

INSTRUMENTATION D'UN DEBLAI DANS UNE MARNE – EVOLUTION DES DEPLACEMENTS ET DE LA PRESSION INTERSTITIELLE SUITE A UN DECHARGEMENT MECANIQUE

MONITORING OF EARTHWORK EXCAVATION ON A MARLY SOIL – EVOLUTION OF PORE PRESSURE AND DISPLACEMENT AFTER A MECHANICAL DISCHARGE

Dino MAHMUTOVIC^{1,2}, Luc BOUTONNIER¹, Jacques MONNET³, Jean-marie LEONARD¹

¹ Egis géotechnique, Seyssins, France

² 3SR, Grenoble, France

³ GAÍATECH, Seyssinet-Pariset, France

RÉSUMÉ – Cet article est consacré à la description de la pose d'une instrumentation et à son exploitation au sein d'un déblai marneux de 18m de profondeur sur le chantier de l'A304. Les données in situ et les essais de laboratoire complémentaires sont analysés à différents stades de l'état d'avancement des travaux de terrassement. Les effets d'un déchargement mécanique sur une arase de déblai sont ainsi observés.

ABSTRACT – This paper aims to present the instrumentation of an earthwork excavation in a marly soil (18m of soil excavated) and results of three years of monitoring. Pore pressure and displacement evolution during mechanical discharge are presented. The instrumentation is set up in the north of France in the A304 site.

1. Introduction

Cet article s'inscrit dans le cadre du projet ANR Terredurable, commencé en 2012 et qui prendra fin en décembre 2016. Terredurable a pour objectif d'améliorer la conception des ouvrages en terre (compactage et stabilité) en combinant recherche expérimentale et théorique avec le retour d'expérience des praticiens. Ce projet a pour ambition de mieux comprendre la mécanique des sols non saturés et notamment celle des sols proches de la saturation. Ces derniers ont un comportement bien spécifique avec la présence de bulles d'air occluses. Cet état hydrique correspond par ailleurs à la majorité des ouvrages en terre anthropiques en sols fins (déblais, remblais, barrages en terre, digues,...). Cette communication est une contribution à la compréhension de ces phénomènes au sein d'ouvrages en terre tels que les déblais. Les données expérimentales en vraie grandeur sur les gonflements mesurées in situ sont rares dans la littérature scientifique, même si quelques auteurs se sont intéressés au sujet (Blight 2013) Un ouvrage en terre sur un chantier autoroutier a ainsi été instrumenté par les membres du projet Terredurable et analysé au cours du temps. Les principaux résultats de cette étude sont présentés par la suite. Cet article est la première partie d'un double article consacré à l'instrumentation du déblai D9B et à sa modélisation. L'autre partie est également présentée aux JNGG 2016 (« Simulation du déchargement mécanique d'un déblai marneux avec un modèle quasi-saturé » - Mahmutovic et al, JNGG 2016).

2.Objectifs et contexte géologique de l'instrumentation

2.1. Principaux objectifs de l'instrumentation

L'ouvrage en terre instrumenté est un déblai faisant partie de la future autoroute de liaison A304, qui prolongera l'actuelle A34 entre Charleville Mézières et Rocroi-Gué d'Hossus (Belgique). Ce projet long de 31 km connaît de fortes contraintes géotechniques avec 8 millions de m³ de terre à déplacer. Les matériaux rencontrés sont des marnes, très sensibles à l'action de l'eau.

Le choix d'instrumenter un déblai plutôt qu'un remblai a été dicté par la volonté de monitorer certains phénomènes tels que :

- L'évolution des pressions interstitielles sous l'arase du déblai avant, pendant et après le terrassement.
- La mesure du gonflement potentiel dans les plates-formes lié au déchargement mécanique du déblai.

A ce jour, ces phénomènes ont été très peu quantifiés à partir d'instrumentation et encore moins pendant le processus d'excavation. C'est pour l'ensemble de ces raisons que le déblai D9B a été choisi. Ce choix permet également de mettre en place une instrumentation dans la durée. Celle-ci a été mise en place avant les différentes phases de terrassement et est restée en place pendant trois ans.

Le déblai D9B est un ouvrage en terre large de 160 m pour une longueur de 400m, centré sur le point kilométrique 10+030. La profondeur finale de l'arase par rapport au TN est de 18 m. Le déblai est composé de 3 risbermes côté gauche et 1 risberme côté droit de l'axe de la future autoroute. Les pentes des talus sont de 3 pour 1 (cf Figure 1).

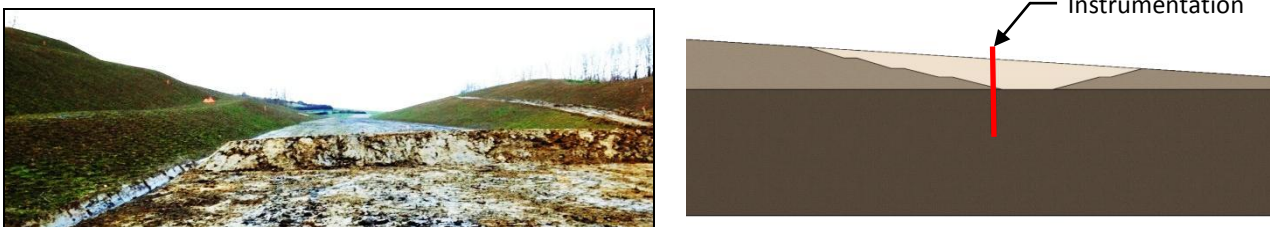


Figure 1. Profil en travers du déblai D9B sur lequel on peut voir la position de l'instrumentation (photo prise à la fin des travaux à gauche, schéma du déblai à droite)

2.2. Lithologie et géologie des formations du site instrumenté

D'après le carottage réalisé au droit du dispositif des élongamètres 2 couches de sols peuvent être distinguées du point de vue lithologique : une couche de marne argileuse jusqu'à 22m de profondeur comportant des lits de galets décimétriques et un substratum de marne argileuse compacte.

La formation géologique est celle des Marnes à ovoïdes. Il s'agit d'argiles légèrement calcaires (5 à 20 % de CaCO₃) pouvant contenir 30 % de montmorillonite (argiles gonflantes). Les feuilletts argileux montrent des stratifications entrecroisées avec des pendages de 0 à 45°. La présence d'une ammonite marqueur (*Oistoceras figulinum*) permet de situer l'arase du déblai au sommet du Pliensbachien inférieur (= Carixien). Les Marnes à ovoïdes sont surmontées par les Marnes bleues à plaquettes de lumachelles » du Pliensbachien supérieur (= Domérien). Le passage entre les deux formations est progressif avec l'apparition de petits bancs calcaires. Les Marnes à plaquettes de

lumachelles sont plus silteuses et plus micacées que les Marnes à ovoïdes. Les bancs calcaires décimétriques y sont plus nombreux et servent d'assises à de petits aquifères perchés. Le pendage général des formations est de 3 à 5° vers le Sud.

3. Description du dispositif d'instrumentation et de sa pose

3.1. Liste et descriptif de l'instrumentation

Le dispositif d'instrumentation mis en place est composé de deux capteurs de pression interstitielle (CPI), d'une pige de tassement gonflement ainsi qu'un dispositif de mesure des déformations verticales (élongamètres chaînés) :

- La mesure de pression interstitielle se fait à l'aide de capteurs de pression interstitielle, dit CPI (Figure 2.d). Ces derniers offrent une mesure automatisée grâce à un enregistreur de niveau piézométrique. Ce capteur de type « mini Diver », de marque Schlumberger, a été adapté par EGIS Géotechnique et modifié par l'ajout d'un filtre (type pierre poreuse) et de son support. Ce capteur présente l'avantage d'être compact. Il est doté d'une mémoire autonome de 2 x 24 000 mesures (mesures simultanées de la pression interstitielle et de la température).

- Les piges de tassements/gonflements sont des tiges en acier de 1m de longueur vissées les unes aux autres et ancrées sous l'arase à l'aide d'une enclume (figure 2.c). Chaque tige est numérotée et indique la hauteur vis-à-vis du point d'ancrage. Les tiges sont assemblées les unes aux autres à l'aide de filetages. Les tiges supérieures peuvent être retirées progressivement au cours de l'avancée du terrassement du déblai afin de faciliter les mesures topographiques. Un déplacement de l'arase entraînera un déplacement de l'enclume et donc un déplacement du train de tiges jusqu'à la surface. Une fois l'altitude du point d'ancrage déterminée par mesure topographique il est possible de mesurer la variation d'altitude de ce dernier au cours du temps par d'autres relevés.

- Les élongamètres chaînés (figure 2.a et 2.b) sont des dispositifs automatiques de mesure des déformations. En se déformant, le sol va également déformer le coulis en contact avec les élongamètres. Le déplacement de ce dernier va pouvoir être enregistré par un capteur de déplacement. Ainsi chaque élongamètre permet de mesurer un déplacement sur une certaine hauteur (2 ou 3 m en fonction des élongamètres), et donc un déplacement total en additionnant les différentes valeurs. Ce dispositif a la même fonction que les piges de tassement gonflement mais permet d'avoir un déplacement différentiel en fonction de la couche de sol étudiée. Une chaîne de mesure de déformations de 24 mètres linéaires constituée de 9 éléments (3x2m et 6x3m) a ainsi été développée dans les locaux d'EGIS Géotechnique et assemblée sur le chantier.

Ces quatre dispositifs ont été installés au sein de trous de forage réalisés à différentes profondeurs (cf figure 2), et recouverts par un coulis ayant des caractéristiques mécaniques se rapprochant de celles du sol en place. Les quatre dispositifs ont été placés parallèlement à l'axe du déblai (à 3 mètres du début de l'arase en pied de talus de déblai) pour être au plus près de l'arase sans pour autant interférer avec les travaux de couche de forme.

Les équipements ont été mis en œuvre dans des forages distincts afin de fiabiliser la mesure. Ils restent cependant très proches les uns des autres pour mesurer des phénomènes identiques. Les différents dispositifs sont conçus afin de permettre l'enregistrement automatique des mesures (enregistrement embarqué) sauf dans le cas des piges de tassement/ gonflement où une mesure manuelle est nécessaire. Chacun

des dispositifs est en capacité de stocker plusieurs mois de données pour une fréquence d'une mesure quotidienne.

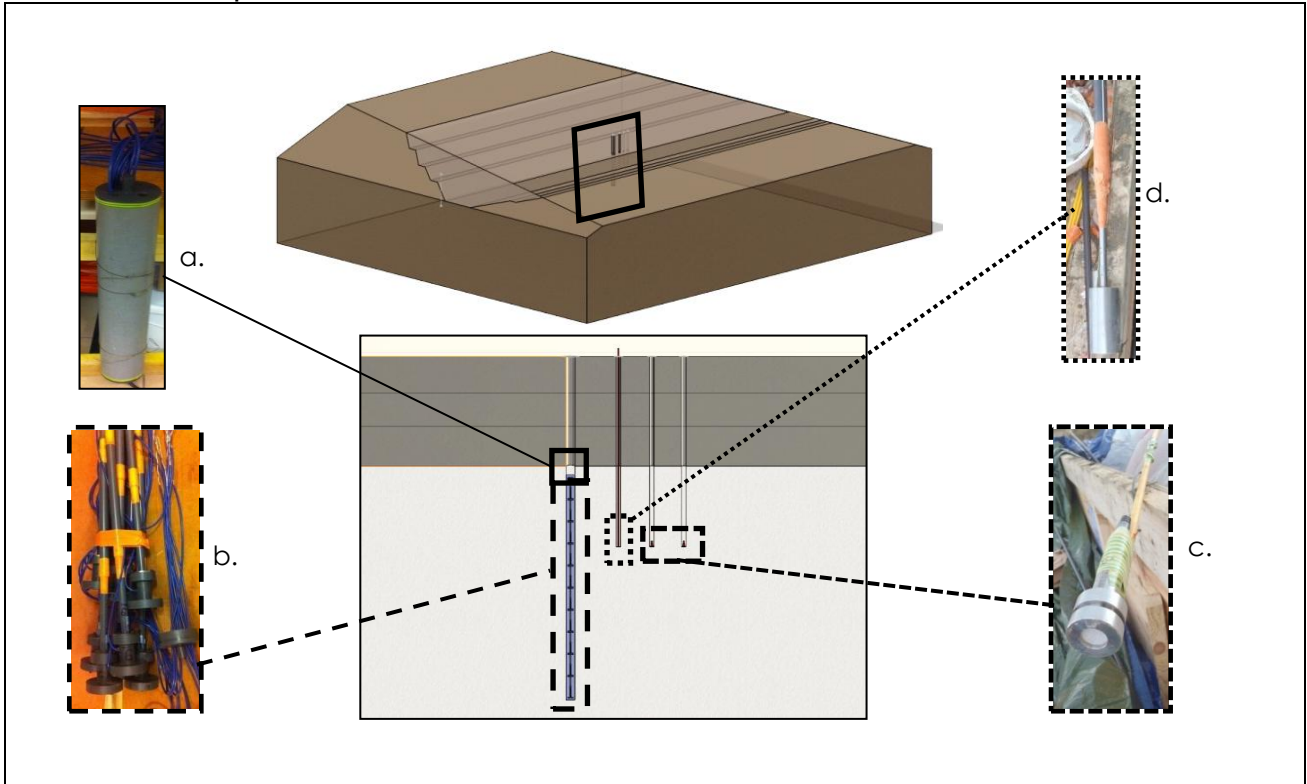


Figure 2. Vue 3D du déblai D9B et gros plan sur l'instrumentation en place
 a. Centrale d'acquisition – b. Elongamètres chaînés – c. Enclume et pige de tassement /gonflement – d. Capteur de pression interstitielle

3.2. Pose de l'instrumentation

La pose de l'instrumentation s'est faite à l'intérieur de forages réalisés au préalable. Le descriptif de chaque appareillage est décrit ci-dessous.

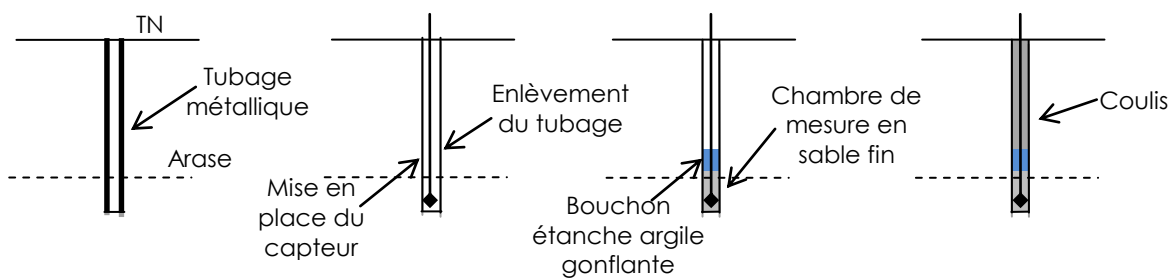


Figure 3. Descriptif du protocole de pose des CPI

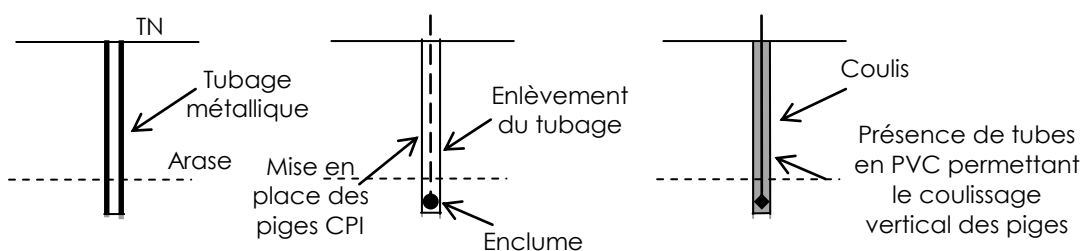


Figure 4. Descriptif du protocole de pose des piges de tassement/gonflement

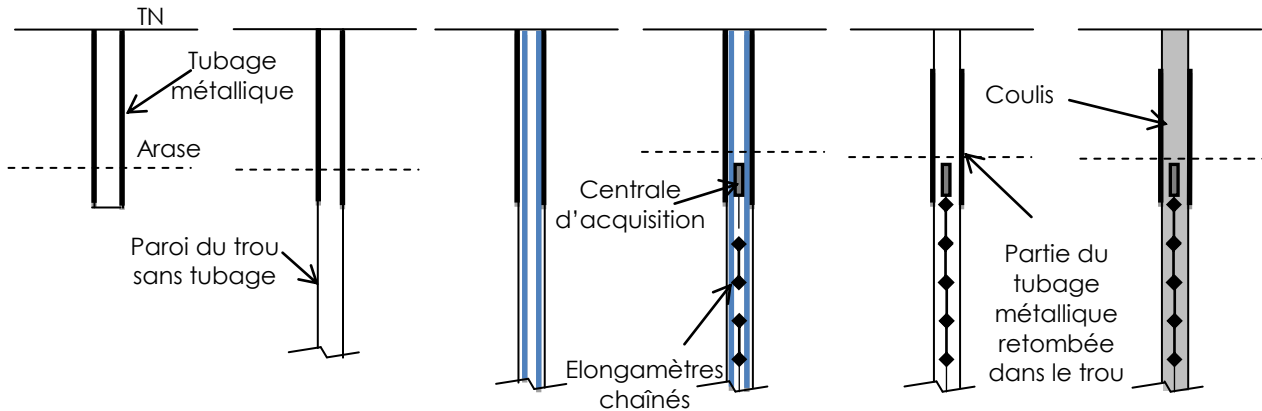


Figure 5. Vue 3D du déblai D9B et gros plan sur l'instrumentation en place

Remarques :

Les CPI ont été posés en fond de trou de forage à l'intérieur d'une chambre de mesure réalisée en sable fin. Cette dernière permet une communication latérale avec le sol naturel, un bouchon argile ayant été posé en partie supérieure de la chambre pour que le trou n'agisse pas comme un piézomètre ouvert.

Un coulis est injecté à l'intérieur du trou de forage des piges de tassement gonflement une fois que le dispositif est mis en place, ce qui permet de sceller l'enclume à l'arase. Les piges en acier sont quant à elles introduites dans une gaine en PVC, ce qui leur permet de coulisser à l'intérieur du coulis lorsque l'arase du déblai gonfle.

La pose des élongamètres a été ponctuée par la retombée d'une partie du tubage métallique à l'intérieur du trou de forage lors de la pose de l'instrumentation (Novembre 2012) entravant la mesure du dispositif jusqu'à ce que le tubage soit enlevé (Juillet 2013), soit la fin des travaux de terrassement. Les mesures des piges de tassement gonflement permettent de compléter les mesures manquantes pendant ce laps de temps.

4. Essais de laboratoire

Le forage du trou à destination des élongamètres a été réalisé par carottage entre 18 et 50m de profondeur en diamètre 200mm. Les échantillons intacts issus de ce dernier ont fait l'objet d'essais de laboratoire afin de mieux étudier le sol sous l'arase du déblai.

Ainsi des essais d'identification classiques ont été réalisés : granulométrie, IP, valeur au bleu, ainsi que des essais mécaniques tels que des essais triaxiaux et oedométriques. Les différents résultats de cette analyse sont reportés dans le tableau 1.

Type de sol	Profondeur	Classe GTR	w _L	IP	C _c	C _s	φ'	c
Marne	0-21m	A2	46	24	0,187	0,048	-	-
Marne	21-50m	A2	-	-	0,13	0,013	25	0

Il est à noter que la marne est surconsolidée. Des résultats complémentaires concernant ce matériau sont disponibles dans l'article de J-F Serratrice (JNGG 2016).

Des mesures de succions ont également été effectuées lors du forage. Ainsi des mesures au papier filtre ont été réalisées tous les 50 cm entre 18m et 50 m de profondeur. L'objectif ici était de voir l'effet d'un déchargement mécanique en mesurant la succion liée au déconfinement du sol. Les résultats de cette analyse sont reportés sur la figure 6. Une augmentation de la succion est ainsi observée avec l'augmentation de la profondeur de prélèvement.

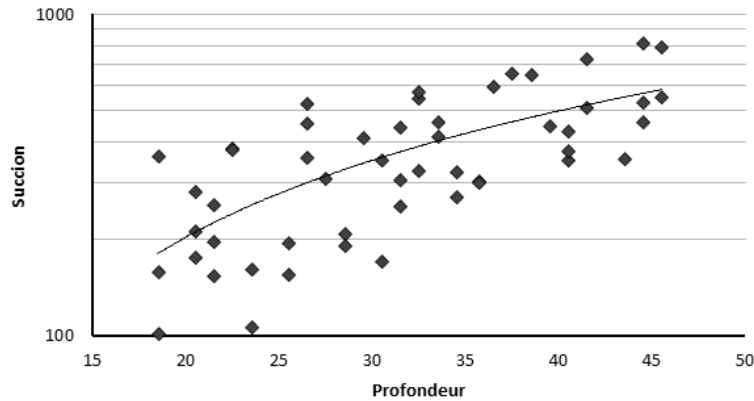


Figure 6 – Valeurs des mesures de succion effectuées à différentes profondeurs sur les échantillons intacts issus des carottes du trou à destination des élongamètres chaînés

Plus le déconfinement est important et plus la variation de contrainte totale est importante au sein du sol. Cette diminution de contrainte totale s'accompagne d'une baisse de la pression interstitielle qui peut devenir négative et par un gonflement non drainé du sol. Le degré de saturation diminue également, à l'inverse du volume d'air au sein du sol. Ce constat a été vérifié de manière analytique. Les résultats sont disponibles dans la seconde partie de cet article consacrée à la modélisation numérique de cet ouvrage.

5. Résultats de l'instrumentation

5.1. Déformation de l'arase

Le dispositif des piges de tassement/gonflement permet de mesurer la variation d'altitude de l'enclume positionnée au niveau de l'arase du déblai. La figure 7a présente les valeurs de gonflement mesurées avant, pendant et après la phase d'excavation. On peut ainsi se rendre compte que le niveau de l'arase est stable avant le début de travaux, avant de gonfler brusquement de 23cm pendant la phase de terrassement, et de continuer à gonfler doucement par la suite (3 cm en 1 ans). L'instrumentation en place permet donc bien de distinguer gonflement « immédiat » pendant la réalisation du déblai et un gonflement différé à la cinématique lente.

Le dispositif d'élongamètres chaînés permet de mieux observer le gonflement différé et ceci sur différentes couches de sol (figure 7b). L'ordre de grandeur est le même que sur le dispositif des piges de tassement/gonflement, ce qui vient fiabiliser les valeurs enregistrées. Un gradient de gonflement peut être observé avec un déplacement surtout important au niveau des couches proches de la surface (surtout au niveau des 4 premiers mètres) et qui devient presque nul en profondeur.

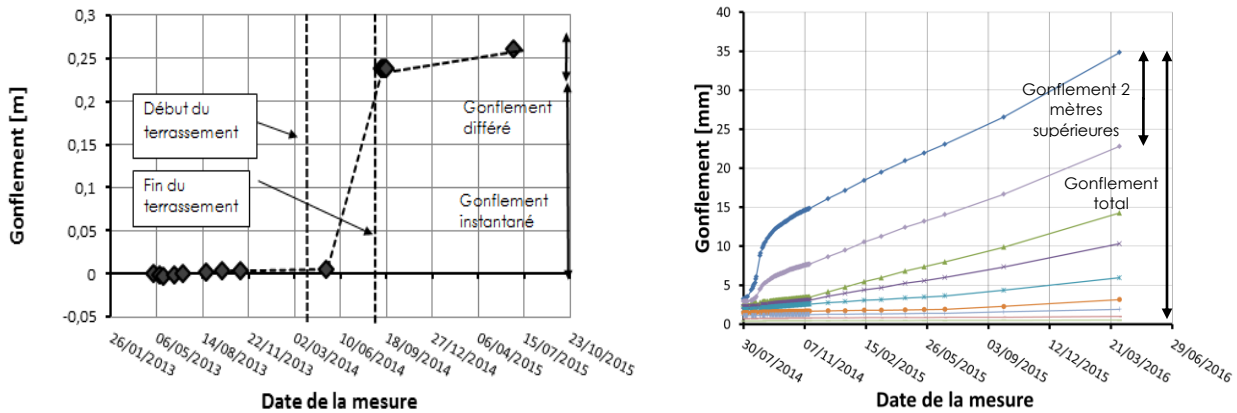


Figure 7a et 7b - Mesure du gonflement total à l'aide du dispositif de piges de tassement/gonflement (figure de gauche) - Mesures des gonflements différés à l'aide du dispositif d'élongamètres chaînés (figure de droite).

5.2. Variation des pressions interstitielles

Les deux capteurs CPI ont été endommagés pendant la phase de terrassement, les données associées aux phases de terrassement et post terrassement n'ont donc pas pu être récupérées. Les deux CPI permettent tout de même de connaître l'état initial du sol en termes de pression interstitielle au niveau de l'arase et de se rendre compte que la nappe était relativement stable au cours des 6 mois pendant lesquels les capteurs ont fonctionnés. De plus, en associant ces données aux mesures de succion effectuées à la même profondeur sur les carottes du dispositif d'élongamètres, il est possible de voir de manière qualitative l'effet d'un déchargement mécanique sur les pressions interstitielles. Ainsi en supposant une pression d'eau initiale de 160 kPa (valeur stabilisée de la pression interstitielle de la CPI 2 à 22m de profondeur figure 8) avant travaux de terrassement, cette dernière passerait à une valeur de pression d'eau négative de -200kPa (figure 6 à une profondeur de 22 m) après travaux.

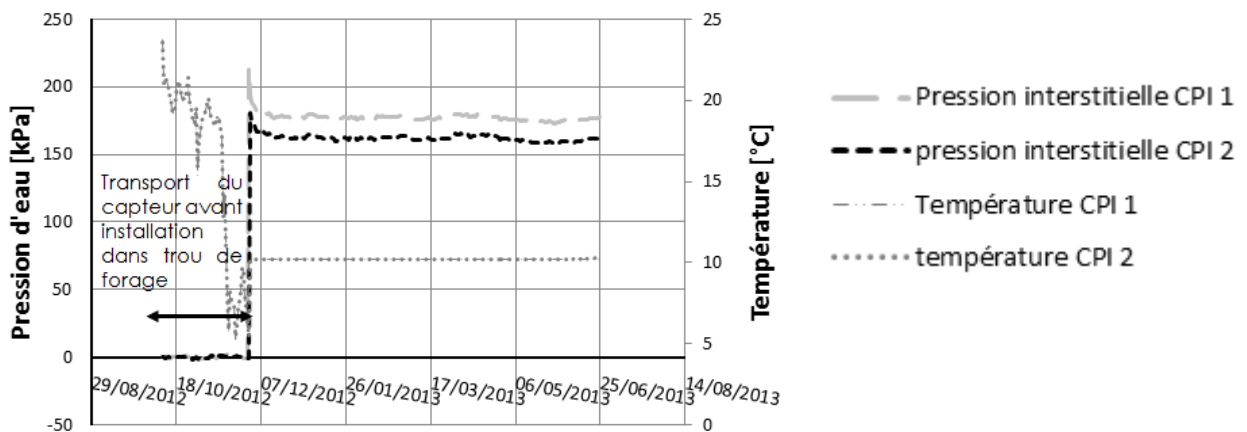


Figure 8 - Evolution des pressions interstitielles et de la température des capteurs CPI avant le début des travaux

6. Conclusion générale

L'instrumentation d'un ouvrage en terre de type déblai a été présentée. Le dispositif mis en place a permis de suivre l'évolution du gonflement de l'arase suite à un déchargement mécanique ainsi que l'évolution des pressions interstitielles. Le phénomène a été mesuré sur plusieurs années permettant de suivre le comportement à court terme et à long terme de l'ouvrage. Un gonflement « immédiat » pendant la réalisation du déblai et un gonflement différé ont ainsi été mis en évidence traduisant un mécanisme lent, couplé et complexe. Un gradient de gonflement différé est clairement visible, avec un gonflement concentré sur les 4 premiers mètres sous l'arase. Les mesures de succion réalisées sur les carottes de sols issus du forage ont montré une augmentation de la succion proportionnellement à la profondeur de prélèvement des échantillons.

7. Remerciements

Le projet Terredurable est soutenu par l'ANR programme Bâtiments et Villes Durables, convention ANR 2011 VILD 004 01.

La DREAL Champagne-Ardenne est vivement remerciée pour avoir autorisé les partenaires du projet Terredurable à réaliser cette expérimentation sur les emprises du chantier de l'autoroute A304.

8. Références bibliographiques

- Blight G-E., (2013). Unsaturated soil mechanics in Geotechnical practice. Taylor & Francis Group, LLC.
- Boutonnier, L., Serratrice, J.-F. (2002). Caractérisation du comportement d'une marne en vue de la réalisation d'un déblai. Congrès. Param 2002, Paris, Presses de l'ENPC/LCPC, p.519-530.
- Boutonnier, L., Virollet, M. (2003). Tassements et gonflements instantanés dans les sols fins proches de la saturation. Revue Française de Géotechnique 104, p.3-19.
- Mahmutovic D., Boutonnier L., Monnet J., 2016. Simulation du déchargement mécanique d'un déblai marneux avec un modèle quasi-saturé. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur – Nancy 2016, France.
- Serratrice J-F., 2016. Mesures des propriétés mécaniques d'une argile surconsolidée au laboratoire. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur – Nancy 2016, France.