), est de l'ordre de 40 mm. Sur la même durée, le tassement du sol sous le corps du remblai est de l'ordre de 90 mm et 60 mm au droit des parois de Trenchmix<sup>®</sup>, pour un tassement moyen compris entre 60 et 70 mm. Le tassement moyen mesuré est donc du même ordre de grandeur que celui calculé avec Plaxis, et on note qu'il s'est stabilisé 6 mois après la construction du remblai. Les différents tassements sont présentés sur la Figure 10.

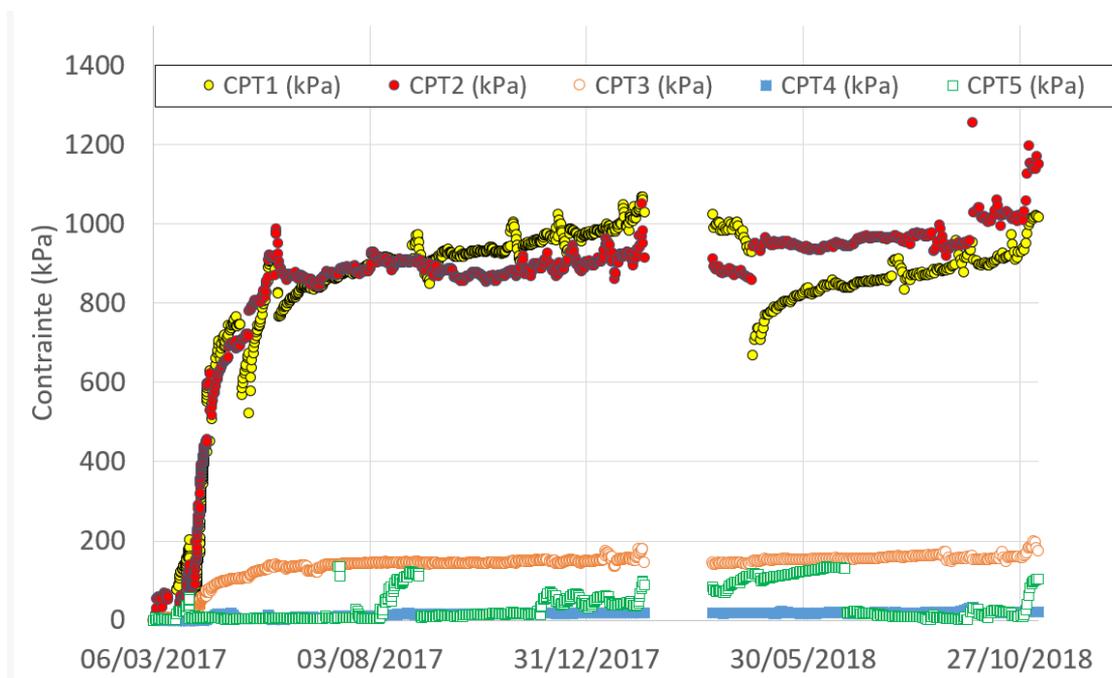


Figure 9 – Contraintes mesurées

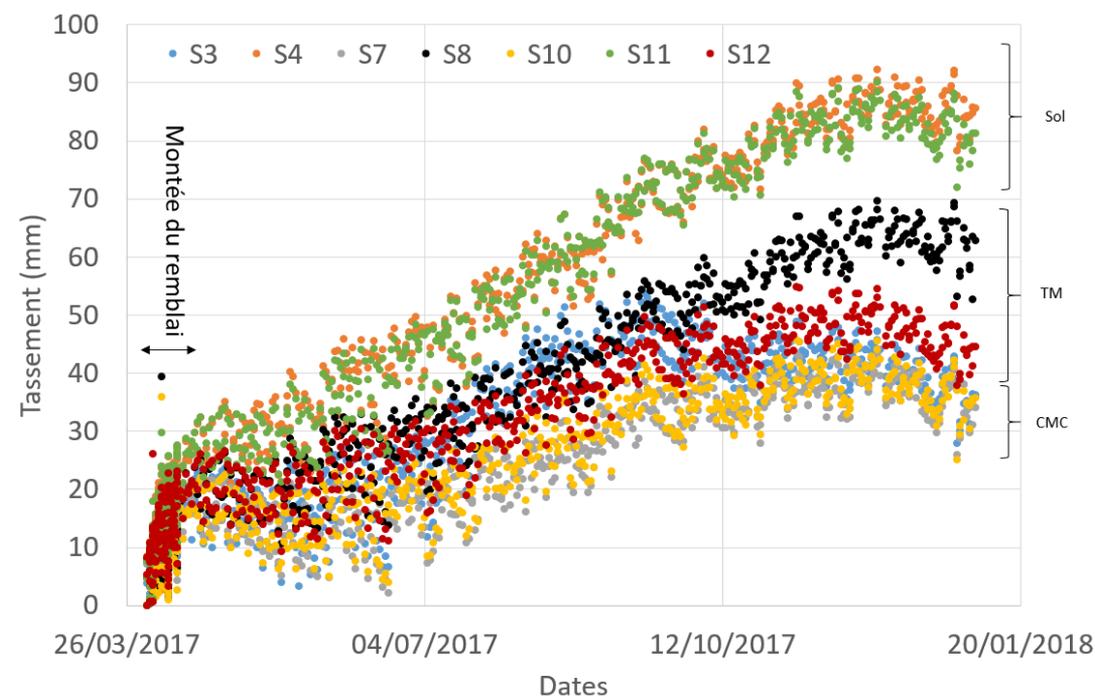


Figure 10 - Tassements mesurés

La Figure 11 présente les déplacements horizontaux mesurés à l'aide des trois forages inclinométriques verticaux. Sur ces mêmes figures sont présentées les valeurs calculées avec Plaxis, pour comparaison. Les mesures présentées ont été réalisées à différentes étapes de la montée du remblai :

- 17/03/17 : mesures initiales de référence,
- 30/03/17 : mise en place du géotextile + 1ère couche de remblai (2 x 30 cm),
- 06/04/17 : fin de montée du remblai,
- 16/05/17 : fin de montée du remblai + 1 mois,

- 05/12/17 : fin de montée de remblai + 8 mois,
- 27/03/18 : fin de montée du remblai + 12 mois
- 25/09/18 : fin de montée du remblai + 18 mois

Les mesures présentées ci-dessus confirment les prévisions calculées avec Plaxis, à savoir qu'il n'y a pas d'évolution sensible des déplacements latéraux entre les mesures à court terme (cf. mesures du 16/05/17) et les mesures à long terme (cf. mesures du 05/12/17 au 25/09/18). En d'autres termes, les déplacements horizontaux se font dès la mise en place du remblai. On remarque également que les ordres de grandeurs calculés avec Plaxis se retrouvent dans les différentes mesures.

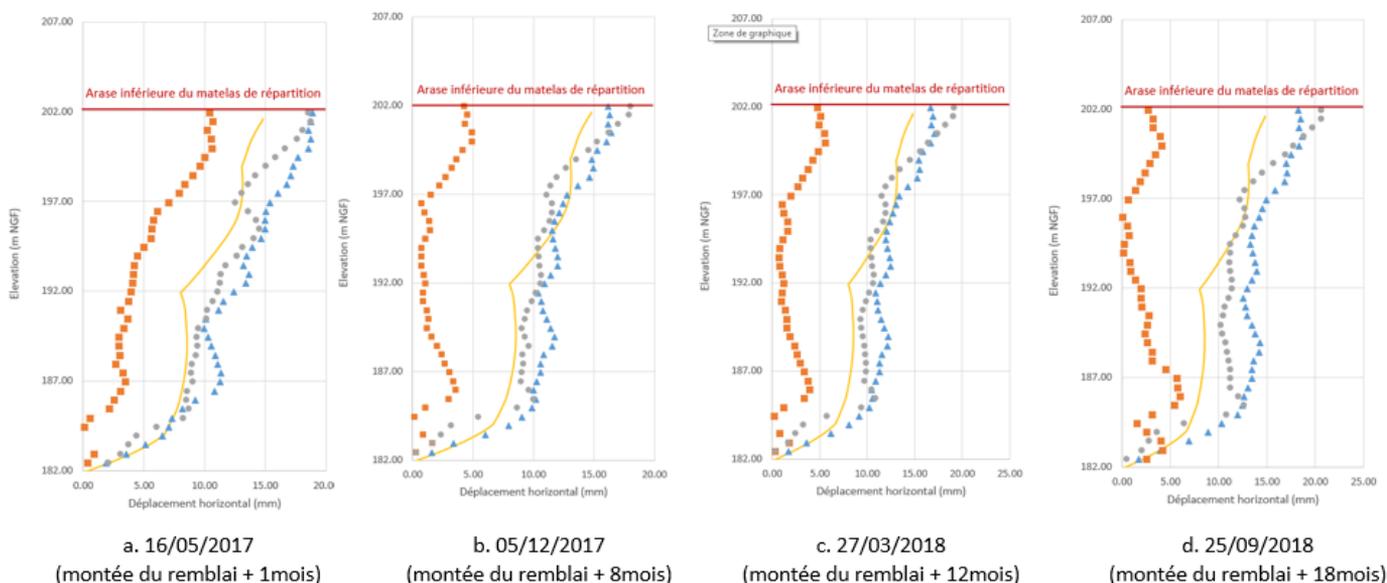


Figure 11 – Déplacements mesurés

## 7. Conclusion

Les résultats présentés ci-dessus permettent de confirmer le bienfondé de la solution de renforcement de sol proposée, et son adéquation avec les problématiques géotechniques identifiées en amont du projet. L'autoroute est en service depuis l'été 2018.

## 8. Références bibliographiques

- ASIRI. 2012. Recommandations pour le dimensionnement, l'exécution et le contrôle de l'amélioration des sols de fondation par inclusions rigides, Presses des Ponts, Paris.
- Briançon L., Liausu Ph., Plumelle C. et Simon B. (2018). Amélioration et renforcement des sols. Editions de Moniteur
- Combarieu O. 1988. Amélioration des sols par des inclusions rigides verticales, application à l'édification de remblais sur sols médiocres. Revue française de Géotechnique, n°44, 57-79.
- Frank R. and Zhao S.R. 1982. Estimation par les paramètres pressiométriques de l'enfoncement sous charge axiale de pieux forés dans les sols fins. Bulletin de liaison du laboratoire des Ponts et Chaussées, n°119, may-june, 17-24.