

SUIVI A 10 ANS DU REMBLAI EXPERIMENTAL EN MATERIAUX TRAITES DE HERICOURT (FRANCE) : RESULTAT DU MONITORING

EXPERIMENTAL EMBANKMENT WITH TREATED SOIL IN HERICOURT (FRANCE) : 10 YEARS OF MONITORING AND RESULTS

Yasmina BOUSSAFIR¹, Dimitri MERCADIER², Katia BICALHO³, Yu-Jun CUI⁴

¹ GERS-SRO, Univ. Gustave Eiffel, Ifsttar, Marne-la-Vallée, France

² Cerema, Centre d'Expérimentation et de Recherche, Rouen, France

³ Universidade Federal do Espirito Santo - Departamento de Engenharia Civil - Centro Tecnológico, Brasil

⁴ Ecole des Ponts ParisTech, Institut Navier, Marne la Vallée, France

RÉSUMÉ – Le remblai expérimental de Héricourt (ANR Terdouest) a été réalisé en 2010. Equipé de capteurs de teneurs en eau et de succion, il a été suivi par le Cerema et l'Ifsttar pendant presque 10 ans. Les enregistrements permettent de suivre la réponse des sols traités à la chaux ou au ciment à leur environnement météorologique. Les observations permettent de conclure sur la durabilité des traitements de sols en remblai.

ABSTRACT – The experimental embankment of Héricourt (ANR Terdouest) has been build in 2010. Volumetric water content probes (TDR) and tensiometric probes have been collected by Cerema and Ifsttar during 10 years. These data allow us to observe the answer of treated soils during climate events in the East of France. We can have a good idea of the good behavior of lime or cement treated soil in long term.

1. Introduction

Le projet ANR TerDOUEST avait pour objectif d'évaluer la durabilité des sols traités en remblai, à la chaux et/ou au ciment. Ce projet a regroupé 12 partenaires (Boussafir et al., 2019) de 2008 à 2012 et prévoyait la réalisation d'un démonstrateur en vraie grandeur, un remblai expérimental qui serait équipé de capteurs.

Les acteurs en charge de la réalisation du remblai expérimental ont été le Cerema de Rouen (Centre d'Expérimentation et de Recherche), l'Ifsttar, le Syndicat Professionnel des Terrassiers de France, Lhoist, CimBéton, et l'Ecole des Ponts ParisTech. À ceux-ci se sont rajoutés les acteurs locaux sans qui la réalisation n'aurait pas été possible : la Direction Interdépartementale des Routes Centre-Est (en charge des travaux de la déviation de Héricourt), le Conseil Départemental de Haute-Saône (gestionnaire de la future infrastructure) et l'entreprise Roger Martin (entreprise mandataire en charge des travaux). La chaux a été fournie par Lhoist et le ciment par l'usine Holcim d'Altkirch.

Le remblai a été construit d'avril à juin 2010 puis a été suivi pendant 10 ans par le Cerema de Rouen.

2. Présentation des matériaux et de l'ouvrage

Le remblai expérimental a été construit avec les matériaux extraits de la déviation de Héricourt en Haute-Saône. Deux matériaux ont été sélectionnés pour leurs propriétés spécifiques : un limon ocre classé A2 (selon NF P11-300), représentatif de matériaux couramment utilisés en terrassement en France, et une argile plastique grise classée

A3/A4 (selon NF P11-300) réputée difficile à travailler et non recommandée pour un réemploi en remblai selon le Guide des Terrassements Routiers (LCPC-Sétra, 1992).

Ces deux matériaux ont été étudiés pour un réemploi avec traitement de sol soit à la chaux vive soit avec du ciment (Froumentin et Boussafir, 2013).

Les matériaux traités et non traités ont été mis en œuvre en remblai en bassin de rétention des eaux pluviales de la chaussée. Au cours de la montée de l'ouvrage, des capteurs ont été installés et des mesures de teneurs en eau et de masse volumique ont été réalisées. L'ouvrage a été enterré de 1 mètre afin de solliciter sa base par les fluctuations de la nappe phréatique en lien avec La Lizaine située à une dizaine de mètre du pied de l'ouvrage (Boussafir et al., 2016 ; Bicalho et al., 2018).

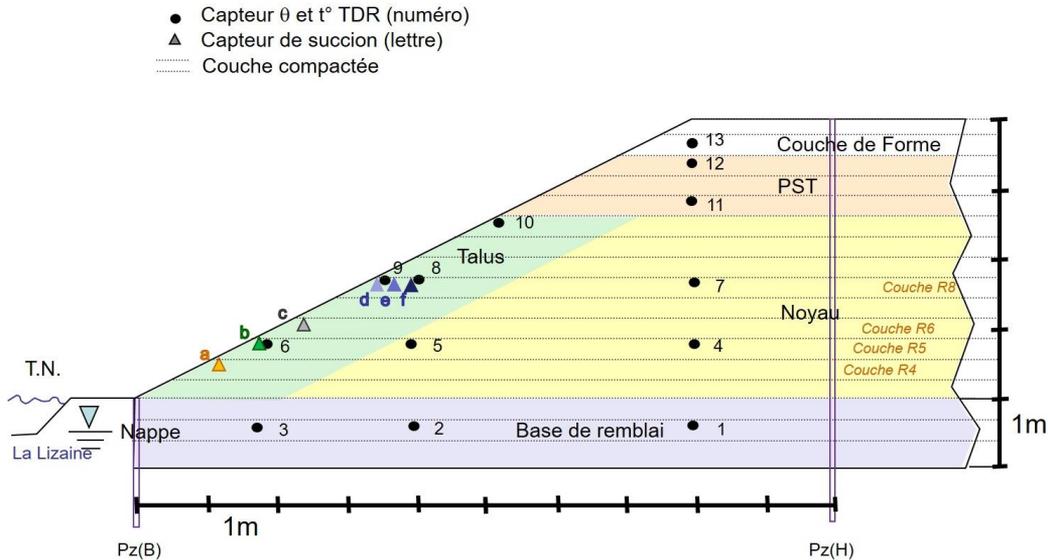


Figure 1. Coupe transversale type du remblai expérimental de Héricourt. Localisation des parties d'ouvrages et des capteurs

Les capteurs qui nous intéressent plus particulièrement sont (Figure 1) :

- les capteurs TDR (Trime Pico 64 du fabricant IMKO GmbH, distribué en France par la société SDEC France) : ils équipent le remblai en talus, sur la plateforme et le corps de l'ouvrage. Ils permettent d'évaluer les fluctuations de teneurs en eau volumiques et les températures.
- les capteurs tensiométriques (sondes Watermark, distribuées en France par la société Challenge Agriculture) : posés uniquement en talus ils enregistrent les succions à plusieurs niveaux à 0,25 m de profondeur sous la surface du talus, ainsi qu'en profondeur à -0,25 ; -0,50 et -0,75 m sur un profil horizontal à mi-hauteur du remblai. Ces capteurs sont limités à 250 kPa.

Les capteurs de succion permettent d'observer la dynamique de séchage au niveau du talus. Ils reflètent l'effet de la météorologie du site de Héricourt. Les capteurs de teneur en eau montrent le comportement de chaque partie d'un remblai vis-à-vis des infiltrations d'eau. Le couplage des teneurs en eau et des succions en un point donné du talus (couche R8 ou R5) permet de manière très intéressante d'évaluer l'intensité des effets de la météorologie de Héricourt et permet de conclure en terme de séchage. L'exploitation des données acquises entre 2010 et 2014 sur la partie de Limon traité à 2% de chaux a ainsi clairement montré que le sol restait stable dans un état quasi saturé durant les 4 années d'observation, garantissant un très bon comportement du talus dans le temps (Bicalho et al., 2018).

3. Evolution des succions en talus à 25 cm de profondeur

Les succions mesurées en peau de talus, sous la terre végétale, à 25 cm dans le matériau compacté permettent d'observer l'effet du séchage à différentes hauteur sur le talus et dans les 4 modalités de traitement (Figure 2, Figure 3, Figure 4, Figure 5).

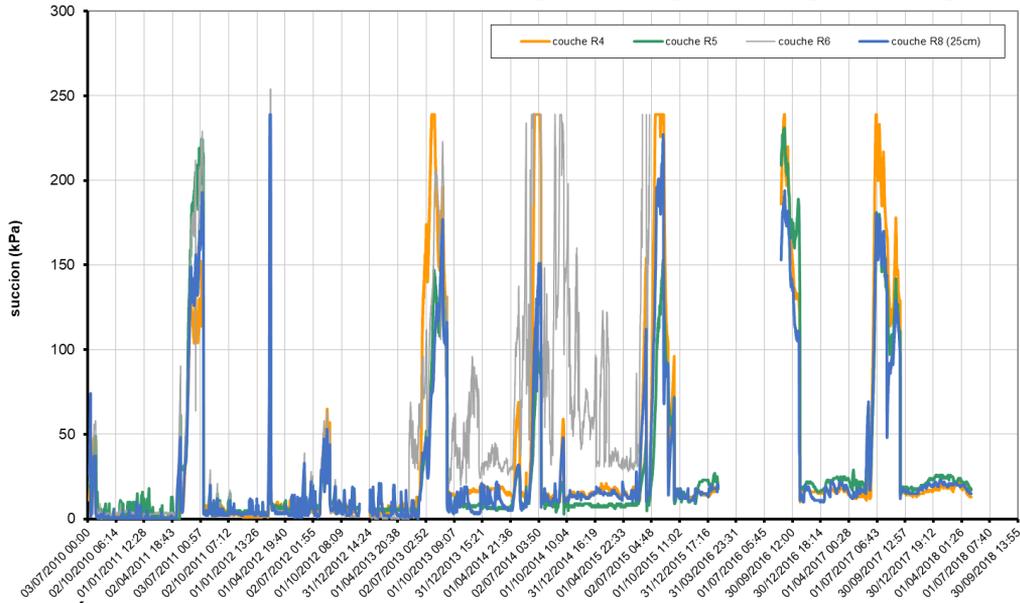


Figure 2. Évolution de la succion dans le limon +2% CaO en peau (25cm de profondeur)

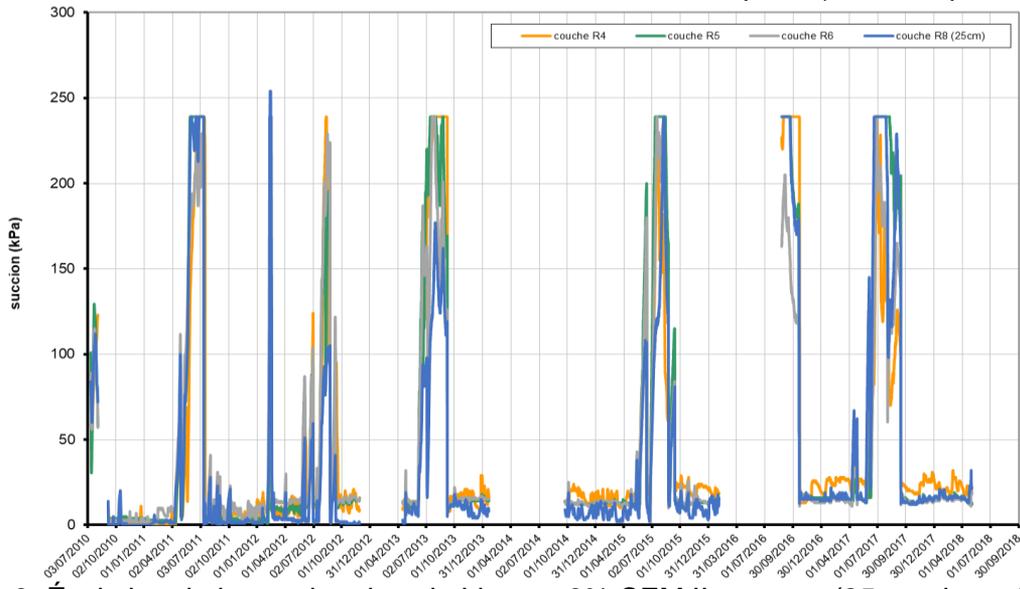


Figure 3. Évolution de la succion dans le Limon +3% CEM II en peau (25 cm de profondeur)

Les conclusions que l'on peut tirer de ces chroniques sont les suivantes :

- L'effet de la météorologie ne se manifeste pleinement qu'après une année voire deux. La première année (en 2010) les effets de la météorologie se manifestent à peine au niveau des mesures ;
- Les effets du séchage ne sont pas corrélés avec la hauteur du capteur : d'une année sur l'autre le séchage peut être plus ou moins intense à des niveaux variables et la position la plus basse (couche R4) n'est pas forcément plus humide que la position la plus haute (couche R8) ;
- Au cours d'un même évènement sec, l'intensité des succions qui se développent dans le matériau traité, est très variable sur le talus : les succions peuvent osciller entre 100 et plus de 250 kPa, valeur seuil d'enregistrement des capteurs,

- Les succions semblent plus fortes dans les modalités de sols traités avec du ciment qu'avec les mêmes sols traités à la chaux vive, notamment avec les limons. Ainsi, les valeurs dépassent 250 kPa dans :
 - 2 épisodes secs sur 9 pour limon chaux (22% des situations),
 - 5 épisodes secs sur 8 pour le limon ciment (62% des situations),
 - 3 épisodes secs sur 9 pour l'argile chaux (33% des situations),
 - 2 épisodes secs sur 8 pour l'argile chaux-ciment (25% des situations)
- La durée des périodes sèches est de l'ordre de 3 mois quelle que soit la modalité de traitement,

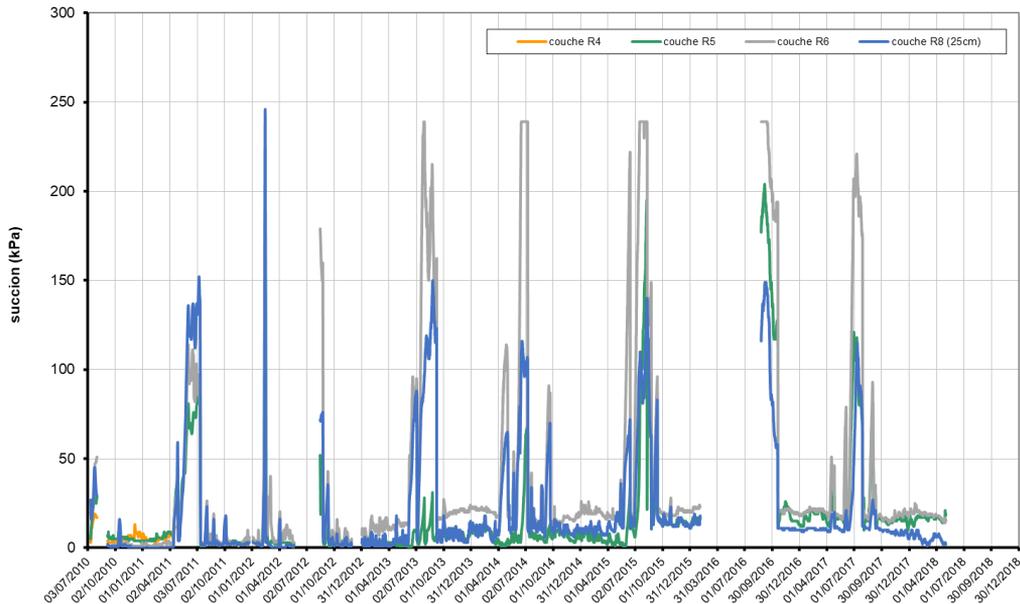


Figure 4. Évolution de la succion dans l'argile +4% Cao en peau (25 cm de profondeur)

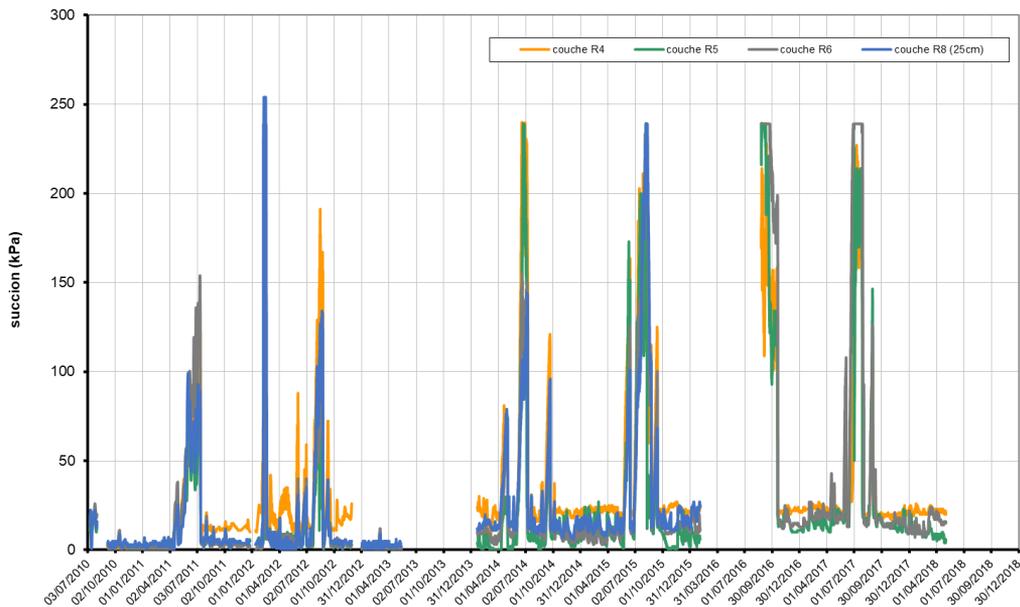


Figure 5. Évolution de la succion dans l'argile +2%CaO +3% CEM II en peau (25cm de prof.)

4. Evolution des succions à 25, 50 et 75 cm dans le talus.

Les succions mesurées dans le talus, sous la terre végétale avec des capteurs placés horizontalement à 25, 50 et 75 cm d'enfoncement, permettent d'observer l'effet du séchage en profondeur au niveau du talus.

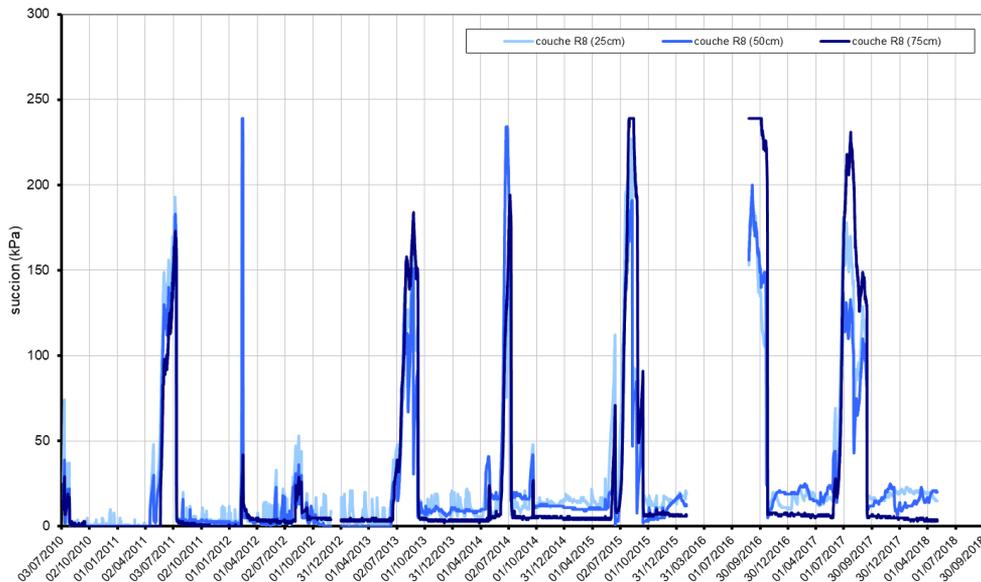


Figure 6. Évolution de la succion dans le limon +2% CaO en fonction de la profondeur.

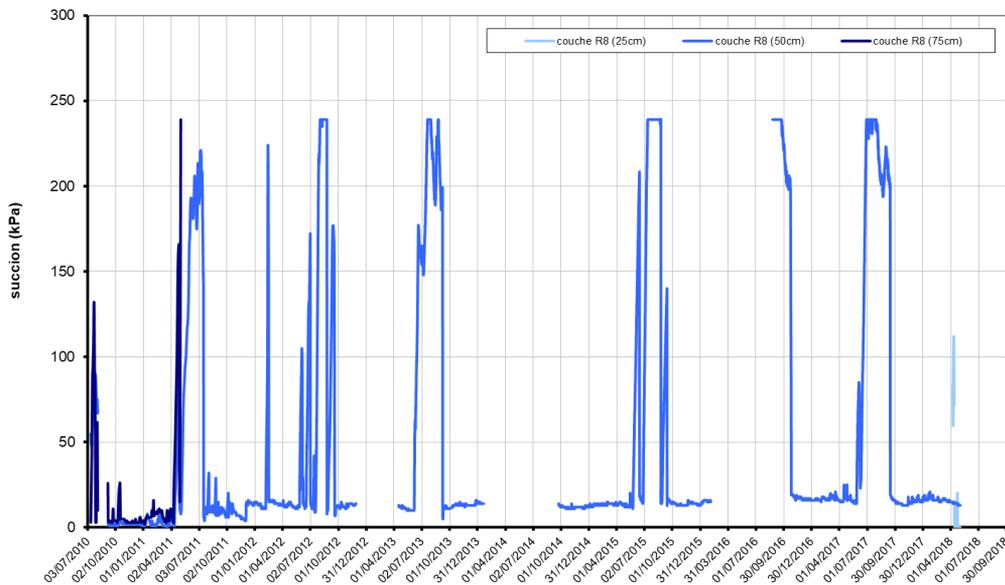


Figure 7. Évolution de la succion dans le limon +3% CEM II en fonction de la profondeur.

L'observation des mesures sur ces longues chroniques (Figure 6, Figure 7, Figure 8, Figure 9) permettent de dégager les enseignements suivants :

- D'une manière générale on observe une atténuation logique de la succion (et donc du séchage) avec la profondeur, au moins les premières années de vie de l'ouvrage. Cette logique s'observe en continu sur les 8 années d'observation dans la modalité argile chaux.
- La logique de l'atténuation avec la profondeur s'inverse dans la modalité limon chaux après 5 années de vie et dans la modalité argile chaux ciment après 6 années de vie. Aucune conclusion ne peut être tirée de la modalité limon ciment pour laquelle un seul capteur a fonctionné.
- L'intensité des succions est variable selon la modalité de traitement, avec par ordre d'importance croissante :
 - Les succions les plus faibles s'observent dans la modalité argile chaux avec des maxima autour de 150 kPa,
 - Des succions faibles dans l'argile chaux ciment, avec des pics très ponctuels à 250 kPa,

- Dans le limon chaux, les succions dépassent facilement 150 kPa et certains étés, dépassent 250 kPa,
 - Dans le limon ciment, les succions enregistrées sur un seul capteur atteignent et dépassent très facilement 250 kPa.
- Les succions reviennent assez facilement à des valeurs inférieures à 10 kPa en période hivernale humide et ceci d'autant plus que l'observation se fait en profondeur (vers 75 cm), signe d'une saturation des sols relativement élevée dans toutes les modalités, à l'exception de la modalité limon ciment (un seul capteur fonctionnant à 50 cm).

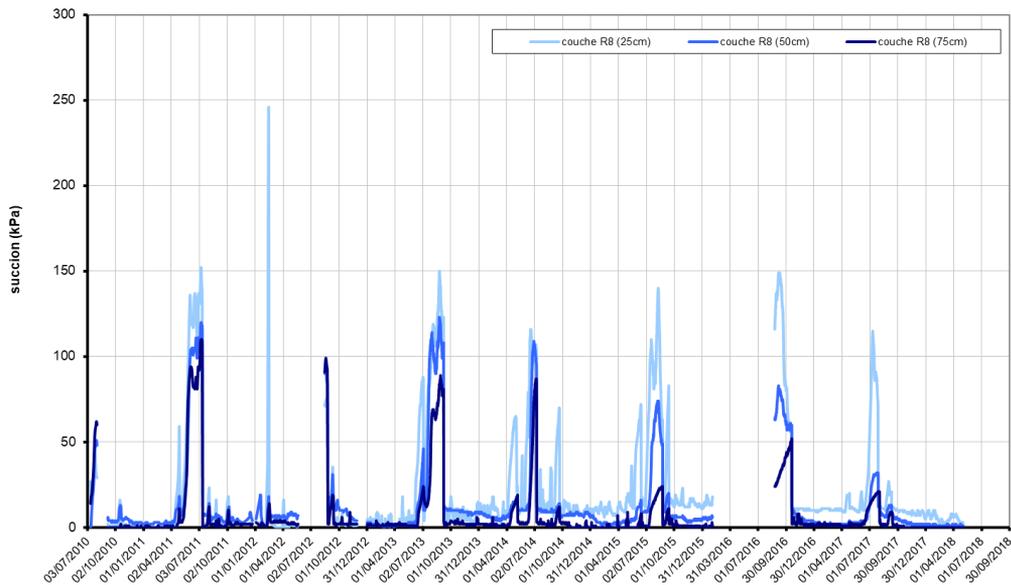


Figure 8. Évolution de la succion dans l'argile +4%CaO en fonction de la profondeur.

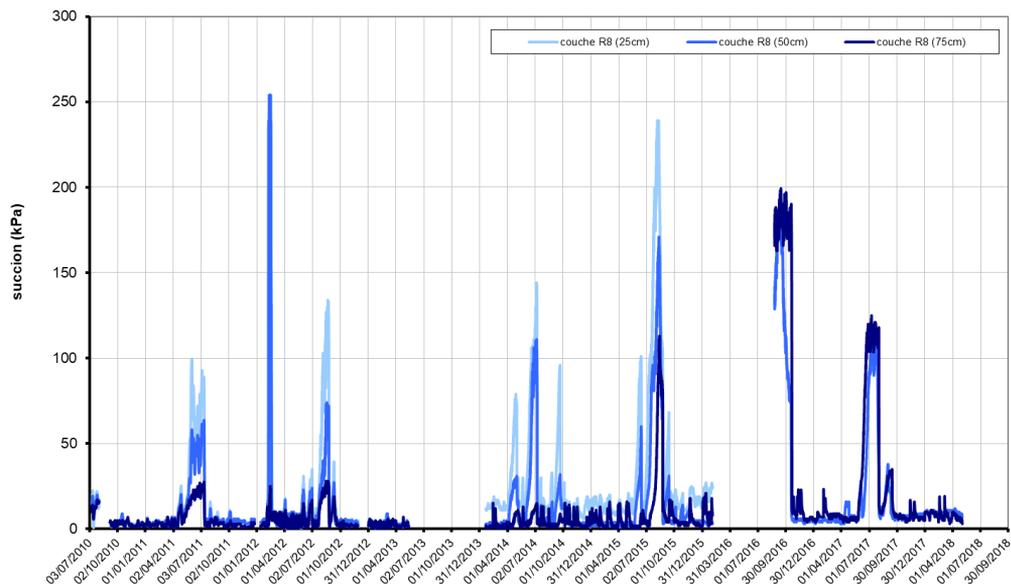


Figure 9. Évolution de la succion dans l'argile +2%CaO +3% CEM II en fonction de la profondeur

5. Les effets de la météorologie d'après l'observation des mesures de succion

Il est assez tentant de déduire de l'observation des mesures de succion, des conclusions sur l'effet de la météorologie sur les sols (Bicalho et al., 2015 et 2018).

L'observation conjointe des mesures de succion sur les capteurs situés à égale profondeur dans les sols traités permet d'apporter certaines informations :

- De manière évidente, les succions se développent principalement pendant les périodes sèches correspondant aux étés. Il est cependant intéressant de remarquer qu'un évènement ponctuel en avril 2012 se retrouve très nettement sur tous les enregistrements, signe manifeste d'un évènement météorologique important.
- Les effets de la météorologie ne se manifestent pas partout avec la même intensité et la même durée selon la position sur le talus :
 - o Dans la modalité limon-chaux, seul le capteur situé dans la couche R4 (soit environ 60 cm par rapport au terrain naturel) réagit le plus fortement en été 2014, 2015 et 2017 ;
 - o Dans la modalité argile-chaux, seul le capteur situé dans la couche R6 (soit environ 90 cm par rapport au terrain naturel) réagit le plus fortement en été 2014, 2015 et 2016 (pas de données pour R4) ;
 - o Dans la modalité limon-ciment, l'effet de la météorologie varie dans le temps et la position en talus : à l'été 2011 c'est le capteur en R8 qui réagit le plus ; à l'été 2013, les capteurs en R4 et R5 ; à l'été 2015 le capteur en R5 ; à l'été 2016, les capteurs en R4, R5 et R8 ; à l'été 2017, les capteurs en R5 et R8 ;
 - o Dans la modalité argile-chaux-ciment, l'effet de la météorologie varie dans le temps et la position en talus : à l'été 2014, ce sont les capteurs dans la couche R4 et R5 qui réagissent le plus ; à l'été 2016, les capteurs dans les couches R4, R5 et R6 (pas de données pour R8) ; à l'été 2017, le capteur dans la couche R6.
- Un même évènement météorologique n'impactera pas les sols de la même manière, ainsi on constate que :
 - o L'été 2014 a eu très peu d'effet sur la modalité limon ciment ;
 - o L'été 2015 a eu très peu d'effet sur la modalité argile chaux ciment ;
 - o L'été 2016 a eu très peu d'effet sur la modalité limon chaux ;
 - o L'été 2017 a eu très peu d'effet sur la modalité argile chaux ;
- Il semble évident que d'autres phénomènes que la météorologie, impactent les réponses en terme de succion et on peut faire les hypothèses suivantes :
 - o Le rôle de la végétation : des végétaux différents peuvent pousser à différentes périodes et avoir des demandes en eau variables ;
 - o Une modification probable de la structure du sol dans le temps : la possibilité que le sol se désature et que des microfissures ou des fissures apparaissent ou disparaissent n'est pas impossible, ce qui peut faire varier la pression capillaire ;
 - o La nature des matériaux de départ : les limons, plus perméables que les argiles, réagissent plus intensément aux effets de la météorologie ;
 - o La nature des liants utilisés : les succions dans les matériaux traités au ciment semblent se développer plus rapidement et plus intensément que dans les matériaux traités à la chaux.

6. Conclusions et enseignements

L'enregistrement de mesures physiques dans des sols sur de très longues périodes permet de tirer des enseignements très riches concernant les interactions de l'atmosphère sur les sols. Ces informations sont également très utiles pour alimenter la réflexion sur la durabilité des parties d'ouvrages en remblai.

6.1. Enseignements sur les interactions sol-atmosphère et la durabilité en remblai

Les mesures de succions en talus sur le remblai de Héricourt montrent que l'effet de la météorologie est plutôt modéré dans ce secteur géographique de la France : les épisodes de sécheresse se manifestent sur des périodes plutôt courtes, de l'ordre de 3 mois, avec

des intensités qui, bien que variables selon la localisation et les modalités de traitement, dépassent peu les seuils de mesures des capteurs de 250 kPa. L'effet du séchage est donc plutôt modéré sur les matériaux traités, et restreint à la partie superficielle des matériaux.

Pendant ces années d'observations, on peut aussi clairement observer des comportements variables des matériaux traités en réponse aux épisodes secs. Certains sont plus sensibles que d'autres aux épisodes estivaux comme les limons traités au ciment, d'autres nettement moins comme l'argile traitée à la chaux vive.

Globalement, quelles que soient les variations de comportement, les matériaux restent le plus souvent dans un état quasi-saturés durant l'année, ce qui permet de garantir de bonnes propriétés mécaniques et une certaine stabilité dans le temps.

6.2. Enseignement pour l'amélioration de l'instrumentation des ouvrages

Les observations acquises sont également précieuses pour améliorer la conception des instrumentations d'ouvrages.

Nous avons par exemple pu constater qu'il est très difficile de tirer des enseignements en se basant sur un seul capteur : seule l'analyse d'un lot de mesure permet d'avoir une vision globale des effets de la météorologie sur le comportement du sol à l'échelle de l'ouvrage. Ceci argumente en faveur d'une instrumentation qui permette une exploitation statistique des données avec une répartition et un nombre de capteurs suffisant pour analyser des surfaces de talus et des profondeurs.

Nous avons également été confrontés à des capteurs en limite d'acquisition et des capteurs en fin de fonctionnement. La bonne surprise de cette instrumentation est la très bonne qualité des mesures obtenues sur de très longues durées sans maintenance particulière, avec des capteurs qui se sont avérés très robustes. Cependant, la qualité du couplage avec le sol peut ponctuellement mettre le capteur en défaut. Pour éviter de se retrouver avec des absences de données, on pourra recommander ponctuellement de doubler les jeux de capteurs pour garantir la fiabilité des acquisitions.

7. Références bibliographiques

- Bicalho K.V., Vivacqua G.P.D., Cui Y.-J., Froumentin M., Mercadier D., Tang A.M. (2015). Experimental investigation of soil-atmosphere interaction in an instrumented embankment constructed with two treated clays. In *Soils and Rocks*, São Paulo, 38(2), pp.149-162, May-August 2015.
- Bicalho K., Boussafir Y., Cui Y.-J. (2018). Performance of an instrumented embankment constructed with lime-treated silty clay during four-years in the Northeast of France. *Transportation Geotechnics*. 17 pages.
- Boussafir Y., Jacques C., Puiatti D., Abdo J., Robinet A. (2009). TerDOUEST - Un projet de recherche pour des terrassements 'durables' grâce au traitement des sols. *Revue générale des routes et Aérodrômes*, n°881, pp 62-67.
- Boussafir Y., Mercadier D., Cui Y.-J. (2016). Suivi du vieillissement d'un remblai traité à Héricourt (70) : quels enseignements sur la durabilité ? *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur*, Nancy 2016, 10 pages.
- Froumentin M., Boussafir Y. (2013). La construction d'un remblai expérimental unique en France en sols fins traités hors spécification. *Colloque TerDOUEST 2013*, Marne-la-Vallée, France, 13 pages.
- LCPC-Sétra (1992). Réalisation des remblais et des couches de forme. *Guide Technique*. Fasc.1 et 2.