

# COMPORTEMENT DES SOLS EXCAVES PAR TUNNELIER A PRESSION DE TERRE ET TRAITES PAR ADDITIFS

## SOIL BEHAVIOUR EXCAVATED BY EPBM TREATED WITH ADDITIVES

Irini DJERAN-MAIGRE<sup>1</sup>, Philippe DUBUJET<sup>2</sup>, Mariem LIMAIEM<sup>1</sup>, Moez SELMI<sup>2</sup>, Zied MESTICOU<sup>2</sup>, Guillaume EUZEN<sup>1</sup>, Stéphane VACHERIE<sup>1</sup>, Maryem KACEM<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Université de Lyon, INSA Lyon, LGCIE-SMS ID, Villeurbanne, France

<sup>2</sup> Université de Lyon, ENISE, LTDS, Saint-Etienne, France

**RÉSUMÉ** – L'analyse de l'impact du traitement par agents moussant, sur les sols excavés est étudiée. Les mécanismes de dégradation des effets du traitement sont analysés et quantifiés. Des essais géotechnique, hydraulique et rhéologique sont utilisés pour caractériser l'évolution des propriétés des sols traités. L'état émulsionné des tensio-actifs est l'élément moteur des modifications des propriétés.

**ABSTRACT** – The analysis of the impact of treatment with foaming agents, of excavated soil is studied. Degradation mechanisms of treatment effects are analyzed and quantified. Geotechnical, hydraulic and rheology tests are used to characterize the properties evolution of the treated soil. The emulsified surfactants are the driving forces of the property changes.

### 1. Introduction

Les tunneliers à pression de terre (EPBMs, Earth Pressure Balance Machines) sont dédiés au creusement des tunnels en terrain meuble fin. Pour augmenter les performances et faciliter le creusement, des additifs sont injectés au niveau du front de taille (Milligan, 2000). Ces additifs sont classiquement constitués de mousses issues de tensio-actif. Le traitement par ces additifs modifie les propriétés hydromécaniques et rhéologiques du sol. La perméabilité, la résistance au cisaillement, la compressibilité et la viscosité sont affectées. Pena 2007, Houlsby et Psomas 2001, Psomas 2001, ont travaillé sur l'évolution de l'angle de frottement; Psomas et Houlsby 2002 ont examiné les effets sur la compressibilité; Plötze et al. 2013 et Peila et Picchio 2011, Picchio et al. 2015, ont fait des comparaisons entre différents additifs. Peu d'études fournissent des informations sur la durée du traitement et de ses effets à plus long terme. Cet aspect, peu exploré, peut cependant permettre de mieux comprendre l'impact des additifs, et en particulier de mieux envisager la revalorisation des sols excavés. Le sol excavé est en général traité par une station de surface qui est en mesure de trier la partie recyclable. Cependant, les boues et matériaux fins à forte teneur en argile posent d'importants problèmes de valorisation. Les fines ainsi récoltées sont alors mises en décharge du fait de l'ignorance de leur caractéristiques et surtout de l'impact des additifs sur leurs propriétés hydromécaniques à plus ou moins long terme. En effet, l'additif ainsi que sa structure évoluent au cours du temps, du fait de la perte de stabilité de la mousse et de la biodégradabilité. La question est alors de savoir si l'on retrouve à terme les caractéristiques du sol non traité et au bout de combien de temps s'opère ce recouvrement. Deux mécanismes sont analysés: la dégradation physique et la biodégradation. L'objectif est d'évaluer et de comparer les temps de dégradation, et de déterminer l'influence de ces deux mécanismes sur les propriétés du sol traité. Il s'agit de relier les mécanismes de dégradation à l'évolution temporelle des propriétés. Les

paramètres mécaniques sont d'abord analysés: compressibilité, résistance au cisaillement et viscosité. L'évolution des propriétés hydrauliques, et en particulier la perméabilité sont ensuite examinées. Deux sols modèles sont utilisés, composés de kaolinite et de sable (Hostun RF). L'agent moussant utilisé est le CLB F5TM développé par la Société CONDAT.

## 2. Le sol et l'additif

Le choix du type de tunnelier dépend essentiellement de la nature des terrains excavés. Les additifs de type tensio-actifs sont utilisés principalement avec les tunneliers à pression des terres. Le choix s'est porté sur deux sols modèles composés de sable d'Hostun et de kaolinite, correspondant respectivement à un sol argileux (A1) et à un sol sableux (B6). Le sol est traité avec un tensio-actif. Des paramètres comme le taux d'expansion de la mousse (FER), le taux d'injection de la mousse (FIR) le dosage de surfactant ( $C_f$ ) et le taux d'injection du liquide (LIR) permettent de définir la quantité d'additif ajoutée. Les valeurs de ces paramètres sont en général déterminées à partir de l'affaissement du sol déduit d'un essai au mini-cône (Peila et al. 2009) (Figure 1).

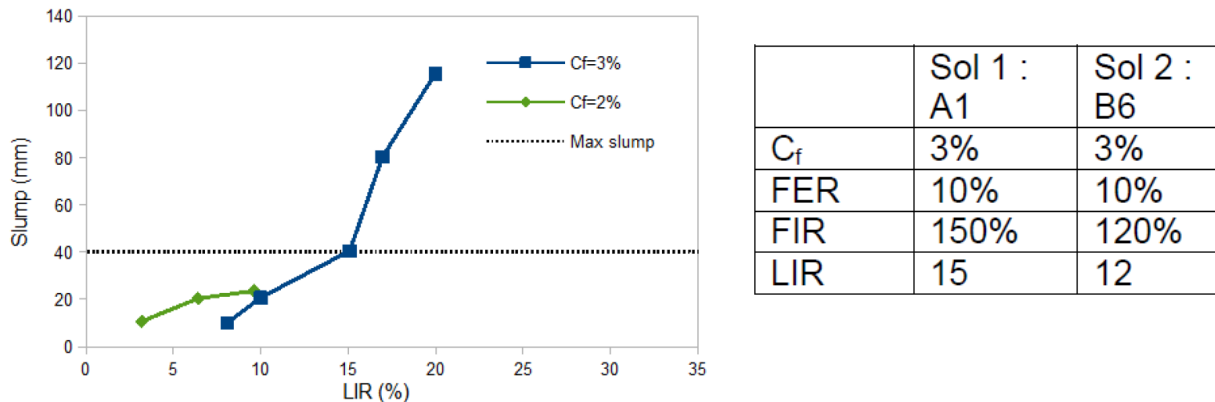


Figure 1. Relation entre le LIR et l'affaissement au mini-cône, valeurs de paramètres pour les deux sols modèles.

## 3. Dégradation de l'additif

La dégradation du traitement résulte de deux phénomènes: la dégradation physique et la biodégradation. La première résulte de l'éclatement progressif des bulles et la seconde de l'activité bactérienne qui décompose le tensio-actif. Pour suivre l'évolution en fonction du temps, le sol traité est conservé à milieu clos. Des échantillons sont alors extraits à différents temps, et soumis à des tests de laboratoire. La mousse constitue au sein de squelette granulaire un milieu localement cristallin respectant les conditions de Plateau. La Figure 2.a montre l'évolution au cours du temps du volume d'un échantillon de sol 1 disposé dans un moule œdométrique en milieu clos. On observe une décroissance progressive du volume, n'étant pas associée à la consolidation du sol. Cette décroissance suit une loi de Weibull.

L'injection de la mousse dans le sol s'accompagne d'une modification importante du volume du sol, qui recouvre progressivement son état initial selon un processus de demi-vie dont la valeur est approximativement de 3 jours. Le mécanisme de dégradation physique de la mousse s'opère ainsi à court terme (Figure 2b).

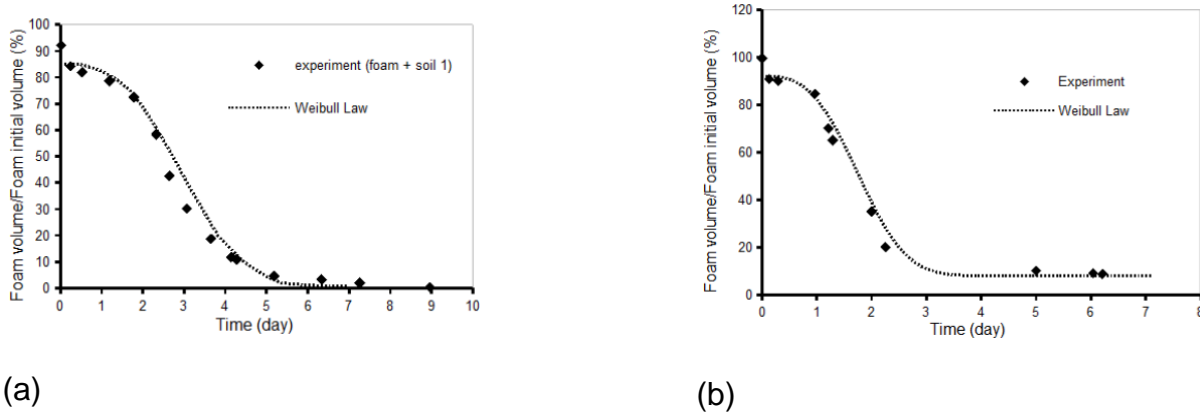


Figure 2 : Evolution du volume de la mousse : (a) au sein du sol, (b) seule en milieu clos.

La Figure 3 montre la consommation d'oxygène mesurée au respiromètre sur un échantillon de sol non traité, un échantillon traité, et un échantillon traité avec ajout de bactéries. Le sol non traité correspond à une activité bactérienne faible sur les huit premiers jours puisque le sol utilisé est un sol modèle non exposé aux conditions naturelles. L'ajout d'additif montre, les cinq premiers jours, une consommation d'oxygène semblable au sol non traité et donc faible. Après une période de latence, l'activité bactérienne se développe de façon conséquente. Un essai avec ajout de bactéries, état que l'on peut trouver dans un milieu naturel, montre une amplification des phénomènes, sans changer la forme de l'évolution de l'activité bactérienne. Comme attendu, la biodégradation est un phénomène à plus long terme que la dégradation physique de la mousse. Ces deux mécanismes s'opèrent à des temps différents.

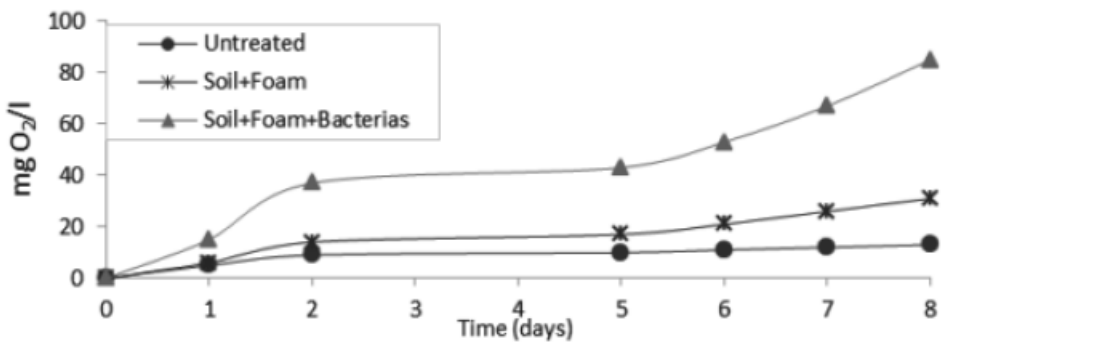


Figure 3 : Biodégradation du sol traité. Taux d'utilisation de l'oxygène (TUO).

#### 4. Evolution du comportement mécanique

Le sol traité est un milieu complexe constitué de deux milieux granulaires, les grains de sol rigides et les bulles tensio-actifs déformables. A l'échelle granulaire, la structure du sol traité montre un milieu fortement hétérogène et à fort contraste de comportement. Le comportement du sol traité est fortement dépendant de l'arrangement des bulles au sein du milieu granulaire constituant le sol. Des observations ont été effectuées au microscope optique afin d'observer sa structure et son évolution au cours du temps. Le sol examiné est le sol 2. Le microscope utilisé est un Axio Imager M2m ZEISS. Les observations

permettent de mesurer la taille des bulles. Elles sont agglomérées les unes aux autres et la structure sablo-argileuse vient se placer autour et entre elles. Une fine couche de grains constitue l'interface entre les bulles qui ne sont pas directement en contact.

Différents essais mécaniques sur des échantillons traités d'âges différents, sont effectués pour observer l'évolution temporelle du milieu, quant à ses caractéristiques mécaniques. Les propriétés de compressibilité et la résistance au cisaillement sont mesurées. Des essais de compressibilité ont été menés sur les deux sols (Sols 1 et 2). La Figure 4 montre l'évolution de l'indice de compressibilité au cours du temps, obtenus à partir d'essais œdométriques. Le traitement a pour effet immédiat d'augmenter la compressibilité. Ce phénomène peut légitimement être imputé à l'augmentation de l'indice des vides et à la déformabilité de la mousse. Il peut alors être observé une décroissance de la compressibilité jusqu'au recouvrement de la compressibilité du milieu non traité. L'évolution de la compressibilité peut être traduite par une loi exponentielle dont l'identification de la durée de demi-vie correspond à 3.6 jours. Ceci est conforme à la durée précédemment identifiée de demi-vie de la mousse.

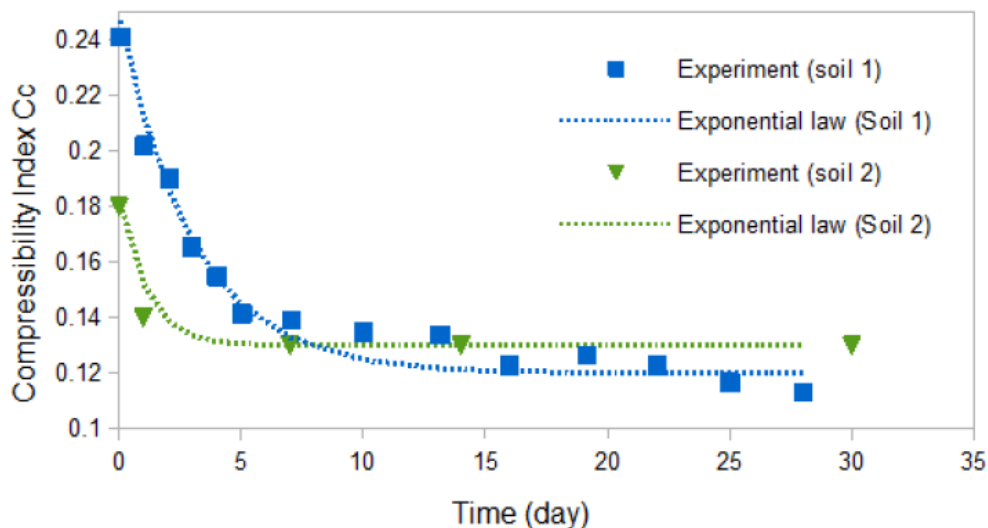


Figure 4 : Evolution temporelle de la compressibilité.

Les caractéristiques de cisaillement du milieu ont été identifiées à partir d'essais à la boîte de Casagrande. Les échantillons sont au préalable consolidés puis cisailés à vitesse rapide. En ce sens, les essais effectués sont des essais consolidés non drainés (essais CU). Cependant, le frottement mesuré est identifiable à un angle de frottement consolidé ( $\phi_{cu}$ ) non drainé, que dans le cas du sol non traité. Seul cet échantillon est effectivement saturé en eau, les autres étant un mélange complexe à trois phases. Il s'agit ainsi d'angle de frottement apparent. La Figure 5 présente l'évolution de l'angle de frottement mesuré en fonction de l'âge de l'échantillon. On observe ainsi une croissance de cet angle jusqu'au recouvrement de la valeur correspondant à l'échantillon non traité. La résistance au cisaillement est donc, comme la compressibilité, une caractéristique réversible. Comme pour la compressibilité, la valeur de celle du sol non traité est obtenue à 10% près au bout d'une dizaine de jours. On peut imaginer, que cette évolution suit celle de l'indice des vides, comme il est classiquement admis avec la formule de Caquot:  $\tan(\phi) = K/e$  où  $K$  est une constante dépendant essentiellement de la granulométrie et de la forme des grains. L'identification de cette constante sur l'échantillon non traité conduit à la valeur  $K=0.245$ . La Figure 5 montre l'évolution de l'angle de frottement apparent fourni par cette corrélation empirique. A partir du dixième jour, l'effet du traitement étant atténué, il y a coïncidence des deux courbes. Cependant en deçà de cette période, une divergence notable est observée.

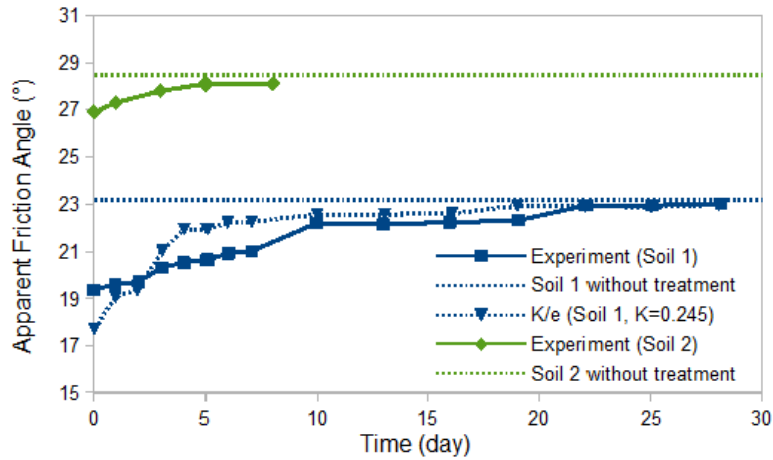


Figure 5 : Evolution de l'angle de frottement des sols, d'après des essais effectués à la boîte de cisaillement.

L'augmentation de l'indice des vides généré par l'injection de mousse n'est donc pas la seule responsable des variations observées au niveau de l'angle de frottement apparent.

## 5. Evolution du comportement visqueux

L'objectif de l'étude rhéologique est de déterminer le comportement du fluide analysé lors du processus de fabrication et comparer les comportements des sols propre et traité. Dans le cas de la mousse, par exemple, une viscosité forte nécessite une plus grande puissance de pompage afin d'injecter celle-ci dans le sol. Dans le cas du sol traité, une viscosité forte indique qu'il est nécessaire d'avoir un couple important au niveau de la tête de coupe du tunnelier afin d'excaver le sol. Cette étude est effectuée à l'aide d'un rhéomètre Anton Paar Modular Compact Rheometer 52 sur le sol 2.

### Comportement de la mousse

La mousse étant relativement fluide, la géométrie cylindre-coaxial est utilisée. Le rhéogramme de la mousse présente une contrainte seuil estimée à 11 Pa (Figure 6a). Cette contrainte désigne le passage à l'état plastique. La mousse a tout d'abord un comportement newtonien lorsque le taux de cisaillement appliqué est faible (ce qui correspond à une vitesse de rotation faible). Le matériau passe ensuite par une phase de transition lorsque le taux de cisaillement augmente.

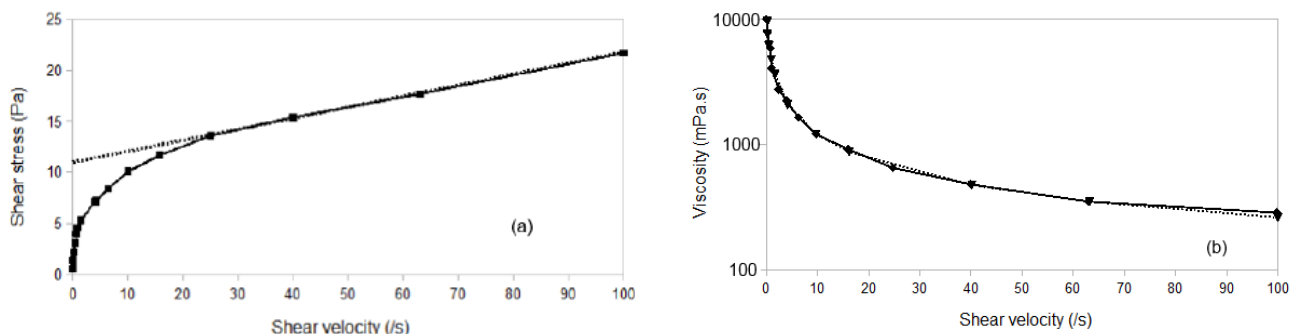


Figure 6. Caractérisation de la viscosité de la mousse : (a) contrainte de cisaillement en fonction du taux de déformation, (b) viscosité en fonction du taux de cisaillement.

Enfin, lorsque le taux de cisaillement est relativement important (environ  $25 \text{ s}^{-1}$ ), la mousse suit un comportement plastique. Ainsi, le comportement de la mousse s'apparente presque à celui d'un matériau pseudoplastique: plus le taux de cisaillement auquel est soumis un matériau pseudoplastique est élevé plus l'effet fluidifiant est important et plus forte est la réduction de viscosité. Cela est visible sur la Figure 6b où on observe bien une diminution de la viscosité lorsque le taux de cisaillement augmente.

#### Comportement du sol propre

Dans le cas du sol propre 2, quel que soit la teneur en eau, le comportement est similaire: la contrainte de cisaillement augmente pour un taux de cisaillement faible, avant de décroître (Figure 7a). La contrainte de cisaillement garde ensuite une valeur constante pour des valeurs de gradient de cisaillement plus importantes. De ce fait, plus le taux de cisaillement augmente, plus la viscosité diminue. C'est une propriété intéressante du sol: plus la tête du tunnelier tourne vite, plus la viscosité du matériau diminue et plus il devient facile à excaver. Lors d'une vitesse de coupe importante, l'usure des têtes est importante, mais elle reste limitée par ce phénomène. Ainsi la viscosité augmente avec la teneur en eau jusqu'à la teneur en eau optimale de 11,4%. Au-dessus de cette teneur en eau, la viscosité redescend progressivement. Cela semble logique: la teneur en eau optimale correspond à la densité sèche maximale et donc à l'empilement granulaire optimal. La résistance au cisaillement est donc la plus importante pour cette teneur en eau et de ce fait la viscosité également.

#### Comportement du sol traité

L'allure des courbes relatives à la viscosité du sol traité en fonction du gradient de cisaillement, et en fonction de l'âge du sol, sont montrées en Figure 7b. Elle est similaire à celle du sol propre. Cependant, il est visible que la viscosité diminue lors de l'introduction de l'agent moussant. La viscosité est divisée par 100 environ directement après introduction de l'agent moussant. Cette viscosité remonte au cours de la biodégradation de l'agent moussant. Ainsi, à 8 jours, la viscosité est toujours 6 à 7 fois inférieure à celle du sol 2 propre, malgré le fait que toutes les bulles soient dégradées. Des essais de rhéologie ont été effectués sur échantillon âgé de sept mois. La viscosité est comparable à celle du sol propre. Elle est légèrement supérieure mais cela peut s'expliquer par la diminution de la teneur en eau en sept mois. Ainsi, la viscosité revient bien à la normale mais beaucoup plus lentement que les caractéristiques mécaniques.

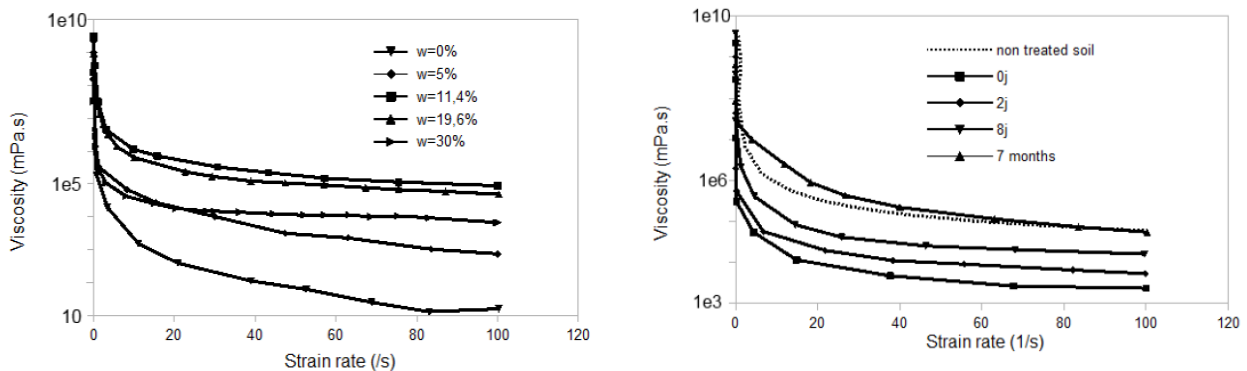


Figure 7. Viscosité du sol non traité, influence de la teneur en eau (a), viscosité du sol traité : évolution temporelle (b).

## 6. Evolution du comportement hydraulique

La Figure 8 montre l'évolution de la perméabilité du sol 1 traité pour des échantillons d'âges différents. Le traitement conduit immédiatement à une forte diminution de la perméabilité, ce qui est l'effet recherché. L'insertion des bulles au sein du squelette granulaire obstrue le volume des pores, et affecte ainsi la perméabilité. Cependant, progressivement, la perméabilité tend à augmenter au cours du temps. Cette augmentation est assez uniforme, et au bout de 28 jours, semble progresser encore, sans atteindre la perméabilité de l'échantillon non traité. Si l'on admet, conformément aux résultats obtenus dans les sections précédentes, que la plus grande partie des bulles a disparu au bout d'un tel temps, il faut admettre que la forme liquide du tensio-actif, initialement présente et issue de l'éclatement des bulles, participe à la réduction de la perméabilité. Il y a cependant une tendance à la diminution de la progression qui peut alors être mise sur le compte de la biodégradation du tensio-actif, mais celle-ci reste faible. De plus la biodégradation est également quasi terminée pour un tel âge d'échantillon. En effet, le traitement a suffisamment modifié la structure pour rendre permanente cette modification de la perméabilité. Pour ce qui est du sol 2, l'évolution de sa perméabilité est de courte durée et retrouve la valeur du sol propre très rapidement. Le caractère sableux plus marqué de ce sol, peut-être à l'origine de ces variations.

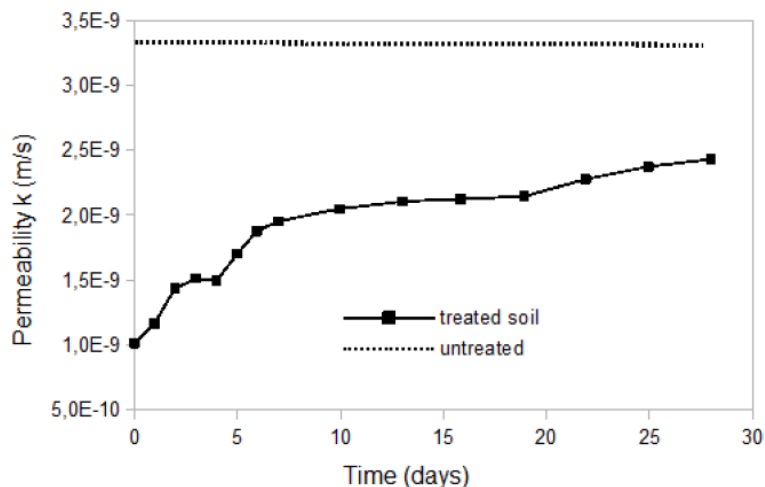


Figure 8. Evolution de la perméabilité du sol 1.

## 7. Conclusions

Cette étude est consacrée à l'évolution des propriétés des sols traités par agents moussants. Les essais expérimentaux effectués permettent d'analyser l'évolution des propriétés hydromécaniques de sols modèles à différentes étapes de la dégradation de ces agents. Plus précisément, les caractéristiques de cisaillement, de compressibilité, et viscosité et de perméabilité sont analysées au cours du temps.

L'étude révèle ainsi plusieurs éléments. La dégradation de l'additif consiste en deux mécanismes. La biodégradation, phénomène à long terme, et la dégradation physique associée à la perte progressive de stabilité de la mousse. Ce dernier mécanisme est l'élément moteur des modifications des propriétés hydromécaniques du sol traité. L'effet reste cependant manifeste à court terme, et le sol recouvre ses propriétés mécaniques initiales. Par contre, l'effet des additifs sur les propriétés hydrauliques et visqueuses persiste sur une durée plus grande et semble piloté par la présence du tensio-actif sous

forme liquide. Le mécanisme de biodégradation participe alors au recouvrement partiel de ces dernières propriétés.

## Remerciements

Les auteurs remercient l'Université de Lyon pour son soutien financier via le programme « Investissement d'Avenir » ANR-11-IDEX-0007 et la société CONDAT pour la mise à disposition du tensio-actif CLB F5TM.

## 5. Références bibliographiques

- Houlsby G. and Psomas S. (2001). Soil conditioning for pipejacking and tunnelling: properties of sand/foam mixtures. In Proc. *Underground construction, 1. International exhibition & symposium. London Docklands, UK*, pp. 128–138.
- Milligan G. (2000). Lubrication and soil conditioning in tunnelling, pipejacking and microtunneling. A state of the art review. *Technical report*, Geotechnical-consulting group, 46 pages.
- Peila D., Picchio A., (2011). Influence of chemical additives used in EPB tunneling and its management. *Int. Congress on Mechanized methods vs. conventional methods of tunnel construction, Warsaw*, pp. 50-72.
- Peila D., Oggeri C. and Borio L. (2009). Using the slump test to assess the behavior of conditioned soil for EPB tunneling. *Environmental & Engineering Geoscience, vol. XV (3)*, pp. 167-174.
- Pena Duarte M.A. (2007). Foam as a soil conditioner in tunnelling : physical and mechanical properties of conditioned sands. PhD University of Oxford, 339 pages.
- Picchio A., Martinelli D., Dal Negro E., Peila D., (2015). Laboratory tests on soil conditioning of clayey soil. *Acta Geotechnica, First online: 30 september 2015*, pp. 1–14.
- Plötze M., Zumsteg R., Puzrin A., (2013). Effects of dispersing foams and polymers on the mechanical behavior of clay pastes. *Géotechnique, 63(11)*, pp. 920–933.
- Psomas, S., Houlsby G.T. (2002). Soil conditioning for EPBM tunnelling: compressibility behaviour of foam/sand mixtures. In *3rd International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Toulouse*, pp. 215-220.
- Psomas S. (2001). Properties of foam/sand mixtures for tunnelling applications. M.S. thesis, University of Oxford, Oxford, U.K., 150 pages.