

Impact du traitement au ciment d'un sable sur les paramètres pressiométriques

Alice Wassermann¹, Adel Abdallah¹, Olivier Cuisinier¹

¹ Université de Lorraine - LEMTA, UMR 7563 CNRS, 54500 Vandœuvre-lès-Nancy, France,

RESUME Le traitement des sols en place est une solution écologique, économique et très efficace face à un large éventail de problèmes géotechniques. Alors que les effets des traitements du sol sont maintenant bien connus à l'échelle du laboratoire, il est aussi nécessaire de connaître le comportement des sols traités sur des sols en place afin de pouvoir intégrer le comportement des sols traités dans le dimensionnement géotechnique des ouvrages. L'objectif de l'étude est d'apporter une synthèse des paramètres pressiométriques obtenus sur des modèles réduits de massifs de sable traité par une gamme de dosage en ciment allant de 0,5 à 4%. Les résultats ont permis de montrer que les paramètres pressiométriques sont très sensibles au traitement des sols notamment le module pressiométrique dont la valeur augmente d'environ 80 fois entre un sable non traité et un sable traité à 4% de ciment. Une approche multi-échelle visera par la suite à relier les résultats obtenus sur ces modèles réduits avec des résultats d'essais en laboratoires mais aussi des essais pressiométriques *in situ*.

Mots-clefs Mécanique des Sols, Géotechnique, Traitement des Sols, Durabilité, Essais pressiométriques

I. INTRODUCTION

Le traitement des sols à la chaux ou au ciment est une technique très répandue dans de nombreux domaines liés à la géotechnique (ouvrages routiers et ferroviaires, hydrauliques, fondations, agent stabilisant pour les matériaux contaminés etc.) dont les effets principaux sont bien caractérisés de nos jours (Bell, 1996). Le traitement d'un sol a pour but d'améliorer des caractéristiques mécaniques trop faibles par rapport aux exigences d'un projet donné et est donc adaptable selon les objectifs visés. Un enjeu majeur actuel est de pouvoir prendre en compte le comportement des sols traités dans le dimensionnement des ouvrages en terre de manière explicite, ce qui n'est fait que partiellement et de manière empirique. L'objectif de cette étude étant de pouvoir intégrer le comportement des sols traités dans le dimensionnement géotechnique des ouvrages, une approche multi-échelle est nécessaire afin de caractériser le comportement des sols traités aussi bien à l'échelle du laboratoire, pour identifier des lois de comportement comme par exemple, Robin et al. (2015), tant qu'à l'échelle *in situ* pour vérifier les propriétés des sols en place. Il n'existe que très peu de références bibliographiques faisant état du comportement des sols traités à l'échelle de l'ouvrage (Herrier et al. 2013) et il n'existe pas d'articles s'intéressant à la recherche de liens entre ces différentes échelles. Dans le cadre de cet article, seule la caractérisation *in situ* sera étudiée sur des massifs de sols simulant des modèles réduits d'ouvrages.

Afin de caractériser les sols traités sur des modèles réduits, des essais mini-pressiométriques seront réalisés. L'essai pressiométrique est l'un des outils principaux de la reconnaissance géotechnique en France et est un moyen très pratique pour faire le lien avec des lois de comportement grâce au module pressiométrique ; c'est pourquoi cette étude s'intéressera à déterminer l'impact du traitement sur les paramètres pressiométriques afin de pouvoir *in fine* caractériser le comportement des sols traités dans une gamme de degrés de cimentation choisie.

II. ESSAIS MINI-PRESSIOMETRIQUES SUR DES MODELES REDUITS

A. Préparation des massifs de sol

Les massifs de sol mesurent 60 cm de haut et ont un diamètre de 60 cm. Ils sont préparés dans des cuves avec un sable de catégorie B1 selon la classification GTR et un ciment soit de type CEM I 52,5N (au moins 95% de clinker et au plus 5% de constituants secondaires) soit CEM II 32,5R (au moins 65% de clinker et au plus 35% de constituants secondaires). La confection des massifs se fait en 6 couches de sable traité à un dosage donné, de 10 cm d'épaisseur. Les couches sont compactées grâce à un fouloir à air comprimé, à une teneur en eau ($w=7\%$) et une densité ($d=1,7$) identiques. Immédiatement après remplissage, les pré-forages servant pour les essais pressiométriques sont réalisés selon le modèle proposé par Eslami (2015) (figure 1.a). Ce modèle permet de minimiser les effets de bord mais aussi d'empêcher toute interaction éventuelle entre les essais pressiométriques ; il est donc possible avec ce modèle de faire 6 essais par massif de sol. L'homogénéité est vérifiée par des prélèvements lors du forage dans chacune des six couches mises en place pour faire des mesures des densités et de teneur en eau (figure 1.b). De plus, l'uniformité du compactage est contrôlée grâce à un pénétromètre dynamique léger (PANDA). Le temps de cure a été fixé à 14 jours car les essais de prise sur les ciments ont montré qu'ils atteignent 97% de leurs résistances maximales au bout de 7 jours.

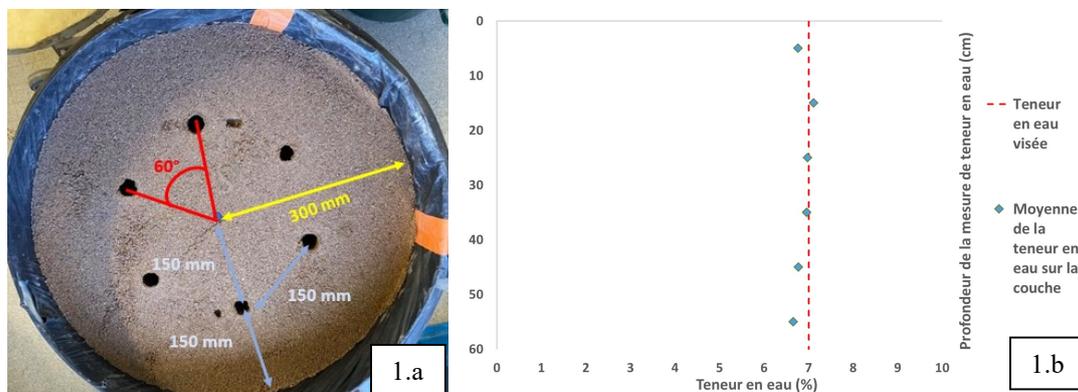


FIGURE 1.a Modèle de répartition des essais pressiométriques selon Eslami (2015) et **1.b** Exemple de courbe de répartition de la teneur en eau en fonction de la profondeur sur un massif traité à 4% de CEM I

B. Principe de l'essai pressiométrique

Le pressiomètre Ménard est couramment utilisé pour concevoir des fondations peu profondes et profondes, ainsi que pour évaluer les tassements de sol. C'est un essai de chargement in situ qui consiste au gonflement dans le sol d'une sonde dilatable radialement. Il permet donc de définir une courbe de déformations volumétriques du sol en fonction de la contrainte appliquée. La

sonde utilisée dans cette étude est une sonde mini-pressiométrique de longueur utile de 30,5 cm et de diamètre égal à 20 mm.

Les essais pressiométriques permettent d'obtenir trois caractéristiques principales : E_M , le module pressiométrique qui caractérise le comportement pseudo-élastique d'un sol, p_l , la pression limite qui définit la résistance d'un sol, et p_f , la pression de fluage qui est la limite entre le comportement pseudo-élastique et la phase plastique d'un sol. Cet essai fournit à la fois un critère de rupture et un critère de déformabilité du sol.

C. Résultats des essais pressiométriques sur les massifs de sable traité

Afin d'observer au mieux le comportement du sol à divers degrés de cimentation, 6 massifs de sable traités au CEM I ou CEM II à 5 dosages de ciment différents ont été mis en place : un massif non traité, un traité à 0,5% de CEM I, un à 2% et un à 4%, 2 autres massifs ont été traité au CEM II à des dosages de 2% et 6%. Les courbes pressiométriques ont été obtenues suivant la norme NF EN ISO 224746-4 (figures 2.a et 2b.) La répétabilité des essais a été vérifiée pour chaque massif et est illustrée par 2 courbes montrant des résultats d'essais sur des massifs traités à 6% de CEM II.

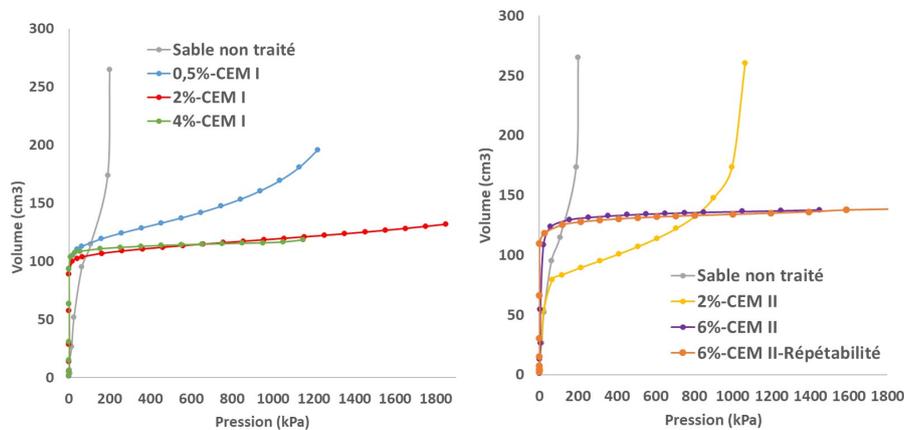


FIGURE 2. Impact du type de traitement et du dosage sur la courbe pressiométrique obtenue sur des massifs de sable traité à différents dosages en ciment après 14 jours de cure **a.** Traitement au CEM I **b.** Traitement au CEM II

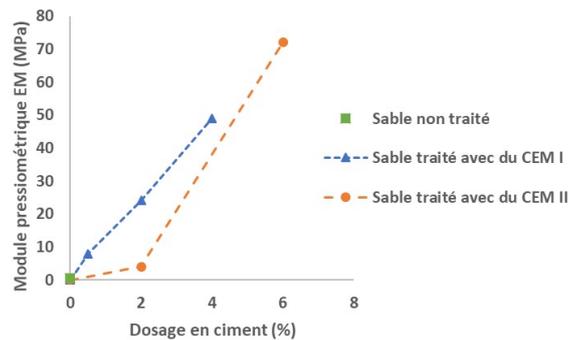


FIGURE 3. Impact du type de traitement et du dosage sur le module pressiométrique calculé sur des massifs de sable traité au CEM I et CEM II après 14 jours de cure

Le module pressiométrique augmente fortement avec l'augmentation du dosage en ciment (figure 3). En effet, avec le CEM I, E_M triple lorsque l'on passe de 0,5% à 2% et double lorsque l'on passe de 2% à 4%. On note aussi une nette augmentation du module pressiométrique avec le traitement

au CEM II. A dosages égaux, le module pressiométrique est 6 fois plus élevé avec le CEM I qu'avec le CEM II.

Des observations similaires ont été faites pour les pressions limite et de fluage. Du fait des caractéristiques propres de la membrane mais aussi des capacités de la sonde, en utilisant un CEM I il n'est pas possible d'arriver à l'état de plastification du sol pour des dosages en ciment supérieurs à 2% et 6% pour le CEM II. Quand il a été possible de les déterminer, elles sont 5 fois plus élevées dans les massifs traités à 0,5% de CEM I comparé au sable vierge. Le CEM I confère une résistance accrue au sable, un traitement de 0,5% donne une pression limite de 1220 kPa et une pression de fluage de 930 kPa alors que pour 2% de CEM II sur le même sable la pression limite est de 1100 kPa et la pression de fluage 815 kPa.

III. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'objectif de l'étude est de caractériser le comportement des sols traités grâce à une approche multi-échelle. Dans ce cadre, cet article se focalise sur la caractérisation de ce comportement via des modèles réduits.

Ces premiers résultats montrent une grande sensibilité des paramètres pressiométriques au traitement au ciment du sable. L'augmentation du dosage entraîne une augmentation des paramètres pressiométriques et notamment du module pressiométrique. Les modèles réduits réalisés avec du CEM I présentent également des modules pressiométriques jusqu'à 6 fois plus élevés que ceux traités au CEM II pour des dosages égaux. Des tendances similaires sont observées pour les pressions limites et de fluage, elles augmentent avec l'augmentation du dosage et sont plus élevées avec un traitement au CEM I qu'avec un traitement au CEM II. Utiliser du CEM I permet donc d'ajouter moins de ciment au sol pour des performances comparables obtenues à des quantités 4 fois plus importantes de CEM II.

La réalisation d'essais complémentaires permettra de préciser le comportement mécanique du sable pour un traitement au CEM I inférieur à 0,5% (figure 2.a.). Pour la suite de la campagne expérimentale, des essais pressiométriques en conditions saturées sous chargements statiques et cycliques seront réalisés.

REFERENCES

Bell, F.G., 1996. Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering Geology* 42, 223–237. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(96\)00028-2](https://doi.org/10.1016/0013-7952(96)00028-2)

Eslami, H., 2014. Comportement thermo-hydrromécanique des sols au voisinage des géostructures énergétiques. [Thèse de doctorat – Université de Lorraine], 245 p.

Herrier, G., Puiatti, D., Chevalier, C., Froumentin, M., Bonelli, S., Fry, J.-J., 2013. Lime Treatment: New Perspectives for the use of Silty and Clayey Soils in Earthen Hydraulic Structures. *Wasserwirtschaft* 103, 112–115. <https://doi.org/10.1365/s35147-013-0546-4>

NF EN ISO 22476-4. Mai 2015. Reconnaissance et essais géotechniques — Essais en place — Partie 4 : Essai au pressiomètre Ménard

Robin, V., Javadi, A.A., Cuisinier, O., Masrouri, F., 2015. An effective constitutive model for lime treated soils. *Computers and Geotechnics* 66, 189–202. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2015.01.010>