

Propriétés mécaniques et physiques de bétons de sol issus de chantier et comparaison avec une étude de laboratoire

J.J. HESSOUH¹, J. ESLAMI¹, A.-L. BEAUCOUR¹, A. NOUMOWE¹, P. GOTTELAND², F. MATHIEU³

¹ Laboratoire de Mécaniques et Matériaux du génie civil (L2MGC), Université de Cergy-Pontoise (site de Neuville), 5 mail Gay-Lussac, 95031 Neuville-sur-Oise, France. *Correspondance : jacques-julius.hessouh@u-cergy.fr

² Fédération Nationale des Travaux Public, 3 rue de Berri, 75008 Paris, France

³ Soletanche Bachy, 280 avenue Napoléon Bonaparte, CS60002 92506 Rueil Malmaison Cedex, France

RÉSUMÉ. Le béton de sol est un mélange de sol, de ciment et d'eau. C'est le mélange résultant des opérations de chantier tels que le Soil Mixing et le Jet Grouting qui sont des techniques de traitement et d'amélioration de sol. Une utilisation structurelle de ce matériau implique la recherche d'un moyen d'étude en laboratoire qui permettra d'estimer les performances du matériau sur chantier. Cette étude vise ainsi à déterminer les relations entre les résultats obtenus sur les matériaux de chantier et les résultats obtenus lorsqu'on réalise le matériau en laboratoire. Pour cela, nous avons étudié des colonnes de béton de sol réalisées sur un chantier de Soil Mixing. Sur ce chantier, nous avons également prélevé du sol en place pour fabriquer des échantillons de béton de sol. Nous avons étudié en laboratoire l'influence du dosage en ciment et du type de sol sur les propriétés mécanique et physique des bétons de sol. Ces différents résultats permettent de comparer les propriétés d'un matériau réalisé sur chantier avec celui réalisé en laboratoire.

ABSTRACT. Soil concrete is a mix of soil, cement and water. It is the result of Deep Soil Mixing or Jet Grouting operations, which are ground treatment and improvement techniques. To use this material for structural elements, we need to search a best way to study material in laboratory, which will allow an evaluation of properties of these materials. The aim of this study is to find a link between laboratory and construction site results. We have studied cores drilled into Deep Soil Mixing columns. In addition, in laboratory, soil cement material specimens were manufactured with two different site soils. The influence of cement dosage and type of soil on the physical and mechanical properties of the soil-mix material was analysed. These results allow comparing physical and mechanical properties of soil mix material made in construction site or in laboratory conditions.

MOTS-CLÉS: Soil Mixing, béton de sol, Jet Grouting, ciment, dosage, sol, résistance en compression, perméabilité

KEY WORDS: Soil Mixing, soil concrete, Jet Grouting, cement, dosage, soil, compressive strength, permeability

1. Introduction

Le Soil Mixing est une technique de traitement de sol qui se fait par voie sèche ou par voie humide. Il est défini comme le malaxage mécanique d'un sol en place avec un liant hydraulique directement in-situ. Le but des travaux actuels est d'identifier les propriétés mécaniques et physiques d'échantillons carottés sur des colonnes de béton de sol réalisés lors d'un chantier. La variation des propriétés en fonction de la localisation de l'échantillonnage dans les colonnes est discutée. Parallèlement des échantillons de béton de sol sont réalisés en laboratoire avec différents dosages en ciment et les deux types de sol rencontrés sur le chantier. L'ensemble de ces résultats est aussi comparé à ceux obtenus par O. Helson à partir de matériaux modèles. Ce travail expérimental de recherche est porté par la Fédération Nationale des Travaux Publics (FNTP) et Soletanche Bachy via la Fondation de l'université de Cergy Pontoise.

2. Matériaux et démarches

2.1. Les colonnes issues de chantier

Le chantier sur lequel porte cette étude est situé à Esbly dans le 77 à environ 50 km au nord Est de Paris. Sur ce chantier, des colonnes de DSM sécantes ont été utilisées pour réaliser une paroi étanche provisoire permettant de protéger l'excavation de la fouille pour la réalisation du sous-sol du bâtiment. Les colonnes réalisées ont un diamètre de 80 cm et leurs hauteurs varient entre 2,5 m et 3,5 m. Le dosage en ciment prévu pour ces colonnes est de 150kg/m³ de sol en place, soit 125 kg/m³ de béton réalisé. Le rapport E/C est de 1 pour le coulis injecté dans le sol. Le Ciment utilisé est du CEM III C 32,5N. Deux colonnes supplémentaires ont été réalisées et excavées après 21 jours et conservées dans l'eau jusqu'à la date des essais, soit 180 jours après la fabrication. La figure 1-a) présente les colonnes après excavation. Elles ont été découpées en tronçons de 25 cm d'épaisseur puis sciées en quart de cylindre. Dans ces quarts de cylindre ont été réalisées des carottes de 5 et 10 cm de diamètre avec un élanement de 2. Environ 230 échantillons de diamètre 10 cm et 130 échantillons de diamètre 5 cm ont été obtenus. L'échantillonnage des colonnes a été effectué selon la hauteur de la colonne et selon son rayon. Pour une même hauteur trois zones différentes sont alors identifiées pour réaliser une analyse spatiale des résultats (La figure 1-b)

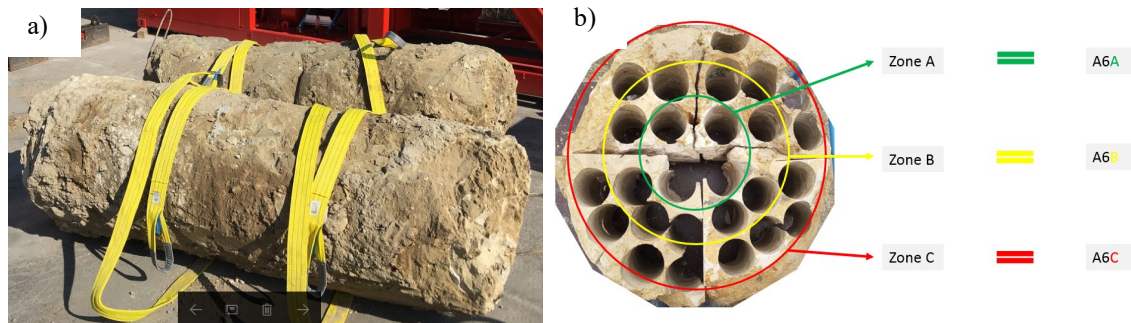


Figure 1 : a) Colonnes excavées ; b) Echantillonnage effectué.

2.2. La confection de béton de sol en laboratoire avec du sol issu du chantier

En parallèle, les sols utilisés pour la confection de béton de sol en laboratoire ont été prélevés sur le même chantier à des profondeurs de 1, 2 et 3m. L'étude de sol à partir des limites d'Atterberg et de la valeur au bleu ont permis de classer le sol à 1m comme un sol sablo-argileux peu plastique et les sols à 2 et 3 m comme des sols limoneux à plasticité moyenne. Le ciment utilisé dans cette étude est le même que celui utilisé sur le chantier. Les sols de 1 et 3 m ont été utilisés pour réaliser des matériaux avec une teneur en eau totale constante du mélange de 50%. Les formulations réalisées avec le sol de 1m sont notées S1 et celles avec le sol de 3m sont notées S3. L'étude compte au total huit formulations S1C100, S1C150, S1C200, S3C100, S3C150, S3C200, S3C250, S3C300. C100 signifie 100 kg de ciment par mètre cube de béton de sol. Pour chaque formulation réalisée, le sol est préalablement saturé. Ensuite la teneur en eau du sol est mesurée et permet de calculer la quantité d'eau d'ajout nécessaire à l'obtention de la teneur en eau cible. Le matériau est mis en place dans des éprouvettes de diamètre 6 cm et de hauteur 12 cm. Le diamètre maximal des grains de sol est de 1,2cm. La mise en place a été

faite par piquage de 15 coups par couche en 3 couches. La cure a été réalisée sous l'eau comme pour les colonnes.

3. Résultats

3.1. Caractérisation physique

La porosité du béton de sol dans cette étude est déterminée avec une saturation naturelle de l'échantillon. Elle représente donc l'ensemble des pores accessibles de façon naturelle par l'eau à un âge donné de maturité. Sur 40 quarts de cylindre d'épaisseur 5 cm et de diamètre 20 cm prélevés sur l'ensemble des deux colonnes, la porosité varie entre 50% et 65% et la masse volumique entre 1550 et 1780 kg/m³. La porosité diminue avec l'augmentation de la masse volumique. Pour les échantillons réalisés en laboratoire, la porosité des mélanges S1 est plus faible que celles des mélanges S3 et la porosité diminue lorsque le dosage en ciment augmente figure 2-a). La perméabilité à l'eau varie comme la porosité pour les formulations de laboratoire avec du sol de chantier. La figure 2-b) présente cette variation. On remarque que la colonne II est plus perméable que la colonne I. Les valeurs de perméabilité et la porosité sont légèrement plus élevées dans le cas des échantillons de chantier

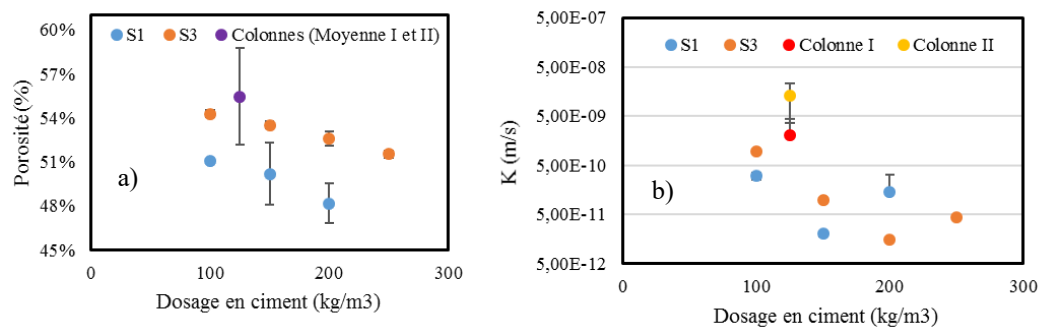


Figure 2 : a) Variation de la porosité ; b) variation de la perméabilité ; en fonction du dosage en ciment.

3.2. Caractérisations mécaniques

La figure 3 présente la variation de la résistance en compression des échantillons en fonction de leurs positions dans les colonnes. Les résultats obtenus pour la colonne I sont plus hétérogènes que ceux de la colonne II. La colonne II a été réalisée dans un sol type S1 (peu plastique) et le malaxage devait être plus aisé que pour la colonne I réalisée dans des sols plus plastiques. Les résistances en compression des deux colonnes diminuent légèrement avec la profondeur. Les résistances moyennes des deux colonnes sont proches, 2,42 et 2,35 MPa pour les colonnes I et II respectivement.

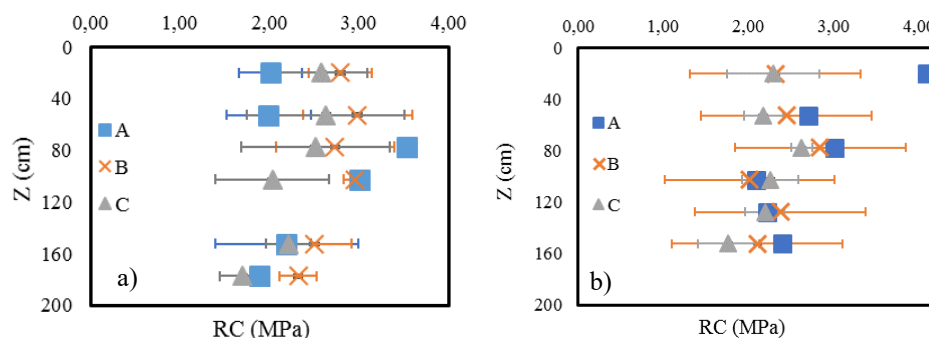


Figure 3 : Variation de la résistance en compression en fonction de la position a) Colonne I ; b) colonne II.

L'évolution de la résistance en compression suivant le dosage en ciment est linéaire pour les formulations réalisées en laboratoire quel que soit le type de sol. Les ondes P quant à elles évoluent de façon logarithmique suivant l'augmentation du dosage. Mais les vitesses mesurées pour les formulations S1 sont plus élevées ce qui est cohérent avec les résultats de porosité. Les valeurs moyennes de résistance en compression sur chantier représentent environ 60 % des valeurs obtenues en laboratoire.

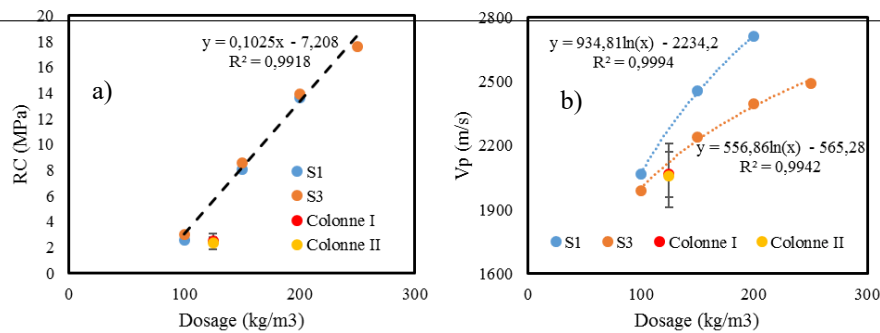


Figure 4 : Variation des propriétés mécaniques mesurées à 180 jours en fonction du dosage en ciment a) RC ; b) Vp

4. Comparaison entre les propriétés du béton de sol issu du chantier celles réalisé en laboratoire

La figure 6-a) exprime la porosité en fonction de la masse volumique. Se basant sur des investigations menées en Belgique sur des échantillons provenant de 38 sites de construction différents de Deep Soil Mixing [DEN 12] et les siennes, O. Helson [HEL 17] a proposé des relations entre la masse volumique humide et sèche et la porosité. Nos résultats suivent très bien ces tendances. Cette relation entre la porosité et les masses volumiques sèche et humide n'est pas donc pas affectée par le type de sol et les conditions de réalisation. La figure 6-b) présente l'évolution de la résistance en compression en fonction de la masse volumique. Les investigations de O. Helson [HEL 17] ont permis de faire une estimation par bornes supérieure et inférieure de cette évolution. Les échantillons de laboratoire sont sur la limite supérieure et les échantillons de chantier sur la limite inférieure.

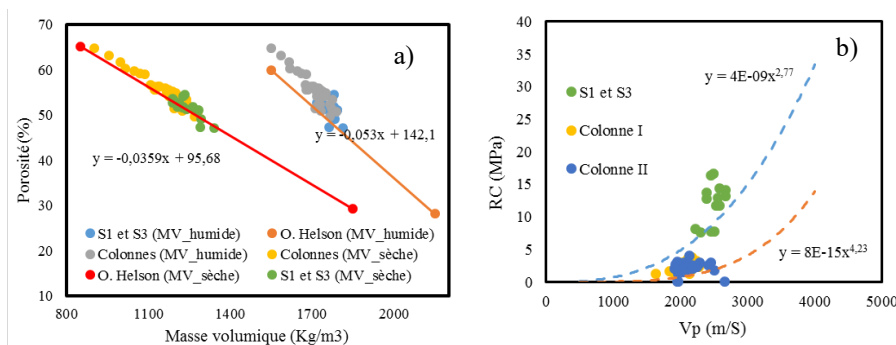


Figure 5 : Comparaison entre le laboratoire et le chantier : a) $\eta = f(MV)$; b) $RC = f(Vp)$

5. Conclusion

Les résultats montrent que les propriétés physiques des matériaux de chantier et de laboratoire sont proches avec une porosité de 5 à 10% plus élevée pour le chantier. Les valeurs de perméabilité sur chantier sont 10 fois plus élevée qu'en laboratoire, ce qui pour un tel matériau est une variation relativement acceptable. En ce qui concerne les propriétés mécaniques, on constate une chute de 60% en compression simple pour les matériaux de chantier par rapport aux échantillons de laboratoire. Cette différence est beaucoup moins importante pour les valeurs de vitesse d'onde. L'hétérogénéité du mélange sur chantier a un effet plus défavorable sur les résistances que sur les vitesses d'onde. Les relations établies par les travaux d'O. Helson sur des matériaux modèles semblent aussi convenir aux résultats obtenus sur chantier.

6. Bibliographie

- [HEL 17] HELSON O., « Comportement thermo-hydro-mécanique et durabilité des bétons de sol : influence des paramètres de formulation et conditions d'exposition », *Rapport de thèse*, décembre 2017, Université de Cergy-Pontoise.
- [DEN 12] DENIES N., « SOIL MIX WALLS as retaining structures – mechanical characterization », ISSMGE - TC 211 International Symposium on Ground Improvement IS-GI Brussels IS-GI Brussels 31 May & June 2012, p. 83-98.