

# VERS UNE MEILLEURE COMPREHENSION DES INTERACTIONS SOL-ATMOSPHÈRE D'UN REMBLAI GRÂCE AU MONITORING

## A BETTER UNDERSTANDING OF THE SOIL-ATMOSPHERE INTERACTION IN AN EMBANKMENT THROUGH LONG-TERM MONITORING

Yasmina BOUSSAFIR<sup>1</sup>, Katia V. BICALHO<sup>2</sup>, Yu-Jun CUI<sup>3</sup> et Dimitri MERCADIER<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Université Paris-Est – Ifsttar – GERS – laboratoire Sols, Roches et Ouvrages géotechnique, F-77 447 Marne la Vallée cedex 2

<sup>2</sup> Universidade Federal do Espírito Santo - Departamento de Engenharia Civil - Centro Tecnológico, Vitoria, ES, Brasil

<sup>3</sup> Ecole des Ponts ParisTech – Laboratoire Navier/Cermes – F-77 455 Marne la Vallée

<sup>4</sup> Cerema Rouen – Centre d'Expérimentation et de Recherche – F-76121 Le Grand Quevilly cedex

**RÉSUMÉ** – Le projet TerDOUEST a permis la réalisation d'un remblai expérimental réalisé en limon et argiles traitées à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. Cet ouvrage a été largement instrumenté par des sondes TDR et de succion. L'exploitation de 4 années d'enregistrement des teneurs en eau volumiques et des succions est présentée dans cet article. La présentation d'une courbe de rétention d'eau avec les données du site ouvre la discussion sur les phénomènes ayant réellement lieu dans le matériau traité et l'ouvrage.

**ABSTRACT** – The TerDOUEST project constructed a large-scale experimental embankment with compacted lime treated clays. The field instrumentation included spatial and temporal changes of the soil suction and water content at predefined locations within the embankment, as well as measurements of rainfall data, collected during 4 years. Field soil water retention curves of the lime treated clay were reconstructed through simultaneous field measurements of soil suction and water content. The results illustrated the importance of field measurements in optimizing the design of earthen landfill covers and in controlling their long-term performance.

### 1. Introduction

Le remblai expérimental de Héricourt, construit en 2010 dans le cadre du projet de recherche ANR TerDOUEST, a été réalisé en limon et argile traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. Cet ouvrage équipé de plus d'une centaine de capteurs a été suivi pendant plus de 4 années par le Cerema de Rouen.

Parmi les nombreux objectifs recherchés par ce monitoring, se trouvait notamment l'idée de vérifier le bon comportement des matériaux traités en remblai par rapport aux sollicitations hydriques imposées par: des remontées de nappe phréatique; des inondations de la Lizaine; les cycles d'humidification et de séchage imposés par la météorologie du site.

Ce travail de long terme a été déroulé grâce à la collaboration du Cerema de Rouen, de l'université fédérale Do Espírito Santo, l'Ecole des Ponts ParisTech et l'Ifsttar. Les résultats acquis permettent d'approfondir la connaissance du comportement des ouvrages en terre dans le temps et d'identifier les événements hydriques ou hydrologiques susceptibles d'influencer la durabilité de l'ouvrage.

L'article présente ainsi les enregistrements de teneur en eau et de succion mesurées sur le talus, permettant d'aboutir à une courbe de rétention d'eau in situ ( $s-\theta$ ) pour des données acquises entre 2010 et 2014 sur un casier en remblai réalisé en limon traité à

2% de chaux vive. La mesure simultanée de la météorologie est également présentée et discutée.

## 2. Présentation du remblai expérimental

Le remblai expérimental de Terdouest, localisé sur la commune de Héricourt (Figure 1), a été décrit dans un article présenté aux JNGG de 2016 à Nancy (Boussafir et al., 2016). Les rapports de construction et de suivi de l'ouvrage (Froumentin, 2012 ; Mercadier, 2013) permettent de disposer d'une base de données complètes sur les propriétés des sols en laboratoire et à la construction.



Figure 1. Localisation du remblai et vue du site en 2015.

Il est composé de 2×3 casiers en remblai dont quatre ont fait l'objet d'instrumentation. Les casiers instrumentés sont ceux composés en argile A3/A4 et en limon A2 traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques selon les modalités suivantes :

- limon traité à 2% de chaux vive et traité à 3% de ciment CEMII ;
- argile traitée à 4% de chaux vive et traitée à 2% de chaux vive+3% de ciment CEMII.

L'instrumentation des sols comprenait :

- en talus : des profils horizontaux de mesures conjointes de succion et de teneur en eau volumique ;
- en base de remblai : des mesures de teneurs en eau volumique, de tassement ;
- en cœur de remblai : des mesures de teneurs en eau volumique ;
- en partie supérieure : des mesures de teneurs en eau volumiques, de succion et des accéléromètres.

En complément, le remblai est suivi pour disposer :

- de données météorologiques : pluviométrie, vitesse de vent, radiation solaire, humidité relative, pression atmosphérique (Froumentin, 2012 ; An et al., 2017) ;
- de données hydrogéologiques : piézométrie au droit de l'ouvrage en terre et en pied de remblai ;
- d'informations sur le ruissellement par un système de cuve enterrée, de récupération des eaux de surface (An et al., 2016).

## 3. Présentation des données de monitoring sur le limon traité à 2% de chaux vive

Le casier en limon traité à 2% de chaux vive a été équipé en talus d'un ensemble de capteur permettant d'étudier les effets de la météorologie sur le couple [suction-teneur en eau]. Le positionnement de ces capteurs est rappelé sur la Figure 2. Le talus est recouvert de manière homogène par une vingtaine de centimètres de terre végétale.

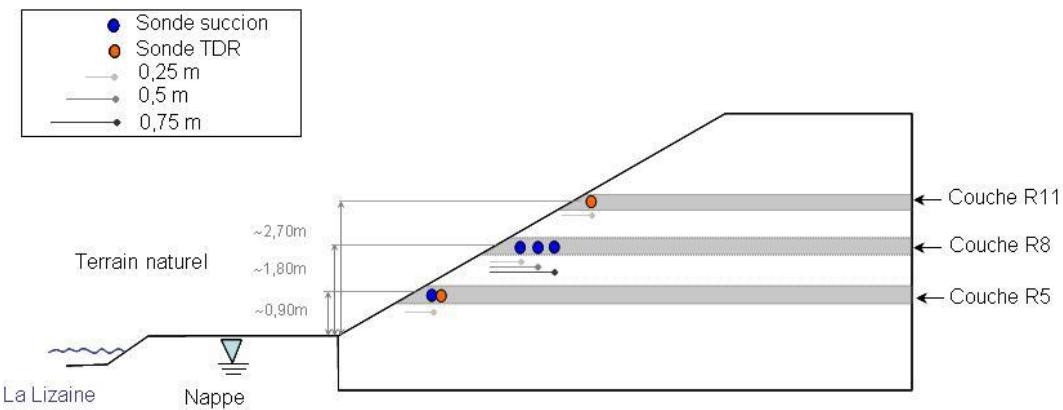


Figure 2. Position des sondes tensiométriques (mesure de succion) et des sondes TDR (mesure des teneurs en eau) dans les différents casiers dans le remblai expérimental de Héricourt

Les capteurs de succion sont des tensiomètres de marque Watermark et fonctionnent de 0 à 250 kPa. Il a été enregistré 3 valeurs de succion par jour sur tous les capteurs pendant 4 ans. Une moyenne de la succion journalière a été calculée à partir des valeurs acquises. Ces moyennes journalières ont servi pour les représentations graphiques suivantes. La succion ‘s’ correspond à la différence entre la pression atmosphérique de l’air et la pression de l’eau dans la porosité du sol, exprimée positivement. Elle représente la dépression de l’eau dans la porosité ouverte du sol, en lien très étroit avec le phénomène de séchage qui se développe sous l’effet de l’évapotranspiration. Lorsque la quantité d’eau diminue dans le sol, la succion augmente très fortement. Lorsque le matériau tend à s’humidifier, la succion diminue jusqu’à s’annuler lorsque la saturation est atteinte. La Figure 3 illustre l’enregistrement de la succion dans le limon traité à la chaux pendant 4 années. La Figure 4 représente l’évolution des succions sur un profil horizontal représentant la succion enregistrée à 0,25 m sous la surface du talus, 0,50 m et 0,75 m de profondeur sous la surface du talus.

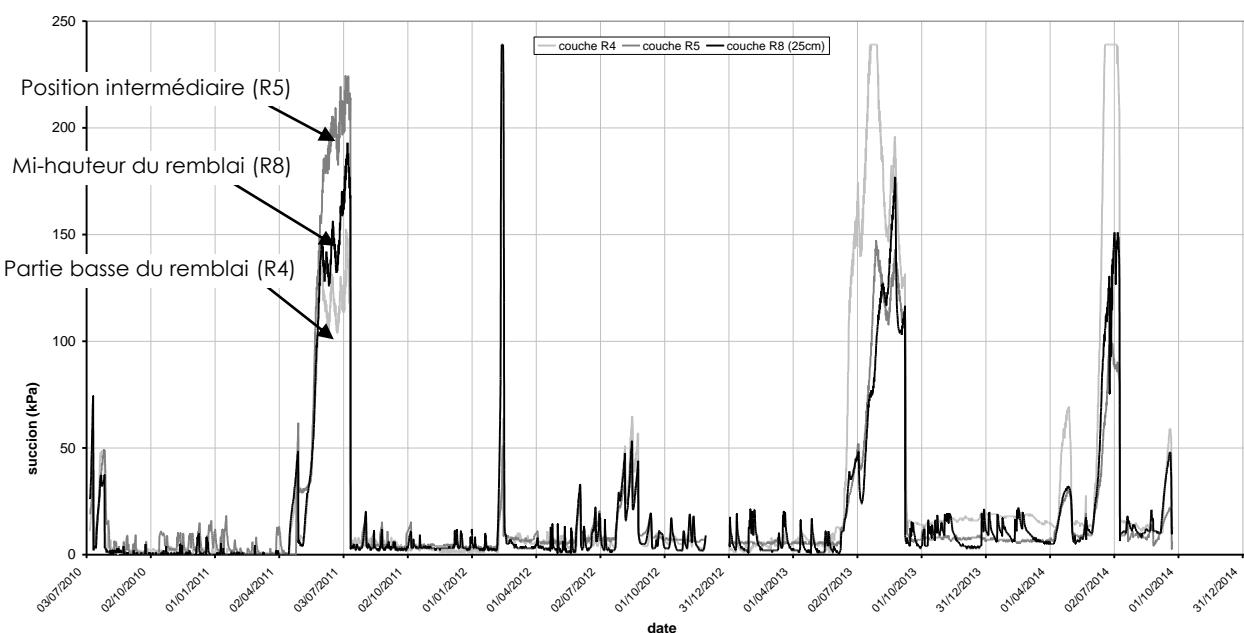


Figure 3. Evolution de la succion du bas vers le haut du talus à 0,25 m de profondeur entre 2010 et 2014. Les périodes sèches estivales entraînent une augmentation des succions.

La Figure 3 permet de constater plusieurs phénomènes :

1. les succions sont la majeure partie de l’année très faibles (0 et 10 kPa);

2. hormis le capteur situé sur la couche R4 (moins d'1 m au dessus du terrain naturel), les valeurs maximales atteintes ne dépassent pas 200 kPa ;
3. l'augmentation significative de la succion coïncide avec les périodes de l'année classiquement chaudes ou sèches sous nos climats comme l'été ou quelque fois le printemps ;
4. à partir de l'année 2013 puis très nettement l'année 2014, les valeurs faibles de succion s'éloignent de 0 kPa (c'est-à-dire de la saturation) et sont en moyenne comprises entre 3 et 10 kPa ;
5. il ne semble pas y avoir de logique entre la position en pied, au milieu ou en haut du talus et les valeurs de succion : ce ne sont pas les positions les plus hautes qui enregistrent systématiquement les succions les plus élevées ou à l'inverse la position la plus basse qui enregistre les succions les plus faibles ;
6. le capteur le plus haut qui enregistre le plus de petites fluctuations annuelles.

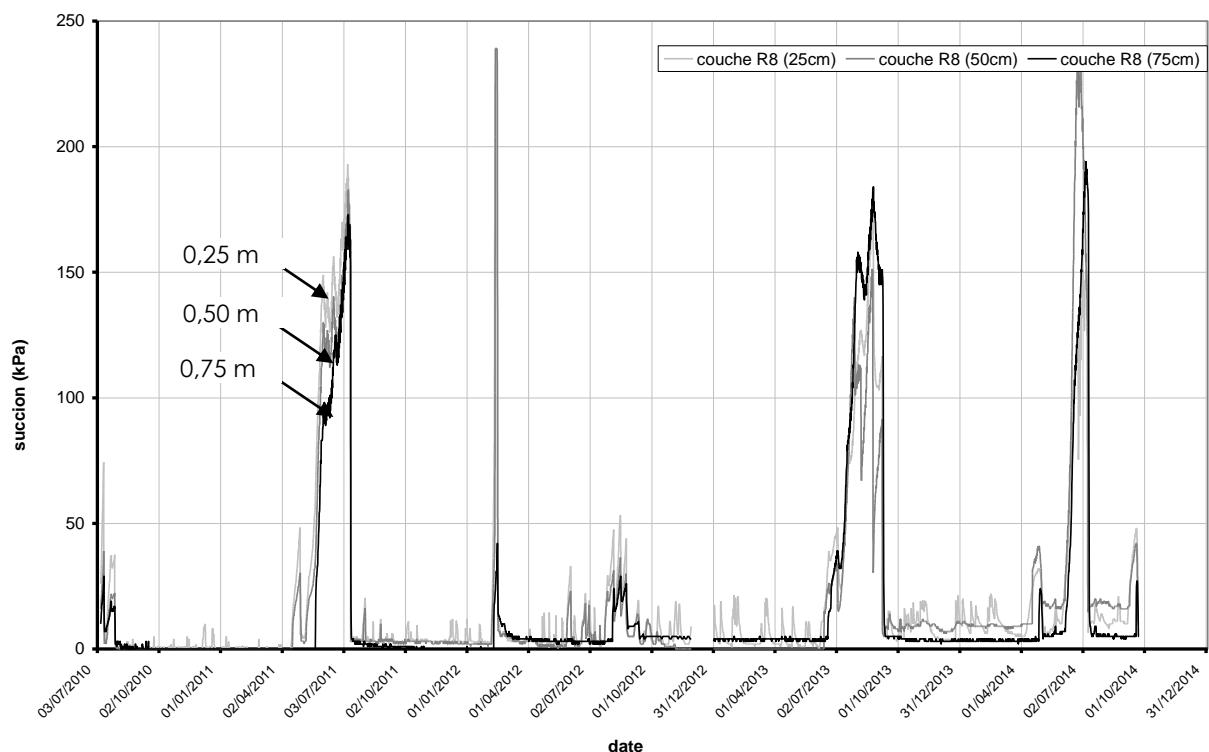


Figure 4. Evolution de la succion de la surface vers la profondeur du talus : 0,25 – 0,50 et 0,75 m de profondeur à mi-hauteur du talus entre 2010 et 2014. les évènements météorologiques ont des effets jusqu'à -0,75 m sous la surface du talus.

La Figure 4 permet de révéler plusieurs phénomènes :

1. La sonde qui réagit le plus tout au long de l'année est celle située juste sous la terre végétale. Les autres sondes ne sont réactives qu'à certains moments clés de l'année, notamment aux périodes estivales ou particulièrement sèches ;
2. à l'exception de l'été de l'année 2013, la succion semble toujours plus élevée dans la tranche de sol comprise entre 0,25 et 0,50 m sous la surface du talus ;
3. la sonde située à 0,75 m sous la surface est très souvent à des valeurs de succions quasi nulles ;
4. les succions s'atténuent dans le sol avec la profondeur et les valeurs relevées par les sondes franchissent rarement la valeur de 250 kPa, valeur correspondant à la valeur maximale pouvant être enregistrée ;
5. le retour à 0 kPa des succions sur les trois capteurs n'est plus constaté (en moyenne) dès l'année 2013 soit 3 ans après la mise en service

Les capteurs de teneurs en eau sont des sondes TDR de modèle Trime Pico 64 qui enregistrent la teneur en eau volumique et la température. Chaque jour, huit valeurs de teneur en eau volumique ont été enregistrées sur chaque capteur pendant 4 ans. Une moyenne de la teneur en eau journalière a été calculée à partir de toutes les valeurs journalières. Ce sont ces moyennes qui ont été utilisées pour les représentations graphiques et les interprétations qui suivent. La teneur en eau volumique  $\theta$  représente le volume d'eau rapportée au volume de sol. Elle n'a pas tout à fait le même sens que la teneur en eau utilisée en terrassement qui est une teneur en eau massique et qui correspond à la masse d'eau rapportée à la masse de sol sec. La teneur en eau volumique est évaluée par la sonde TDR grâce à une relation mettant en lien les propriétés électriques de l'eau et son volume dans le sol.

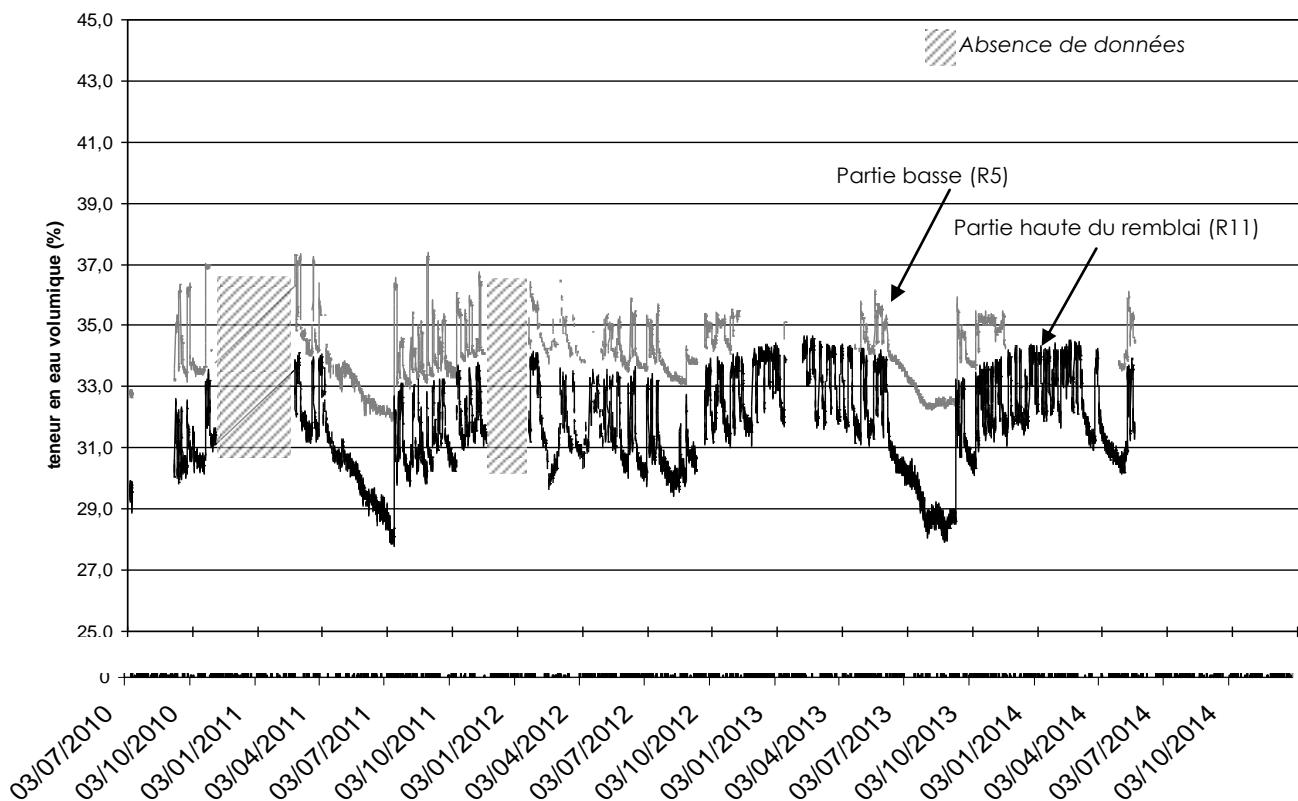


Figure 5. Évolution des teneurs en eau du bas vers le haut du talus à 0,25 m prof. (2010 /2014).

Les enregistrements présentés montrent que les évolutions des teneurs en eau au sein de l'ouvrage sont très dépendantes de la position du matériau par rapport à la surface du talus : les sondes les plus profondément enterrées enregistrent des fluctuations beaucoup plus faibles que ceux immédiatement sous la surface du talus.

Sur la Figure 5 on peut constater que quelle que soit la position de la sonde en talus, que ce soit en partie basse (couche R5) ou haute (couche R11), les enregistrements ont la même forme et sont sensibles aux mêmes évènements. Ceci permet de considérer que les enregistrements sont fiables et représentatifs d'une réalité qui se passe dans le sol. Le capteur situé sur la couche R5, située plus bas que la couche R11, enregistre des valeurs de teneurs en eau plus élevée.

Une lecture fine des valeurs permet de révéler que les valeurs de teneur en eau les plus basses coïncident avec les périodes estivales et que les valeurs les plus élevées avec les périodes hivernales. Même si elles ne sont pas clairement visibles à l'échelle de ce graphique, plusieurs cyclicités superposées se dégagent de la lecture des valeurs :

1. Une cyclicité annuelle en lien avec les tendances météorologiques alternant entre une période sèche estivale et une période humide hivernale ;

2. une cyclicité journalière, en lien avec les variations hydriques caractéristiques des alternances jour – nuit, avec souvent une tendance au séchage le jour et une tendance à l'humidification la nuit ;
3. une cyclicité à l'échelle du mois ou de plusieurs semaines, en lien avec les évènements météorologiques caractéristiques de l'année écoulée.

#### 4. Mise en relation des teneurs en eau et de la succion

Le comportement des sols non saturé est très bien illustré par l'expression de la courbe de rétention d'eau, qui est une donnée propre à chaque état du sol, ainsi que par la courbe de retrait volumique de ce sol. Ces deux courbes permettent de constater que lorsque la teneur en eau diminue, cela entraîne une diminution du volume du sol concomitante à une augmentation de la succion. Les lois de Kelvin, Laplace et de Jurin expliquent ces phénomènes grâce à la thermodynamique et aux équilibres qui relient les propriétés des fluides (eau et air) au contact d'une particule d'un sol et de la taille des vides dans le sol.

Disposant à la fois de mesures de teneurs en eau volumiques et de la succion dans les sols situés à 0,25 m sous la surface du talus, nous avons établi la courbe de rétention des limons traités à la chaux sur la couche R5 située à 0,90 mètre au dessus du terrain naturel.

La représentation simultanée des enregistrements de succion et de teneur en eau volumique sur la Figure 6 illustre très bien le comportement du sol dans le temps. Les périodes météorologiques correspondant à l'été se signalent par une diminution nette des teneurs en eau et une augmentation brutale de la succion, exception faite de l'été 2013 qui fut un été particulièrement humide. Pendant les périodes hivernales, les teneurs en eau augmentent alors que la succion reste très faible, à des valeurs inférieures à 10 kPa.

La représentation couplée des teneurs en eau et de la succion selon les standards des courbes de rétention d'eau est illustrée sur la Figure 7. Les valeurs de succion < 250 kPa, la Figure 7 focalise essentiellement sur la partie de la courbe présentant le comportement du sol proche de la saturation. On s'aperçoit ainsi qu'une bonne partie des couples de valeurs sont situés dans la partie des faibles succions et fortes teneurs en eau. Ces couples de valeurs sont répartis de manière aléatoire et explorent très certainement la partie d'hystérésis de la courbe de rétention d'eau dite « scanning curve ». Les couples de valeurs de succion plutôt élevées s'alignent plus volontiers, mais le nombre de donnée n'est pas suffisamment représentatif pour en tirer des conclusions.

On constate que les valeurs de succion la première année après la construction oscillent entre 0 et 10 kPa pour les gammes de teneur en eau supérieures à 34 %. La deuxième année après la construction, elles oscillent entre 3 et 10 kPa et la troisième année, entre 4 et 8 kPa et la quatrième année entre 6 et 10 kPa toujours pour les gammes de teneur en eau proches de la saturation. Bien que situé dans une gamme de mesures faibles et donc entachée d'une certaine imprécision, ceci semble montrer que le matériau traité à la chaux vive évolue dans le temps avec une évolution des propriétés du sol qui fait que le retour à l'équilibre entre la pression de l'air et la pression de l'eau dans la porosité ne se fait plus pour revenir à la quasi-saturation des pores par l'eau.

Ceci peut s'expliquer soit:

- par le développement de nouvelles phases cristallines suite à l'action de la chaux sur les particules argileuses: cette minéralisation induit une modification de la microstructure et de la porosité. Cette observation serait en phase avec les travaux de Navier mettant en évidence l'augmentation de la raideur d'un limon traité à la chaux avec le temps (Wang, 2016);

- par l'augmentation de la teneur en air dans la porosité en lien avec également l'action du traitement à la chaux vive, la modification des propriétés de retrait du matériau et la création d'air occlus.

La courbe de rétention d'eau de laboratoire a été obtenue sur des échantillons traités en laboratoire, dont la succion a été établie par des mesures au WP4 et la teneur en eau mesurée à l'étuve (« measured data »). À partir de ces points, une courbe (« fitting curve ») basée sur un modèle de Van Genuchten a été calée en définissant des paramètres adéquats.

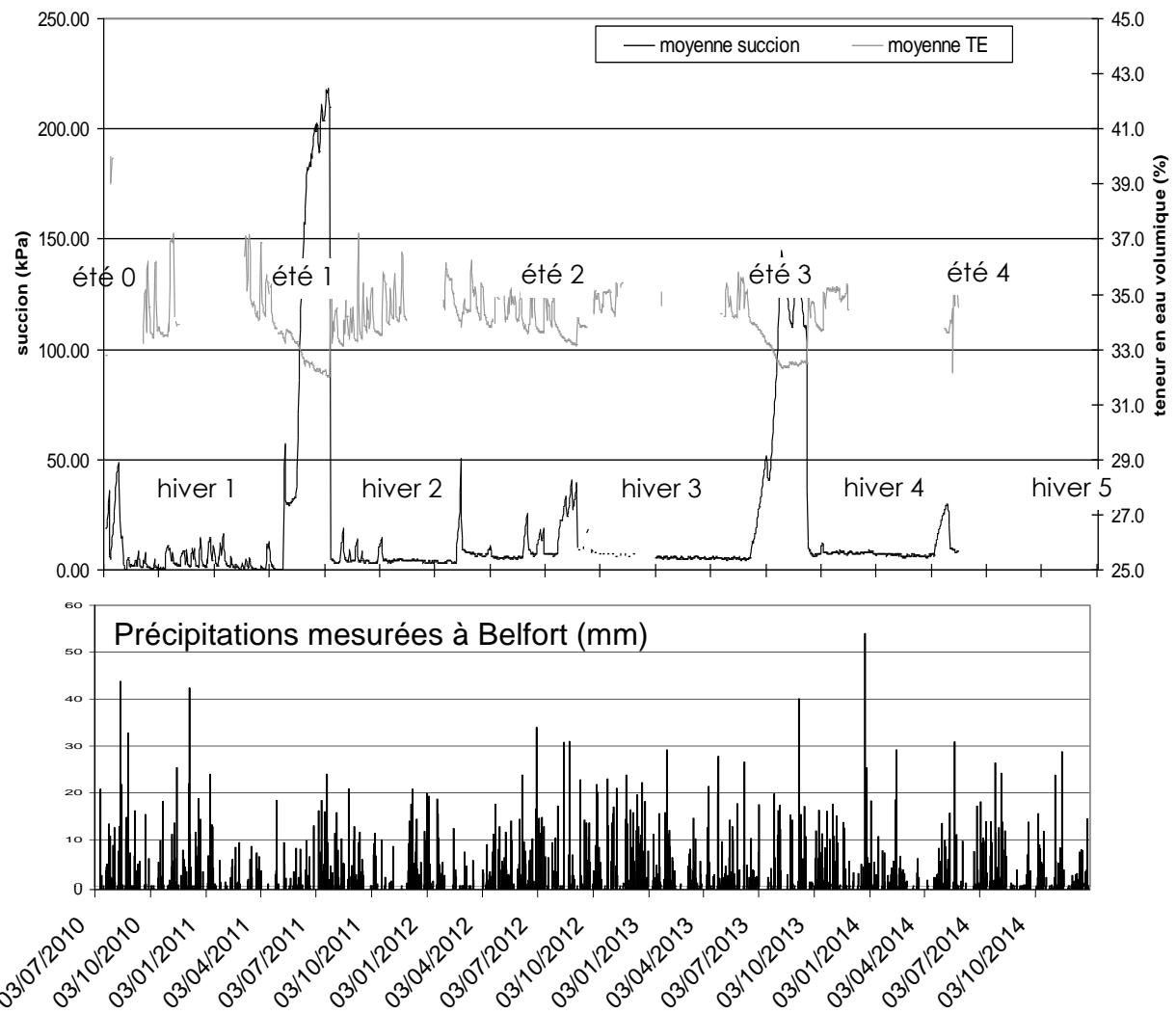


Figure 6. Évolution de la teneur et de la succion à 0,25 m de profondeur (couche R5) sur le limon traité à 2% de chaux vive, ainsi que de la pluviométrie enregistrée à Belfort, à 9 km du site, entre 2010 et 2014.

Grâce à une mise à l'échelle identique des deux graphes, on peut observer que les données acquises sur site se situent majoritairement dans le domaine quasi saturé du sol, avec des succions faibles et des teneurs en eau relativement élevées. Il est intéressant de préciser qu'à la mise en œuvre, les contrôles réalisés sur site (Froumentin, 2012) ont permis d'établir que les teneurs en eau massiques étaient en moyenne de 24,1 % et la teneur en eau volumique de 38%. Le matériau a été mis en œuvre côté saturé de la courbe Proctor avec +3,8% d'eau supplémentaire par rapport à  $w_{OPN}$ . La masse volumique sèche mesurée par méthode nucléaire a donné une valeur moyenne de 1,569 t/m<sup>3</sup>, soit un taux de compactage de 93,4% par rapport à la masse volumique OPN, et un taux de saturation Sr évalué à presque 91%.

Pendant la durée d'observation, soit 4 années après la mise en service de l'ouvrage, les teneurs en eau ne descendent pas en dessous de 30% de teneur en eau volumique et les succions même plafonnées par le type de capteur utilisé, dépassent rarement 250 kPa. La courbe de rétention d'eau obtenue en laboratoire montre que pour dépasser 250 kPa, les teneurs en eau volumiques doivent descendre en dessous 30% ce qui est cohérent avec les observations de terrain. Il est intéressant de noter que le procédé de construction par compactage ne permet pas de saturer à 100% le matériau traité. Les variations d'état hydrique partent d'un point de départ situé à 91% de saturation et que les valeurs oscillent dans une plage de succion très faible (inférieure à 10 kPa) la majeure partie de l'année et que les teneurs en eau (ou la saturation) fluctuent ensuite de manière cyclique et pratiquement répétable d'une année sur l'autre entre un minimum de l'ordre de 32% (Sr~76%) et une valeur maximale de l'ordre de 36% (Sr~86%) très proche de l'état initial de 38% (Sr~91%). La Figure 8 compare la courbe de rétention d'eau établie sur le même matériau en laboratoire (Wang, 2016) au monitoring in situ (Figure 7).

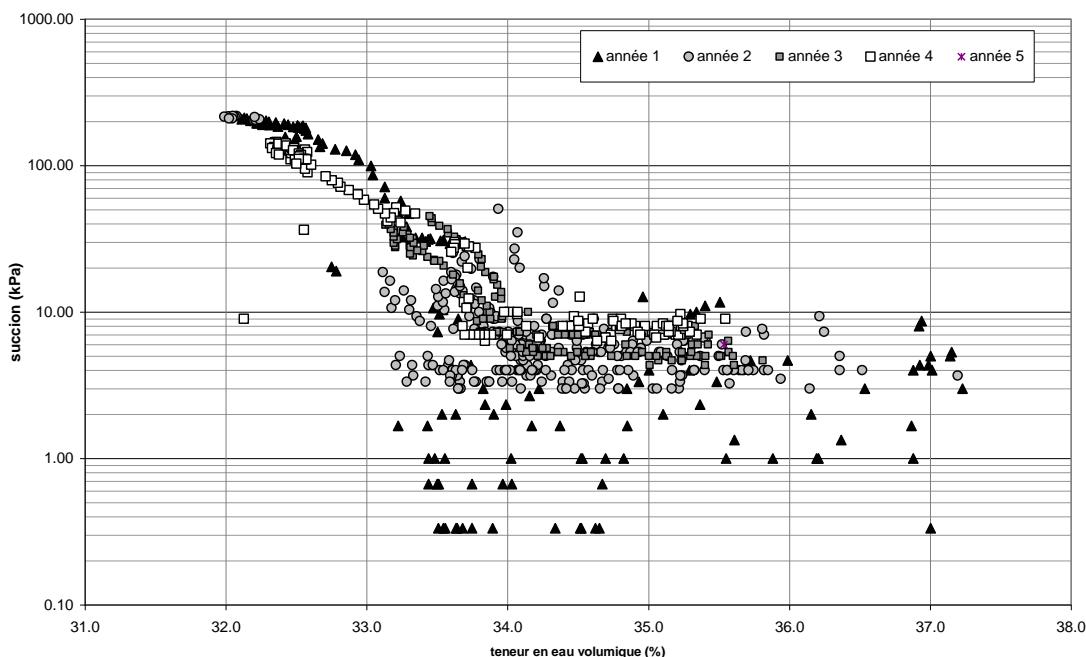


Figure 7. Courbe de rétention d'eau des limons traités à 2% de chaux vive, obtenue par croisement des enregistrements de succion et de teneur à 0,25 m sous la surface de talus, couche R5, entre 2010 et 2014. Les couples de points enregistrés montrent le lien entre variation de teneur en eau et du succion dans les limons traités à la chaux vive. La majeure partie des valeurs sont dans des gammes de fortes teneur en eau (>33%) et très faibles succions (<10 kPa). Les sollicitations environnementales sont faibles à Héricourt et engendrent peu de dessication. Le matériau est saturé une bonne partie de l'année pendant les 4 ans.

A partir de l'état initial quasi-saturé, les 4 années suivies par monitoring peuvent être assimilés à 4 cycles d'humidification-séchage. En effet, l'environnement météorologique du site de Héricourt se caractérise comme on peut l'observer sur la Figure 6, par un seul événement météorologique dans l'année susceptible de déclencher des phénomènes de dessiccation dans le sol et donc de succions élevées (Bicalho et al., 2015) souvent en été, plus rarement et de manière très ponctuelle au printemps. Le reste de l'année se caractérise par un environnement globalement humide qui ne permet pas d'entraîner de phénomènes de séchage intense. Ainsi, l'été se caractérise par un cycle de séchage (Bicalho et al., 2015) et le reste de l'année se caractérise globalement par des modifications mineures de succion et une forte humidification des sols certainement en lien avec une évolution volumique des sols.

Par voie de conséquence, les phénomènes d'hystérésis se manifestent essentiellement dans la partie quasi-saturée de la courbe de rétention d'eau (Figure 8). La diminution très nette de la teneur en eau, en lien avec une augmentation brutale de la succion se traduit ensuite par un relativement bon alignement des couples de données  $s-\theta$  et les 4 années d'observation n'ont pas permis de mettre en évidence de phénomène d'hystérésis important sur cette partie de drainage de la courbe.

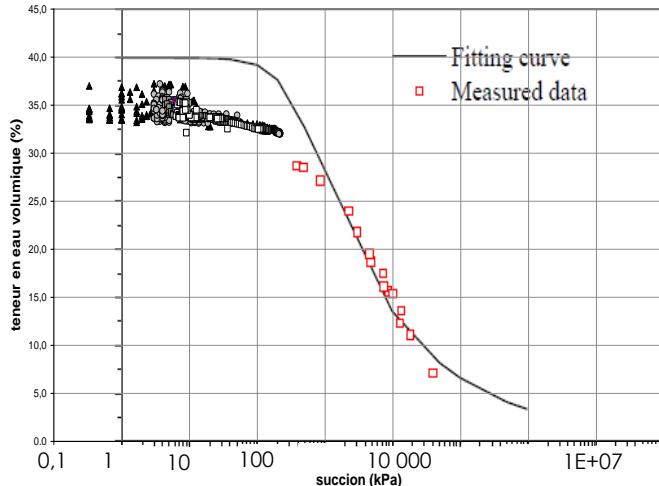


Figure 8. Courbe de rétention d'eau du limon traité 2% chaux établie en laboratoire (Wang, 2016) comparée aux enregistrements sur site. La météorologie du site, relativement humide, limite les phénomènes de dessiccation dans les limons traités chaux. Les succions réellement enregistrées sont comprises entre 0 et 250 kPa ce qui limite les répercussions sur les contraintes effectives.

Les précédentes recherches menées dans le cadre du projet de recherche ANR TerDOUEST montraient après imposition de 7 cycles d'humidification-séchage (Stoltz et al., 2013) une évolution des sols traités à la chaux avec une tendance à la diminution de certaines performances. Ces résultats sont à mettre en relation avec les très fortes succions imposées par la méthode osmotique sur les éprouvettes (de l'ordre de 8 MPa) finalement sans commune mesure avec les données enregistrées sur le site de Héricourt : on montre ici que très peu de valeurs de succion in situ dépassent 250 kPa à -0,50m sous la surface du talus en limon traité. Ceci est à mettre en lien avec la nature du climat et des sollicitations environnementales de ce site situé en Haute-Saône, et l'impact de la végétation sur la pression capillaire réellement observée in situ.

## 5. Conclusions

Le monitoring de long-terme d'un remblai constitué de limon traité à la chaux vive permet de capitaliser des informations importantes sur la durabilité des effets du traitement dans le temps. On s'aperçoit d'après les données acquises sur le site que :

- **la teneur en eau** est un paramètre très important en lien avec la position des matériaux au sein de l'ouvrage et les interactions avec l'atmosphère. Cet indicateur montre ainsi que les parties d'ouvrage en talus sont les plus influencées par les variations atmosphériques, sur un minimum de 2 mètres d'épaisseur. Plus à l'intérieur de l'ouvrage, les teneurs en eau évoluent très peu ;
- **la succion** qui peut se développer dans les limons traités à la chaux vive n'est pas très élevée (< 250kPa). Les pics de succion observées au cours des 4 années d'observation ont pratiquement toujours coïncidés avec la période estivale, à l'exception de quelques événements climatiques ponctuels de printemps ;

- **la courbe de rétention d'eau** établie à partir des données de site montre des répartitions balayant largement une zone d'hystérésis (« scanning zone ») manifeste dans la gamme des succions faibles et des teneurs en eau élevées. Cette partie de la courbe correspond aux enregistrements des couples de teneur en eau / succion de la majeure partie de l'année. Seule la période estivale permet de constater une augmentation brutale des succions, concomitantes à une diminution forte des teneurs en eau volumiques. Sur ces couples de valeurs, on peut constater un relativement bon alignement et donc probablement une faible hystérésis sur cette partie de la courbe de rétention d'eau in situ ;
- **une année de vie de l'ouvrage en limon traité sur le territoire de Héricourt** peut être simulée en laboratoire par un cycle d'humidification séchage, en imposant des conditions d'humidité relative aux éprouvettes testées qui reproduisent des succions de l'ordre de 300 kPa. Une étude des environnements météorologiques permettrait de dresser une cartographie des régions qui mettrait en lien les amplitudes de succion à imposer en laboratoire pour reproduire les phénomènes d'humidification-séchage et la durabilité du traitement à la chaux dans ces environnements.

## 6. Références bibliographiques

- An N., Hemmati S., Cui Y.-J. And Mercadier D. (2016). Assessment of rainfall runoff based on the field measurements on an embankment. Geotechnical Testing Journal, Vol. 40, n°1, pp. 29-36. <http://dx.doi.org/10.1520/GTJ20160096>. ISSN 0149-6115.
- An N., Hemmati S., Cui Y.-J. (2017). Assessment of the methods for determining net radiation at different time-scales of meteorological variables. Journal of Rock mechanics and Geotechnical Engineering n°9, pp. 239-246. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.10.004>
- 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.
- Boussafir Y., Mercadier D. et Cui Y.-J. (2016). Suivi du vieillissement d'un remblai traité à Héricourt (70) : quels enseignements sur la durabilité ? JNGG Nancy 06/08 juillet 2016.
- Froumentin M. (2012). Terdouest projet ANR-07-PGCU-006-10. Rapport de construction de l'ouvrage expérimental RD.438 Héricourt (70). Livrable module C. 134 pages.
- Mercadier D. (2013). Terdouest projet ANR-07-PGCU-006-10. Rapport de suivi n°2 des données enregistrées sur l'ouvrage expérimental RD.438 Héricourt (70). Livrable module C. 59 pages.
- Stoltz G., Cuisinier O., Masrouri F. (2013). Impact de cycles hydriques sur le comportement hydromécanique d'une argile gonflante traitée à la chaux. Colloque TerDOUEST, Marne la Vallée, juin 2013.
- Wang Y. (2016). Étude des propriétés thermo-hydro-mécaniques des sols fins traités à la chaux. Thèse de l'université Paris-Est, ED SIE. 252 pages.